

В.Г. Гусев

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

Томский государственный университет

Поступила в редакцию 22.11.2006 г.

Анализируется чувствительность спекл-интерферометра к поперечным или продольным перемещениям диффузно рассеивающей свет плоской поверхности, когда на стадии записи двухэкспозиционной спеклограммы используется положительная 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 положительной линзы квази-Фурье и Фурье-голограмм 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 наклоном. Это обстоятельство приводит на стадии восстановления записи к локализации интерференционных картин в двух плоскостях: в плоскости голограммы и в Фурье-плоскости. Причем имеет место разная чувствительность интерферометра к поперечному перемещению рассеивателя в плоскостях локализации интерференционных картин при выполнении пространственной фильтрации дифракционного поля.

В случае контроля продольного перемещения диффузно рассеивающей свет плоской поверхности 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) рассеивателя. 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 плоскости голограммы и в Фурье-плоскости. Причем имеет место разная чувствительность интерферометра к продольному перемещению рассеивателя в плоскостях локализации интерференционных картин при выполнении пространственной фильтрации дифракционного поля. В связи с вы-

шеуказанным возникает необходимость выявить особенности корреляции распределений интенсивности света, рассеянного поверхностью в начальном и перемещенном положениях рассеивателя, на основе полученных в [1] распределений комплексных амплитуд полей в плоскости фотопластинки.

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

Согласно рис. 1 матовый экран 1, находящийся в плоскости  $(x_1, y_1)$ , освещается когерентным излучением с расходящейся сферической волной радиусом кривизны  $R$ . Диффузно рассеянное им излучение после прохождения тонкой положительной линзы  $L$  с фокусным расстоянием  $f$  регистрируется на фотопластинке 2, находящейся в плоскости  $(x_3, y_3)$  за время первой экспозиции. Перед повторным экспонированием в случае контроля поперечного перемещения осуществляется смещение матового экрана в плоскости его расположения, например в направлении оси  $x$  на величину  $a$ .

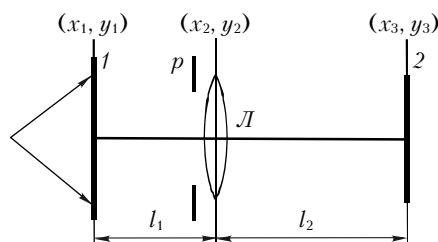


Рис. 1. Схема двухэкспозиционной записи спеклограммы: 1 — матовый экран; 2 — фотопластинка;  $L$  — положительная линза;  $p$  — апертурная диафрагма

С учетом дифракционной ограниченности на основании [1] распределения комплексных амплитуд полей, соответствующих первой и второй экспозициям, в плоскости фотопластинки в приближении Френеля принимают вид

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

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

где  $\otimes$  – символ операции свертки;  $k$  – волновое число;  $l_1, l_2$  – 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 положительной линзы  $L$ ;  $L_p$  – геометрический параметр оптической системы, удовлетворяющий условию  $1/L_p = 1/l_1 - 1/f + 1/l_2 > 0$ , т.е.  $f > l_1 l_2 / (l_1 + l_2)$  (причем  $L_p < \infty$ , так как условие  $L_p = \infty$  соответствует формированию в плоскости фотопластинки действительного изображения рассеивателя);  $1/l = 1/R + 1/l_1 - L_p/l_1^2$  – введенное обозначение для сокращения записи;  $F(x_3, y_3)$  – Фурье-образ функции  $t(x_1, y_1)$ , которая характеризует комплексную амплитуду пропускания матового экрана и является случайной функцией координат, с пространственными частотами  $L_p x_3 / \lambda l_1 l_2, L_p y_3 / \lambda l_1 l_2$ ,  $\lambda$  – длина волны когерентного источника света, используемого для записи и воспроизведения спеклограммы;  $\tilde{P}(x_3, y_3)$  – Фурье-образ функции  $p(x_2, y_2)$  зрачка [2] положительной линзы  $L$  с пространственными частотами  $x_3 / \lambda l_2, y_3 / \lambda l_2$ ;  $r$  – радиус кривизны сферической волны, величина и знак которого приведены в [1], однако в случае квадратичной регистрации поля в плоскости  $(x_3, y_3)$  экспоненциальный множитель  $\exp[ik(x_3^2 + y_3^2)/2r]$  не имеет существенного значения.

Из (1), (2) следует, что для  $\exp[-iklL_p^2(x_3^2 + y_3^2)/2l_1^2l_2^2] \neq \delta(x_3, y_3)$  ( $\delta(x_3, y_3)$  – дельта-функция Дирака) в плоскости фотопластинки формируется квази-Фурье образ функции  $t(x_1, y_1)$ , каждая точка которого в пределах диаметра  $D \leq dl_2/L_p$  [3], где  $d$  – диаметр зрачка положительной линзы  $L$ , уширена до размера субъективного спекла, определяемого шириной функции  $P(x_3, y_3)$ , когда диаметр  $D_0$  освещенной области матового экрана удовлетворяет условию  $D_0 \geq dl_1/L_p$ , которое необходимо для пространственной ограниченности рассеянного поля. Кроме того, согласно (2) по сравнению с распределением комплексной амплитуды поля в (1) имеют место как однородное смещение субъективных спек-

лов на величину  $al_1 l_2 / l L_p$ , так и их наклон на угол  $aL_p / l_1 l_2$ .

При условии выполнения двухэкспозиционной записи спеклограммы на линейном участке кривой почернения фотоматериала распределение комплексной амплитуды ее пропускания определяется выражением

$$\tau(x_3, y_3) \sim \left\{ F(x_3, y_3) \otimes \exp\left[-\frac{iklL_p^2}{2l_1^2l_2^2}(x_3^2 + y_3^2)\right] \otimes P(x_3, y_3) \right\} \{k.c.\} + \left\{ F(x_3, y_3) \otimes \exp\left[-\frac{iklL_p^2}{2l_1^2l_2^2}(x_3^2 + y_3^2)\right] \otimes \exp\left(-\frac{ikL_p a x_3}{l l_2}\right) P\left(x_3 + \frac{l l_2}{L_p} a, y_3\right) \right\} \{k.c.\}, \quad (3)$$

где  $k.c.$  – обозначение комплексно-сопряженной величины.

Как и в [1], учтем частный случай ( $l_2 = f$ ), который имеет характерные особенности в образовании интерференционных картин. Для него распределения комплексных амплитуд полей в плоскости  $(x_3, y_3)$ , соответствующих первой и второй экспозициям, и распределение комплексной амплитуды пропускания двухэкспозиционной спеклограммы принимают вид

$$\tilde{u}_1(x_3, y_3) \sim \exp\left[\frac{ik}{2\tilde{r}}(x_3^2 + y_3^2)\right] \times \left\{ \tilde{F}(x_3, y_3) \otimes \exp\left[-\frac{ikR}{2f^2}(x_3^2 + y_3^2)\right] \otimes \tilde{P}(x_3, y_3) \right\}, \quad (4)$$

$$\tilde{u}_2(x_3, y_3) \sim \exp\left[\frac{ik}{2\tilde{r}}(x_3^2 + y_3^2)\right] \exp\left(-\frac{ika^2}{2R}\right) \times \exp\left(\frac{ikax_3}{f}\right) \left\{ \tilde{F}(x_3, y_3) \otimes \exp\left[-\frac{ikR}{2f^2}(x_3^2 + y_3^2)\right] \otimes \exp\left(-\frac{ikax_3}{f}\right) \tilde{P}\left(x_3 + \frac{f}{R}a, y_3\right) \right\}, \quad (5)$$

$$\tilde{\tau}(x_3, y_3) \sim \left\{ \tilde{F}(x_3, y_3) \otimes \exp\left[-\frac{ikR}{2f^2}(x_3^2 + y_3^2)\right] \otimes \tilde{P}(x_3, y_3) \right\} \{k.c.\} + \left\{ \tilde{F}(x_3, y_3) \otimes \exp\left[-\frac{ikR}{2f^2}(x_3^2 + y_3^2)\right] \otimes \exp\left(-\frac{ikax_3}{f}\right) \tilde{P}\left(x_3 + \frac{f}{R}a, y_3\right) \right\} \{k.c.\}, \quad (6)$$

где  $\tilde{F}(x_3, y_3), \tilde{P}(x_3, y_3)$  – Фурье-образы соответственно функций  $t(x_1, y_1), p(x_2, y_2)$  с пространственными частотами  $x_3 / \lambda f, y_3 / \lambda f$ .

Из (4), (5) следует, что когда  $R \neq \infty$ , то в плоскости фотопластинки в пределах диаметра  $\tilde{D} \leq d$

формируется квази-Фурье-образ функции  $t(x_1, y_1)$ , каждая точка которого при условии освещения матового экрана когерентным излучением диаметра  $\tilde{D}_0 \geq d$  уширена до размера субъективного спекла, определяемого шириной функции  $\tilde{P}(x_3, y_3)$ . Кроме того, для субъективных спеклов, соответствующих второй экспозиции, имеют место их однородное смещение на величину  $af/R$  и наклон на угол  $a/f$ .

При воспроизведении двухэкспозиционной спеклограммы, характеризующей поперечное перемещение рассеивателя, когда  $l_2 \neq f$ , на основании [4] согласно [4, рис. 2] распределение комплексной амплитуды поля в Фурье-плоскости  $(x_5, y_5)$ , с помощью подстановки (3) в формулу (4) из [4] и с учетом четности функции  $p(x_2, y_2)$  определяется выражением

$$\begin{aligned} u(x_5, y_5) \sim & \left\{ p\left(\frac{l_2}{f_0}x_5, \frac{l_2}{f_0}y_5\right) t\left(-\frac{hl_2}{L_p f_0}x_5, -\frac{hl_2}{L_p f_0}y_5\right) \times \right. \\ & \times \exp\left[\frac{ikl_1^2 l_2^2}{2lL_p^2 f_0^2}(x_5^2 + y_5^2)\right] \otimes p\left(\frac{l_2}{f_0}x_5, \frac{l_2}{f_0}y_5\right) \times \\ & \times t^*\left(\frac{hl_2}{L_p f_0}x_5, \frac{hl_2}{L_p f_0}y_5\right) \exp\left[-\frac{ikl_1^2 l_2^2}{2lL_p^2 f_0^2}(x_5^2 + y_5^2)\right] + \\ & + p\left(\frac{l_2}{f_0}x_5 + \frac{L_p}{l_1}a, \frac{l_2}{f_0}y_5\right) t\left(-\frac{hl_2}{L_p f_0}x_5, -\frac{hl_2}{L_p f_0}y_5\right) \times \\ & \times \exp\left[\frac{ikl_1^2 l_2^2}{2lL_p^2 f_0^2}(x_5^2 + y_5^2)\right] \exp\left(\frac{ikl_1 l_2}{f_0 l L_p}ax_5\right) \otimes \\ & \otimes p\left(\frac{l_2}{f_0}x_5 - \frac{L_p}{l_1}a, \frac{l_2}{f_0}y_5\right) t^*\left(\frac{hl_2}{L_p f_0}x_5, \frac{hl_2}{L_p f_0}y_5\right) \times \\ & \left. \times \exp\left[-\frac{ikl_1^2 l_2^2}{2lL_p^2 f_0^2}(x_5^2 + y_5^2)\right] \exp\left(\frac{ikl_1 l_2}{f_0 l L_p}ax_5\right) \right\} \otimes \\ & \otimes P_0(x_5, y_5), \end{aligned} \quad (7)$$

где  $f_0$  – фокусное расстояние положительной линзы  $L_0$  [4, рис. 2];  $P_0(x_5, y_5)$  – Фурье-образ функции  $p_0(x_4, y_4)$  зрачка положительной линзы  $L_0$  с пространственными частотами  $x_5/\lambda f_0$ ,  $y_5/\lambda f_0$  (обозначения как в [4]).

Воспользуемся выводами [4], которые заключаются в том, что для малой величины поперечного перемещения рассеивателя, когда величина  $f_0 L_p a / l_1 l_2$  много меньше радиуса зрачка положительной линзы  $L$  (см. рис. 1), т.е. в (7) можно положить  $p(l_2 x_5 / f_0 \pm L_p a / l_1, l_2 y_5 / f_0) \cong p(l_2 x_5 / f_0, l_2 y_5 / f_0)$ , и видность интерференционной картины в Фурье-плоскости будет мало отличаться от единицы. Тогда на основании известного [5] тождества и предположения, что период изменения функции  $1 + \exp(ikl_1 l_2 ax_5 / f_0 l L_p)$  хотя бы на порядок [6] превосходит размер субъективного спекла в плоскости  $(x_5, y_5)$ , распределение освещенности в последней принимает вид

$$I(x_5, y_5) \sim \left[ 1 + \cos\left(\frac{kl_1 l_2 ax_5}{f_0 l L_p}\right) \right] \left| p\left(\frac{l_2}{f_0}x_5, \frac{l_2}{f_0}y_5\right) \right|^2$$

$$\begin{aligned} & \times t\left(-\frac{hl_2}{L_p f_0}x_5, -\frac{hl_2}{L_p f_0}y_5\right) \exp\left[\frac{ikl_1^2 l_2^2}{2lL_p^2 f_0^2}(x_5^2 + y_5^2)\right] \otimes \\ & \otimes p\left(\frac{l_2}{f_0}x_5, \frac{l_2}{f_0}y_5\right) t^*\left(\frac{hl_2}{L_p f_0}x_5, \frac{hl_2}{L_p f_0}y_5\right) \times \\ & \times \exp\left[-\frac{ikl_1^2 l_2^2}{2lL_p^2 f_0^2}(x_5^2 + y_5^2)\right] \otimes P_0(x_5, y_5) \Big|^2. \end{aligned} \quad (8)$$

Из (8) следует, что субъективная спекл-структура в Фурье-плоскости в пределах области, определяемой шириной функции  $p(l_2 x_5 / f_0, l_2 y_5 / f_0) \otimes p(l_2 x_5 / f_0, l_2 y_5 / f_0)$ , промодулирована эквидистантно расположенными на оси  $x$  интерференционными полосами, измерение периода повторения которых обеспечивает возможность определения величины поперечного перемещения диффузно рассеивающей свет плоской поверхности для известных величин  $\lambda$ ,  $l_1$ ,  $l_2$ ,  $l$ ,  $L_p$ ,  $f_0$ . При этом частота спекл-интерференционных полос зависит как от величины, так и знака радиуса кривизны сферической волны когерентного излучения, используемого для освещения рассеивателя на стадии двухэкспозиционной записи спеклограммы.

Если  $l_2 < f$ , то период  $\Delta x'_5 = \lambda f_0 / a(1 - l_2 / f + l_1 l_2 / L_p R)$  спекл-интерференционных полос уменьшается с уменьшением радиуса кривизны расходящегося сферического волнового фронта когерентного излучения, используемого для освещения рассеивателя на стадии записи спеклограммы. Это объясняется увеличением в ней смещения субъективных спеклов, соответствующих второй экспозиции, по отношению к идентичным спеклам первой экспозиции. В свою очередь при освещении рассеивателя когерентным излучением со сходящейся сферической волной период  $\Delta x''_5 = \lambda f_0 / a(1 - l_2 / f - l_1 l_2 / L_p R)$  спекл-интерференционных полос увеличивается с уменьшением радиуса кривизны  $R$  в пределах  $l_1^2 / (l_1 - L_p) \leq R \leq \infty$  вплоть до бесконечности, когда  $R = l_1^2 / (l_1 - L_p)$ , и на стадии записи спеклограммы в плоскости фотопластинки формируется Фурье-образ комплексной амплитуды пропускания (или отражения) диффузно рассеивающей свет плоской поверхности.

При формировании в плоскости спеклограммы Фурье-образа функции  $t(x_1, y_1)$  отсутствует смещение субъективных спеклов, соответствующих второй экспозиции, как и в [7], где формирование Фурье-образа возможно только при освещении рассеивателя когерентным излучением со сходящимся волновым фронтом. Дальнейшее уменьшение величины  $R$  приводит к возникновению и увеличению смещения в плоскости спеклограммы субъективных спеклов, соответствующих второй экспозиции, по отношению к идентичным спеклам первой экспозиции, в результате чего увеличивается частота спекл-интерференционных полос.

В качестве примера на рис. 2 приведена зависимость частоты спекл-интерференционных полос от величины и знака  $R$  для фиксированных величин  $\lambda = 0,6328$  мкм,  $a = 30$  мкм,  $f = 220$  мм,  $l_1 = 350$  мм,  $l_2 = 100$  мм,  $f_0 = 50$  мм.

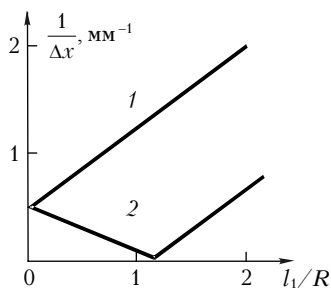


Рис. 2. Зависимость частоты спекл-интерференционных полос от радиуса кривизны: 1 – расходящегося сферического волнового фронта, 2 – сходящегося, в случае использования положительной линзы с фокусным расстоянием  $f = 220$  мм

Если  $l_2 > f$ , то период  $\Delta x'_5 = \lambda f_0 / a(1 - l_2/f - l_1 l_2 / L_p R)$  спекл-интерференционных полос увеличивается с уменьшением радиуса кривизны расходящегося сферического волнового фронта когерентного излучения, используемого для освещения рассеивателя на стадии записи спеклограммы, в пределах  $l_1^2 / (l_1 - L_p) \leq R \leq \infty$  вплоть до бесконечности, когда  $R = l_1^2 / (L_p - l_1)$ .

Выполнение условия  $R = l_1^2 / (L_p - l_1)$  соответствует формированию в плоскости спеклограммы Фурье-образа функции  $t(x_1, y_1)$  и отсутствию в ней смещения субъективных спеклов второй экспозиции по отношению к идентичным спеклам первой экспозиции. Дальнейшее уменьшение величины  $R$  приводит к возникновению и увеличению смещения в плоскости спеклограммы субъективных спеклов, соответствующих второй экспозиции, в результате чего увеличивается частота спекл-интерференционных полос. В свою очередь при освещении рассеивателя на стадии двухэкспозиционной записи спеклограммы когерентным излучением со сходящейся сферической волной с уменьшением  $R$  уменьшается период  $\Delta x''_5 = \lambda f_0 / a(1 - l_2/f + l_1 l_2 / L_p R)$  спекл-интерференционных полос, что связано с увеличением смещения в плоскости спеклограммы субъективных спеклов второй экспозиции.

На рис. 3 приведена зависимость частоты спекл-интерференционных полос от величины и знака  $R$  для фиксированных величин  $\lambda = 0,6328$  мкм,  $a = 30$  мкм,  $f = 170$  мкм,  $l_1 = 180$  мм,  $l_2 = 300$  мм,  $f_0 = 50$  мм.

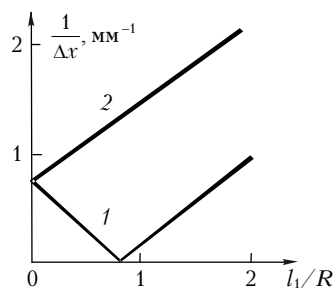


Рис. 3. Зависимость частоты спекл-интерференционных полос от радиуса кривизны: 1 – расходящегося сферического волнового фронта, 2 – сходящегося, в случае использования положительной линзы с фокусным расстоянием  $f = 170$  мм

В частном случае, когда  $l_2 = f$ , при воспроизведении двухэкспозиционной спеклограммы, характеризующей поперечное перемещение диффузно рассеивающей свет плоской поверхности, с учетом подстановки (6) в формулу (4) из [4] распределение комплексной амплитуды поля в Фурье-плоскости  $(x_5, y_5)$  определяется выражением

$$\begin{aligned} \tilde{u}(x_5, y_5) \sim & \left\{ p\left(\frac{f}{f_0}x_5, \frac{f}{f_0}y_5\right) t\left(-\frac{f}{f_0}x_5, -\frac{f}{f_0}y_5\right) \times \right. \\ & \times \exp\left[\frac{ik}{2R}(x_5^2 + y_5^2)\right] \otimes p\left(\frac{f}{f_0}x_5, \frac{f}{f_0}y_5\right) t^*\left(-\frac{f}{f_0}x_5, -\frac{f}{f_0}y_5\right) \times \\ & \times \exp\left[-\frac{ik}{2R}(x_5^2 + y_5^2)\right] + p\left(\frac{f}{f_0}x_5 + a, \frac{f}{f_0}y_5\right) \times \\ & \times t\left(-\frac{f}{f_0}x_5, -\frac{f}{f_0}y_5\right) \exp\left[\frac{ik}{2R}(x_5^2 + y_5^2)\right] \exp\left(\frac{ikf a x_5}{f_0 R}\right) \otimes \\ & \otimes p\left(\frac{f}{f_0}x_5 - a, \frac{f}{f_0}y_5\right) t^*\left(\frac{f}{f_0}x_5, \frac{f}{f_0}y_5\right) \exp\left[-\frac{ik}{2R}(x_5^2 + y_5^2)\right] \times \\ & \left. \times \exp\left(\frac{ikf a x_5}{f_0 R}\right) \right\} \otimes P_0(x_5, y_5), \quad (9) \end{aligned}$$

на основании которого распределение освещенности в ней принимает вид

$$\begin{aligned} \tilde{I}(x_5, y_5) \sim & \left[ 1 + \cos\left(\frac{kf}{f_0 R} a x_5\right) \right] \left| p\left(\frac{f}{f_0}x_5, \frac{f}{f_0}y_5\right) \times \right. \\ & \times t\left(-\frac{f}{f_0}x_5, -\frac{f}{f_0}y_5\right) \exp\left[\frac{ik}{2R}(x_5^2 + y_5^2)\right] \otimes p\left(\frac{f}{f_0}x_5, \frac{f}{f_0}y_5\right) \times \\ & \left. \times t^*\left(\frac{f}{f_0}x_5, \frac{f}{f_0}y_5\right) \exp\left[-\frac{ik}{2R}(x_5^2 + y_5^2)\right] \otimes P_0(x_5, y_5) \right|^2. \quad (10) \end{aligned}$$

Согласно (10) в Фурье-плоскости в пределах области, определенной шириной функции  $p(fx_5/f_0, fy_5/f_0) \otimes p(fx_5/f_0, fy_5/f_0)$ , период  $\Delta \tilde{x}_5 = \lambda f_0 R / af$  спекл-интерференционных полос не зависит от знака радиуса кривизны сферического волнового фронта когерентного излучения, используемого на стадии записи двухэкспозиционной спеклограммы. При этом частота спекл-интерференционных полос увеличивается с уменьшением величины  $|R|$  из-за увеличения смещения в плоскости спеклограммы субъективных спеклов, соответствующих второй экспозиции, по отношению к идентичным спеклам первой экспозиции, которое отсутствует при  $R = \infty$ , когда в плоскости фотопластинки на стадии записи формируется Фурье-образ функции  $t(x_1, y_1)$  [8].

Положим, что на стадии воспроизведения двухэкспозиционной спеклограммы, характеризующей поперечное перемещение рассеивателя, осуществляется ее смещение, например в направлении оси  $x$  на величину  $x_{03}$ . Тогда распределение комплексной амплитуды поля в плоскости  $(x_3, y_3)$  определяется выражением

$$\begin{aligned}
\tau(x_3, y_3) \sim & \left\{ F(x_3 + x_{03}, y_3) \otimes \right. \\
& \left. \otimes \exp \left\{ -\frac{iklL_p^2}{2l_1^2 l_2^2} [(x_3 + x_{03})^2 + y_3^2] \right\} \otimes P(x_3, y_3) \right\} \{k.c.\} + \\
& + \left\{ F(x_3 + x_{03}, y_3) \otimes \exp \left\{ -\frac{iklL_p^2}{2l_1^2 l_2^2} [(x_3 + x_{03})^2 + y_3^2] \right\} \otimes \right. \\
& \left. \otimes \exp \left[ -\frac{ikL_p a}{l_1 l_2} (x_3 + x_{03}) \right] P \left( x_3 + \frac{l_1 l_2}{L_p} a, y_3 \right) \right\} \{k.c.\}. \quad (11)
\end{aligned}$$

При подстановке (11) в формулу (4) из работы [4] распределение комплексной амплитуды поля в Фурье-плоскости  $(x_5, y_5)$  принимает вид

$$\begin{aligned}
u(x_5, y_5) \sim & \left\{ p \left( \frac{l_1 l_2}{f_0} x_5, \frac{l_1 l_2}{f_0} y_5 \right) t \left( -\frac{l_1 l_2}{L_p f_0} x_5, -\frac{l_1 l_2}{L_p f_0} y_5 \right) \times \right. \\
& \times \exp \left[ \frac{ikl_1^2 l_2^2}{2lL_p^2 f_0^2} (x_5^2 + y_5^2) \right] \exp \left( \frac{i2kx_{03}x_5}{f_0} \right) \otimes p \left( \frac{l_2}{f_0} x_5, \frac{l_2}{f_0} y_5 \right) \times \\
& \times t^* \left( \frac{l_1 l_2}{L_p f_0} x_5, \frac{l_1 l_2}{L_p f_0} y_5 \right) \exp \left[ -\frac{ikl_1^2 l_2^2}{2lL_p^2 f_0^2} (x_5^2 + y_5^2) \right] \times \\
& \times \exp \left( \frac{i2kx_{03}x_5}{f_0} \right) + p \left( \frac{l_2}{f_0} x_5 + \frac{L_p}{l_1} a, \frac{l_2}{f_0} y_5 \right) \times \\
& \times t \left( -\frac{l_1 l_2}{L_p f_0} x_5, -\frac{l_1 l_2}{L_p f_0} y_5 \right) \exp \left[ \frac{ikl_1^2 l_2^2}{2lL_p^2 f_0^2} (x_5^2 + y_5^2) \right] \times \\
& \times \exp \left( \frac{ikl_1 l_2}{f_0 l L_p} a x_5 \right) \exp \left( \frac{i2kx_{03}x_5}{f_0} \right) \otimes p \left( \frac{l_2}{f_0} x_5 - \frac{L_p}{l_1} a, \frac{l_2}{f_0} y_5 \right) \times \\
& \times t^* \left( \frac{l_1 l_2}{L_p f_0} x_5, \frac{l_1 l_2}{L_p f_0} y_5 \right) \exp \left[ -\frac{ikl_1^2 l_2^2}{2lL_p^2 f_0^2} (x_5^2 + y_5^2) \right] \times \\
& \left. \times \exp \left( \frac{ikl_1 l_2}{f_0 l L_p} a x_5 \right) \exp \left( \frac{i2kx_{03}x_5}{f_0} \right) \right\} \otimes P_0(x_5, y_5), \quad (12)
\end{aligned}$$

на основании которого распределение освещенности в ней определяется выражением

$$\begin{aligned}
I(x_5, y_5) \sim & \left[ 1 + \cos \left( \frac{kl_1 l_2 a x_5}{f_0 l L_p} \right) \right] \left| p \left( \frac{l_2}{f_0} x_5, \frac{l_2}{f_0} y_5 \right) \times \right. \\
& \times t \left( -\frac{l_1 l_2}{L_p f_0} x_5, -\frac{l_1 l_2}{L_p f_0} y_5 \right) \exp \left[ \frac{ikl_1^2 l_2^2}{2lL_p^2 f_0^2} (x_5^2 + y_5^2) \right] \times \\
& \times \exp \left( \frac{i2kx_{03}x_5}{f_0} \right) \otimes p \left( \frac{l_2}{f_0} x_5, \frac{l_2}{f_0} y_5 \right) \times \\
& \times t^* \left( \frac{l_1 l_2}{L_p f_0} x_5, \frac{l_1 l_2}{L_p f_0} y_5 \right) \exp \left[ -\frac{ikl_1^2 l_2^2}{2lL_p^2 f_0^2} (x_5^2 + y_5^2) \right] \times \\
& \left. \times \exp \left( \frac{i2kx_{03}x_5}{f_0} \right) \otimes P_0(x_5, y_5) \right|^2. \quad (13)
\end{aligned}$$

Из (13) следует, что на стадии воспроизведения спеклограммы ее перемещение в плоскости  $(x_3, y_3)$  не приводит к изменению положения спекл-интерференционных полос («замороженная» интерференционная картина). Поэтому из-за отсутствия параллакса интерференционных полос и с учетом того, что в задней фокальной плоскости положительной линзы постоянная составляющая пропускающая спеклограммы занимает малую область пространства, отсутствует необходимость в выполнении пространственной фильтрации дифракционного поля при регистрации спекл-интерференционной картины, характеризующей поперечное перемещение рассеивателя.

Сравнение рассматриваемого спекл-интерферометра и голографического интерферометра [1], в котором для контроля поперечного перемещения диффузно рассеивающей свет плоской поверхности проводится регистрация интерференционной картины, локализуемой в Фурье-плоскости, показывает, что чувствительность их одинакова. Это объясняется одинаковой природой механизма формирования в диффузно рассеянных полях интерференционных картин, который связан с однородным смещением в плоскости голограммы или спеклограммы субъективных спеклов, соответствующих второй экспозиции. При этом на стадии восстановления голограммы или воспроизведения спеклограммы в Фурье-плоскости осуществляется совмещение идентичных субъективных спеклов двух экспозиций. Отличие состоит в том, что в голографическом интерферометре [1] регистрация интерферограммы выполняется с проведением пространственной фильтрации дифракционного поля в плоскости голограммы, а регистрация спекл-интерферограммы не требует выполнения пространственной фильтрации дифракционного поля. Кроме того, в спекл-интерферометре ниже порог чувствительности к перемещению рассеивателя из-за увеличения пространственной протяженности спекл-интерферограммы [9].

В эксперименте двухэкспозиционные спеклограммы записывались на фотопластинках типа Микрат-ВРЛ с помощью излучения He-Ne-лазера на длине волны 0,6328 мкм. Кроме того, использовались положительная линза с фокусным расстоянием  $f = 220$  мм, диаметром зрачка  $d = 11$  мм и положительная линза с фокусным расстоянием  $f = 170$  мм и  $d = 25$  мм. Для первой линзы расстояния  $l_1, l_2$  соответственно равнялись 350 и 100 мм, а для второй линзы 180 и 300 мм. Диаметр освещенной области матового экрана  $D_0$  составлял 50 мм. Методика экспериментальных исследований заключалась в сравнении результатов записи двухэкспозиционных спеклограмм для фиксированной величины поперечного перемещения  $a = (0,03 \pm 0,002)$  мм матового экрана. Причем различные радиусы кривизны сферической волны излучения, используемого для освещения рассеивателя, выбирались в диапазоне  $120 \leq |R| \leq \infty$ .

На рис. 4 в качестве примера представлены спекл-интерференционные картины, зарегистрированные в фокальной плоскости объектива с фокусным расстоянием  $f_0 = 50$  мм, диаметром зрачка 17 мм. При этом рис. 4, а относится к случаю освещения

матового экрана на стадии записи двухэкспозиционной спеклограммы коллимированным пучком, рис. 4, б – излучением с расходящейся сферической волной радиусом кривизны  $R = 350$  мм, рис. 4, в – со сходящейся с  $R = 350$  мм.

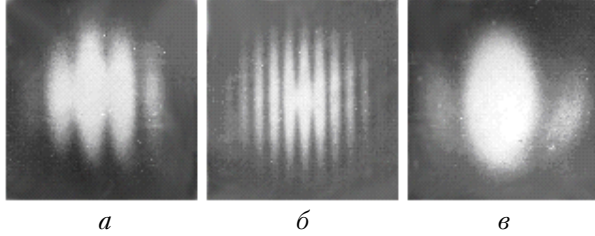


Рис. 4. Спекл-интерферограммы, характеризующие поперечное перемещение рассеивателя, когда на стадии записи спеклограммы с использованием положительной линзы с  $f = 220$  мм матовый экран освещался излучением: а – с плоской волной; б – сферической расходящейся; в – сферической сходящейся

В этих случаях, как и в последующих, связанных с изменением как величины, так и знака радиуса кривизны, измерялись периоды интерференционных полос (помимо того, что их можно определить из результатов измерений  $R$  для известных величин  $\lambda, a, f, l_1, l_2, f_0$ ). Полученные таким образом значения частоты интерференционных полос соответствуют рис. 2 с точностью (10%) до ошибки, допускаемой в эксперименте.

Спекл-интерферограммы, представленные на рис. 5 и зарегистрированные в фокальной плоскости объектива с фокусным расстоянием  $f_0 = 50$  мм, диаметром зрачка 17 мм, характеризуют поперечное перемещение рассеивателя, когда на стадии двухэкспозиционной записи спеклограммы использовалась положительная линза с фокусным расстоянием  $f = 170$  мкм. При этом рис. 5, а относится к случаю освещения матового экрана коллимированным пучком, рис. 5, б – излучением с расходящейся сферической волной с радиусом кривизны  $R = 300$  мм, рис. 5, в – со сходящейся с  $R = 300$  мм.

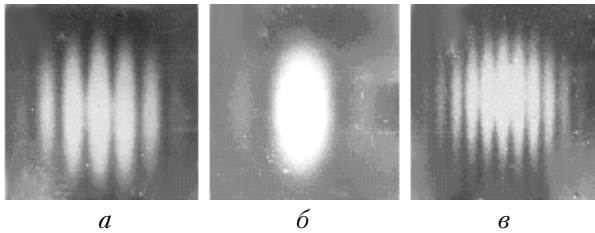


Рис. 5. Спекл-интерферограммы, характеризующие поперечное перемещение рассеивателя, когда матовый экран освещается излучением: а – с плоской волной; б – сферической расходящейся; в – сферической сходящейся

В этих случаях, как и в последующих, связанных с изменением как величины, так и знака радиуса кривизны, измерялись периоды интерференционных полос (помимо того, что их можно определить из результатов измерений  $R$  для известных величин  $\lambda, a, f, l_1, l_2, f_0$ ). Полученные таким образом значения частоты интерференционных полос соответствуют рис. 3

с точностью (10%) до ошибки, допускаемой в эксперименте.

В частном случае, когда на стадии двухэкспозиционной записи спеклограммы для контроля поперечного перемещения рассеивателя фотопластинка находится в задней фокальной плоскости линзы ( $l_2 = f$ ), результаты экспериментальных исследований, которые приведены в [10], соответствуют вышеуказанным теоретическим предположкам.

Пусть теперь перед повторным экспонированием фотопластинки 2 (см. рис. 1) матовый экран 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 фотопластинки определяется выражением

$$u'_2(x_3, y_3) \sim \exp(ik\Delta l) \times \exp\left[\frac{ik}{2r}(x_3^2 + y_3^2)\right] \exp\left[-\frac{ikL_p^2\Delta l}{2l_1^2l_2^2}(x_3^2 + y_3^2)\right] \times \left\{ F'(x_3, y_3) \otimes \exp\left[-\frac{ikl'L_p^2}{2(l_1 + \Delta l)^2l_2^2}(x_3^2 + y_3^2)\right] \otimes P(x_3, y_3) \right\}, \quad (14)$$

где  $F'(x_3, y_3)$  – Фурье-образ функции  $t(x_1, y_1)$  с пространственными частотами  $L'_p x_3 / \lambda(l_1 + \Delta l)l_2$ ,  $L'_p y_3 / \lambda(l_1 + \Delta l)l_2$ ;  $L'_p = L_p(1 + L_p\Delta l/l_1^2)$ ;  $1/l' = 1/(l_1 + \Delta l) + 1/(R - \Delta l) - L'_p/(1 + \Delta l)^2$ .

Согласно (14) 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 (14). 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 (14) множителя  $\exp[-ikL_p^2\Delta l(x_3^2 + y_3^2)/2l_1^2l_2^2]$ .

В свою очередь ориентационный характер субъективных спеклов, соответствующих второй экспозиции, таков, что имеет место дополнительное изменение по радиусу от оптической оси их угла наклона, который зависит от радиуса кривизны волнового фронта в плоскости  $(x_1, y_1)$  (см. рис. 1) и определяется множителем в (14), стоящим под интегралом свертки функций.

Это обстоятельство приводит в общем случае к значительной декорреляции спекл-структур двух экспозиций, которая будет отсутствовать при освещении рассеивателя когерентным излучением со сходящейся сферической волной радиусом кривизны  $R' = l_1^2/(l_1 - L_p)$ , когда  $l_2 < f$  и в плоскости фотопластинки формируется Фурье-образ функции  $t(x_1, y_1)$ , или изучением с расходящейся сферической волной с указанным радиусом кривизны  $R'$  и в плоскости фотопластинки формируется квази-Фурье-образ [1].

Если  $l_2 > f$ , то при освещении рассеивателя когерентным излучением с расходящейся сферической волной радиусом кривизны  $R' = l_1^2/(L_p - l_1)$

в плоскости фотопластинки формируется Фурье-образ функции  $t(x_1, y_1)$  или излучением со сходящейся сферической волной с указанным радиусом кривизны  $R'$  и в плоскости фотопластинки формируется квази-Фурье-образ функции  $t(x_1, y_1)$ . Поэтому для доказательства возможности образования высококонтрастной спекл-интерференционной картины, характеризующей продольное перемещение диффузно рассеивающей свет плоской поверхности, ограничимся этим значением  $R'$  радиуса кривизны волнового фронта. Тогда распределение комплексной амплитуды пропускания  $\tau(x_3, y_3)$  двухэкспозиционной спеклограммы [4, рис. 4] без учета постоянной составляющей пропускания, которая будет занимать малую область в плоскости регистрации спекл-интерферограммы, принимает вид

$$\begin{aligned} \tau(x_3, y_3) \sim & \left\{ F(x_3, y_3) \otimes \exp \left[ -\frac{ikR'L_p^2}{4l_1^2 l_2^2} (x_3^2 + y_3^2) \right] \otimes \right. \\ & \left. \otimes P(x_3, y_3) \right\} \{k.c.\} + \left\{ F'(x_3, y_3) \otimes \right. \\ & \left. \otimes \exp \left[ -\frac{ikR'L_p^2}{4l_1^2 l_2^2} (x_3^2 + y_3^2) \right] \otimes P(x_3, y_3) \right\} \{k.c.\}, \quad (15) \end{aligned}$$

где пространственные частоты Фурье-образа  $F'(x_3, y_3)$  соответствуют величинам  $L_p x_3 / \lambda l_1 l_2 (1 + \Delta l / R')$ ,  $L_p y_3 / \lambda l_1 l_2 (1 + \Delta l / R')$ .

Как и в [4], в приближении Френеля распределение комплексной амплитуды поля в плоскости  $(x_5, y_5)$  [4, рис. 4] определяется выражением

$$\begin{aligned} u'(x_5, y_5) \sim & \iiint \tau(x_3, y_3) \times \\ & \times \exp \left[ \frac{ik}{2l_3} [(x_3 - x_4)^2 + (y_3 - y_4)^2] \right] \times \\ & \times p_0(x_4, y_4) \exp \left[ -\frac{ik}{2f_0} (x_4^2 + y_4^2) \right] \times \\ & \times \exp \left[ \frac{ik}{2l_4} [(x_4 - x_5)^2 + (y_4 - y_5)^2] \right] dx_3 dy_3 dx_4 dy_4, \quad (16) \end{aligned}$$

которое на основании [3] запишем в виде

$$\begin{aligned} u'(x_5, y_5) \sim & \exp \left[ \frac{ik}{2l_4} (x_5^2 + y_5^2) \right] \left\{ \exp \left[ -\frac{ikL_b}{2l_4^2} (x_5^2 + y_5^2) \right] \times \right. \\ & \left. \times \left\{ F_b(x_5, y_5) \otimes \exp \left[ -\frac{ikL_b^2}{2(l_3 - L_b)l_4^2} (x_5^2 + y_5^2) \right] \right\} \otimes \right. \\ & \left. \otimes P_0(x_5, y_5) \right\}, \quad (17) \end{aligned}$$

где  $L_b$  – геометрический параметр оптической системы, регистрирующей спекл-интерферограмму и удовлетворяющий условию  $1/L_b = 1/l_3 - 1/f_0 + 1/l_4$ ;  $F_b(x_5, y_5)$  – Фурье-образ функции  $\tau(x_3, y_3)$  с пространственными частотами  $L_b x_5 / \lambda l_3 l_4$ ,  $L_b y_5 / \lambda l_3 l_4$ ,

$P_0(x_5, y_5)$  – Фурье-образ функции  $p_0(x_4, y_4)$  зрачка регистрирующей оптической системы [4, рис. 4] с пространственными частотами  $x_5 / \lambda l_4$ ,  $y_5 / \lambda l_4$ .

Согласно (17) в плоскости  $(x_5, y_5)$  образуется субъективное спекл-поле с размером спекла, определяемого шириной функции  $P_0(x_5, y_5)$ , на которое наложено распределение фазы расходящейся сферической волны с радиусом кривизны  $l_4$ .

При подстановке (15) в (17) получим

$$\begin{aligned} u(x_5, y_5) \sim & \exp \left[ \frac{ik}{2l_4} (x_5^2 + y_5^2) \right] \left\{ \exp \left[ -\frac{ikL_b}{2l_4^2} (x_5^2 + y_5^2) \right] \times \right. \\ & \times \left\{ \exp \left[ -\frac{ikL_b^2}{2(l_3 - L_b)l_4^2} (x_5^2 + y_5^2) \right] \otimes \left\{ p \left( \frac{l_2 L_b}{l_3 l_4} x_5, \frac{l_2 L_b}{l_3 l_4} y_5 \right) \right\} \times \right. \\ & \times t \left( -\frac{l_1 l_2 L_b}{L_p l_3 l_4} x_5, -\frac{l_1 l_2 L_b}{L_p l_3 l_4} y_5 \right) \exp \left[ \frac{ik l_1^2 l_2^2 L_b^2}{R' L_p^2 l_3^2 l_4^2} (x_5^2 + y_5^2) \right] \otimes \\ & \otimes p \left( \frac{l_2 L_b}{l_3 l_4} x_5, \frac{l_2 L_b}{l_3 l_4} y_5 \right) t^* \left( \frac{l_1 l_2 L_b}{L_p l_3 l_4} x_5, \frac{l_1 l_2 L_b}{L_p l_3 l_4} y_5 \right) \times \\ & \times \exp \left[ -\frac{ik l_1^2 l_2^2 L_b^2}{R' L_p^2 l_3^2 l_4^2} (x_5^2 + y_5^2) \right] + p \left( \frac{l_2 L_b}{l_3 l_4} x_5, \frac{l_2 L_b}{l_3 l_4} y_5 \right) \times \\ & \times t \left( -\frac{l_1 l_2 L_b}{L_p l_3 l_4} \left( 1 + \frac{\Delta l}{R'} \right) x_5, -\frac{l_1 l_2 L_b}{L_p l_3 l_4} \left( 1 + \frac{\Delta l}{R'} \right) y_5 \right) \times \\ & \times \exp \left[ \frac{ik l_1^2 l_2^2 L_b^2}{R' L_p^2 l_3^2 l_4^2} (x_5^2 + y_5^2) \right] \otimes p \left( \frac{l_2 L_b}{l_3 l_4} x_5, \frac{l_2 L_b}{l_3 l_4} y_5 \right) \times \\ & \times t^* \left( \frac{l_1 l_2 L_b}{L_p l_3 l_4} \left( 1 + \frac{\Delta l}{R'} \right) x_5, \frac{l_1 l_2 L_b}{L_p l_3 l_4} \left( 1 + \frac{\Delta l}{R'} \right) y_5 \right) \times \\ & \left. \left. \times \exp \left[ -\frac{ik l_1^2 l_2^2 L_b^2}{R' L_p^2 l_3^2 l_4^2} (x_5^2 + y_5^2) \right] \right\} \otimes P_0(x_5, y_5) \right\}. \quad (18) \end{aligned}$$

Для  $\Delta l \ll R'$

$$\begin{aligned} t \left[ -\frac{l_1 l_2 L_b (1 + \Delta l / R')}{L_p l_3 l_4} x_5, -\frac{l_1 l_2 L_b (1 + \Delta l / R')}{L_p l_3 l_4} y_5 \right] = \\ = t \left( -\frac{l_1 l_2 L_b x_5}{L_p l_3 l_4}, -\frac{l_1 l_2 L_b y_5}{L_p l_3 l_4} \right) \otimes \\ \otimes \exp \left[ -ik l_1^2 l_2^2 L_b^2 (x_5^2 + y_5^2) / 2L_p^2 l_3^2 l_4^2 \Delta l \right], \\ a \text{ с учетом того, что } \tau(x_3, y_3) \text{ — действительная функция:} \\ t^* \left[ \frac{l_1 l_2 L_b (1 + \Delta l / R')}{L_p l_3 l_4} x_5, \frac{l_1 l_2 L_b (1 + \Delta l / R')}{L_p l_3 l_4} y_5 \right] = \\ = t^* \left( \frac{l_1 l_2 L_b x_5}{L_p l_3 l_4}, \frac{l_1 l_2 L_b y_5}{L_p l_3 l_4} \right) \otimes \\ \otimes \exp \left[ -ik l_1^2 l_2^2 L_b^2 (x_5^2 + y_5^2) / 2L_p^2 l_3^2 l_4^2 \Delta l \right]. \end{aligned}$$

Тогда в результате интегрального представления в (18) операции свертки с функцией  $\exp[-ikL_b^2 \times (x_5^2 + y_5^2) / 2(l_3 - L_b)l_4^2]$  распределение комплексной амплитуды поля в плоскости  $(x_5, y_5)$  принимает вид

$$\begin{aligned}
u'(x_5, y_5) &\sim \exp\left[\frac{ik}{2l_4}(x_5^2 + y_5^2)\right] \times \\
&\times \left\{ \exp\left[-\frac{ikL_b}{2l_4^2}(x_5^2 + y_5^2)\right] \exp\left[-\frac{ikL_b^2}{2(l_3 - L_b)l_4^2}(x_5^2 + y_5^2)\right] \times \right. \\
&\times \left\{ \exp\left[\frac{ikL_b^2}{2(l_3 - L_b)l_4^2}(x_5^2 + y_5^2)\right] \otimes \left\{ F_1(x_5, y_5) \otimes \right. \right. \\
&\otimes \exp\left[-\frac{ikR'L_pL_b^2l_3^2}{4l_1^2l_2^2(l_3 - L_b)^2l_4^2}(x_5^2 + y_5^2)\right] \otimes P'(x_5, y_5) \left. \right\} \times \\
&\times \left\{ F_2(x_5, y_5) \otimes \exp\left[\frac{ikR'L_pL_b^2l_3^2}{4l_1^2l_2^2(l_3 - L_b)^2l_4^2}(x_5^2 + y_5^2)\right] \otimes P'(x_5, y_5) \right\} + \\
&+ \left\{ \exp\left[\frac{ikL_pL_b^2l_3^2\Delta l}{2l_1^2l_2^2(l_3 - L_b)^2l_4^2}(x_5^2 + y_5^2)\right] F_1(x_5, y_5) \otimes \right. \\
&\otimes \exp\left[-\frac{ikR'L_pL_b^2l_3^2}{4l_1^2l_2^2(l_3 - L_b)^2l_4^2}(x_5^2 + y_5^2)\right] \otimes P'(x_5, y_5) \left. \right\} \times \\
&\times \left\{ \exp\left[\frac{ikL_pL_b^2l_3^2\Delta l}{2l_1^2l_2^2(l_3 - L_b)^2l_4^2}(x_5^2 + y_5^2)\right] F_2(x_5, y_5) \otimes \right. \\
&\otimes \exp\left[\frac{ikR'L_pL_b^2l_3^2}{4l_1^2l_2^2(l_3 - L_b)^2l_4^2}(x_5^2 + y_5^2)\right] \otimes P'(x_5, y_5) \left. \right\} \left. \right\} \otimes \\
&\otimes P_0(x_5, y_5) \left. \right\}, \quad (19)
\end{aligned}$$

где  $F_1(x_5, y_5)$ ,  $F_2(x_5, y_5)$  – Фурье-образы соответственно функций  $t(l_1l_2L_b\xi/L_p l_3l_4, l_1l_2L_b\eta/L_p l_3l_4)$ ,  $t^*(-l_1l_2L_b\xi/L_p l_3l_4, l_1l_2L_b\eta/L_p l_3l_4)$  с пространственными частотами  $L_b^2x_5/\lambda(l_3 - L_b)l_4^2$ ,  $L_b^2y_5/\lambda(l_3 - L_b)l_4^2$ ,  $P'(x_5, y_5)$  – Фурье-образ функции  $p(l_2L_b\xi/l_3l_4, l_2L_b\eta/l_3l_4)$  с пространственными частотами  $L_b^2x_5/\lambda(l_3 - L_b)l_4^2$ ,  $L_b^2y_5/\lambda(l_3 - L_b)l_4^2$ .

Так как  $kL_p^2L_b^2l_3^2\Delta l(x_5^2 + y_5^2)/2l_1^2l_2^2(l_3 - L_b)^2l_4^2 \ll \ll kL_b^2/2(l_3 - L_b)l_4^2$ , то в силу медленности изменения с координатой функции  $\exp\left[ikL_p^2L_b^2l_3^2\Delta l(x_5^2 + y_5^2)/2l_1^2l_2^2(l_3 - L_b)^2l_4^2\right]$  вынесем ее в (19) из-под знаков интервалов свертки. Кроме того, положим, что размер субъективного спекла, определяемый шириной функции  $P_0(x_5, y_5)$ , хотя бы на порядок меньше [6] периода изменения функции  $1 + \exp\left[ikL_p^2L_b^2l_3^2\Delta l(x_5^2 + y_5^2)/l_1^2l_2^2(l_3 - L_b)^2l_4^2\right]$ . Тогда с учетом интегрального представления операции свертки с функцией  $\exp\left[ikL_b^2(x_5^2 + y_5^2)/2(l_3 - L_b)l_4^2\right]$  в (19) распределение освещенности в плоскости  $(x_5, y_5)$  определяется выражением

$$\begin{aligned}
I'(x_5, y_5) &\sim \left\{ 1 + \cos\left[\frac{kL_p^2L_b^2l_3^2\Delta l}{l_1^2l_2^2(l_3 - L_b)^2l_4^2}(x_5^2 + y_5^2)\right] \right\} \times \\
&\times \left| \exp\left[-\frac{ikL_b}{2l_4^2}(x_5^2 + y_5^2)\right] \left\{ \exp\left[-\frac{ikL_b^2}{2(l_3 - L_b)l_4^2}(x_5^2 + y_5^2)\right] \otimes \right. \right. \\
&\otimes p\left(\frac{l_2L_b}{l_3l_4}x_5, \frac{l_2L_b}{l_3l_4}y_5\right) t\left(-\frac{l_1l_2L_b}{L_p l_3l_4}x_5, -\frac{l_1l_2L_b}{L_p l_3l_4}y_5\right) \times \\
&\times \exp\left[\frac{ikl_1^2l_2^2L_b^2}{R'L_p^2l_3^2l_4^2}(x_5^2 + y_5^2)\right] \otimes p\left(\frac{l_2L_b}{l_3l_4}x_5, \frac{l_2L_b}{l_3l_4}y_5\right) \times \\
&\times t^*\left(\frac{l_1l_2L_b}{L_p l_3l_4}x_5, \frac{l_1l_2L_b}{L_p l_3l_4}y_5\right) \exp\left[-\frac{ikl_1^2l_2^2L_b^2}{R'L_p^2l_3^2l_4^2}(x_5^2 + y_5^2)\right] \left. \right\} \otimes \\
&\otimes P_0(x_5, y_5) \left. \right|^2. \quad (20)
\end{aligned}$$

Если на стадии двухэкспозиционной записи спеклограммы в плоскости фотопластики формируется распределение комплексной амплитуды поля, соответствующее Фурье-образу функции  $t(x_1, y_1)$ , то распределение освещенности в плоскости регистрации спекл-интерферограммы принимает вид

$$\begin{aligned}
I'(x_5, y_5) &\sim \left\{ 1 + \cos\left[\frac{kL_p^2L_b^2l_3^2\Delta l}{l_1^2l_2^2(l_3 - L_b)^2l_4^2}(x_5^2 + y_5^2)\right] \right\} \times \\
&\times \left| \exp\left[-\frac{ikL_b}{2l_4^2}(x_5^2 + y_5^2)\right] \left\{ \exp\left[-\frac{ikL_b^2}{2(l_3 - L_b)l_4^2}(x_5^2 + y_5^2)\right] \otimes \right. \right. \\
&\otimes p\left(\frac{l_2L_b}{l_3l_4}x_5, \frac{l_2L_b}{l_3l_4}y_5\right) t\left(-\frac{l_1l_2L_b}{L_p l_3l_4}x_5, -\frac{l_1l_2L_b}{L_p l_3l_4}y_5\right) \otimes \\
&\otimes p\left(\frac{l_2L_b}{l_3l_4}x_5, \frac{l_2L_b}{l_3l_4}y_5\right) t^*\left(\frac{l_1l_2L_b}{L_p l_3l_4}x_5, \frac{l_1l_2L_b}{L_p l_3l_4}y_5\right) \left. \right\} \otimes \\
&\otimes P_0(x_5, y_5) \left. \right|^2. \quad (21)
\end{aligned}$$

Из (20), (21) следует, что субъективная спекл-структура с размером спекла, определяемым шириной функции  $P_0(x_5, y_5)$ , промодулирована в пределах области, диаметр которой определяется шириной функции  $p(l_2L_b x_5/l_3l_4, l_2L_b y_5/l_3l_4) \otimes p(l_2L_b x_5/l_3l_4, l_2L_b y_5/l_3l_4)$ , полосами равного наклона – системой концентрических спекл-интерференционных колец. Измерение их радиусов в соседних порядках интерференции обеспечивает возможность определения величины продольного перемещения диффузно рассеивающей свет плоской поверхности. При этом, как и в [4], чувствительность интерферометра зависит от величины, определяющей масштаб Фурье-образа функции  $t(x_1, y_1)$ .

Кроме того, учтем, что  $L_b^2l_3^2/(l_3 - L_b)^2l_4^2 = f_0^2/(l_4 - f_0)^2 = \mu^2$ , где  $\mu = (\tilde{l} + l_3)/l_4$  – коэффициент масштабного преобразования в [4]. Это обстоятельство соответствует адекватности используемого представления



распределения (17) комплексной амплитуды поля с представлением распределения, принятым в [4]. Причем из условий  $\Delta l \ll R'$  и  $\Delta l \ll l_1^2 l_2^2 (L_b - l_3) / 2L_p^2 l_3^2$

следует, что  $\tilde{l} = l_1^2 l_2^2 / 2L_p^2 R'$ . Тогда на стадии воспроизведения двухэкспозиционной спеклограммы для регистрации спекл-интерференционной картины, локализуемой в плоскости, находящейся в ближней зоне дифракции, предметная плоскость линзы  $L_0$  [4, рис. 4] должна находиться на расстоянии  $2\tilde{l}$ , а спеклограмма соответственно на расстоянии  $l_3 = \tilde{l}$  [4].

Положим, что на стадии воспроизведения двухэкспозиционной спеклограммы, характеризующей продольное перемещение рассеивателя, осуществляется ее смещение, например в направлении оси  $x$  на  $x_{03}$ . Тогда распределение комплексной амплитуды поля в плоскости  $(x_3, y_3)$  определяется выражением

$$\begin{aligned} \tau'(x_3, y_3) \sim & \left\{ F(x_3 + x_{03}, y_3) \otimes \right. \\ & \otimes \exp \left\{ -\frac{ikR'L_p^2}{4l_1^2 l_2^2} [(x_3 + x_{03})^2 + y_3^2] \right\} \otimes P(x_3, y_3) \left. \right\} \{k.c.\} + \\ & + \left\{ F'(x_3 + x_{03}, y_3) \otimes \exp \left\{ -\frac{ikR'L_p^2}{4l_1^2 l_2^2} [(x_3 + x_{03})^2 + y_3^2] \right\} \otimes \right. \\ & \left. \otimes P(x_3, y_3) \right\} \{k.c.\}. \end{aligned} \quad (22)$$

Следя вышеприведенному анализу формирования спекл-интерференционной картины, характеризующей продольное перемещение диффузно рассеивающей свет плоской поверхности, чтобы определить распределение комплексной амплитуды поля в плоскости  $(x_5, y_5)$  ее регистрации, получим

$$\begin{aligned} u'(x_5, y_5) \sim & \exp \left[ \frac{ik}{2l_4} (x_5^2 + y_5^2) \right] \left\{ \exp \left[ -\frac{ikL_b}{2l_4^2} (x_5^2 + y_5^2) \right] \times \right. \\ & \times \exp \left[ -\frac{ikL_b^2}{2(l_3 - L_b)l_4^2} (x_5^2 + y_5^2) \right] \left\{ \exp \left[ \frac{ikL_b^2}{2(l_3 - L_b)l_4^2} (x_5^2 + y_5^2) \right] \otimes \right. \\ & \left. \otimes \left\{ F_1 \left[ x_5 + \frac{(l_3 - L_b)l_4}{L_b l_3} x_{03}, y_5 \right] \otimes \right. \right. \\ & \left. \left. \otimes \exp \left\{ -\frac{ikR'L_p^2 L_b^2 l_3^2}{4l_1^2 l_2^2 (l_3 - L_b)^2 l_4^2} \left[ x_5 + \frac{(l_3 - L_b)l_4}{L_b l_3} x_{03} \right]^2 + y_5^2 \right\} \right\} \otimes \right. \\ & \left. \otimes P'(x_5, y_5) \right\} \left\{ F_2 \left( x_5 + \frac{(l_3 - L_b)l_4}{L_b l_3} x_{03}, y_5 \right) \otimes \right. \\ & \left. \otimes \exp \left\{ -\frac{ikR'L_p^2 L_b^2 l_3^2}{4l_1^2 l_2^2 (l_3 - L_b)^2 l_4^2} \left[ x_5 + \frac{(l_3 - L_b)l_4}{L_b l_3} x_{03} \right]^2 + y_5^2 \right\} \right\} \otimes \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \left. \otimes P'(x_5, y_5) \right\} + \left\{ F_1 \left[ x_5 + \frac{(l_3 - L_b)l_4}{L_b l_3} x_{03}, y_5 \right] \times \right. \\ & \times \exp \frac{ikL_p^2 L_b^2 l_3^2 \Delta l}{2l_1^2 l_2^2 (l_3 - L_b)^2 l_4^2} \left\{ \left[ x_5 + \frac{(l_3 - L_b)l_4}{L_b l_3} x_{03} \right]^2 + y_5^2 \right\} \otimes \\ & \left. \otimes \exp \left\{ -\frac{ikR'L_p^2 L_b^2 l_3^2}{4l_1^2 l_2^2 (l_3 - L_b)^2 l_4^2} \left[ x_5 + \frac{(l_3 - L_b)l_4}{L_b l_3} x_{03} \right]^2 + y_5^2 \right\} \right\} \otimes \\ & \left. \otimes P'(x_5, y_5) \right\} \left\{ F_2 \left( x_5 + \frac{(l_3 - L_b)l_4}{L_b l_3} x_{03}, y_5 \right) \times \right. \\ & \times \exp \left\{ \frac{ikL_p^2 L_b^2 l_3^2 \Delta l}{2l_1^2 l_2^2 (l_3 - L_b)^2 l_4^2} \left\{ \left[ x_5 + \frac{(l_3 - L_b)l_4}{L_b l_3} x_{03} \right]^2 + y_5^2 \right\} \otimes \right. \\ & \left. \otimes \exp \left\{ -\frac{ikR'L_p^2 L_b^2 l_3^2}{4l_1^2 l_2^2 (l_3 - L_b)^2 l_4^2} \left\{ \left[ x_5 + \frac{(l_3 - L_b)l_4}{L_b l_3} x_{03} \right]^2 + y_5^2 \right\} \right\} \right\} \otimes \\ & \left. \otimes P'(x_5, y_5) \right\} \left. \right\} \otimes P_0(x_5, y_5). \end{aligned} \quad (23)$$

Тогда на основании (23), используя вышеприведенное положение о медленности изменения с координатой функции  $\exp \left\{ ikL_p^2 L_b^2 l_3^2 \Delta l \left[ \left( x_5 + \frac{(l_3 - L_b)l_4}{L_b l_3} x_{03} \right)^2 + y_5^2 \right] / 2l_1^2 l_2^2 (l_3 - L_b)^2 l_4^2 \right\}$ , с учетом интегрального представления операции свертки с функцией  $\exp \left[ ikL_b^2 (x_5^2 + y_5^2) / 2(l_3 - L_b)l_4^2 \right]$  распределение освещенности в плоскости  $(x_5, y_5)$  регистрации спекл-интерферограммы принимает вид

$$\begin{aligned} I'(x_5, y_5) \sim & \left\{ 1 + \cos \frac{kL_p^2 L_b^2 l_3^2 \Delta l}{l_1^2 l_2^2 (l_3 - L_b)^2 l_4^2} \times \right. \\ & \times \left\{ \left[ x_5 + \frac{(l_3 - L_b)l_4}{L_b l_3} x_{03} \right]^2 + y_5^2 \right\} \left. \right\} \left| \exp \left[ -\frac{ikL_b}{2l_4^2} (x_5^2 + y_5^2) \right] \times \right. \\ & \times \left\{ \exp \left[ -\frac{ikL_b^2}{2(l_3 - L_b)l_4^2} (x_5^2 + y_5^2) \right] \otimes p \left( \frac{l_2 L_b}{l_3 l_4} x_5, \frac{l_2 L_b}{l_3 l_4} y_5 \right) \times \right. \\ & \times t \left( -\frac{l_1 l_2 L_b}{L_p l_3 l_4} x_5, -\frac{l_1 l_2 L_b}{L_p l_3 l_4} y_5 \right) \exp \left[ \frac{ikl_1^2 l_2^2 L_b^2}{R' L_p^2 l_3^2 l_4^2} (x_5^2 + y_5^2) \right] \times \\ & \times \exp \left( \frac{i2kL_b x_{03} x_5}{l_3 l_4} \right) \otimes p \left( \frac{l_2 L_b}{l_3 l_4} x_5, \frac{l_2 L_b}{l_3 l_4} y_5 \right) \times \\ & \times t^* \left( \frac{l_1 l_2 L_b}{L_p l_3 l_4} x_5, \frac{l_1 l_2 L_b}{L_p l_3 l_4} y_5 \right) \exp \left[ -\frac{ikl_1^2 l_2^2 L_b^2}{R' L_p^2 l_3^2 l_4^2} (x_5^2 + y_5^2) \right] \times \\ & \left. \left. \times \exp \left( \frac{i2kL_b x_{03} x_5}{l_3 l_4} \right) \right\} \otimes P_0(x_5, y_5) \right|^2. \end{aligned} \quad (24)$$

Если на стадии двухэкспозиционной записи спеклограммы распределение комплексной амплитуды поля в плоскости фотопластинки соответствует Фурье-образу функции  $t(x_1, y_1)$ , то распределение освещенности в плоскости  $(x_5, y_5)$  регистрации спекл-интерферограммы определяется выражением

$$\begin{aligned}
I'(x_5, y_5) \sim & \left\{ 1 + \cos \frac{kL_p^2 L_b^2 l_3^2 \Delta l}{l_1^2 l_2^2 (l_3 - L_b)^2 l_4^2} \times \right. \\
& \times \left. \left[ x_5 + \frac{(l_3 - L_b)l_4}{L_b l_3} x_{03} \right]^2 + y_5^2 \right\} \left| \exp \left[ -\frac{ikL_b}{2l_4^2} (x_5^2 + y_5^2) \right] \right| \times \\
& \times \left\{ \exp \left[ -\frac{ikL_b^2}{2(l_3 - L_b)l_4^2} (x_5^2 + y_5^2) \right] \otimes p \left( \frac{l_2 L_b}{l_3 l_4} x_5, \frac{l_2 L_b}{l_3 l_4} y_5 \right) \times \right. \\
& \times t \left( -\frac{l_1 l_2 L_b}{L_p l_3 l_4} x_5, -\frac{l_1 l_2 L_b}{L_p l_3 l_4} y_5 \right) \exp \left( \frac{ikL_b x_{03} x_5}{l_3 l_4} \right) \otimes \\
& \otimes p \left( \frac{l_2 L_b}{l_3 l_4} x_5, \frac{l_2 L_b}{l_3 l_4} y_5 \right) t^* \left( \frac{l_1 l_2 L_b}{L_p l_3 l_4} x_5, \frac{l_1 l_2 L_b}{L_p l_3 l_4} y_5 \right) \times \\
& \left. \times \exp \left( \frac{ikL_b x_{03} x_5}{l_3 l_4} \right) \right\} \otimes P_0(x_5, y_5) \Big| ^2. \quad (25)
\end{aligned}$$

Согласно (24), (25) с учетом неравенства  $l_3 < L_b$  поперечное перемещение спеклограммы на стадии ее воспроизведения приводит к смещению интерференционных полос в сторону, противоположную перемещению спеклограммы, из-за явления параллакса.

В частном случае  $l_2 = f$  на стадии двухэкспозиционной записи голограммы для контроля продольного перемещения диффузно рассеивающей свет плоской поверхности распределение комплексной амплитуды поля, соответствующее второй экспозиции, в предметном канале согласно [1] имеет вид

$$\begin{aligned}
\tilde{u}_2(x_3, y_3) \sim & \exp(ik\Delta l) \exp \left[ \frac{ik}{2\tilde{r}} (x_3^2 + y_3^2) \right] \times \\
& \times \exp \left[ -\frac{ik\Delta l}{2f^2} (x_3^2 + y_3^2) \right] \left\{ \tilde{F}(x_3, y_3) \otimes \right. \\
& \left. \otimes \exp \left[ -\frac{ik(R - \Delta l)}{2f^2} (x_3^2 + y_3^2) \right] \otimes \tilde{P}(x_3, y_3) \right\}. \quad (26)
\end{aligned}$$

Из (4) и (26) следует, что имеет место только изменение по радиусу от оптической оси в плоскости  $(x_3, y_3)$  фотопластинки углов наклона субъективных спеклов, соответствующих второй экспозиции, по отношению к идентичным спеклам первой экспозиции. В результате этого двухэкспозиционная запись спеклограммы не сопровождается образованием спекл-интерференционной картины.

Сравнение голографического интерферометра [1] и рассматриваемого спекл-интерферометра для контроля продольного перемещения диффузно рассеивающей свет плоской поверхности показывает, что механизмы формирования в них интерференционных картин не одинаковы. Так, в голографическом ин-

терферометре интерференционная картина образуется из-за изменения в плоскости голограммы углов наклона по радиусу от оптической оси субъективных спеклов, соответствующих второй экспозиции по отношению к идентичным спеклам первой экспозиции. В свою очередь в спекл-интерферометре образование спекл-интерференционной картины обусловлено изменяющимся по радиусу от оптической оси смещением в плоскости спеклограммы субъективных спеклов, соответствующих второй экспозиции, по отношению к идентичным спеклам первой экспозиции. При этом на стадии воспроизведения двухэкспозиционной спеклограммы совмещение идентичных спеклов происходит в ближней зоне дифракции, где и локализуется спекл-интерференционная картина в отличие от плоскостей локализации в голографическом интерферометре.

Кроме того, как в голографическом интерферометре, так и в спекл-интерферометре для регистрации интерферограмм необходимо выполнение пространственной фильтрации дифракционного поля. Однако если в голографическом интерферометре в пределах диаметра фильтрующего отверстия должны находиться идентичные спеклы двух экспозиций, то в спекл-интерферометре необходимость выполнения пространственной фильтрации дифракционного поля обусловлена двумя причинами: с одной стороны, для уменьшения в плоскости регистрации спекл-интерферограммы области, в пределах которой сосредоточена интенсивность света из-за постоянной составляющей пропускания спеклограммы, с другой стороны, из-за параллакса интерференционных полос.

В эксперименте двухэкспозиционная запись спеклограмм для контроля продольного перемещения матового экрана осуществлялась с использованием положительных линз с вышеуказанными величинами  $f, l_1, l_2$ . При этом на стадии записи спеклограммы диаметр освещенной области рассеивателя составлял 50 мм, а радиус кривизны сферического волнового фронта  $R'$  равнялся 212 мм, когда использовалась линза с фокусным расстоянием  $f = 170$  мм, и в случае использования линзы с  $f = 220$  мм радиус кривизны  $R' = 533$  мм. Величины продольных перемещений матового экрана выбирались в диапазоне  $\Delta l = (0,5 \pm 0,002) - (3 \pm 0,002)$  мм.

На рис. 6 представлены спекл-интерферограммы, регистрация которых выполнялась согласно [4, рис. 4] с использованием объектива с фокусным расстоянием  $f_0 = 50$  мм. При этом на стадии воспроизведения двухэкспозиционных спеклограмм диаметр коллимированного пучка равнялся 50 мм, диаметр фильтрующей диафрагмы составлял 2 мм, предметная плоскость находилась на расстоянии  $(\tilde{l} + l_3) = 124$  мм, а расстояние  $l_3$  равнялось 62 мм.

В свою очередь на рис. 7 представлены спекл-интерферограммы, когда на стадии записи спеклограммы использовалась линза с фокусным расстоянием  $f = 220$  мм. В этом случае предметная плоскость находилась на расстоянии  $(\tilde{l} + l_3) = 160$  мм, а расстояние до спеклограммы составляло  $l_3 = 80$  мм. Причем по сравнению с рис. 6 угол поля зрения используемого в эксперименте объектива не ограничивал

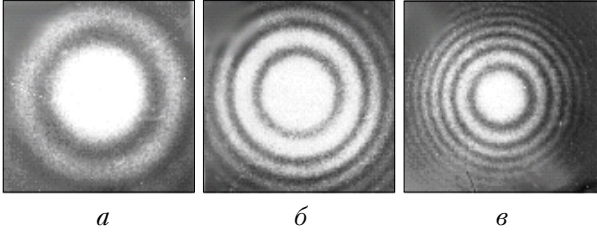


Рис. 6. Спекл-интерференционные картины, характеризующие продольное перемещение матового экрана:  $a - \Delta l = 0,5$  мм;  $b - 1$  мм;  $v - 2$  мм, когда на стадии записи спеклограммы использовалась положительная линза с  $f = 170$  мм

пространственную протяженность дифракционного гало, в пределах которого наблюдается спекл-интерференционная картина.

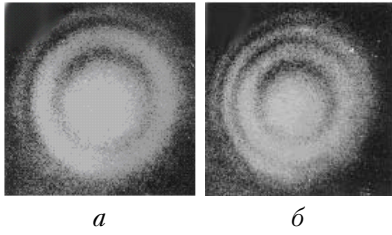


Рис. 7. Спекл-интерференционные картины, характеризующие продольное перемещение матового экрана:  $a - \Delta l = 2$  мм,  $б - 3$  мм, когда на стадии записи спеклограммы использовалась положительная линза с  $f = 220$  мм

Для измеренных радиусов интерференционных колец в соседних порядках интерференции определялась величина продольного перемещения матового экрана  $\Delta l = 2\lambda l_1^2 l_2^2 / \mu^2 L_p^2 (r_2^2 - r_1^2)$ , где  $r_1, r_2$  — соответственно радиусы колец в соседних порядках интерференции, с учетом величины коэффициента масштабного преобразования  $\mu = 1,49$  в случае использования на стадии записи спеклограммы линзы с фокусным расстоянием  $f = 170$  мм и  $\mu = 2,2$ , когда  $f = 220$  мм. При этом результаты расчета соответствуют приведенным величинам  $\Delta l$  с точностью (10%) до ошибки, допускаемой в эксперименте. Кроме того, из сравнения рис. 6 и 7 следует, что из-за меньшей величины коэффициента  $L_p/l_1 l_2$ , определяющего масштаб Фурье-образа функции  $t(x_1, y_1)$  в плоскости фотопластинки, чувствительность спекл-интерферометра с параметрами  $f = 170$  мм,  $l_1 = 180$  мм и  $l_2 = 300$  мм выше.

Известно, например [11, 12], что линейный участок характеристической кривой почернения используемого фотоматериала позволяет выполнять на нем многоэкспозиционную (до 5 экспозиций включительно) запись голограмм или спеклограмм. Тогда распределение комплексной амплитуды пропускания многоэкспозиционной спеклограммы, характеризующей продольное перемещение диффузно рассеивающей свет плоской поверхности на величину  $\Delta l$ , когда на стадии ее записи освещение рассеивателя осуществляется сферической волной с радиусом кривизны, необходимым для формирования в плоскости фотопластинки Фурье-образа функции  $t(x_1, y_1)$ , определяется выражением

$$\tau'(x_3, y_3) \sim \{F(x_3, y_3) \otimes P(x_3, y_3)\} \{k.c.\} + \sum_{n=1}^{N-1} \{F'_n(x_3, y_3) \otimes P(x_3, y_3)\} \{k.c.\}, \quad (27)$$

где  $N$  — число экспозиций;  $F'_n(x_3, y_3)$  — Фурье-образ функции  $t(x_1, y_1)$  с пространственными частотами  $L_p x_3 / \lambda l_1 l_2 (1 + n\Delta l / R')$ ,  $L_p y_3 / \lambda l_1 l_2 (1 + n\Delta l / R')$ .

В результате подстановки (27) в (17), считая  $(N-1)\Delta l \ll R'$  и следуя вышеприведенному анализу формирования спекл-интерференционной картины для определения распределения комплексной амплитуды поля в плоскости  $(x_5, y_5)$  ее регистрации, получим

$$u'(x_5, y_5) \sim \exp\left[\frac{ik}{2l_4}(x_5^2 + y_5^2)\right] \left\{ \exp\left[-\frac{ikL_b}{2l_4^2}(x_5^2 + y_5^2)\right] \times \exp\left[-\frac{ikL_b^2}{2(l_3 - L_b)l_4^2}(x_5^2 + y_5^2)\right] \left\{ \exp\left[\frac{ikL_b^2}{2(l_3 - L_b)l_4^2}(x_5^2 + y_5^2)\right] \otimes \{F_1(x_5, y_5) \otimes P'(x_5, y_5)\} \{F_2(x_5, y_5) \otimes P'(x_5, y_5)\} + \sum_{n=1}^{N-1} \left\{ \exp\left[\frac{ikL_p^2 L_b^2 l_3^2 n\Delta l}{2l_1^2 l_2^2 (l_3 - L_b)^2 l_4^2}(x_5^2 + y_5^2)\right] F_1(x_5, y_5) \otimes P'(x_5, y_5) \right\} \times \left\{ \exp\left[\frac{ikL_p^2 L_b^2 l_3^2 n\Delta l}{2l_1^2 l_2^2 (l_3 - L_b)^2 l_4^2}(x_5^2 + y_5^2)\right] F_2(x_5, y_5) \otimes P'(x_5, y_5) \right\} \right\} \otimes P_0(x_5, y_5) \right\}. \quad (28)$$

Учитывая вышеприведенные положения и считая, что период изменения функции  $1 + \sum_{n=1}^{N-1} \exp\left[ikL_p^2 \times L_b^2 l_3^2 n\Delta l (x_5^2 + y_5^2) / l_1^2 l_2^2 (l_3 - L_b)^2 l_4^2\right]$  хотя бы на порядок превосходит ширину функции  $P_0(x_5, y_5)$ , выражение (28) запишем в виде

$$u'(x_5, y_5) \sim \exp\left[\frac{ik}{2l_4}(x_5^2 + y_5^2)\right] \times \left\{ 1 + \sum_{n=1}^{N-1} \exp\left[\frac{ikL_p^2 L_b^2 l_3^2 n\Delta l}{l_1^2 l_2^2 (l_3 - L_b)^2 l_4^2}(x_5^2 + y_5^2)\right] \right\} \times \left\{ \exp\left[-\frac{ikL_b}{2l_4^2}(x_5^2 + y_5^2)\right] \left\{ \exp\left[-\frac{ikL_b^2}{2(l_3 - L_b)l_4^2}(x_5^2 + y_5^2)\right] \otimes p\left(\frac{l_2 L_b}{l_3 l_4} x_5, \frac{l_2 L_b}{l_3 l_4} y_5\right) t\left(-\frac{l_1 l_2 L_b}{L_p l_3 l_4} x_5, -\frac{l_1 l_2 L_b}{L_p l_3 l_4} y_5\right) \otimes p\left(\frac{l_2 L_b}{l_3 l_4} x_5, \frac{l_2 L_b}{l_3 l_4} y_5\right) \times t^*\left(\frac{l_1 l_2 L_b}{L_p l_3 l_4} x_5, \frac{l_1 l_2 L_b}{L_p l_3 l_4} y_5\right) \right\} \otimes P_0(x_5, y_5) \right\}, \quad (29)$$

на основании которого распределение освещенности в плоскости  $(x_5, y_5)$  регистрации интерферограммы с учетом обозначения  $A = kL_p^2 L_b^2 L_3^2 (x_5^2 + y_5^2) / l_1^2 l_2^2 (l_3 - L_b)^2 l_4^2$  для сокращения записи принимает вид

$$I(x_5, y_5) \sim \left\{ 1 + \frac{2 \cos\left(\frac{N\Delta l}{2} A\right) \sin\left(\frac{(N-1)\Delta l}{2} A\right)}{\sin\left(\frac{\Delta l}{2} A\right)} + \frac{\sin^2\left(\frac{(N-1)\Delta l}{2} A\right)}{\sin^2\left(\frac{\Delta l}{2} A\right)} \right\} \exp\left[-\frac{ikL_b}{2l_4^2} (x_5^2 + y_5^2)\right] \times \left\{ \exp\left[-\frac{ikL_b^2}{2(l_3 - L_b)l_4^2} (x_5^2 + y_5^2)\right] \otimes p\left(\frac{l_2 L_b}{l_3 l_4} x_5, \frac{l_2 L_b}{l_3 l_4} y_5\right) \right\} \times \left\{ \exp\left[-\frac{il_2 L_b}{L_p l_3 l_4} x_5, -\frac{l_1 l_2 L_b}{L_p l_3 l_4} y_5\right] \otimes p\left(\frac{l_2 L_b}{l_3 l_4} x_5, \frac{l_2 L_b}{l_3 l_4} y_5\right) \right\} \times \left\{ \exp\left[\frac{il_2 L_b}{L_p l_3 l_4} x_5, \frac{l_1 l_2 L_b}{L_p l_3 l_4} y_5\right] \otimes P_0(x_5, y_5) \right\}^2. \quad (30)$$

Так, на рис. 8, *a* представлена спекл-интерферограмма, соответствующая записи пяти экспозиций с интервалом 0,5 мм, когда использовалась положительная линза с  $f = 170$  мм.

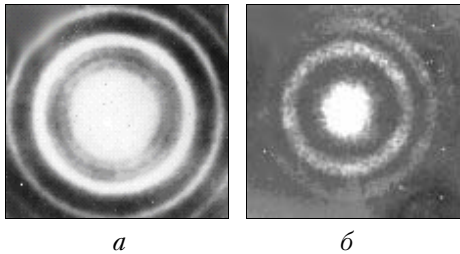


Рис. 8. Распределение освещенности при восстановлении многоэкспозиционной спеклограммы: *a* – в плоскости локализации интерференционной картины, *б* – вне плоскости локализации

При этом на стадии воспроизведения спеклограммы, как и в случае регистрации спекл-интерферограмм на рис. 6, предметная плоскость находилась на расстоянии 124 мм, а расстояние до спеклограммы составляло 62 мм. При увеличении последнего на 30 мм изменившееся и не соответствующее уже выражению (30) распределение освещенности представлено на рис. 8, *б*.

Следовательно, как и результаты экспериментальных исследований в [4], рис. 8 демонстрирует локализацию спекл-интерференционной картины, характеризующей продольное перемещение диффузно рассеивающей свет плоской поверхности, в определенной плоскости, находящейся в ближней зоне дифракции. Причем положение этой плоскости, связанное с величиной  $\tilde{l} = l_1^2 l_2^2 / 2L_p^2 R'$ , зависит от коэф-

фициента, определяющего масштаб Фурье-образа комплексной амплитуды пропускания (или отражения) рассеивателя в плоскости спеклограммы.

Как и при использовании отрицательной линзы с целью контроля продольного перемещения рассеивателя [4] при регистрации спекл-интерферограмм, когда запись спеклограмм выполняется с помощью положительных линз, имеет место параллакс интерференционных полос (рис. 9).

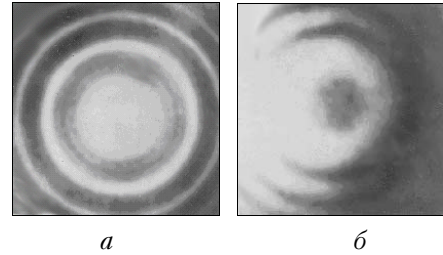


Рис. 9. Спекл-интерференционные картины, демонстрирующие параллакс интерференционных полос при несмещенном (*a*) и смещенном (*б*) положениях спеклограммы на стадии ее воспроизведения

Рис. 9, *a* соответствует вышеприведенной на рис. 8, *a* регистрации спекл-интерферограммы, а рис. 9, *б* – случаю смещения спеклограммы на 5,5 мм, при величине которого фаза интерференционной картины на оптической оси изменяется на  $\pi$ .

Таким образом, проведенный теоретический анализ и экспериментальные результаты показали следующее.

В случае спекл-интерференционного контроля поперечного перемещения диффузно рассеивающей свет плоской поверхности, когда с помощью положительной линзы в плоскости фотопластинки на стадии записи спеклограммы формируется квази-Фурье-образ комплексной амплитуды пропускания (или отражения) рассеивателя, интерференционная картина локализуется в Фурье-плоскости и для ее регистрации не требуется выполнения пространственной фильтрации дифракционного поля. При этом чувствительность спекл-интерферометра зависит и от величины, и от знака радиуса кривизны сферического волнового фронта когерентного излучения, используемого для освещения рассеивателя, а также от величины, определяющей масштаб Фурье-образа комплексной амплитуды пропускания (или отражения) рассеивателя. В частном случае, когда фотопластинка находится в задней фокальной плоскости линзы, чувствительность спекл-интерферометра не зависит от знака радиуса кривизны сферического волнового фронта.

Для обеспечения спекл-интерференционного контроля продольного перемещения диффузно рассеивающей свет плоской поверхности необходимо на стадии записи спеклограммы освещать рассеиватель когерентным излучением со сферическим волновым фронтом радиусом кривизны, величина которого удовлетворяет условию формирования в плоскости фотопластинки Фурье-образа (или квази-Фурье-образа) комплексной амплитуды пропускания (или

отражения) рассеивателя. При этом на стадии воспроизведения спеклограммы спекл-интерференционная картина локализуется в плоскости, находящейся в ближней зоне дифракции и для ее регистрации необходимо выполнение пространственной фильтрации дифракционного поля.

Кроме того, чувствительность спекл-интерферометра зависит от величины, определяющей масштаб в плоскости фотопластины Фурье-образа комплексной амплитуды пропускания (или отражения) рассеивателя. В частном случае, когда фотопластина находится в задней фокальной плоскости линзы, отсутствует неоднородное (изменяющееся по радиусу от оптической оси) смещение субъективных спеклов, соответствующих второй экспозиции, по отношению к идентичным спеклам первой экспозиции, и спекл-интерференционная картина не образуется.

1. Гусев В.Г. Формирование в диффузно рассеянных полях интерференционных картин при проведении пространственной фильтрации дифракционного поля двухэкспозиционных квази-Фурье и Фурье-голограмм. Часть II // Оптика атмосфер. и океана. 2006. Т. 19. № 7. С. 641–652.
2. Гудмен Д. Введение в Фурье-оптику. М.: Мир, 1970. 360 с.
3. Гусев В.Г. Формирование интерферограмм бокового сдвига в диффузно рассеянных полях при двухэкспо-

зиционной записи голограмм Фурье // Оптика атмосфер. и океана. 1992. Т. 5. № 2. С. 115–124.

4. Гусев В.Г. Формирование спекл-интерференционных картин, характеризующих поперечное или продольное перемещение диффузно рассеивающий свет поверхности. Ч. I // Оптика атмосфер. и океана. 2007. Т. 20. № 4. С. 362–377.
5. Гусев В.Г. Формирование голографических интерферограмм бокового сдвига в диффузно рассеянных полях для контроля телескопической оптической системы // Оптика атмосфер. 1991. Т. 4. № 5. С. 482–490.
6. Джоунс Р., Уайкс К. Голографическая и спекл-интерферометрия. М.: Мир, 1986. 320 с.
7. Гусев В.Г. Пространственная фильтрация интерферограмм бокового сдвига // Оптика и спектроскопия. 1993. Т. 74. Вып. 6. С. 1201–1206.
8. Гусев В.Г. Пространственная фильтрация голографических интерферограмм бокового сдвига // Оптика и спектроскопия. 1990. Т. 69. Вып. 5. С. 1125–1128.
9. Франсон М. Оптика спеклов. М.: Мир, 1980. 158 с.
10. Гусев В.Г. Формирование интерференционных картин при двухэкспозиционной записи квази-Фурье-голограмм и спеклограмм // Изв. вузов. Физ. 2006. № 2. С. 62–70.
11. Gover C.P. New Technique of Image Multiplexing Using Random Diffuser // J. Opt. Soc. Amer. 1972. V. 62. N 9. P. 1071–1077.
12. Кириллов Н.И. Высокора разрешающие фотоматериалы для голографии и процессы их обработки. М.: Наука, 1979. 125 с.

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

Analysis of sensitivity of the speckle interferometer to transversal or longitudinal displacements of plate surface diffusively scattering light is presented when a positive lens is used to record the speckle interferogram. 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-transfor function determinated complex amplitude the reflection or the transmission of the surface scattering light. The experimental results are in agreement with theoretical arguments.