

ПРОЯВЛЕНИЕ ПРОДОЛЬНОЙ ТОНКОЙ СТРУКТУРЫ СПЕКЛ-ПОЛЯ В ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОМ ЭКСПЕРИМЕНТЕ

И. С. Клименко, Т. В. Криво

Изучение структуры спекл-полей представляет значительный интерес в связи с широким распространением приложений оптики спеклов. Особенности спекл-полей, как и дислокации волнового фронта [1, 2], тонкая структура спеклов [3, 4] нередко проявляют себя при интерференции спекл-полей, существенным образом влияя на распределение видности и характер локализации интерференционных полос.

В работах [3-6] достаточно подробно исследовалась поперечная тонкая структура спеклов, во многом определяющая корреляционные свойства спекл-полей. Есть также все основания ожидать, что спеклы обладают и продольной тонкой структурой, т. е. характеризуются продольной автокорреляционной функцией, имеющей вторичные максимумы, относительная величина которых зависит от

выбора апертуры, формирующей спеклы. Между тем работа по обнаружению продольной тонкой структуры спекл-полей до настоящего времени не проводилась.

В настоящей работе исследуются эффекты, свидетельствующие о проявлении продольной тонкой структуры спекл-полей при их регистрации средствами спекл-интерферометрии.

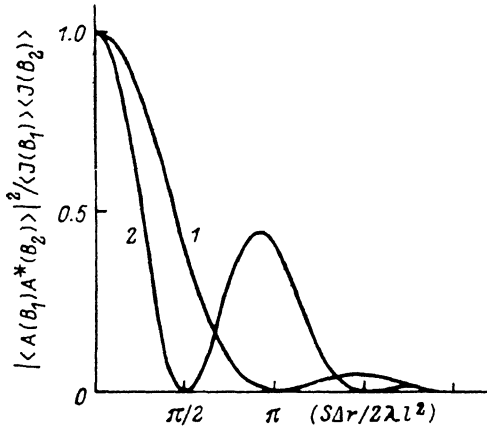


Рис. 1. Продольные автокорреляционные функции спекл-поля.

1 — для круглой и кольцевой апертур, 2 — для апертур в виде кольца с кругом и двух колец; S — эффективная площадь апертуры.

Эксперименты проводились с использованием при формировании спекл-полей радиально-симметричных апертур сложной формы, состоящих из двух колец или кольца и круга. Выбор таких апертур обеспечил наличие ярко выраженных вторичных максимумов интенсивности продольной автокорреляционной функции спекл-поля. Графики продольных автокорреляционных функций для различных радиально-симметричных апертур одинаковой площади приведены на рис. 1, откуда следует целесообразность использования выбранных апертур. В эксперименте диффузный рассеиватель, равномерно освещенный плоской когерентной волной, ограничивался апертурой в виде кольца с кругом. На расстоянии $l=100$ мм от диффузора регистрировалась серия двухэкспозиционных спеклограмм для различных пар сечений спекл-поля, сдвинутых в поперечном направлении на фиксированную величину $d=20$ мкм и в продольном на переменную величину g в интервале от 0 до 150 мкм с шагом 12.5 мкм. Полученные спеклограммы освещались нерасширенным лазерным пучком, соответствующие спекл-интерферограммы наблюдались в области дифракции Фраунгофера (на расстоянии $f=140$ мм от спеклограмм).

Продольное смещение объекта приводит, как известно, к дополнительному радиально-симметричному поперечному смещению спеклов или, что то же самое, к смещению максимума кросс-корреляционной функции, линейно возрастающему к периферии спеклограммы, а также к изменению ее характерного вида по отношению к виду автокорреляционной функции.

Для данных условий эксперимента были рассчитаны автокорреляционные и кросс-корреляционные функции зарегистрированных на спеклограмме интенсивностей.

Выражение для корреляционной функции интенсивностей зарегистрированных сечений спекл-поля получено в виде

$$\langle I_j(\xi_1, \eta_1) I_j(\xi_2, \eta_2) \rangle = C_j \times$$

$$\times \left\{ 1 + \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} |P(x, y)|^2 \exp \left[\frac{i2\pi}{\lambda l_j} (x\Delta\xi + y\Delta\eta) \right] dx dy}{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} |P(x, y)|^2 dx dy} \right\}, \quad (1)$$

где $j=1, 2$; $l_1=l$, $l_2=l-g$; x, y — координаты плоскости объекта, $\Delta\xi, \Delta\eta$ — параметры смещения спеклов в плоскости регистрации; C_j — постоянная, не зависящая от поперечных координат; $P(x, y)$ — функция пропускания апертуры.

Далее путем фурье-преобразования находилось распределение интенсивностей в плоскости наблюдения u, v и определялась видимость интерференционных полос. Выражение для видности интерференционных полос получено в виде

$$V(u, v) = \left| \frac{A}{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \left| P \left(x - \frac{l}{f} u, y - \frac{l}{f} v \right) \right|^2 |P(x, y)|^2 dx dy} \right|, \quad (2)$$

где A — в общем случае знакопеременная функция, которую можно представить в виде

$$A = |A| \exp(i\varphi), \quad \text{где } \varphi = \begin{cases} 0 & \text{при } A > 0, \\ \pi & \text{при } A < 0. \end{cases} \quad (3)$$

Функция φ имеет смысл аргумента комплексной степени пространственной когерентности интерферирующих спекл-полей. Существенно, что φ входит в аргумент косинусоидального множителя выражения для распределения интенсивности в плоскости наблюдения, который определяет геометрические параметры интерференционных полос. Для определенных значений продольного смещения φ может менять (с радиальной симметрией) свое значение на π , что должно приводить к смещению интерференционных полос на половину периода.

Функция видности $V=1$ при $g=0$. При $g \neq 0$ продольное смещение спеклов приводит к изменению вида кросс-корреляционной функции регистрируемых спекл-структур, что эквивалентно изменению формы соответствующих друг другу (идентичных) спеклов, и, следовательно, к изменению амплитудно-фазового распределения их фурье-спектров. Когерентное сложение вторичных спеклов, образующихся при дифракции света на сечениях смещенных спеклов, зарегистрированных спеклограммой, приведет к образованию интерференционной картины со сложной функцией видности, отличной от единицы.

Далее был проведен численный анализ выражений (1) и (2) с целью выявления закономерностей распределения видности интерференционных полос для выбранных параметров эксперимента. Радиусы окружностей элементов апертуры $P(x, y)$ имели значения $R_1=0$, $R_2=7.1$ мм, $R_3=10$ мм, $R_4=12.3$ мм.

На рис. 2 представлены графические результаты вычислений кросс-корреляционной функции, нормированной к ее максимальному значению (при $g=0, \Delta\xi=\Delta\eta=0$) для характерных величин продольного смещения g .

При $g=63$ мкм функция автокорреляции интенсивности спекл-поля обращается в нуль (первый минимум функции на рис. 1), однако корреляция между распределением интенсивности в соответствующих поперечных сечениях поля отлична от нуля и имеет вид, приведенный на рис. 2, а. Очевидны существенное изменение формы (смещение максимума) функции корреляции и падение ее максимального значения.

Смещение $g=114$ мкм соответствует координате второго максимума продольной функции автокорреляции интенсивности. Функция корреляции соответствующих сечений спекл-поля качественно вновь оказывается аналогичной первоначальной с точностью до величины и протяженности максимумов.

Изменение вида кросс-корреляционной функции относительно характерного вида функции автокорреляции соответствует изменению формы и размеров соответствующих спеклов во время второй экспозиции.

Результаты вычисления функции видности приведены на рис. 3. В отсутствие продольного смещения ($g=0$) теоретическое значение видности равно 1. При $g=63$ мкм видность дважды принимает нулевое значение. При переходе через точки нулевой видности фаза вид-

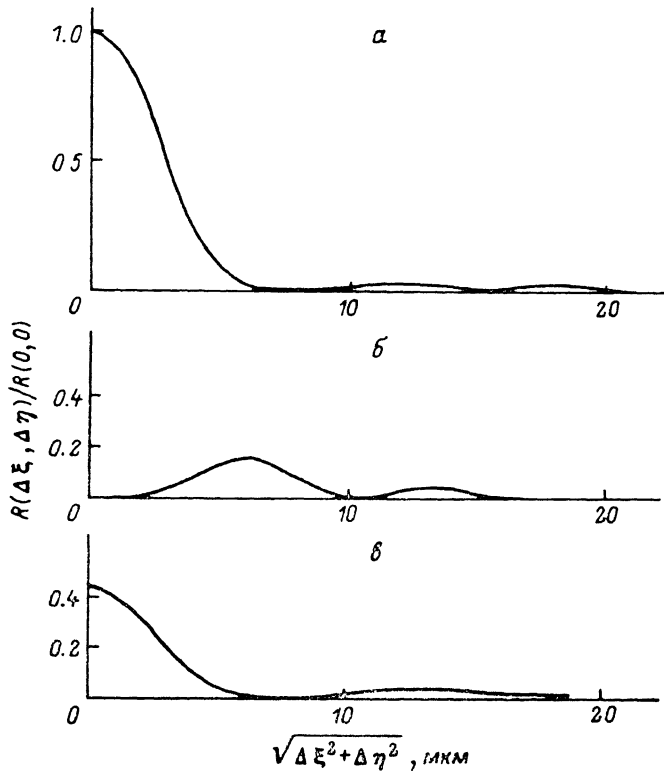


Рис. 2. Нормированные функции интенсивности двух поперечных сечений спекл-поля, сдвинутых в продольном направлении на расстояние g .

$a - 0$, $б - 63$, $в - 114$ мкм.

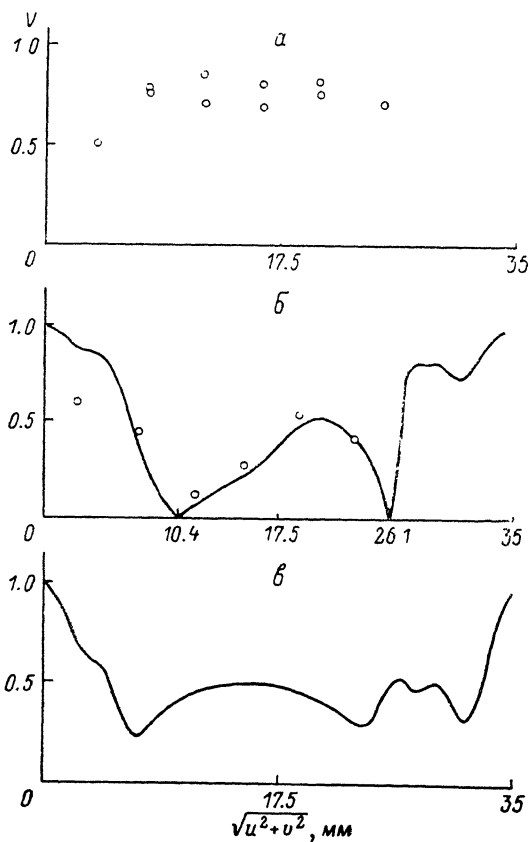


Рис. 3. Графики видности интерференционных полос для различных значений g .

$a - в$ — то же, что и на рис. 2.

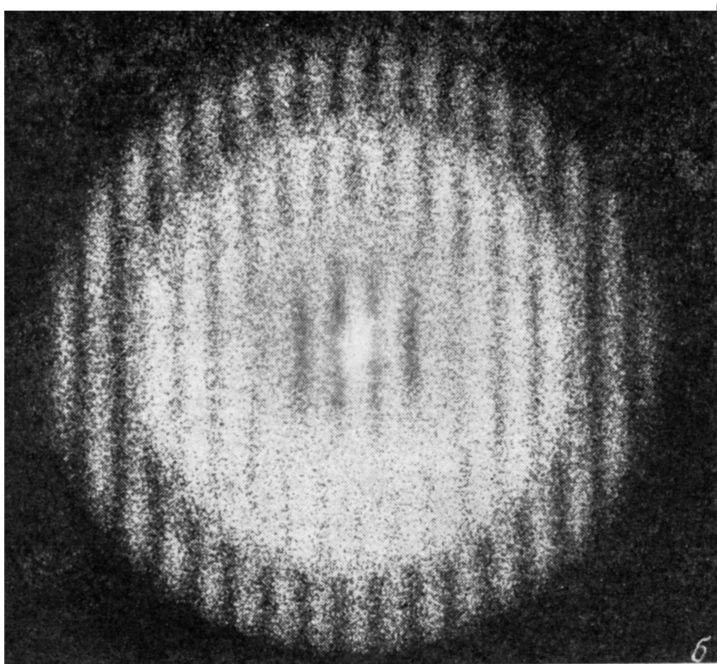
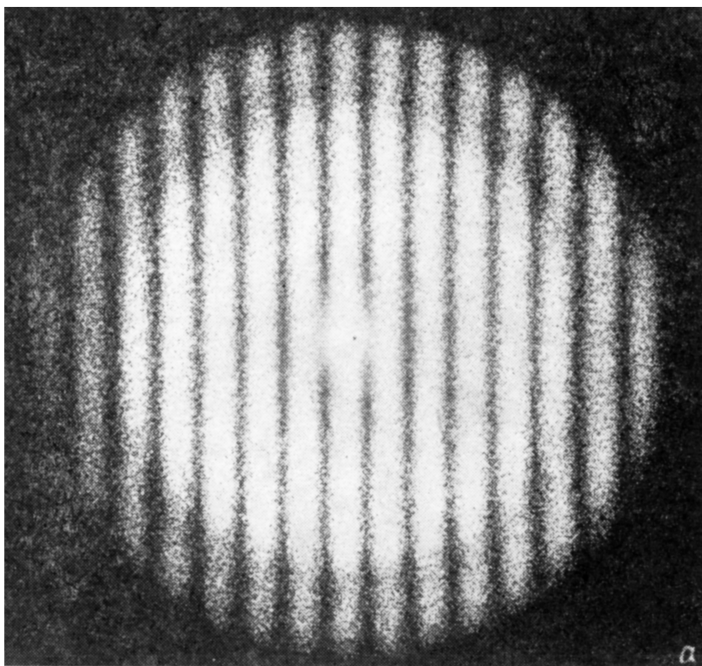


Рис. 4. Спекл-интерферограммы, полученные при различных значениях g .
 $a-b$ — то же, что и на рис. 2.

ности испытывает скачок на π . Дальнейшее увеличение g до величины 114 мкм приводит к однородному поведению фазы видности.

Результаты натурального эксперимента (снимки спекл-интерферограмм) приведены на рис. 4. Максимальная видность наблюдается при $g=0$. Значения видности в зависимости от координат дифракционного гало в плоскости наблюдения нанесены на теоретический график (рис. 3, a). Измерение видности проводилось по экспериментальным графикам рас-

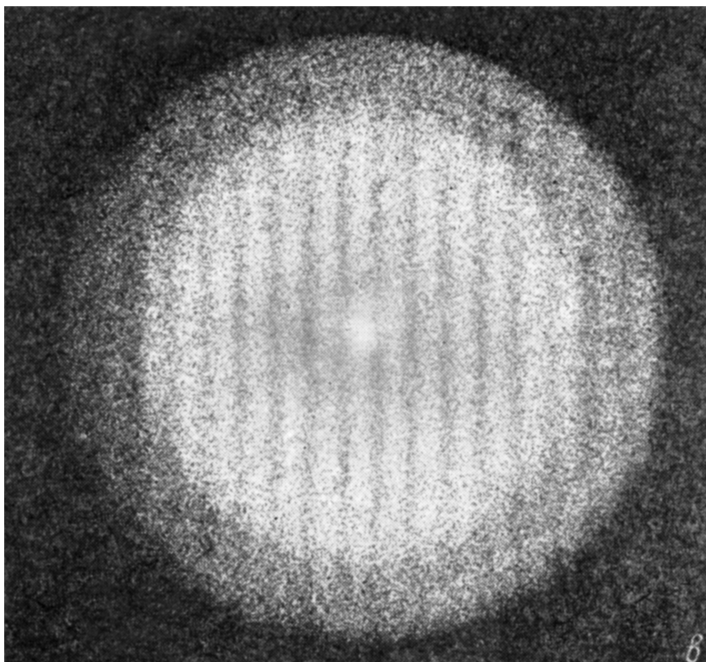


Рис. 4 (продолжение).

пределения интенсивности в интерференционной картине, полученным сканирующим фотодиодом с апертурой 1 мм. Падение видности к центру спеклограммы обусловлено фоновой засветкой от нерассеянного спеклограммой пучка.

Интерференционная картина при $g=63$ мкм (рис. 4, б) содержит два радиально-симметричных схода видности с обращением контраста полос. Экспериментальные значения нанесены на график (рис. 3, в) и согласуются с результатами вычислений. При $g=114$ мкм интерференционная картина (рис. 4, в) качественно аналогична первоначальной (рис. 4, а), что также согласуется с теорией.

Таким образом, результаты настоящей работы убедительно свидетельствуют о проявлении при интерференции спекл-полей продольной тонкой структуры спеклов. Наличие такой структуры необходимо учитывать, в частности, при измерении продольных смещений средствами спекл-интерферометрии. Кроме того, с наличием тонкой структуры спеклов можно естественным образом связывать практический смысл понятия продольной пространственной когерентности.

Авторы благодарят В. П. Рябухо за обсуждение.

Список литературы

- [1] Баранова Н. Б., Зельдович Б. Я. // ЖЭТФ. 1981. Т. 90. Вып. 5. С. 1789—1797.
- [2] Баранова Н. Б., Зельдович Б. Я., Мамаев А. В. и др. // ЖЭТФ. 1982. Т. 83. Вып. 5. С. 1702—1710.
- [3] Клименко И. С., Рябухо В. П., Федулеев Б. В. // Письма в ЖТФ. 1983. Т. 9. Вып. 22. С. 1381—1385.
- [4] Клименко И. С., Рябухо В. П., Федулеев Б. В. // ЖТФ. 1985. Т. 55. Вып. 7. С. 1338—1346.
- [5] Клименко И. С., Рябухо В. П., Федулеев Б. В. // ЖТФ. 1986. Т. 56. Вып. 9. С. 1749—1756.

Институт повышения квалификации
руководящих работников и специалистов
Москва

Поступило в Редакцию
18 июля 1989 г.