

07

© 1991 г.

ХАРАКТЕРИСТИКИ СПЕКЛ-ПОЛЕЙ, ОБРАЗУЮЩИХСЯ ПРИ РАССЕЯНИИ СФОКУСИРОВАННЫХ ЛАЗЕРНЫХ ПУЧКОВ

С. С. Ульянов

Проведен анализ критериев подобия, которые отражают основные особенности процесса рассеяния сфокусированных лазерных пучков. Приведены результаты численного решения задачи дифракции сфокусированных лазерных пучков с малыми размерами перетяжки на неподвижной шероховатой поверхности.

Выявлены основные закономерности пространственного формирования спекл-структур с малой амплитудной модуляцией. Установлена зависимость параметров спекл-поля от параметров рассеивающей поверхности. Проведены экспериментальные исследования высокочастотной пространственной структуры спекл-поля. Полученные результаты могут быть положены в основу метода исследования высокочастотной пространственной структуры шероховатой поверхности.

При дифракции на изотропной шероховатой поверхности лазерных пучков с размерами перетяжки, существенно превышающими размеры неоднородностей поверхности и длину волны света λ , рассеянное поле образует развитую спекл-структуру, статистические свойства которой изучены наиболее полно (см., например, [1]). При этом статистические свойства рассеивающей поверхности однозначно не связаны со статистическими характеристиками спекл-поля и определяются в основном размерами освещенной области поверхности и расстоянием от плоскости наблюдения до рассеивающей поверхности. Зависимость параметров спекл-поля от свойств рассеивающей поверхности начинает проявляться, если размеры перетяжки сфокусированного на шероховатую поверхность лазерного пучка становятся соизмеримы с λ . Образующееся при этом спекл-поле статистически неоднородно и характеризуется малой глубиной амплитудной модуляции. Важно подчеркнуть, что если размеры перетяжки сравнимы с длиной корреляции профиля поверхности, то, как показывают экспериментальные исследования, в самих спеклах появляется высокочастотная амплитудная модуляция случайного характера (внутриспекловая модуляция), что нехарактерно для световых полей с развитой спекл-структурой. Настоящая работа посвящена анализу особенностей формирования световых полей с малой спекл-модуляцией, которые образуются при рассеянии сфокусированных на шероховатую поверхность лазерных пучков.

Рассмотрим процесс дифракции гауссова пучка при нормальном падении на изотропную шероховатую идеально отражающую поверхность, полагая, что плоскость перетяжки пучка совпадает с подстилающей плоскостью. Процесс рассеяния определяется заданием безразмерных параметров

$$L_d = \frac{l_c}{\phi} = idem, \quad (1)$$

$$D = \frac{\phi}{z} = idem, \quad (2)$$

$$C = \frac{r}{l_c} = idem, \quad (3)$$

$$R = \frac{r}{\lambda} = idem, \quad (4)$$

где l_c — длина корреляции профиля поверхности, ϕ — диаметр перетяжки пучка, z — расстояние от рассеивающей поверхности до плоскости наблюдения спекл-поля, r — максимум отклонения точек поверхности от подстилающей плоскости, λ — длина волны света.

Предположим, что размеры перетяжки пучка сравнимы с λ . Комплексную амплитуду рассеянного поля в приближении однократного рассеяния можно записать в виде [2]

$$U_R(x, y, z) = -i \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} U_0[-1 + 4\pi i \xi(x_1, y_1)] \times \\ \times \exp\left(-\frac{x_1^2 + y_1^2}{W_0^2}\right) \frac{\exp(2\pi i R)}{R} \frac{z}{R} dx_1 dy_1, \quad (5)$$

где U_0 — максимум поля на оси перетяжки пучка; W_0 — радиус перетяжки; (x_1, y_1) — подстилающая плоскость рассеивающей поверхности; (x, y) — плоскость наблюдения спекл-поля; $\xi(x_1, y_1)$ — величина отклонения рассеивающей поверхности от подстилающей плоскости; все линейные размеры нормированы на λ .

Представим формально $\xi(x_1, y_1) = H(x_1, y_1) + h(x_1, y_1)$, где $h(x_1, y_1)$ — составляющая профиля с такой длиной корреляции, что величина параметра $L_d = l_h/w$ (1) составляет порядка 0.05 (что соответствует условиям образования развитых спекл-структур), $H(x_1, y_1)$ — низкочастотная составляющая процесса $\xi(x_1, y_1)$. Тогда, поле U_R можно записать в виде

$$U_R(x, y, z) = U_{idem}(x, y, z) + U_v(x, y, z),$$

где U_{idem} — поле, подобное по поперечным масштабам развитому спекл-полю (для которого выполняется условие (2)); U_v — его низкочастотное возмущение, вызванное «линзовым» действием микродефектов поверхности.

Заметим, что условие (3) также примерно выполняется для процесса $h(x_1, y_1)$, поскольку процессы, описывающие профиль поверхности, обладают равномерно спадающим спектром пространственных частот. Таким образом, при уменьшении размеров перетяжки пучка, падающего на поверхность, не может быть выполнено только условие (1) (параметр R существенно больше для развитых спекл-полей).

Поскольку возмущения амплитуды рассеянного поля нелинейно связаны с величиной возмущений рассеивающей поверхности [2], то с увеличением R быстро обогащается спектр пространственных частот спекл-поля, по этой причине при значениях $R > 1$ по параметрам спекл-поля уже нельзя судить о статистических свойствах рассеивающей поверхности. При значениях $R \ll 1$ эта величина, по-видимому, в первую очередь влияет на контраст спекл-поля и такие поля можно рассматривать как подобные по поперечным масштабам с полями, образующимися при рассеянии сфокусированных пучков при выполнении условий (1)–(3).

Ниже приводятся результаты численного решения задачи дифракции гауссовых пучков с малыми параметрами перетяжки. Решение проводилось методами функций Грина [3] и малых возмущений [2] в приближениях скалярной теории [4] и однократного рассеяния [2]. Для простоты интерпретации полученных результатов введем новые безразмерные параметры

$$L_c = \frac{l_c}{\lambda}, \quad W = \frac{w}{\lambda}, \quad Z = \frac{z}{\lambda}, \quad AMP = \frac{A}{\lambda},$$

где A — модуль наибольшего полного отклонения поверхности от подстилающей плоскости на освещенном элементе.

На рис. 1 приведена зависимость нормированного среднеквадратичного возмущения амплитуды рассеянного поля от невозмущенного значения от ве-

личины расстояния $Z=z/\lambda$ между плоскостью наблюдения спекл-поля и рассеивающей поверхностью при различных значениях параметра AMP.

Анализ кривых показывает, что в пространстве рассеяния можно выделить три характерные области. При значении параметра $Z < 75$ (первая область) спекл-модуляция носит чисто фазовый характер. В интервале значений параметра $Z \in [75, 1500]$ лежит область формирования спекл-поля (область наибольшей крутизны функции $S(Z)$). В этой области фазовая модуляция спекл-поля переходит в амплитудно-фазовую. При $Z > 1500$ значение S не меняется, достигнув своего предельного значения. В этой области рассеянная волна распространяется в форме парциальных расходящихся световых пучков, что соответствует результатам эксперимента. Размеры области формирования

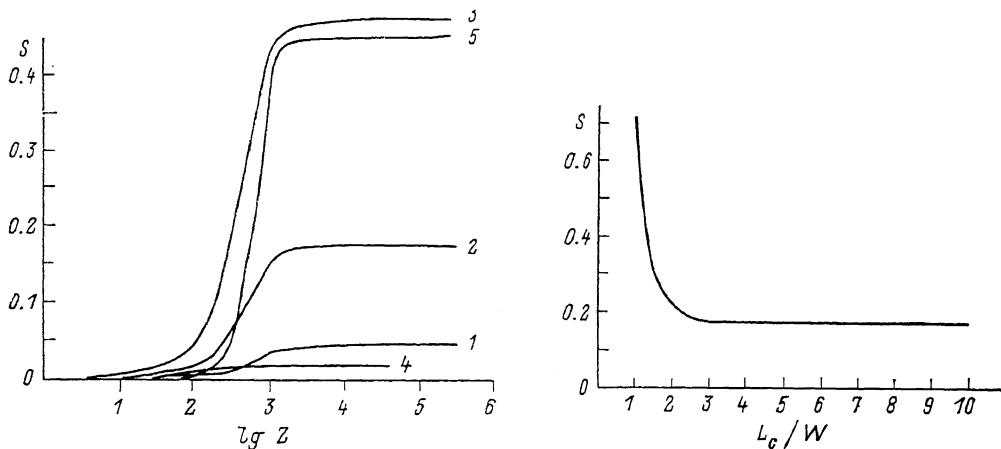


Рис. 1. Зависимость средневладратичного возмущения S от расстояния между плоскостью наблюдения и рассеивающей поверхностью.

AMP: 1 — 0.01; 2, 4, 5 — 0.03; 3 — 0.05; W: 1—3 — 7.5, 4 — 3.75, 5 — 11.25.

Рис. 2. Зависимость средневладратичного возмущения S от отношения длины корреляции к радиусу перетяжки.

$W=7.5$, $Z=375\ 000$, AMP=0.03.

спекл-поля и ее положение в пространстве не зависят от параметра AMP (характеризующего величину шероховатости гладких поверхностей), а зависят только от размеров перетяжки лазерного пучка, сфокусированного на поверхность. При этом начало области формирования спекл-поля находится на расстоянии $\sim 10W$ от рассеивающей поверхности, а ее протяженность составляет $\sim 200W$.

На рис. 2 приведена зависимость средневладратичного возмущения S от отношения нормированной длины корреляции профиля к нормированному радиусу перетяжки. При $L_c/W > 3$ значение S изменяется не более чем на 3 %, а при значении $L_c \sim W$ величина S изменяется как $(L_c/W)^{-2}$ (при значениях W , сопоставимых с 1).

На рис. 3 приведена зависимость S от степени шероховатости поверхности (для $L_c/W=1$ при $W=7.5$), зависимость S от параметра AMP близка к квадратичной (рис. 3, кривая 4). Малые значения L_c характерны для гладких поверхностей, чем меньше шероховатость поверхности, тем меньше значение L_c [5, 6]. Таким образом, параметр AMP должен уменьшаться быстрее, чем L_c , при увеличении чистоты обработки поверхности, поскольку при дифракции света на более гладких поверхностях в эксперименте наблюдается уменьшение спекл-модуляции рассеянного поля.

Зависимость S от величины шероховатости поверхности (параметра AMP) близка к квадратичной, ее крутизна определяется в основном величиной перетяжки лазерного пучка (рис. 3, кривые 1—3). При значениях $L_c \sim W$ зависимость S (AMP) имеет большую крутизну, хотя при значениях параметра AMP < 0.01 (при одинаковых значениях W) (рис. 3, кривые 2, 3) величина S мало

зависит от величины L_c . При значениях параметра $AMP > 0.1$ глубина спекл-модуляции поля значительно увеличивается (даже в центральной области дифракционной картины) (рис. 5) настолько, что разрушается зеркальный компонент.

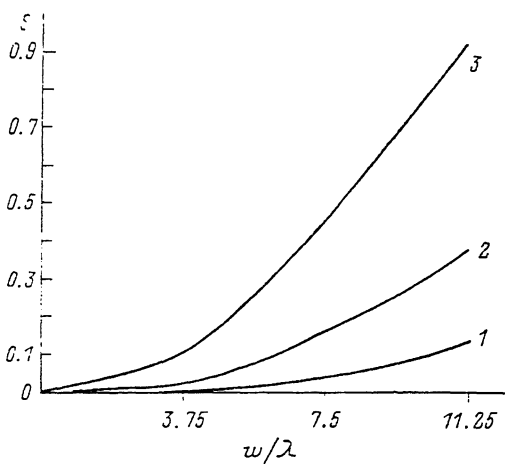
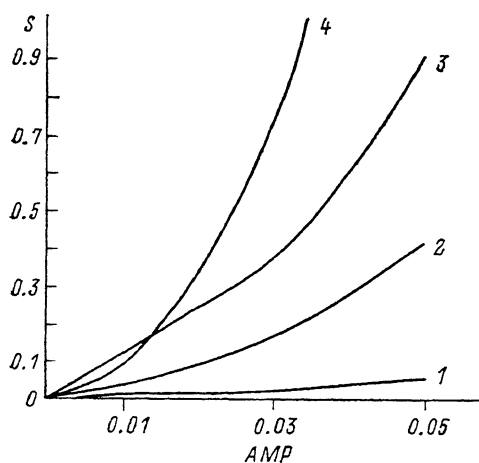


Рис. 3. Зависимость среднеквадратичного возмущения S от степени шероховатости рассеивающей поверхности.

$Z=375.000$; W : 1 — 3.75; 2, 4 — 7.5; 3 — 11.25; L_c : 1—3 — 45, 4 — 7.5.

Рис. 4. Зависимость среднеквадратичного возмущения S от нормированного радиуса перетяжки W .

$Z=375\ 000$, $L_c=45$; AMP : 1 — 0.01, 2 — 0.03, 3 — 0.05.

В исследуемой области параметров величина среднеквадратичного отклонения S существенным образом зависит от величины W , эта зависимость близка к квадратичной при любых значениях параметра AMP , меньших 0.05 (рис. 4).

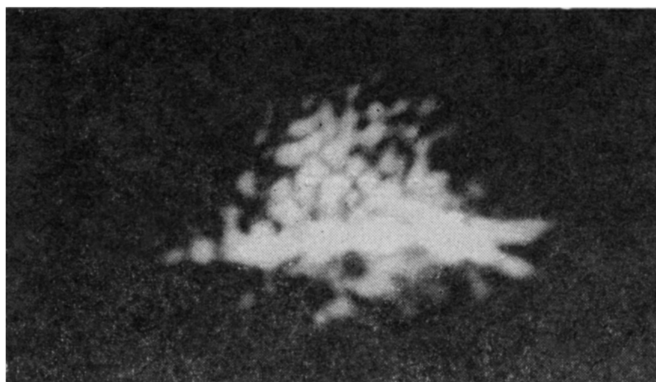


Рис. 5. Фотография спекл-поля, образующегося при рассеянии сфокусированного лазерного пучка.

$W=11.25$, $AMP > 0.1$.

При рассеянии сфокусированных лазерных пучков с $W \approx 11.25$ на поверхности с $R \approx 0.1$ в эксперименте наблюдается высокочастотная амплитудная модуляция спеклов (модуляция в области зеркального компонента отсутствует).

На установке, схема которой приведена на рис. 6, были проведены экспериментальные исследования высокочастотной спектральной составляющей интенсивности спекл-поля. Луч лазера 1 ($\lambda=0.63$ мкм) фокусируется на исследуемую поверхность 3 с помощью микрообъектива 2, рассеянное поле попадает

на вращающемся с постоянной угловой скоростью зеркало 4, обратная сторона которого покрыта поглощающим свет слоем, и регистрируется фотоприемником 6 через диафрагму 5, диаметр которой мал по сравнению с размерами спеклов. Сигнал с фотоприемника поступает на анализатор спектра 7 СК4-72/2.

Исследовался процесс рассеяния сфокусированных лазерных пучков с различными размерами перетяжки ($W_1=12$, $W_2=20$, $W_3=40$) на образцах с различными степенями шероховатости ($R_1 \approx 0.01$, $R_2 \approx 0.1$, $R_3 \approx 1$). На частоте f_{20} , соответствующей 20-й гармонике фундаментальной частоты (частоты вращения зеркала) выходного сигнала, проводилось дополнительное сглаживание спектра (6) с помощью прямоугольного спектрального окна шириной в одну октаву для устранения ложных выбросов спектра в низкочастотной области. Спектр мощности выходного сигнала нормировался на квадрат амплитуды спектральной составляющей $A^2(f_{20})$, таким образом, устраняются различия для высокочастотных составляющих спектров сигналов от различных поверхностей, связанные с различием коэффициентов отражения разных образцов.

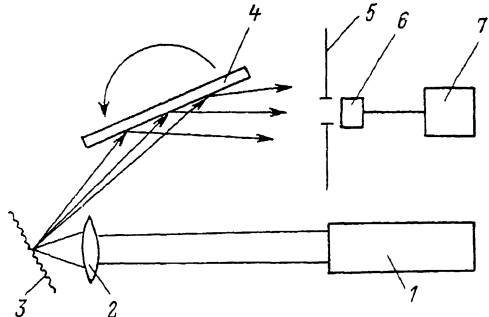


Рис. 6. Схема экспериментальной установки.

Экспериментальные исследования показывают, что при рассеянии световых пучков ширина полосы частот и энергия сигнала с фотоприемника в частотном диапазоне, лежащем выше частоты f_{20} , не увеличивается по сравнению с невозмущенным пучком с тем же размером перетяжки (при различных значениях параметра W и различных степенях шероховатости поверхности R).

Таким образом, при увеличении спекл-модуляции световой волны, рассеянной на шероховатой поверхности, спектр пространственных частот спекл-поля расширяется при увеличении степени шероховатости рассеивающей поверхности и размеров перетяжки, но не имеет высокочастотных всплесков и не содержит длин волн с периодом, меньшим $1/20$ диаметра невозмущенного пучка в области регистрации спекл-поля (для значений параметра $W < 40$ и $AMP < 1$); при этом максимум спектральной функции не смещается из окрестности нулевой частоты.

Выявленные в результате экспериментального исследования и численного анализа процессов дифракции сфокусированных лазерных пучков на гладких поверхностях закономерности позволяют судить по глубине амплитудной модуляции спекл-поля о тонкой высокочастотной пространственной структуре рассеивающей поверхности.

Автор выражает признательность В. П. Рябухо за обсуждение результатов работы.

Список литературы

- [1] Очоа Е., Goodman J. W. // J. Opt. Soc. Am. 1983. Vol. 73. N 7. P. 943—949.
- [2] Рытов С. М., Кравцов Ю. А., Татарский В. Н. Введение в статистическую радиофизику. Ч. II. М.: Наука, 1978. 463 с.
- [3] Колтон Д., Кресс Р. Методы интегральных уравнений в теории рассеяния. М.: Мир, 1987. 311 с.
- [4] Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1973. 718 с.
- [5] Топорев А. С. Оптика шероховатой поверхности. Л.: Машиностроение, 1988. 191 с.
- [6] Дженкинс Г., Ваттс Д. Спектральный анализ и его приложения. Вып. 1. М.: Мир, 1971. 316 с.

Институт машиноведения
им. А. А. Благонравова АН СССР
Саратов

Поступило в Редакцию
10 апреля 1990 г.