

## КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

## ОПТИКА И СПЕКТРОСКОПИЯ

УДК 535.41

## КЛАСТЕРНЫЕ СПЕКЛ-СТРУКТУРЫ И ИНФОРМАЦИОННАЯ ДИАГРАММА ГАБОРА

Ю. В. Васильев, А. В. Козарь, Е. Ф. Курицына, А. Е. Лукьянов

(кафедра общей физики, кафедра радиофизики, кафедра физической электроники)

**Экспериментально обнаружено возникновение кластерных спекл-структур при отражательной дифракции гауссова пучка когерентного излучения, освещающего анизотропно шероховатую поверхность узкой металлической полоски. На основе информационной трактовки Габова дифракционных явлений в оптике объяснена физическая природа кластерного строения спеклов.**

Известно [1], что анизотропная, сильно шероховатая поверхность узкой металлической полоски рассеивает освещающий пучок лазерного излучения необычным образом. Обнаружены различные аномалии в характере обратного дифракционного рассеяния излучения, но физическая природа аномалий не установлена. Цель настоящей работы — исследовать детали строения ярких, структурированных, пятнистых дифракционных картин (спекл-структур), которые возникают на удаленном экране при освещении анизотропно шероховатой металлической полоски когерентным излучением — гауссовым пучком с широкой или узкой апертурой, и выяснить их природу.

Принципиальная оптическая схема экспериментов на голографической измерительной установке УИГ-22М показана на рис. 1.

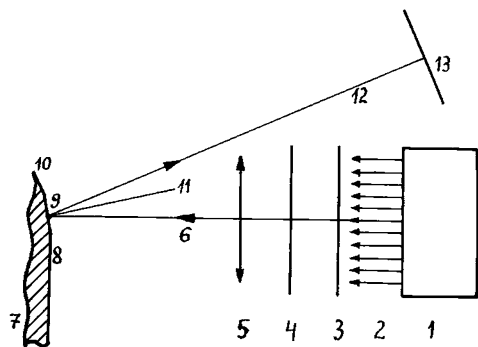


Рис. 1. Принципиальная оптическая схема эксперимента: 1 — лазер, 2 — лазерный пучок, 3 — оптический затвор, 4 — ослабитель лазерного пучка, 5 — тонкая сферическая линза, 6 — оптическая ось гауссова пучка излучения, 7 — фрагмент поперечного сечения металлической пластины лезвия при широкой апертуре гауссова пучка излучения, 8 — плоскость освещаемой поверхности пластины лезвия при широкой апертуре гауссова пучка излучения, 9 и 10 — плоскости первой и второй граней режущей кромки лезвия с углом наклона около  $5^\circ$  и  $7^\circ$  к плоскости пластины лезвия соответственно, 11 — нормаль к плоскости первой грани, 12 — ось конуса дифрагированного излучения от первой грани, 13 — фотографическая рамка голографической установки

Аргоновый лазер типа ЛГН-503 генерирует гауссов пучок когерентного излучения: длина волны  $\lambda = 514.5$  нм, пространственная мода пучка  $TEM_{00}$ , эффективный диаметр  $D = 2.5$  мм. В опыте без использования линзы лазерный пучок освещает узкую металлическую полоску — первую грань режущей кромки плоского лезвия безопасной бритвы. Длина вертикально установленной грани 37 мм, средняя ширина  $b \approx 0.3$  мм ( $b \ll D$ ). В опыте с использованием линзы (фокусное расстояние  $f = 42$  см) первая грань освещается гауссовым пучком с малым эффективным диаметром  $d$  [2].

При установке лезвия за фокальной плоскостью линзы размер освещенного малого пятна на поверхности грани увеличивался начиная с минимального значения  $d \approx 0.05$  мм, но при этом всегда было выполнено условие  $d < b$ . В опытах ось освещающего пучка была перпендикулярна плоскости пластины лезвия и составляла угол около  $5^\circ$  с нормалью к плоскости первой грани.

Поверхность первой грани анизотропно шероховатая из-за большого количества бороздок, которые возникают в процессе изготовления бритвы (при заточке края лезвия абразивным инструментом). Бороздки пересекают грань под почти прямым углом к длинной стороне грани. Расстояние между бороздками, их глубина и ширина изменяются нерегулярно. Поэтому на поверхности грани нет строгой трансляционной периодичности. Наблюдения в растровом электронном микроскопе JSM-U3 показывают, что на поверхности грани помимо бороздок имеется много разнообразных по форме и величине, хаотически расположенных, локальных микродефектов. Пример анизотропного, сложно-шероховатого состояния поверхности режущей кромки лезвия приведен в работе [3] (рис. 2).

При лазерном освещении первая грань режущей кромки лезвия ведет себя как узкая, хао-

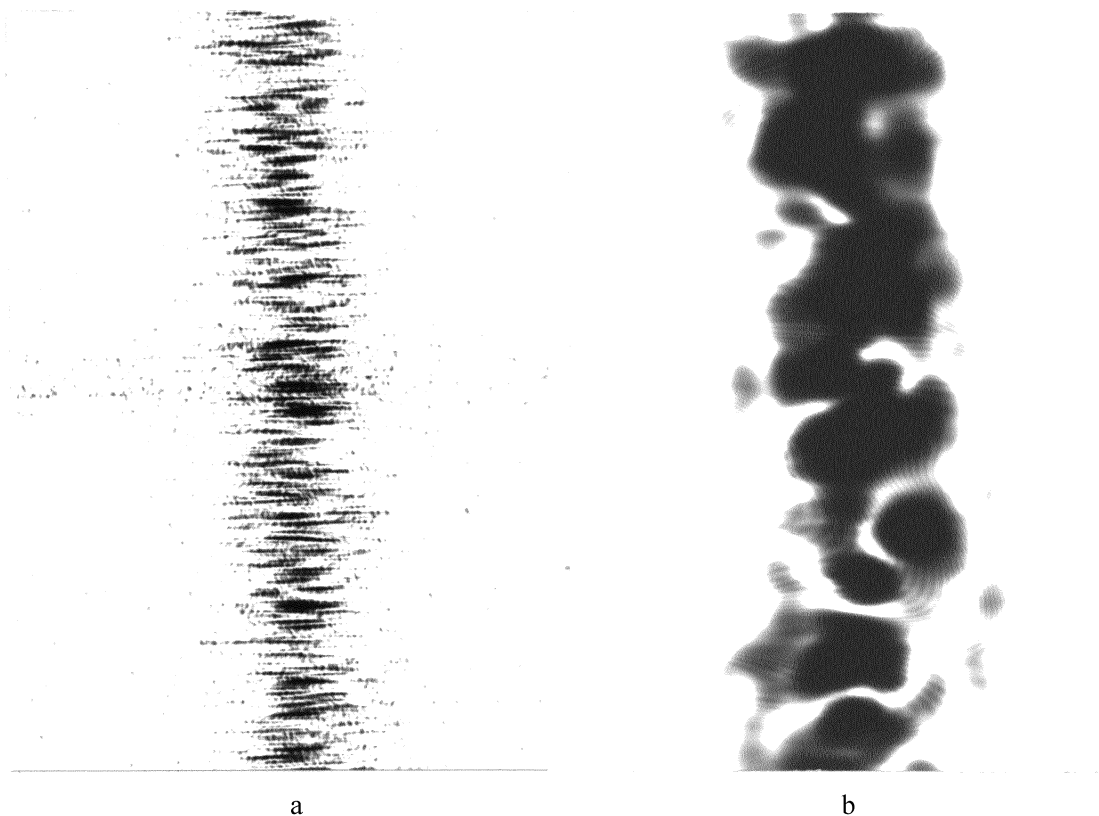


Рис. 2. Спекл-структура при освещении первой грани режущей кромки лезвия широкоапертурным (а) и сфокусированным, узкоапертурным (б) гауссовым пучком когерентного излучения (негативное изображение)

тическая, отражательная дифракционная решетка плохого качества. Освещенный участок поверхности грани служит локальной дифракционной решеткой. В опыте с широким несфокусированным пучком такая решетка имеет форму сильно вытянутого прямоугольника с эффективной длиной  $\xi = D$  и шириной  $\eta = b$  ( $\xi \gg \eta$ ). В опыте с фокусированным пучком освещенная решетка имеет почти круглую форму с центром на длинной оси первой грани ( $\xi \approx \eta \approx d < b$ ).

Регистрация дифрагированного излучения производится на расстоянии  $L = 2$  м от лезвия на плоском листе фотобумаги в фотографической рамке голографической установки с входным окном  $9 \times 12$  см (длинная сторона окна вертикальна).

Дифрагированное излучение формирует вертикальную полосу изображения шириной около 3 см (спекл-структуру). Оптический затвор и ослабитель лазерного излучения позволяют подобрать в опытах экспозицию, которая обеспечивает регистрацию на фотобумаге мелких деталей спекл-структуры. Типичные примеры спекл-структур в негативном изображении показаны на рис. 2, а (при широкоапертурном освещении грани) и на рис. 2, б (узкоапертурное освещение).

Экспериментально установлено, что при любой апертуре освещающего пучка возникают спекл-структуры с кластерным строением спеклов.

Визуально наблюдаемые на удаленном экране крупные пятна дифракционной картины (спеклы) представляют собой тесное скопление более мелких однотипных пятнышек. Типичный размер мелких деталей любого крупного спекла определяется характерным размером апертуры освещающего пучка. Так, горизонтальные анизомерные спеклы на рис. 2, а не являются сплошными узкими полосками — это линейные цепочки из отдельных весьма мелких круглых пятнышек с характерным размером  $l \sim \lambda L/D$ . Число пятнышек в цепочках различное — от 3 до 20. Средняя длина цепочек  $\Delta x$  и их ширина  $\Delta y$  по порядку величины совпадают со значениями, рассчитанными согласно дифракционной теории оптики спеклов [4, 5] в случае рассеяния когерентного излучения площадкой с изотропно шероховатой поверхностью (длина  $\xi$ , ширина  $\eta$ ):  $\Delta x \sim \lambda L/\eta$ ,  $\Delta y \sim \lambda L/\xi$ . Результаты опытов убеждают, что анизомерные спеклы на рис. 2, а — это линейные кластеры из стандартных мелких пятнышек. Поэтому можно ввести термин «кластерные спекл-структуры».

Кластерное строение крупных, амeboподобных по форме спеклов на рис. 2, б хорошо видно благодаря большому характерному размеру  $l$  пятнышек в двумерных случайных цепочках, когда апертура освещающего гауссова пучка весьма мала ( $l \sim \lambda L/d$ ,  $d \ll D$ ).

Экспериментальные данные позволяют сделать вывод, что причина образования кластерных спекл-структур имеет информационную природу по Габору [6]. Апертура освещающего пучка определяет характер разбиения на дискретные информационные ячейки Габора всего доступного пространства волновых векторов  $\mathbf{k}$  при дифракционном рассеянии излучения [7, 8].

В случае освещения гауссовым пучком когерентного излучения анизотропно шероховатой, слегка изогнутой в поперечном направлении поверхности первой грани режущей кромки лезвия на удаленном экране (листе фотобумаги) возникает соответствующая двумерная информационная диаграмма Габора. Узлы решетки диаграммы Габора отвечают разрешенным направлениям дифракции на плоскости проекций  $k_x, k_y$  волнового вектора рассеянного излучения.

Апертура освещающего пучка определяет дискретизацию проекций  $k_x, k_y$  с шагом неопределенности  $\Delta k \sim 2\pi/D$  в случае широкоапертурного или  $\Delta k \sim 2\pi/d$  в случае узкоапертурного гауссова пучка. Любая последующая дополнительная пространственная модуляция излучения сказывается только на заполнении сформированных информационных ячеек Габора в соответствии с локальным спектром шероховатой поверхности. При этом происходит формирование уже более крупномасштабных образований на информационной диаграмме Габора. Например, такие образования воспринимаются на удаленном листе фотобумаги как анизомерные (рис. 2, а) или амебоподобные (рис. 2, б) спеклы.

Фактически двумерный пространственный спектр освещенного участка шероховатой поверхности — неидеальной локальной дифракционной решетки — определяет процесс дополнительной модуляции излучения и возникновения в результате этого некоторой конкретной мозаичной картины на плоском листе фотобумаги. Мозаичная картина при соответствующей регистрации рассеянного излучения визуализируется как кластерная спекл-структура.

#### Литература

1. Васильев Ю.В., Козарь А.В., Курицына Е.Ф., Лукьянов А.Е. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2000. № 5. С. 59 (Moscow University Phys. Bull. 2000. No. 5. P. 72).
2. Ахманов С.А., Никитин С.Ю. Физическая оптика. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1998.
3. Васильев Ю.В., Козарь А.В., Курицына Е.Ф., Лукьянов А.Е. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 1999. № 3. С. 71 (Moscow University Phys. Bull. 1999. No. 3. P. 94).
4. Франсон М. Оптика спеклов. М.: Мир, 1980.
5. Petzing J.N., Tyrer J.R. // J. Strain Anal. Eng. Des. 1998. **33**, No. 2. P. 153.
6. Gabor D. // Progr. in Optics. 1961. **1**. P. 109.
7. Bastiaans M.J. // Advanced Topics in Shannon Sampling and Interpolation Theory / Ed. R.J. Marks II. N.Y.: Springer-Verlag, 1993. P. 1.
8. Васильев Ю.В., Курицына Е.Ф., Лукьянов А.Е. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 1997. № 4. С. 59 (Moscow University Phys. Bull. 1997. No. 4. P. 85).

Поступила в редакцию  
09.02.01