

Измерение морфологических форм поляризационных сингулярностей и их статистических весов в оптических векторных полях

В. Г. Денисенко, Р. И. Егоров, М. С. Соскин¹⁾

Институт физики НАН Украины, 03028 Киев, Украина

Поступила в редакцию 18 февраля 2004 г.

После переработки 17 мая 2004 г.

С помощью разработанного метода в оптике на примере эллиптически поляризованных полей экспериментально измерены все три возможных морфологических формы в окрестности точек с круговой поляризацией и их статистические веса в естественных спекл-полях.

PACS: 02.40.–k, 42.25.Ja, 42.30.Ms

В настоящее время особый интерес в поляризационной оптике представляют исследования структуры неоднородно поляризованных световых полей. Неоднородности распределения поляризации конкретного светового поля могут служить, например, критерием обнаружения и описания особенностей структуры породившей его среды.

В общем случае световое поле после деполяризующей среды является эллиптически поляризованным. Однако из-за неоднородностей среды в поперечном сечении пучка, наряду с эллиптической, возникают точки с циркулярной (С-точки) и линейной поляризациями. Состояние поляризации в любой точке поля может быть полностью описано углом ориентации эллипса и его эллиптичностью (с учетом направления вращения). С-точки при подобном описании являются вырожденными (сингулярными [1]) по азимуту.

Детальный теоретический анализ оптического поля с системой С-точек проведен Фройндом в [2], полученные им выводы были экспериментально подтверждены в [1, 3].

Предметом настоящей работы является экспериментальное исследование влияния С-точек на поляризационную структуру поля в их ближайшей окрестности. Теоретические исследования данной проблемы были проведены Деннисом [4].

Самой простой визуальной формой распределения поляризационного азимута по сечению пучка является поверхность в декартовых координатах. Координаты X и Y соответствуют положению точки в сечении пучка, а Z – величине азимутального угла. Окрестность С-точки в таком представлении является витком спирали с направлением восхождения,

определяющим знак топологического индекса С-точки.

Топологический индекс (I_c) точки равен углу поворота (в единицах 2π) азимута большой оси окружающих эллипсов при полном обходе этой точки. Для всех “обычных” точек поля $I_c = 0$, только для С-точек $I_c(C^+) = +1/2$, $I_c(C^-) = -1/2$ и азимут поляризации изменяется на π при обходе сингулярности против или по часовой стрелке, соответственно.

В работе Денниса приведены аналитические выражения для определения формы окрестности сингулярной точки, из чего следует, что при обходе сингулярности азимут меняется неравномерно (зависимость азимута от полярного угла имеет экстремумы). Возможны всего три тенденции его поведения [4, 5], определяющие морфологию поля вокруг С-точек: star (S), lemon (L), monstar (M) с индексами:

$$I_c(C^-, \text{star}) = -1/2,$$

$$I_c(C^+, \text{lemon}) = I_c(C^+, \text{monstar}) = 1/2.$$

Данные морфологические формы отличаются числом и расположением прямых линий, на которых азимутальный угол φ равен полярному углу θ относительно

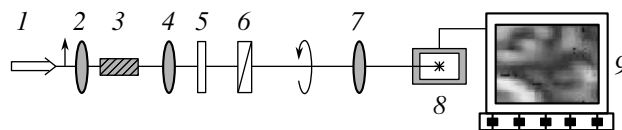


Рис.1. Схема сингулярного стокс-поляриметра: 1 – He-лазер ($\lambda = 633$ нм), 2 – линза, фокусирующая пучок на исследуемую среду 3, 4 – коллимирующая линза, 5 – фазовая ($\lambda/4$) пластинка, 6 – поляризатор, 7 – масштабная линза, 8 – CCD-камера, 9 – PC

¹⁾e-mail: marats@vortex.kiev.ua

| Morphological forms | Theoretical model | Photonic-crystal fiber | Two-side scattering polymer film | Cut of human skin |
|---------------------|-------------------|------------------------|----------------------------------|-------------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| S $I_C = -1/2$ | | | | |
| L $I_C = 1/2$ | | | | |
| M $I_C = 1/2$ | | | | |

Морфологические формы окрестности С-точек. Колонка 2 содержит результаты моделирования [14–16] (сплошные (пунктирные) линии изображают реализацию морфологической формы для больших (малых) осей эллипса поляризации). В колонках 3, 4, 5 представлены обработанные результаты измерений для трех морфологических форм, полученных на фотон-кристаллическом волокне, рассеивающей полимерной пленке и срезе человеческой кожи. Рисунки S2–S5 отображают разброс углов для S-формы, полученный из экспериментальных данных (“Star” для разных С-точек совмещены по одной из прямых). На рисунках L2–L5 приведены полученные L-формы (сплошная черная линия – ось для “Lemon”). Черточками показана ориентация большой оси эллипсов поляризации в окрестности С-точки. На рисунках M2–M5 представлен разброс углов для M-формы (разные “Monstar” совмещены по центральной прямой). При слиянии трех прямых в одну существует возможность перехода M→L.

но С-точки (см. таблицу, колонки 1, 2):

$$\theta = \varphi \pm n \cdot \pi, \quad (1)$$

где $n = 0, 1, \dots$. Касательные к сплошным контурам (таблица, колонка 2) определяют ориентацию большой оси эллипса поляризации в соответствующей точке поля.

Статистические веса α этих форм зависят от свойств реальных систем. Для неоднородно поляри-

зованных случайных полей с гауссовой статистикой фаз $\alpha_{\text{star}} = 0.5$, $\alpha_{\text{lemon}} = 0.45$, $\alpha_{\text{monstar}} = 0.045$ [6–8].

Такие же морфологические формы существуют и в полях любой природы вокруг изотропных точек [6, 7, 9–11].

Для генерации развитых векторных спекл-полей использовались три типа сред [1, 2]. Спекл-поле с развитой субструктурой возникало после рассеяния на двусторонне матированной полимерной плен-

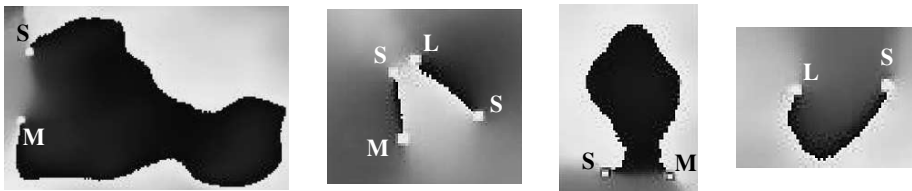


Рис.2. Типичные фрагменты измеренных векторных спекл-полей с тесными парами C -точек вида S - M , S - L . Оттенками серого закодирован азимут поляризации в диапазоне $0 \div \pi$

ке ($d = 200 \text{ мкм}$) с независимыми ансамблями шероховатостей либо на оптических неоднородностях тонкого ($d = 20 \text{ мкм}$) среза человеческой кожи. Гладкое спекл-поле формировалось на выходе фотон-кристаллического многомодового волокна с сердцевинной $d = 50 \text{ мкм}$ за счет интерференции ансамбля вырожденных по частоте поляризованных поперечных мод.

Измерялась дальняя зона спекл-поля на сингулярном стокс-поляриметре (рис.1). Параметры и положение коллимирующей линзы 7 позволяли получать на приемном экране ССD-камеры (640×539 пикселей с пространственным шагом 8 мкм) $20 \div 35$ C -точек. Компьютерная обработка результатов измерений по разработанной программе позволяла находить картину распределения азимутов с точностью до $42'$ для каждого пикселя. Было проведено десять серий таких измерений для всех трех сред.

Форма каждой из C -точек в поле зрения определялась в два этапа на матрице азимутов окружающих эллипсов на расстояниях $5 \div 20$ пикселей. Сначала на круговом контуре с некоторым радиусом находились координаты пикселей, для которых выполняется равенство (1). Затем этот радиус варьировался в указанных пределах. Искомые прямые находились как совокупность таких точек пересечения.

В соответствии с теорией, все C^- -точки имели форму S . Число C^- и C^+ -точек было примерно равно в соответствии с законом парного рождения сингулярностей [12, 13]. Измеренные азимутальные структуры представлены в компактном виде в таблице (рисунки $S3$ - $S5$, $L3$ - $L5$, $M3$ - $M5$). Качественное соответствие измеренных и предсказанных форм очевидно. Все C^- -точки имели форму S при $\alpha_{C,star} = 0.5$ вследствие закона сохранения топологического индекса поля. Значительный разброс по углам между "формообразующими" прямыми определяется отличием статистики реальных полей от гауссовой, предполагаемой в развитых теориях. Найденная морфология формы L согласуется с результатами моделирования при случайной ориентации нулевой эквивалентной линии [2, 14]. Согласно теории, форма M

имеет малый статистический вес 0.05 , неустойчива и преобразуется в форму L в процессе дальнейшей эволюции путем приближения боковых прямых к центральной и их последующего слияния [14]. Действительно, форма M наблюдалась достаточно редко только у близких пар C -точек (рис.2).

$\alpha_{C,monstar}$ составляло ~ 0.2 для волокна, $0.05 \div 0.07$ для среза кожи и около 0.13 для пленки. Отличие в количественных соотношениях $M:S:L$ от рассчитанных для полей с гауссовой статистикой [2, 14] свидетельствует о некотором ее нарушении.

Стоит отметить, что для любой морфологической формы "формообразующие" линии остаются прямыми только вблизи рассматриваемой C -точки. При большем удалении они искривляются вследствие влияния других топологических элементов поля.

В заключение отметим, что в работе на примере случайных векторных спекл-полей, генерируемых поляризационно-неоднородными средами, экспериментально идентифицированы все три морфологически разрешенных S , L , M формы распределения эллипсов поляризации вокруг изотропных точек с круговой поляризацией и измерены их статистические веса. При этом наблюдается асимметрия и значительный угловой разброс "формообразующих" прямых для S и M структур по сравнению с их каноническими формами. Статистический вес наиболее неустойчивой и редкой формы M варьируется от теоретического значения 0.05 до 0.2 для различных сред. Полученные результаты являются еще одной демонстрацией универсальности законов топологии и морфологии.

Авторы благодарны проф. М.Бери, проф. Дж.Наю, др. М.Денису (Университет, Бристоль, Великобритания) за полезные дискуссии, проф. И.Фройнду (Университет Бар-Илан, Израиль) за полезные рекомендации.

1. M. Soskin, V. Denisenko, and R. Egorov, J. Opt. A: Pure Appl. Opt. **6**, S281 (2004).
2. I. Freund, M. Soskin, and A. Mokhun, Opt. Commun. **208**, 223 (2002).

3. M. Soskin, V. Denisenko, and I. Freund, *Opt. Lett.* **28**, 1475 (2003).
4. M. Dennis, *Opt. Commun.* **213**, 201 (2002).
5. M. V. Berry and J. H. Hannay, *J. Phys. A: Math. Gen.* **10**, 1809 (1977).
6. A. S. Thorndike, C. R. Cooley, and J. F. Nye, *J. Phys. A: Math. Gen.* **11**, 1455 (1978).
7. J. F. Nye, *J. of Glaciology* **29**, 70 (1983).
8. С. С. Рожков, *УФН* **149**, 259 (1986).
9. J. F. Nye, *J. of Glaciology* **32**, 363 (1986).
10. H. J. Hutchinson, J. F. Nye, and P. S. Salmon, *J. Struct. Mech.* **11**, 371 (1983).
11. E. Umezaki and S. Terauchi, *Opt. Lasers Eng.* **38**, 71 (2002).
12. J. F. Nye and M. V. Berry, *Proc. R. Soc. Lond.* **A336**, 90 (1974).
13. M. S. Soskin and M. V. Vasnetsov, *Prog. Opt.* **42**, 219 (2001).
14. J. Nye, *Natural Focusing and the Fine Structure of light*, IOP, Bristol, 1999.
15. J. V. Hajnal, *Proc. R. Soc. London* **A414**, 447 (1987).
16. M. V. Berry, in: *Singular Optics (Optical Vortices): Fundamentals and Applications*, SPIE **4403**, 4 (2001).