

# Топологический отклик неоднородных эллиптически поляризованных световых полей на управляемые анизотропные возмущения

Р. И. Егоров<sup>1)</sup>, В. Г. Денисенко, М. С. Соскин

Институт физики НАН Украины, 03028 Киев, Украина

Поступила в редакцию 21 марта 2005 г.

Изучено воздействие управляемых анизотропных потерь на топологическую структуру сложных эллиптически поляризованных световых полей. Показано, что они могут инициировать топологические реакции с рождением/аннигиляцией  $C$ -точек, седел и др. либо вызывать лишь их слабое смещение. Как сильный, так и слабый топологический отклик на возмущения могут реализоваться в едином поле на участках с различной степенью неоднородности поляризационных параметров поля.

PACS: 02.40.–k, 42.25.Ja, 42.30.Ma

Одним из быстро развивающихся разделов современной оптики является сингулярная оптика, которая изучает свойства полей с оптическими сингулярностями, то есть такими точками, где один из параметров поля вырожден [1]. Особый интерес для исследователей представляют оптические (фазовые) вихри линейно поляризованных полей, где амплитуда строго равна нулю, а фаза неопределенна. При этом волновой фронт имеет форму геликоида [2], а световые пучки обладают рядом новых свойств (см., например, [3, 4]). Для полей с эллиптической поляризацией амплитуда поля никогда не равна нулю, а сингулярности являются поляризационными и реализуются в тех точках, где вырожден один из параметров эллипса поляризации:  $C$ -точки – круговая поляризация и неопределенный азимут, а также  $L$ -точки – линейная поляризация и неопределенный знак эллиптичности (направление вращения вектора  $\mathbf{E}$ ). В сечении пучка точки с линейной поляризацией формируют  $L$ -линии, которые разделяют области поля с правой и левой поляризациями. Перечисленные сингулярности вместе с экстремумами и седловыми точками распределения азимута (точки пересечения эквивизимутальных бифуркационных линий) [5] формируют топологические решетки, отображающие поляризационную структуру волнового фронта. Такие топологические решетки были измерены для реальных эллиптически поляризованных спекл-полей [6] с помощью усовершенствованного метода сингулярной стокс-поляриметрии [7]. С ее помощью также были измерены все морфологические формы окрестности  $C$ -точек [8], предсказанные теорией [9].

В настоящей работе на примере топологических решеток поляризационно-неоднородных спекл-полей экспериментально изучена одна из ключевых проблем топологии сингулярных световых полей [2] об устойчивости реализующихся структур.

Поляризационные сингулярности определены как геометрически предельные формы эллипса – круг, линия. При этом, как теоретически обосновал И. Фройнд в своей работе [10], любой эллипс может быть преобразован в круг или линию с помощью наклонного проецирования. Простым физическим аналогом такого преобразования является ослабление одной из линейных компонент в базисе разложения поляризационного эллипса. В случае поляризационно-неоднородного исходного поля такое преобразование приведет к разным искажениям поляризации в его различных точках. Анализируя искаженное таким образом поле, можно оценить устойчивость его структуры и влияние искажений на разные типы присутствующих в нем поляризаций.

Объектом исследования служило эллиптически поляризованное спекл-поле, полученное после многомодового фотон-кристаллического волокна [6]. Поляризационная структура поля исследовалась с помощью модифицированной методики Стокс-поляриметрии. Для внесения управляемых искажений поляризации в установку добавлена тонкая стеклянная плоскопараллельная пластинка с возможностью поворота ее на заданный угол к оси пучка. Схема эксперимента показана на рис.1.

При падении пучка на стеклянную пластинку компоненты поляризации, параллельные и перпендикулярные плоскости падения, согласно формулам Френеля, отражаются и пропускаются

<sup>1)</sup>e-mail: vbтар@iop.kiev.ua

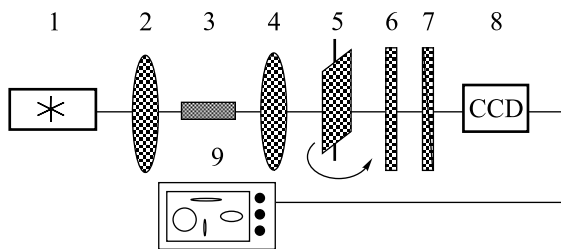


Рис.1. Схема экспериментальной установки. 1 – He-Ne лазер ( $\lambda = 633$  нм), 2 – линза, фокусирующая пучок на производящий спекл-поле объект 3, 4 – коллимирующая линза, 5 – плоскопараллельная стеклянная пластинка, 6 – фазовая ( $\lambda/4$ ) пластинка, 7 – поляризатор, 8 – CCD-камера, 9 – компьютер

по-разному [11]. Действие пластинки на однородно поляризованный пучок тривиально – его поляризация изменится известным образом.

Однако так как падающий пучок поляризационно-неоднородный, то разные точки его сечения имеют различные  $E_{\parallel}$  и  $E_{\perp}$ , а значит, и искажения они получают разные, несмотря на однородность пластинки. Соответственно, поляризация разных точек в сечении пучка изменится по-разному.

Влияние поворота пластинки на различные поляризации, присутствующие в исследуемом поле, наглядно представлено на рис.2. При моделировании прохождения света сквозь пластинку было учтено однократное переотражение внутри пластинки и интерференция прошедшего и переотраженного лучей. Данный эффект оказывает существенное влияние на поляризацию результирующего пучка.

Из графиков видно, что наибольшие изменения азимута поляризации получают точки пучка с круговой поляризацией. Эллиптические же поляризации приобретут сравнительно малые искажения азимута. Угловая зависимость для эллиптичности свидетельствует о том, что с ростом угла поворота пластинки исходные точки с циркулярной и линейной поляризациями станут эллиптическими. Зависимости поляризационных параметров существенно немонотонны. При определенных значениях углов падения падающие лучи с круговой (линейной) поляризацией снова становятся поляризованными по кругу (линейно).

Поляризационная структура в поперечном сечении неоднородно поляризованного пучка может быть хорошо изображена с помощью топологической сетки поля [7]. Пример фрагмента такой сетки представлен на рис.3а. Она состоит из разных типов С-точек [8] и эквивазимутальных бифуркационных линий, проходящих через седловые точки. Бело-серый фон представляет собой распределение право- и левовращаю-

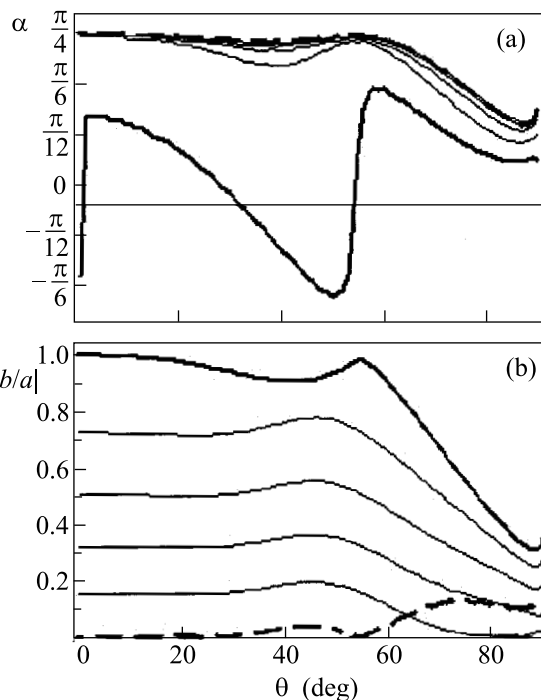


Рис.2. Зависимость поляризации проходящего света от угла наклона пластинки (азимут  $\alpha$  – рис.2а, эллиптичность  $|b/a|$  – рис.2б). Кривые соответствуют входным поляризациям в диапазоне от циркулярной (жирная сплошная кривая) до линейной (жирная пунктирная кривая) с эллиптичностями 0, 0.16, 0.33, 0.51, 0.73, 1 и азимутом  $\pi/4$

щихся поляризаций. Согласно правилам петель [5, 6], внутри петель бифуркационных линий расположены экстремумы азимутального распределения.

В когерентном поле соседние точки скоррелированы по фазе, поэтому искажение поля, меняющее один элемент решетки, приведет к ее полной перестройке.

Изменения топологической решетки под действием наклона пластинки очень наглядно демонстрируют изменения поляриационной структуры прошедшего пучка. Такие изменения мы и будем считать топологическим откликом поля на вносимые искажения. Результаты эксперимента представлены на рис.3.

Из рис.3 можно сделать вывод, что топологический отклик поля на вносимые искажения может быть двух типов: 1) сильный, при котором происходит перестройка решетки в результате топологических реакций с исчезновением одних элементов или рождением новых. Например, как видно из левой части рис.3а, б, в, происходит изменение числа экстремумов (внутри петель) и седловых точек азимутального распределения от 1/1 в исходном поле (а), затем 2/2 (б) и до их полной аннигиляции (в). Все реак-

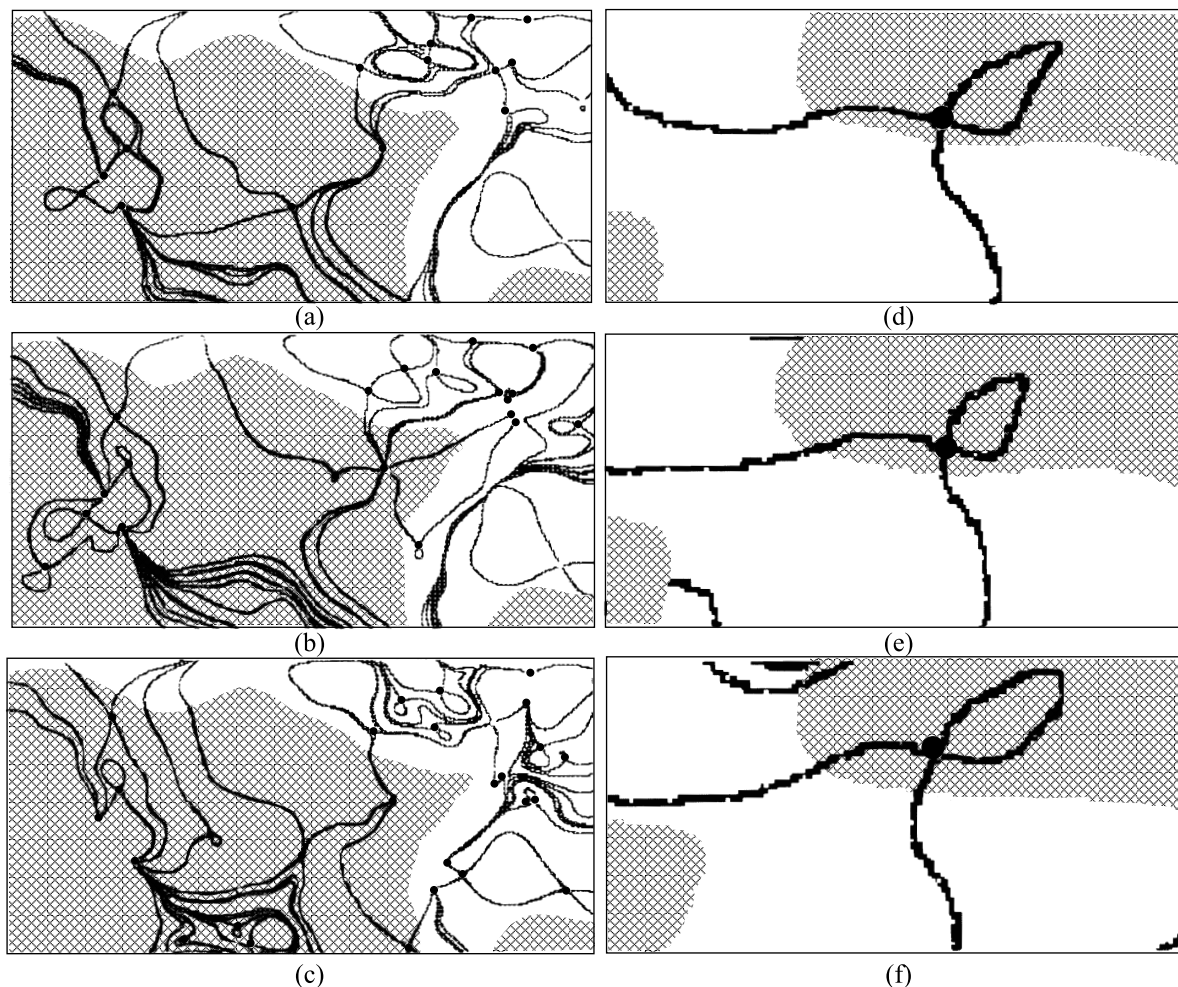


Рис.3. Искажение поляризационной структуры неоднородно поляризованного поля с помощью наклона преломляющей пластинки. Рисунки (a), (b), (c) представляют топологическую сетку для области поля с сильным топологическим откликом на искажения и (d), (e), (f) – для области поля со слабым топологическим откликом (углы наклона  $0^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $20^\circ$  соответственно, масштаб разный). Серая и темно-серая фоновые области представляют распределение правой и левой поляризаций, граница между ними – L-линия. Белые звездочки, ромбы и треугольники – C-точки разных типов; белые квадраты – седловые точки азимутального распределения. Черные линии – эквизимутальные бифуркационные линии

ции строго подчиняются закону сохранения суммарного топологического индекса Пуанкаре–Хопфа, который равен для экстремумов, седел и C-точек соответственно [2, 5]:

$$\eta_{\text{extr}} = +1, \quad \eta_{\text{sad}} = -1, \quad \eta_C = \pm \frac{1}{2};$$

2) слабый, при котором происходит лишь небольшое смещение элементов решетки без изменения их числа и типа.

Оба типа отклика могут реализоваться в разных частях одного и того же поля. Тип отклика в каждом месте определяется степенью неоднородности поляризации исходного поля в данном месте.

Согласно модели влияния пластинки, показанной на рис.2, производился расчет искажения для исходного экспериментально полученного поля при различных углах ее наклона. Результаты моделирования хорошо коррелировали с экспериментально полученными распределениями.

В заключение отметим, что в работе изучено влияние управляемых возмущений на топологическую структуру неоднородных эллиптических световых полей. Экспериментально подтверждена предсказанная с помощью математической модели различная чувствительность разных поляризаций к вносимым искажениям. Самыми чувствительными к ним в области “добрюстеровских” углов наклона пластинки

являются С-точки, затем с уменьшением эллиптичности чувствительность падает.

Авторы благодарны проф. И. Фройнду (Университет Бар-Илан, Израиль) за полезные дискуссии.

1. M. S. Soskin and M. V. Vasnetsov, *Progr. Optics* **41**, 219 (2001).
2. J. Nye, *Natural Focusing and the Fine Structure of light*, IOP, Bristol, 1999.
3. M. V. Berry and J. H. Hannay, *J. Phys. A: Math Gen.* **10**, 1809 (1977).
4. *Optical vortices*, *Horizons in world physics*, v. **228**. Eds. M. Vasnetsov, K. Staliunas, Nova Scien. Publ., 1999.
5. I. Freund, M. Soskin, and A. Mokhun, *Opt. Commun.* **208**, 223 (2002).
6. M. Soskin, V. Denisenko, and R. Egorov, *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* **6**, S281 (2004).
7. M. Soskin, V. Denisenko, and I. Freund, *Opt. Lett.* **28**, 1475 (2003).
8. В. Г. Денисенко, Р. И. Егоров, М. С. Соскин, *Письма в ЖЭТФ* **80**, 21 (2004).
9. M. Dennis, *Opt. Commun.* **213**, 201 (2002).
10. I. Freund, *Opt. Lett.* **29**, 15 (2004).
11. M. Born and E. Wolf, *Principles of Optics*, 6nd ed., Pergamon, New York, 1986.