

01;07

## Динамика дислокаций и дисклинаций поля маломодового волокна

### IV. Формирование оптического вихря

© А.В. Воляр, Т.А. Фадеева, Х.М. Решитова

Симферопольский государственный университет

Поступило в Редакцию 11 ноября 1996 г.

Экспериментально и теоретически изучаются физические механизмы процесса формирования оптического вихря в поле маломодового волокна. В оптическом волокне с параболическим профилем показателя преломления формирование оптического вихря связано с взаимодействием циркулярно поляризованных вращающихся чисто краевых дислокаций циркулярно поляризованных четных и нечетных  $CP_{11}$  мод. В ступенчатом волокне формирование оптического вихря также связано с одновременным распространением четных и нечетных мод. Поля этих мод изменяют свою структуру по длине волокна и не выражаются через вращающиеся краевые дислокации. Экспериментально найдено, что устойчивый вихрь не изменяет своей величины степени поляризации поля на длинах волокна свыше 10 м. Неустойчивый вихрь, для которого произведение спина и топологического заряда всегда меньше нуля, периодически распадается и восстанавливается на длине биений 0.65 м.

Отмечается, что устойчивый оптический вихрь нельзя сформировать ортогонально поляризованными  $LP_{11}$  модами. Это связано с тем, что оптический вихрь переносит дополнительный момент импульса, как и  $CP_{11}$  моды, а  $LP_{11}$  моды не переносят дополнительного момента импульса поля.

Гладкие лазерные поля в свободном пространстве не могут формировать устойчивые вихри. Формирование вихря протекает, например, в активной среде лазерного резонатора [1] или при прохождении лазерного излучения через компьютерно-синтезированную голограмму [2]. В работе [3] нами было показано, что поля собственных мод оптических волокон являются носителями оптических вихрей противоположных топологических зарядов. Но в поле многомодового волокна присутствуют одновременно как оптические вихри с противоположными зарядами, так и чисто краевые или смешанные типы дислокаций [4].

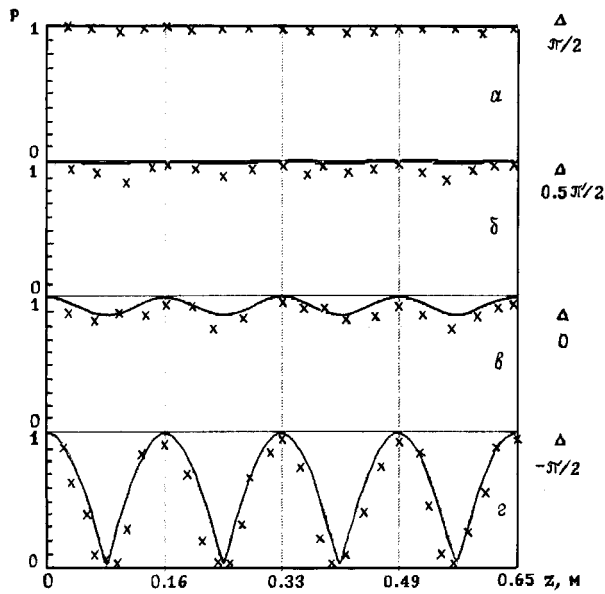
Целью настоящей работы явилось экспериментальное и теоретическое изучение физического механизма формирования единичных оптических вихрей в поле маломодового волокна.

1. В полях собственных мод волокна для чисто винтовых дислокаций нельзя раздельно рассматривать топологический заряд  $l$  и спин соответствующего базиса фотонов  $\sigma_z$ , задаваемый базисными векторами круговой поляризации  $\hat{e}^+$  и  $\hat{e}^-$  [3]. Устойчивым  $CV_1$  вихрем с азимутальным числом  $|l| = 1$  соответствует пара состояний:  $(l = +1, \hat{e}^+)$  и  $(l = -1, \hat{e}^-)$ . Для неустойчивых вихрей  $IV_1$  характерны квантовые состояния:  $(l = -1, \hat{e}^+)$  и  $(l = +1, \hat{e}^-)$ . В неоднородной среде волокна образование вихря связано с наличием двух циркулярно поляризованных четной и нечетной  $CP_{11}^{ev}$ ,  $CP_{11}^{od}$  мод. В третьей части данной работы было показано, что в параболическом волокне циркулярно-поляризованные  $CP_{11}$  моды представляют собой вращающиеся чисто краевые дислокации поля. Ось такой дислокации совершает полный оборот вокруг оси волокна на длине биений.  $CP_{11}$  моды четырежды вырождены: дважды по направлению циркуляции и дважды по четности. Сложение четных и нечетных  $CP_{11}$  мод с одноименной циркуляцией и фазовой задержкой  $\pm\pi/2$  порождает нераспадающийся вихрь. Устойчивость вихрей в параболическом волокне определяется равенством поляризационных поправок как для  $TE_{01}$  и  $TM_{01}$  мод, так и для четной и нечетной  $HE_{21}$  моды.

Несколько иной механизм формирования свойствен вихрям ступенчатого волокна. В таком волокне поляризационные поправки  $TE_0$  и  $TM_{01}$  мод не равны друг другу и оптические вихри разделяются на устойчивые и неустойчивые. Предположим, что  $CP_{11}$  моды не имеют точной циркулярной поляризации. Отклонение состояния поляризации будем выражать через разность фаз  $\Delta$  между ортогональными линейными  $LP_{11}$  полями.

Поля эллиптически поляризованных  $EV_1$  вихрей можно записать в виде:

$$\begin{aligned} \mathbf{e}_t = & \left( \hat{\mathbf{x}} \left[ \cos \varphi [\cos \delta\beta z - \sin \delta\beta z \exp\{i\Delta\}] \right. \right. \\ & + i \sin \varphi [\cos(\delta\beta + \Delta\beta)z - \sin(\delta\beta + \Delta\beta)z \exp\{i\Delta\}] \exp\{i\Delta\beta z\} \left. \right] \\ & + \hat{\mathbf{y}} \left[ \cos \varphi [\cos(\delta\beta + \Delta\beta)z \exp\{i\Delta\} + \sin(\delta\beta + \Delta\beta)z] \exp\{i\Delta\beta z\} \right. \\ & \left. \left. + i \sin \varphi [\sin \delta\beta z + \cos \delta\beta z \exp\{i\Delta\}] \right] \right) F_1(R), \end{aligned} \quad (1)$$



**Рис. 1.** Зависимости степени поляризации  $P$  поля  $EP_{11}^{ev} \pm iEP_{11}^{od}$  мод от длины  $z$  оптического волокна:  $a - \Delta = \pi/2$ ;  $б - \Delta = 0.5\pi/2$ ;  $в - \Delta = 0$ ;  $г - \Delta = -\pi/2$ . Сплошные линии — теоретические кривые, крестики — экспериментальные точки.

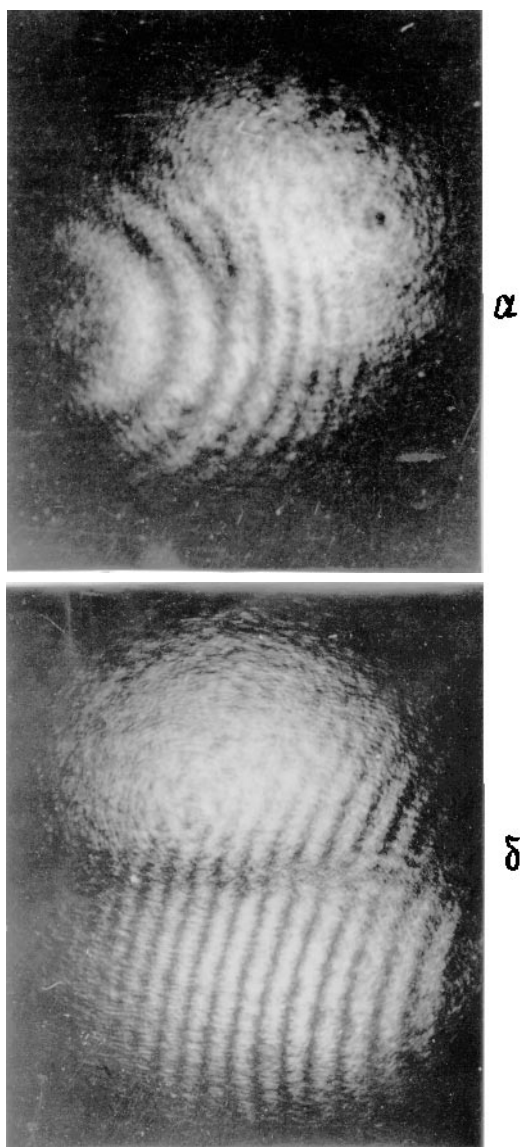
где  $F_1(R)$  — радиальные функции полей;  $\delta\beta$  — разность постоянных распространения  $HF_{21}$  и  $TM_{01}$  мод;  $\Delta\beta$  — разность постоянных распространения  $LP_{11y}$  и  $LP_{11x}$  мод. Для правоциркулярной поляризации  $\Delta = \pi/2$  и поле (1) преобразуется в поле устойчивого вихря:

$$\mathbf{e}_r(CV_{+1}^+) = \mathbf{e}^+ \exp\{+i\varphi\} F_1(R). \quad (2)$$

Для левоциркулярной поляризации  $\Delta = -\pi/2$  и поле (1) преобразуется в неустойчивый вихрь  $IV_1$ :

$$\mathbf{e}_r(IV_{+1}) = \left[ \hat{\mathbf{e}} \exp\{+i\varphi\} \cos \Delta\beta z - i\hat{\mathbf{e}}^+ \exp\{-i\varphi\} \sin \Delta\beta z \right] F_1(R). \quad (3)$$

На рис. 1,  $a$  представлено семейство кривых зависимости степени поляризации  $P$  от длины волокна  $z$  для различных значений разности фаз



**Рис. 2.** Интерференция поля оптических вихрей с линейно поляризованным опорным пучком для  $\Delta\beta z = \pi/4$ : *a* — устойчивый вихрь, *б* — неустойчивый вихрь.

Письма в ЖТФ, 1997, том 23, № 5

$\Delta$ . Характерно, что слабые возмущения циркулярно поляризованного поля эллиптической поляризации (кривая 2) вызывают небольшие осцилляции степени поляризации  $P$  и разрушения вихря не происходит. Вихрь становится неустойчивым для линейно поляризованной чисто винтовой дислокации возбуждающего поля, а при  $\Delta = -\pi/2$  оптический вихрь распадается на две связанные ортогонально циркулярно поляризованные волны.

2. Экспериментально исследовалась зависимость степени поляризации  $P$  оптического вихря от длины волокна  $z$  при различных значениях разности фаз  $\Delta$ . Маломодовое оптическое волокно с радиусом сердцевины  $\rho_0 = 3.5$  мкм и волноводным параметром  $V = 3.6$  (см. I часть работы) возбуждалось полем оптического вихря. Для получения вихря циркулярно поляризованное лазерное излучение проходило компьютерную голограмму винтовой дислокации с топологическим зарядом  $m = 1$  [2], после которого выделялся оптический вихрь с топологическим зарядом  $+1$ . Состояние поляризации лазерного вихря регулировалось с помощью электрооптического поляризационного модулятора посредством изменения управляющего напряжения на кристалле ниобата лития. Экспериментальные точки на рис. 1 иллюстрируют зависимость  $P(z)$ . Для малых значений величины разности фаз  $\Delta$  степень поляризации лежит в пределах погрешности эксперимента и приближается к значению 0.9. Наибольшие вариации величины  $P$  наблюдаются для разности фаз  $\Delta = -\pi/2$ , т. е. в случае  $l = 1$  и левациркулярно поляризованного на входе поля. Отметим, что максимальным значениям  $P$  соответствует правациркулярная поляризация, а минимальным значениям  $P$  соответствует линейная поляризация. Такое квантовое состояние характерно для неустойчивого вихря  $IV_1$ . При интерференции поля излучения волокна длиной 18 см ( $\Delta\beta z = \pi/4$ ) с линейно поляризованным опорным пучком в случае устойчивого вихря наблюдается "вилка" (рис. 2, а) с топологическим зарядом, совпадающим с зарядом падающего вихря. В случае неустойчивого вихря на этой длине наблюдается чисто краевая дислокация (рис. 2, б).

Механизм формирования устойчивого вихря примечателен синхронностью дисклинационных процессов в двух одинаково циркулярно поляризованных  $CP_{11}$  модах. В третьей части данной статьи отмечалось, что в  $CP_{11}$  моде в волокне со ступенчатым профилем показателя преломления наблюдаются периодические преобразования, например правациркулярно поляризованного поля с краевой дислокацией в поле с винтовой

дислокацией, заряда  $l = 1$ , и неоднородной по сечению линейной поляризацией, и наоборот. Происходит перекачка момента импульса поляризации волны в момент импульса дислокации. Поэтому если на входе волокна знаки топологического вихря и циркуляции поляризации совпадают, то перекачка, происходящая в составляющих вихрь  $CP_{11}$  модах, не изменяет ни состояния поляризации, ни знака топологического заряда и вихрь остается устойчивым при распространении в волокне. Однако если знаки заряда  $l$  и циркуляции поляризации противоположны, то преобразования в составляющих вихрь  $CP_{11}$  модах приводят к тому, что на половине длины биений  $CP_{11}$  моды в сечении волокна возникнет вихрь с ортогональными к падающему циркуляцией поляризации и знаком топологического заряда. Такой вихрь оказывается неустойчивым.

Особо отметим, что из одинаково поляризованных четной и нечетной  $LP_{11}$  мод нельзя сформировать линейно поляризованный устойчивый вихрь. Это связано с тем, что во-первых, чисто краевые дислокации поля не вращаются, а следовательно, такое поле не переносит дополнительного момента импульса, во-вторых, постоянные распространения этих мод различны.  $CP_{11}$  моды переносят дополнительный момент импульса и способны сформировать оптический вихрь.

Работа выполнена при частичной поддержке Международной Соросовской программы поддержки образования в области точных наук (ISSEP), грант N PSU062108.

## Список литературы

- [1] Harris M., Hill C.A., Vaughan J.M. // Opt. Comm. 1994. V. 106. P. 161–166.
- [2] Basistiy I.V., Soskin M.S., Vashnetsov M.V. // Optics Comm. 1995. V. 119. P. 604–612.
- [3] Воляр А.В., Фадеева Т.А. // Письма в ЖТФ. 1996. Т. 22. В. 8. С. 63–67.
- [4] Зельдович Б.Я., Пилипецкий Н.Ф., Шкунов В.В. Обращение волнового фронта. М: Наука, 1985. 247 с.