

01:07

Динамика дислокаций и дисклинаций поля маломодового волокна: II. Чистые типы сингулярностей

© А.В. Воляр, Т.А. Фадеева

Симферопольский государственный университет

Поступило в Редакцию 11 ноября 1996 г.

Экспериментально и теоретически изучались особенности регистрации дислокаций и дисклинаций поля линейно поляризованной LP_{11} моды на выходе из оптического волокна. Найдено, что тип дислокации поля и ее топологический заряд существенно зависят от длины волокна, состояния поляризации опорного пучка и ориентации оси поляризатора на выходе интерферометра. Экспериментально показано, что при циркулярно поляризованном опорном пучке (без поляризатора) регистрируются C^+ и C^- чисто краевые дисклинации LP_{11} моды. В схеме поляризационной интерференции при длине волокна, равной четверти длины биений LP_{11} моды, наблюдается чисто винтовая дислокация с топологическим зарядом $l = 1$ для ориентации оси пропускания поляризатора $\alpha = \pi/4$ и $l = -1$ для $\alpha = 3/4\pi$, если опорный пучок линейно поляризован под углом $\pi/4$ к оси x . При круговой поляризации опорного пучка наблюдается следование угла ориентации чисто краевой дислокации за осью поляризатора; изменение поляризации опорного пучка на противоположную вызывает изменение знака угла следования краевой дислокации.

Изучение поля маломодового волокна требует известной осторожности в описании сингулярностей волнового фронта. Встречающиеся оценки среднего числа полевых дислокаций [1] или преобразования их топологических зарядов [2] должны зависеть от способа наблюдения светового поля. В работе [3] было показано, что при скалярной интерференции гауссовых пучков свободного пространства, переносящих топологический заряд, тип наблюдаемой сингулярности зависит от кривизны волнового фронта пучков

и направлений их схождения. Наблюдение сингулярностей поля в неоднородной среде требует учета векторных свойств волновых полей.

В первой части данной работы нами уже отмечалось, что в линейно поляризованной LP_{11} моде неоднородной среды основным физическим механизмом эволюции поля является взаимодействие циркулярно поляризованных C^+ и C^- дисклинаций, которые формируют смешанные типы сингулярностей (наложение сингулярностей различных компонент векторного поля). Экспериментальная регистрация таких смешанных фазовых особенностей, принадлежащих разным поляризациям, требует учета состояния поляризации опорного пучка и также зависит от присутствия в измерительной установке поляризационного анализатора.

Целью настоящей работы явилось изучение особенностей экспериментального проявления чистых типов векторных сингулярностей (дислокаций и дисклинаций) LP_{11} моды поля излучения маломодового волокна при поляризационной интерференции света. Особое внимание обращается на тип наблюдаемой дислокации и ее топологический заряд.

1. Рассмотрим оптическое волокно, возбуждаемое таким образом, что в нем реализуется исключительно LP_{11} модовая комбинация. Считаем, что поле излучения когерентно складывается с гладким полем с состоянием поляризации $(a_{01}\hat{x} + a_{02}\hat{y})$. Суперпозицию этих полей можно представить в виде

$$e - a_1 \begin{pmatrix} \cos \delta\beta_1 z_0 \cos \varphi \\ i \sin \delta\beta_1 z_0 \sin \varphi \end{pmatrix} \exp\{i\Phi_1\} F_1(R) \begin{pmatrix} a_{01} \\ a_{02} \end{pmatrix} \exp\{i\Phi_2\} F_0(R), \quad (1)$$

где a_1 — амплитуда LP_{11} моды, $\delta\beta_1$ — разность постоянных распространения TE_{01} и HE_{21} мод,

$$\Phi_1 = \beta z_0 + kz, \quad \Phi_2 = \psi_0 + kz \cos(\theta) + kr \sin(\theta), \quad (2)$$

β — постоянная распространения LP_{11} моды в неоднородной среде, r — радиальная координата пучка, θ — угол схождения пучков, $F_{1,0}(R)$ — функции радиального распределения поля пучков [4].

Считаем, что поляризатор в оптической схеме отсутствует. Тогда результат измерения поля излучения будет зависеть только от состояния поляризации опорного пучка и длины оптического волокна

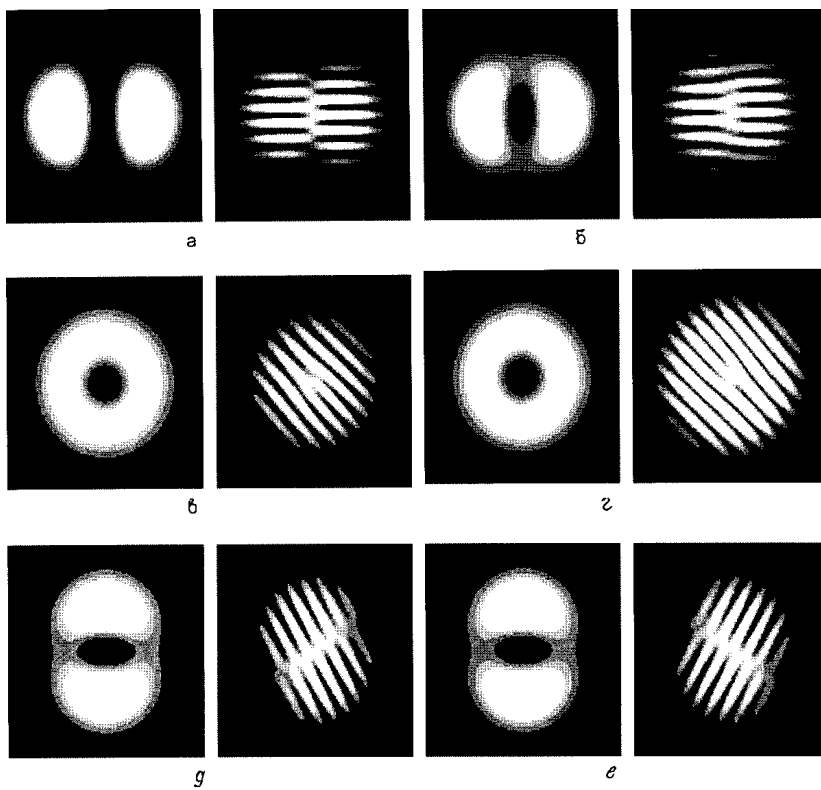


Рис. 1. Распределение поля и интерференционные картины поляризованной интерференции LP_{11} моды (компьютерный расчет).

z_0 . Если опорный пучок имеет линейную поляризацию вдоль оси \hat{x} или \hat{y} и a_{01} или a_{02} равно нулю, то для любой длины волокна z_0 наблюдается чисто краевая дислокация (рис. 1, *a*). Если опорный пучок линейно поляризован под углом $\pi/4$ ($a_{01} = 1, a_{02} = 1$), то на длинах волокна, не кратных четверти длины биений $\Lambda/4$ LP_{11} моды ($\Lambda = 2\pi/\delta\beta_1$), экспериментально будет регистрироваться смешанная винтовая-краевая дислокация (рис. 1, *б*). Для длин волокна $z_0 = \Lambda/4(4m + 1)$ наблюдается чисто винтовая дислокация с тополо-

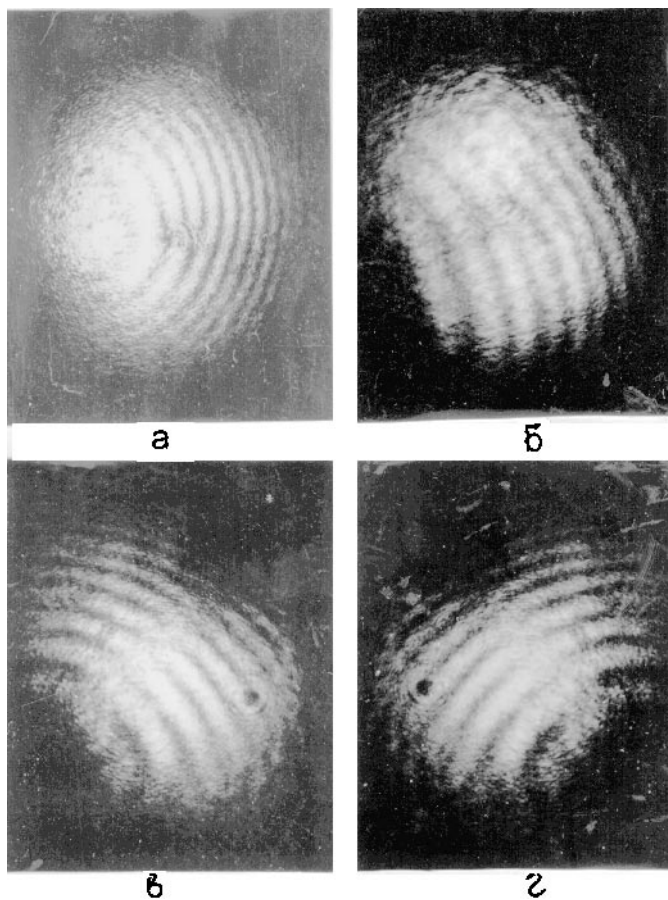


Рис. 2. Фотографии интерференции LP₁₁ моды и опорного гауссового пучка.

гическим зарядом $l = +1$, а для $z_0 = \Lambda/4(4m+3)$ также наблюдается чисто винтовая дислокация, но с топологическим зарядом $l = -1$. Смену знака топологического заряда на длинах волокна, кратных $z_0 = \Lambda/4(4m + 1)$ или $z_0 = \Lambda/4(4m + 3)$, можно наблюдать при изменении азимута линейной поляризации опорного пучка на 90°

($a_{01} = 1, a_{02} = -1$) (рис. 1, в, з). Для произвольного состояния поляризации и произвольной длины z_0 наблюдается смешанная винтовая–краевая дислокация.

Особый интерес представляет случай круговой поляризации опорного пучка. Для правой циркуляции ($a_{01} = 1, a_{02} = i$) опорный пучок избирательно интерферирует с правой циркуляцией поля, в то время как левая циркуляция создает фон. На рис. 1, д наблюдается чисто краевая дислокация с углом наклона $\psi = \delta\beta_1 z_0$, в точности совпадающем с углом наклона C^- дисклинации. Изменение циркуляции поляризации пучка на противоположную ($a_{01} = 1, a_{02} = -i$) вызовет изменение знака угла ψ наблюдаемой чисто краевой дислокации на противоположный знак ($\psi = -\delta\beta_1 z_0$) (рис. 1, е). Такое изменение угла соответствует тому, что теперь опорный пучок выбирает для интерференции уже C^+ дисклинацию, ось которой наклонена под углом $\varphi = -\delta\beta_1 z_0$.

Пусть в оптической схеме установлен линейный поляризатор с осью, ориентированной под углом α , тогда результаты наблюдения уже будут зависеть как от длины z_0 и состояния поляризации пучка, так и от угла α , так что в системе координат, одна из осей которой направлена вдоль оси поляризатора, поле запишется в виде

$$e_\alpha = e_x \cos \alpha + e_y \sin \alpha. \quad (3)$$

При $\alpha = 0; \pi/2$ наблюдаются чисто краевые дислокации при любых длинах волокна z_0 . Для произвольного угла α и произвольного состояния поляризации пучка регистрируется смешанная винтовая–краевая дислокация. Для $\alpha = \pi/4, \alpha = 3/4\pi$ и $z_0 = \Lambda/4(4m + 1)$ наблюдается чисто винтовая дислокация с топологическими зарядами $l = +1$ и $l = -1$ соответственно.

Интересное явление наблюдается при циркулярной поляризации опорного пучка после прохождения поляризатора. Для правой циркуляции ($a_{01} = 1, a_{02} = i$) ось краевой дислокации всегда следует за поворотом угла поляризатора α . Изменение циркуляции на противоположную ($a_{01} = 1, a_{02} = -i$) вызывает изменение угла отслеживания оси дислокации относительно оси поляризатора ($\psi = -\alpha$).

Физический механизм описанных явлений связан с неоднородной поляризацией полей оптического волокна. Однородно поляризованный опорный пучок избирательно взаимодействует только с той

частью модовой комбинации, которая согласуется с ним по поляризации. Аналогично поляризатор выделяет в опорном и объектном пучках волны с одинаковой поляризацией.

2. Для экспериментального исследования было выбрано маломодовое волокно с диаметром сердцевины $\rho_0 = 3.5$ мкм и волноводным параметром $V = 3.6$ для длины волны $\lambda = 0.63$ мкм. Длина биений составляла $\Lambda = 3.6$ м. Волокно помещалось в интерферометр Маха–Цендера (см. I часть статьи). Состояние поляризации опорного пучка регистрировалось посредством вращения поляризатора и $\lambda/4$ пластинки, помещенной в опорный пучок. Волокно обламывалось с интервалом 1 см. Регистрировались картины поляризационной интерференции, углы ориентации осей дислокаций и их топологические заряды при изменении состояния поляризации пучка Q и угла ориентации оси поляризатора α . Точность регистрации круговой поляризации составляла $Q = 0.95 \pm 0.05$. На рис. 2 приведены типичные интерференционные картины поля излучения волокна и опорного гауссового пучка (TEM₀₀ лазерная мода). Нами специально выделены чисто винтовые дислокации, изменяющие знак топологического заряда на противоположный при изменении угла $\alpha = \pi/4$ на $3/4\pi$ (рис. 2, а, б). Заметим, что для получения именно чисто винтовой дислокации потребовалось помимо подбора длины волокна z_0 еще дополнительное модовое согласование посредством изменения радиуса кривизны волоконной петли, установленной на входной секции волокна.

В процессе контрольного эксперимента установлено, что при интерференции поля линейно поляризованной LP₁₁ моды с полем циркулярно поляризованного гауссового пучка изменение знака циркуляции поляризации опорного пучка на противоположную (рис. 2, в, г) вызывает синхронную смену угла ориентации краевой дислокации интерференционной картины $\psi = \delta\beta_1 z_0$ на $\psi = -\delta\beta_1 z_0$, хорошо согласующиеся с теоретическим расчетом. Полученные результаты экспериментально подтверждают существование C^+ дисклинаций поля LP₁₁ моды.

Работа выполнена при частичной поддержке Международной Соросовской программы поддержки образования в области точных наук (ISSEP), грант N PSUO62108.

Список литературы

- [1] *Абдулаев С.С., Заславский Г.М.* // Квантовая электроника. 1987. Т. 14. № 7. С. 1475–1484.
- [2] *Болитянский М.А.* // Оптика и спектроскопия. 1995. Т. 79. № 3. С. 512–516.
- [3] *Basistiy I.V., Soskin M.S., Vasnetsov M.V.* // Optics Comm. 1995. V. 119. P. 604–612.
- [4] *Снайдер А., Лав Дж.* Теория оптических волноводов. М.: Радио и связь, 1987. 656 с.