

Особенности процесса возбуждения в многомодовых волоконных световодах гибридных мод и оптических вихрей и исследование их интерференции

© А.А. Маковецкий, А.А. Замятин

Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
141190 Фрязино, Московская обл., Россия

e-mail: maz226@ms.ire.rssi.ru

Поступила в редакцию 16.12.2022 г.

В окончательной редакции 10.05.2023 г.

Принята к публикации 10.05.2023 г.

Проведены эксперименты по возбуждению в коротких кварц-полимерных оптических волокнах (ОВ) гибридных мод и оптических вихрей, используя лазер ($\lambda = 532 \text{ nm}$) и объективы с различным значением числовой апертуры. Для исследований были вытянуты образцы ОВ с диаметром сердцевины $200\text{--}800 \mu\text{m}$ и светоотражающей оболочкой из различных полимеров. В экспериментах при различных условиях возбуждения фиксировались распределения интенсивности излучения на выходном торце ОВ (в ближнем поле) и в дальнем поле. Контроль каустики (при вариации геометрических параметров схемы ввода излучения в ОВ) позволял возбуждать разные группы гибридных мод и оптических вихрей в ОВ и наблюдать различные топологии межмодовой интерференции, включая спиральные структуры. Проведен качественный анализ результатов экспериментов.

Ключевые слова: многомодовое оптическое волокно, распределения интенсивностей излучения в ближнем и дальнем полях, гибридные моды, оптические вихри, каустика, межмодовая интерференция.

DOI: 10.61011/OS.2023.08.56305.4454-23

Введение

Оптические пучки с вращением волнового фронта, называемые оптическими вихрями, находят широкое применение в научных исследованиях и технике вследствие их специфических свойств [1,2]. Оптические вихри формируются в свободном пространстве при прохождении лазерного луча через турбулентные участки атмосферы. Их возбуждают и в оптических волокнах (ОВ) [3]. В многомодовых ОВ они могут возникнуть в результате преобразования групп гибридных мод на случайно возникших участках волокна с двулучепреломлением [4]. Характерным признаком оптического вихря ОВ (как и гибридной моды) является темное пятно в центре распределения интенсивности излучения на выходном торце ОВ и кольцевая структура излучения в дальнем поле. Возбуждают гибридные моды в ОВ наклонно сфокусированным лазерным лучом, смещенным относительно центра входного торца ОВ и при этом не пересекающим ось ОВ [5,6]. Классическим приемом обнаружения оптического вихря является его интерференция с плоской волной, картина которой представляет собой многовитковую спираль [7,8].

Наиболее детальные исследования возбуждения гибридных мод и оптических вихрей в коротких отрезках многомодовых ОВ с диаметром световедущей сердцевины от 100 до $800 \mu\text{m}$ проведены в работах [5,9,10]. В них ОВ возбуждали лазерным лучом как непосредственно, так и сфокусированным объективом (от микроскопа МИКМЕД-В-1-20). Распределения интенсивности излу-

чения на торце ОВ и дальнем поле (на расстояниях до 1 mm от торца) регистрировали цифровой фотокамерой. При определенных настройках в дальнем поле были наблюдаемы спиральные интерференционные структуры, дана квазилучевая интерпретация их возникновения. Однако схема измерения не позволяла регистрировать выходящее из ОВ излучение на расстояниях от торца $50\text{--}300 \text{ mm}$, удобных для непосредственного визуального анализа изображения. Кроме того, не были изучены влияние параметров используемого объектива на эффективность возбуждения оптических вихрей, вопросы каустики излучения в ОВ и ее влияние на распределение интенсивности излучения в дальнем поле.

В связи с вышесказанным целью работы было следующее:

- 1) проведение экспериментов по возбуждению в коротких ($0.1\text{--}0.5 \text{ m}$) многомодовых кварц-полимерных ОВ с диаметром сердцевины $200\text{--}800 \mu\text{m}$ гибридных мод (косых лучей) и оптических вихрей при различных условиях возбуждения с использованием объективов с различными значениями числовой апертуры;

- 2) качественный анализ структур возбужденных полей в ближней (на выходном торце ОВ) и дальней зонах дифракции с целью выявления эффектов межмодовой интерференции.

Методы

Схема экспериментальной установки для возбуждения оптических вихрей в ОВ и регистрации их интенсивно-

стей излучения в ближнем и дальнем полях приведена на рис. 1.

Излучение лазера 2 (LGLaser 303, $\lambda = 532 \text{ nm}$) вводилось в ОВ 4 через объектив 3, исходно настроенный соосно с волокном. Использовались объективы марок ЛОМО $10\times$, 0.4; F-6.16A-0.65; F-2.8 \times , 1.25, отличающиеся значениями числовой апертуры и фокусного расстояния. Юстировочный столик 1 осуществлял регулируемый поперечный сдвиг δ оси лазера относительно оси объектива в горизонтальной плоскости. При $\delta = 0$ сфокусированный луч падал в центр торца ОВ под углом $\alpha = 0$ к оси ОВ, возбуждая низкоапертурные меридиональные лучи. Введение сдвига $\delta > 0$ приводило к наклонному падению луча на торец ОВ ($\alpha > 0$) и возбуждению меридиональных лучей с большей апертурой излучения. В таблице приведены измеренные значения диаметра сфокусированного луча $d_{\text{сп}}$, его расходимости $\delta\varphi$, а также максимального угла падения луча α_m для трех использованных объективов. Зависимости угла падения α от сдвига δ задавали формулой $\alpha(\delta) \approx \alpha_m \delta / \delta_m$, где δ_m — максимально допустимый для данного объектива сдвиг.

Для возбуждения оптических вихрей точку падения луча на входной торец ОВ смещали от его центра в вертикальном направлении на некоторую величину $x_s \in (0, \frac{D}{2} - D_n/2)$, где D — диаметр сердцевины ОВ. Это осуществлялось с помощью механического юстировочного узла 6, на котором был закреплен входной торец ОВ. Юстировочный узел имел 2-координатную угловую юстировку в горизонтальной и вертикальной плоскостях и 3-координатную линейную подачу в направлениях x , y , z . При этом определяющей из регулировок узла является линейная подача в вертикальном направлении (y -подача). Линейные подачи в x - и z -направлениях, а также угловые регулировки γ и δ использовались для подстроек.

Для регистрации поля в ближней зоне микроскоп 5 настраивался на выходной торец ОВ. В этом случае выходящие из ОВ лучи формировали на бумажном экране 7 увеличенное изображение торца, которое снималось цифровой камерой. Расстояние от окуляра микроскопа до экрана составляло 30–50 см.

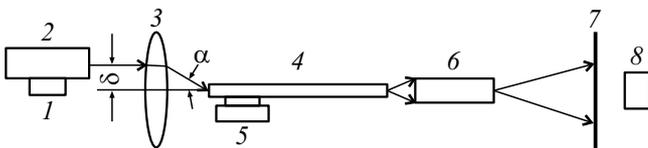


Рис. 1. Схемы ввода излучения в ОВ и регистрации распределений интенсивностей излучения в ближнем и дальнем полях (вид в горизонтальной плоскости): 1 — столик для сдвига оси лазера относительно оси объектива в горизонтальной плоскости, 2 — лазер LG 303 ($\lambda = 532 \text{ nm}$), 3 — объектив, 4 — исследуемое ОВ, 5 — юстировочный узел с 3-координатной линейной подачей и 2-координатной угловой регулировкой входного торца ОВ, 6 — микроскоп, 7 — бумажный экран, 8 — цифровая фотокамера.

При регистрации поля в дальней зоне микроскоп удаляли из схемы. Изображение снимали с экрана, расположенного на расстоянии 5–20 см.

Для экспериментов нами были изготовлены образцы кварц-полимерных (КП) оптических волокон с диаметрами световедущей сердцевины $D = 200, 400, 600$ и $800 \mu\text{m}$ с отражающей оболочкой из кремний-органического эластомера марки СИЭЛ-159-305. Были также изготовлены и опробованы ОВ с диаметром сердцевины $400 \mu\text{m}$ с оболочками из кристаллизующего сополимера тетрафторэтилена с этиленом марки Tefzel. Номинальная числовая апертура исследованных ОВ составляла 0.4–0.45. В дальнейшем тексте ОВ будем обозначать следующим образом: КП-марка оболочки/диаметр сердцевины.

Результаты. Дискуссия

Управление каустикой излучения в ОВ

Регулировкой геометрических параметров δ и x_s оптической схемы в ОВ можно возбуждать различные группы меридиональных и гибридных мод. Характерные фотографии распределений интенсивностей излучения на выходном торце КП-СИЭЛ/600 μm длиной $l_b = 17 \text{ cm}$ приведены на рис. 2.

При $\delta < 2 \text{ mm}$ и $x_s \approx 0 \mu\text{m}$ на торце ОВ формировались пятнистые спекл-структуры (рис. 2, *a*), характерные для меридиональных лучей. При $6 \text{ mm} > \delta > 2 \text{ mm}$ и $x_s > 0 \mu\text{m}$ формировались структуры поля с каустикой (с темным пятном в центре торца ОВ, рис. 2, *b, c, d*). Такие структуры характерны для гибридных мод и оптических вихрей. Величину, характеризующую каустику, зададим как $\chi = d/D$, где d — внутренний диаметр темного пятна на торце ОВ, D — диаметр сердцевины ОВ. Величина χ определялась в основном величиной x_s и слабо зависела от осевого сдвига δ . Все три фото с каустикой получены при одном и том же значении $\delta = 3.5 \text{ mm}$, но различных значениях x_s . Из них видно, что при изменении x_s от 10 до $280 \mu\text{m}$ величина χ увеличилась от ≈ 0.15 до ≈ 0.9 . С точки зрения волнового анализа величину χ определяет наименьшее значение азимутального числа m_{min} у группы возбужденных оптических вихрей: $m_{\text{min}} < m_{\text{max}}$, где m_{max} — максимальное (для данного ОВ) значение азимутального числа. У оптических волокон КП-СИЭЛ/200 μm , КП-СИЭЛ/400 μm и КП-СИЭЛ/600 μm величину m_{max} можно оценить как 476, 943 и 1430 соответственно [11]. Повышенная яркость излучения у внутренней границы каустики, заметная на фото, свидетельствует о преимущественном возбуждении группы гибридных мод с близкими к m_{min} значениями азимутальных чисел.

Интерференционные картины, сформированные КП-СИЭЛ/600 (200, 400, 800) μm при использовании объектива F 6.16-0.6

Наиболее разнообразные интерференционные картины в дальнем поле были получены на коротких отрезках

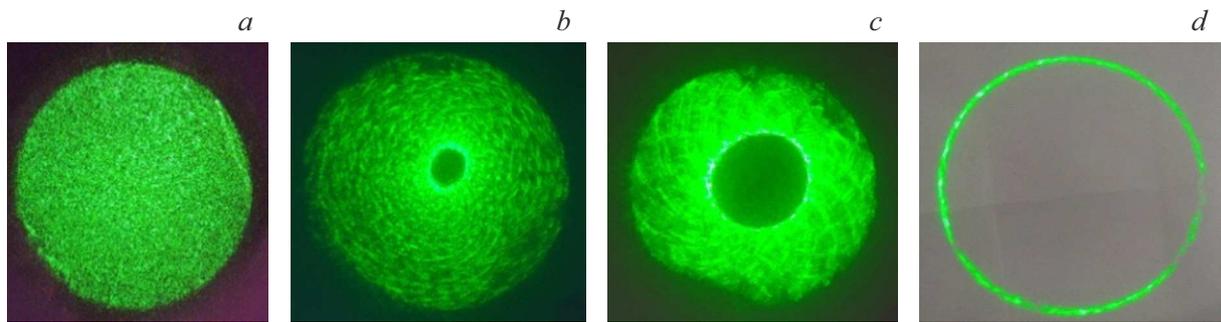


Рис. 2. Распределения интенсивности поля излучения ($\lambda = 532 \text{ nm}$) в КП-СИЭЛ/ $600 \mu\text{m}$ длиной $l_b = 17 \text{ cm}$ в ближнем поле (на торце ОБ); объектив $10\times$, 0.4. Фото (a) — спекл-структура, $\delta = 0 \text{ mm}$. Фото (b, c, d) — структуры с каустикой, $\delta = 3.5 \text{ mm}$; величина x_s последовательно возрастает от $\approx 10 \mu\text{m}$ (b) до $\approx 280 \mu\text{m}$ (d).

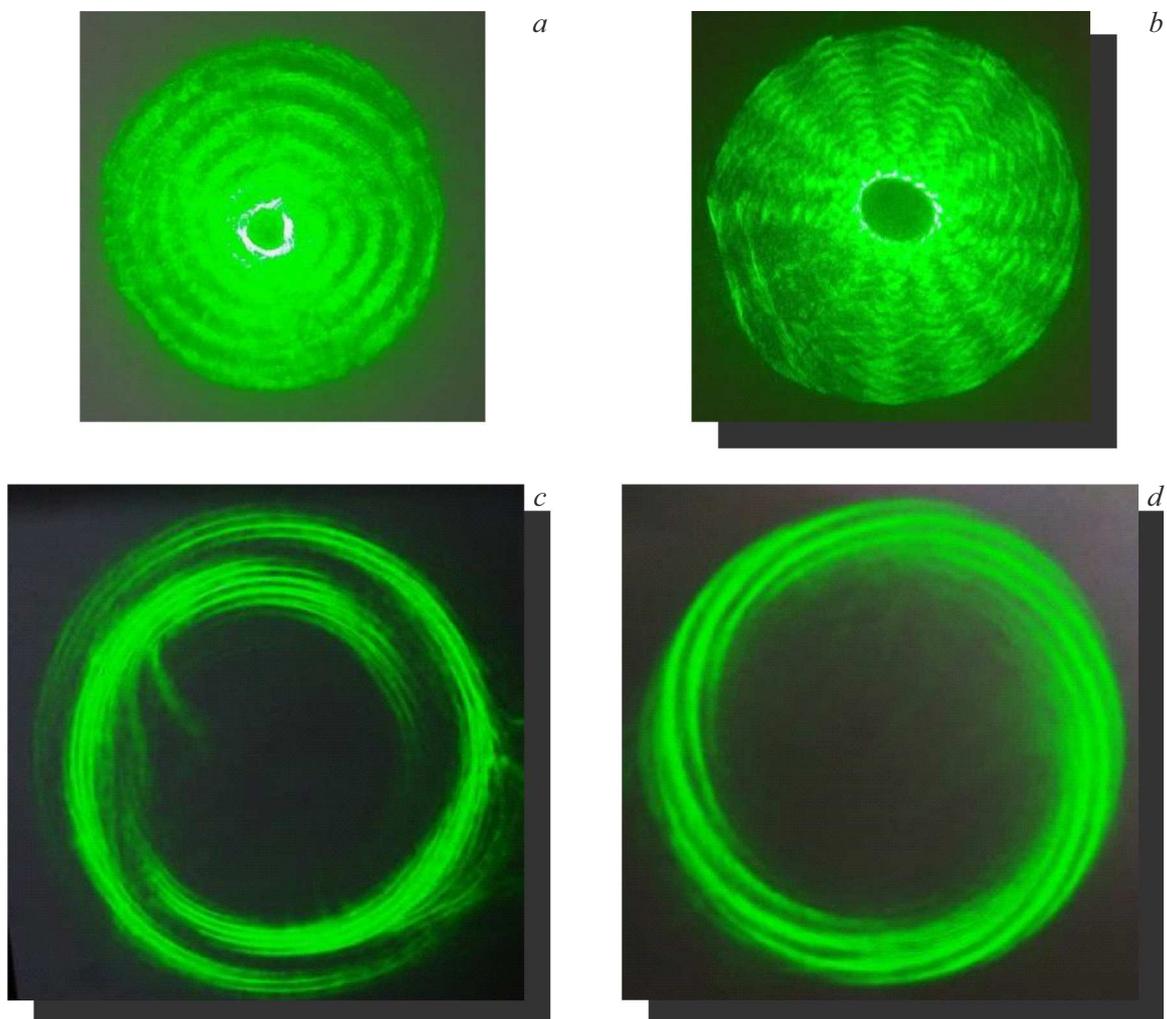


Рис. 3. Распределения интенсивности поля излучения ($\lambda = 532 \text{ nm}$) КП-СИЭЛ/ $600 \mu\text{m}$ длиной $l_b = 17 \text{ cm}$ в ближнем (a, b) и дальнем (c, d) полях; объектив F 6.16-0.65. Кадры (a, c) получены при $\delta \approx 1 \text{ mm}$, $x_s \approx 10 \mu\text{m}$, $\chi \approx 0.12$; (b, d) — при $\delta \approx 2 \text{ mm}$, $x_s \approx 20 \mu\text{m}$, $\chi \approx 0.22$.

КП-СИЭЛ/ $600 \mu\text{m}$ при использовании объектива F 6.16-0.65. Для данного объектива числовая апертура (0.65) больше номинальных числовых апертур исследованных ОБ (0.4–0.45). Примеры снятых интерференционных

картин для коротких ОБ различной длины приведены на рис. 3–5. Качественно их топологии представляют собой следующее: 1) двулепестковую спираль, каждая ветвь которой состоит из нескольких более

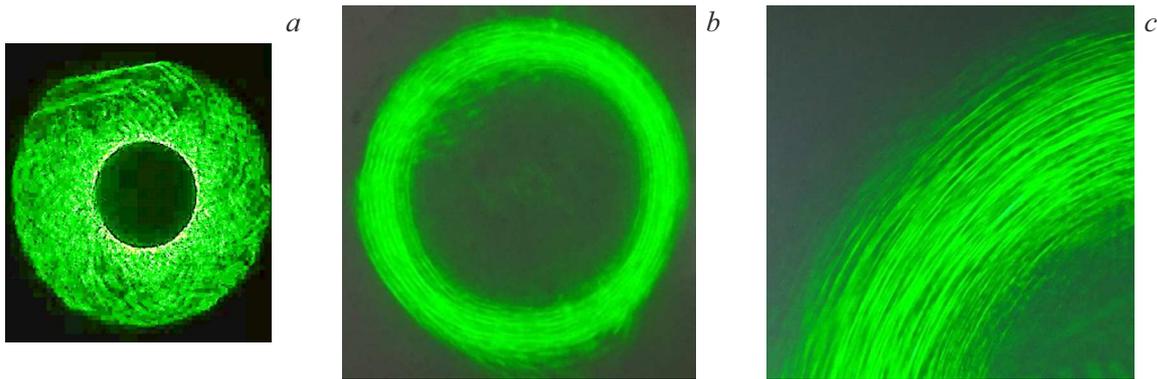


Рис. 4. Распределения интенсивности поля излучения ($\lambda = 532 \text{ nm}$) КП-СИЭЛ/600 μm длиной $l_b = 28 \text{ cm}$ в ближнем (*a*) и дальнем (*b*) полях; объектив F 6.16-0.65. Фото получены при $\delta \approx 1.5 \text{ mm}$, $x_s \approx 100 \mu\text{m}$, $\chi \approx 0.4$. На фото (*c*) представлен увеличенный фрагмент изображения (*b*).

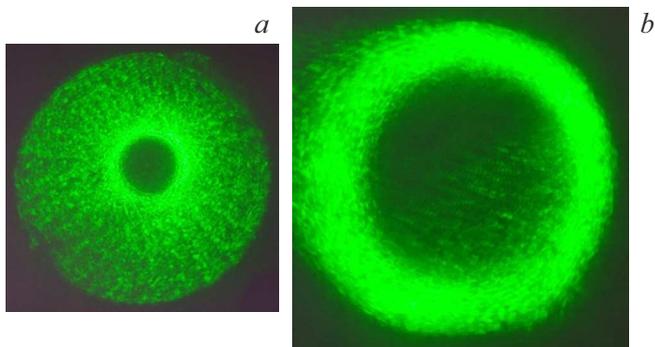


Рис. 5. Распределения интенсивности поля излучения ($\lambda = 532 \text{ nm}$) КП-СИЭЛ/600 μm длиной $l_b = 28 \text{ cm}$ в ближнем (*a*) и дальнем (*b*) полях; объектив F 6.16-0.65. Фото получены при $\delta \approx 1.5 \text{ mm}$, $x_s \approx 20 \mu\text{m}$, $\chi \approx 0.18$.

Таблица

Объектив	ЛОМО 10 \times , 0.4	F-6.16A-0.65	F-2.8 \times , 1.25
δ_m, mm	6	2.5	1.8
$d_n, \mu\text{m}$	20.0	12.6	6.0
$\Delta\varphi$	1.7 $^\circ$	4.0 $^\circ$	11.3 $^\circ$
α_m	23.6 $^\circ$	40.5 $^\circ$	$\approx 90^\circ$

тонких фрагментов спиралей (рис. 3, *c*); 2) многолепестковую спираль (рис. 3, *d*); 3) кольцо-огигающую, состоящую из множества вложенных дуговых отрезков (рис. 4, *b, c*); 4) кольцо-огигающую, внутри которой вместо дуговых отрезков заметна пятнистость (рис. 5, *b*).

Заметим, что двулепестковой спирали соответствует кольцевая структура поля на торце ОВ, многолепестковой — радиальная. При этом возможно возбуждение спиралей, закрученных как по часовой стрелке, так и против нее.

Спиральные структуры и кольца-огигающие возникают при визуально-контрастной каустике. Такая каустика представляет собой тонкую кольцевидную область с азимутально размещенными в ней яркими точками (рис. 3, *a, b*; рис. 4, *a*). При возбуждении спиралей эти точки расположены квазипериодично, их число, по-видимому, равно числу ветвей спирали. Возбуждали спирали, как правило, в два этапа. Сначала регулировкой величины x_s получали каустику с кольцом-огигающей. Затем тонкой подстройкой параметров γ , Δ , у кольцо-огигающую преобразовывали в спиральную структуру.

Заметим, что возникновение в дальней зоне дифракции спиральных структур (рис. 3, *c, d*), предположительно свидетельствует о присутствии оптических вихрей в выходящем из ОВ излучении.

Кольцам-огигающим с пятнистой структурой в ближнем поле соответствовала каустика с неконтрастной границей. У нее относительно широкая (по сравнению с контрастной) область повышенной яркости и меньший контраст яркости этой области относительно яркости на периферии (рис. 5, *a*). Это свидетельствует о возбуждении группы гибридных мод с более широким спектром азимутальных чисел.

По своей топологии поля излучения КП-СИЭЛ/200 μm , КП-СИЭЛ/400 μm и КП-СИЭЛ/800 μm в ближней и дальней зонах близки к полям излучения КП-СИЭЛ/600 μm . По сравнению с распределениями КП-СИЭЛ/600 μm первые два ОВ обладают более грубой структурой в дальнем поле, третье ОВ — более тонкой (рис. 6). Это можно объяснить тем, что при одинаковом значении номинальной числовой апертуры ОВ с большим диаметром сердцевинки имеет число гибридных мод большее, чем ОВ с меньшим диаметром сердцевинки. Большее число возбужденных гибридных мод приводит к более тонкой интерференционной картине.

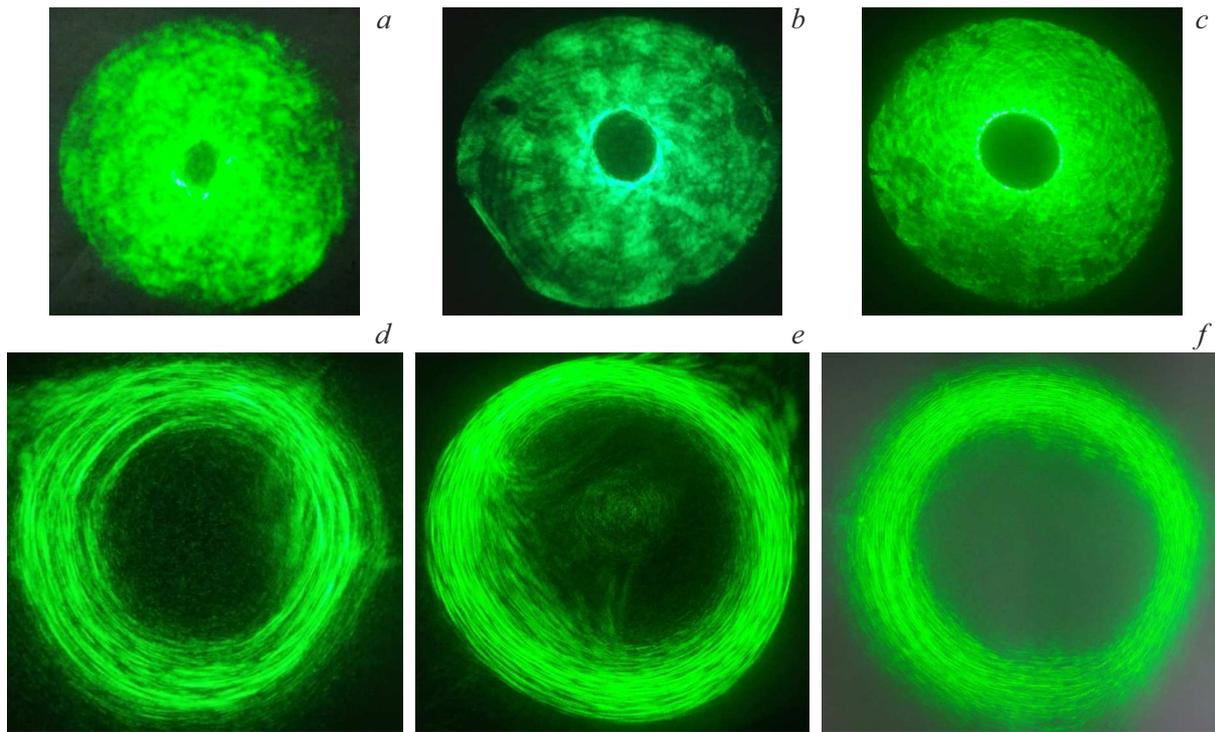


Рис. 6. Распределения интенсивности полей излучения ($\lambda = 532 \text{ nm}$) КП-СИЭЛ/200 μm длиной $l_b = 40 \text{ cm}$ (*a, d*), КП-СИЭЛ/400 μm длиной $l_b = 15 \text{ cm}$ (*b, e*) и КП-СИЭЛ/800 μm длиной $l_b = 45 \text{ cm}$ (*c, f*); объектив F 6.16-0.65. Фото (*a, d*) получено при $\delta \approx 2 \text{ mm}$, $x_s \approx 20 \mu\text{m}$, $\chi \approx 0.16$; (*b, e*) — при $\delta \approx 2 \text{ mm}$, $x_s \approx 80 \mu\text{m}$, $\chi \approx 0.22$; (*c, f*) — при $\delta \approx 2 \text{ mm}$, $x_s \approx 200 \mu\text{m}$, $\chi \approx 0.28$. Верхние фото получены в ближнем поле, нижние — в дальнем.

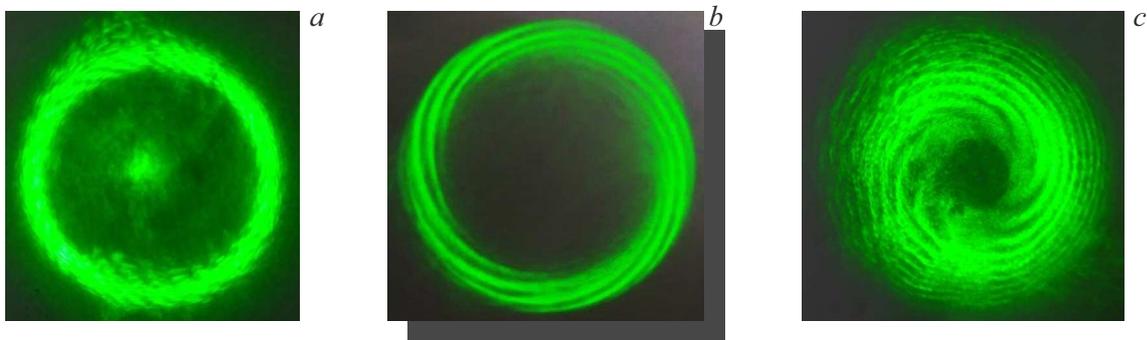


Рис. 7. Распределения интенсивности поля излучения ($\lambda = 532 \text{ nm}$) КП-СИЭЛ/600 μm длиной $l_b = 20 \text{ cm}$ в дальнем поле: (*a*) объектив $10\times$, 0.4, F 6.16-0.65, $x_s \approx 20 \mu\text{m}$, $\delta \approx 0.18$; (*b*) объектив F 6.16-0.65, $\delta \approx 1.8 \text{ mm}$, $x_s \approx 50 \mu\text{m}$, $\chi \approx 0.22$; (*c*) объектив $2.8\times$, 1.25, $\delta \approx 1.8 \text{ mm}$, $x_s \approx 140 \mu\text{m}$, $\chi \approx 0.5$.

Интерференционные картины, сформированные КП-СИЭЛ/600 μm при использовании объективов с разными значениями числовых апертур

На рис. 7 приведены фото распределений-спиралей в дальнем поле, сформированных с использованием объективов $10\times$, 0.4, F 6.16-0.65 и $2.8\times$, 1.25 (иммерсионный). В подписи к рис. 7 приведены значения соответствующих каустик χ .

Из приведенных данных следует, что чем больше числовая апертура использованного объектива, тем больше

ветвей у сформированной спирали и тем меньше относительная ширина ее кольца-оглабающей. Это связано с различием диаметров сфокусированного луча $d_{\text{п}}$ и его угловой расходимости $\Delta\varphi$ у лазерных лучей, сфокусированных использованными объективами (табл. 1).

Сделаем краткое замечание о возбуждении кварц-полимерного ОВ с рассеивающей светоотражающей оболочкой Tefzel. Из-за сильного рассеивания света оболочкой, особенно гибридных мод с большими значениями азимутального числа m , в КП-Tefzel/400 μm не удалось получить каустическую с контрастной границей. Со-

ответственно в дальней зоне не формировались спирали и кольца-огигающие с дугowymi отрезками.

Заключение

Проведены эксперименты по возбуждению коротких (10–50 см) кварц-полимерных ОВ с диаметром сердцевины 200–800 μm лазерным излучением с $\lambda = 532 \text{ nm}$ с использованием объективов с различными значениями числовой апертуры и при различных условиях возбуждения. При этом фиксировались распределения интенсивности излучения в ближней (на выходном торце ОВ) и в дальней зонах дифракции.

В результате проведенных экспериментов выявлены характерные для гибридных мод топологии интерференционных картин в дальней зоне дифракции: двулепестковая спираль, многолепестковые спирали, кольцо-огигающая с вложенными дугowymi отрезками; кольцо-огигающая с заполнением, похожим на размытую спекл-структуру. Выявлены также характерные распределения интенсивности излучения в ближней зоне дифракции — контрастной и неконтрастной каустиками.

Зарегистрированные в дальней зоне дифракции спиральные топологии предположительно свидетельствуют о присутствии оптических вихрей в выходящем из ОВ излучении. Наиболее устойчиво спиральные структуры возникали в оптическом волокне КП-СИЭЛ/600 μm (номинальная числовая апертура $NA = 0.44$) при использовании объектива F 6.16-0.65 (числовая апертура 0.65) и значениях каустики $\chi = 0.12–0.22$. Для более тонкого выявления оптических вихрей требуется анализ фазовых характеристик излучения, что является задачей дальнейших исследований.

Финансирование работы

Работа выполнена в рамках государственного задания ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] П.В. Короленко. Соросовский образовательный журнал, № 6, 94 (1998).
- [2] В.А. Сойфер, В.В. Котляр, С.Н. Хонина. Физика элементарных частиц и атомного ядра, **35** (6), 1368 (2004).
- [3] S. Ramachandran, P. Kristensen. Nanophotonics, **2** (5-6), 455 (2013).
- [4] Д.В. Кизеветтер. Квант. электрон., **38**(2), 172 (2008).
- [5] М.А. Bolshtyansky, А. Yu. Savchenko, В. Ya. Zel'dovich. Opt. Lett., **24** (7), 433 (1999).
- [6] Н.В. Ильин, Д.В. Кизеветтер. Научно-технические ведомости СПбГПУ, № 2, 9 (2010).
- [7] В.И. Борисов, В.И. Лебедев, А.Н. Куканов. Письма в ЖТФ, **10** (5), 287 (1984).
- [8] А.В. Воляр, Т.А. Фадеева. Письма в ЖТФ, **22** (8), 54 (1996).
- [9] Д.В. Кизеветтер. Оптический журнал, **74** (9), 20 (2007).
- [10] Д.В. Кизеветтер, Н.В. Ильин. Научно-технические ведомости СПбГПУ, № 3 (177), 151 (2013).
- [11] А.А. Маковецкий. Опт. и спектр., **129** (6), 1198 (2021).