

УДК 53.083.91: 535.3

*Д.В. Кизеветтер, Н.В. Ильин*

**РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ СВЕТА  
ВБЛИЗИ ВЫХОДНОГО ТОРЦА ВОЛОКОННОГО СВЕТОВОДА  
ПРИ НАЛИЧИИ ОПТИЧЕСКИХ ВИХРЕЙ**

*D.V. Kieseewetter, N.V. Ilyin*

St. Petersburg State Polytechnical University,  
29 Politekhnikeskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia.

**THE INTENSITY DISTRIBUTIONS OF THE LIGHT NEAR THE OUTPUT END  
OF THE OPTICAL FIBER IN THE PRESENCE OF OPTICAL VORTICES**

Экспериментально подтвержден эффект вращения спеклов излучения многомодовых волоконных световодов при перемещении плоскости наблюдения вдоль оси волокна вблизи поверхности выходного торца. Путем расчета функции взаимной корреляции распределений интенсивности определена угловая скорость вращения спеклов.

**ВОЛОКОННЫЙ СВЕТОВОД, ОПТИЧЕСКИЙ ВИХРЬ, СПЕКЛ, РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ СВЕТА, ВЫХОДНОЙ ТОРЕЦ СВЕТОВОДА.**

The effect of rotation of speckle of multimode optical fiber has been confirmed experimentally when moving plane observations along the fiber axis near the surface of the output end. Using the calculation of cross correlation function between the distributions of intensity the angular speed of rotation of speckle was determined.

**OPTICAL FIBER, OPTICAL VORTEX, SPECKLE, INTENSITY DISTRIBUTION OF LIGHT, OUTPUT END OF OPTICAL FIBER.**

Технические характеристики множества волоконно-оптических устройств на основе многомодовых волоконных световодов (ВС) в значительной степени зависят от распределения интенсивности оптического излучения, выходящего из оптического волокна. При использовании когерентного излучения на выходе многомодового ВС возникает пятнистая картина интерференции излучения множества волноводных мод, называемая спекл-структурой (СПС), а сами пятна – спеклами. От параметров СПС зависят, в частности, параметры ВО

датчиков, характеристики шума в приемных устройствах, эксплуатационные характеристики устройств для оптической манипуляции микрочастицами. Для волноводных мод с плоским волновым фронтом, которые далее по тексту будут называться обычными, основные свойства спекл-структур изучены довольно хорошо. Однако в волоконных световодах могут распространяться также оптические вихри. Свойства спекл-структур, сформированных оптическими вихрями, отличаются от СПС, образованных обычными волноводными модами

[1, 2]. Это влияет, например, на отношение сигнал/шум при пространственной фильтрации излучения [3]. Поэтому исследования распределений интенсивности излучения вблизи выходного торца световодов актуальны и могут иметь прикладное значение.

Одним из свойств спекл-структуры, формируемой излучением оптических вихрей волоконного световода, является ее вращение при перемещении плоскости наблюдения вблизи выходного торца. Экспериментально этот эффект был обнаружен в градиентных волоконных световодах [4]; методом численного моделирования был установлен факт вращения интерференционной картины, формируемой излучением оптического вихря и волноводной модой с плоским волновым фронтом, вблизи поверхности выходного торца [5]. Как будет показано ниже, эффект вращения СПС при перемещении плоскости наблюдения имеет место и в ВС со ступенчатым профилем показателя преломления.

Для создания оптических вихрей в волоконных световодах использовалась экспериментальная установка, описанная в работе [4]. Сущность использованного метода возбуждения оптических вихрей заключается в освещении торца ВС сфокусированным лазерным пучком, центр которого смещен относительно оси световода на величину  $l_s$ , а оптическая ось пучка наклонена относительно оси ВС на угол  $\gamma_s$  в одной из плоскостей (рис. 1) и на угол  $\gamma_a$  в другой плоскости. Согласно терминологии лучевого приближения, использованное устройство создавало в волоконном световоде косые лучи [6, 7]. Исследования проводились на ВС (длина от 0,5 до 5 м) со ступенчатым профилем показателя преломления, состоящим из кварцевой сердцевины (диаметры 200 и 1000 мкм) и полимерной отражающей оболочки («кварц-полимер»). В качестве источников излучения применялись гелий-неоновый и твердотельный лазеры с рабочими длинами волн 633 и 532 нм соответственно. Регистрация распределений интенсивности выходящего излучения производилась матричной телевизионной камерой с фокусирующим микрообъективом,

расположенной на микрометрической подвижке.

В качестве примера на рис. 2,а приведено экспериментально полученное распределение интенсивности выходящего излучения в плоскости, перпендикулярной оси ВС, на рис. 2,б – распределения интенсивности  $I_1(\varphi)$  и  $I_2(\varphi)$  от азимутального угла при постоянном значении радиуса  $r = \text{const}$ . График 2 получен для изображения, зарегистрированного при смещении плоскости наблюдения вдоль оси ВС на 50 мкм ( $I_2(\varphi)$ ). Представленные экспериментальные данные получены на ВС длиной 3 м с диаметром сердцевины 1000 мкм; длина волны излучения составляла 633 нм; диаметр сфокусированного лазерного пучка – приблизительно 10 мкм, углы наклона  $\gamma_s, \gamma_a$  составляли  $5^\circ$  и  $10^\circ$  соответственно, а смещение центра пучка  $l_s = 400$  мкм. При малом расстоянии  $\Delta L$  между плоскостями наблюдения радиусы окружностей  $r_1$  и  $r_2$ , по которым рассчитываются зависимости  $I_1(\varphi)$  и  $I_2(\varphi)$ , а также функцию взаимной корреляции (ФВК) указанных распределе-

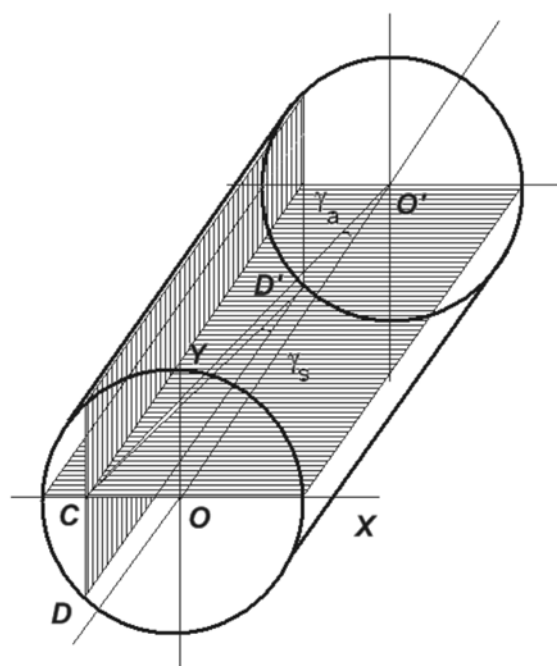


Рис. 1. Геометрия лазерного пучка относительно оси волоконного световода:  $C$  – центр лазерного пучка,  $OCO'$ ,  $CDD'$  – плоскости, в которых лежат углы  $\gamma_a$  и  $\gamma_s$  соответственно

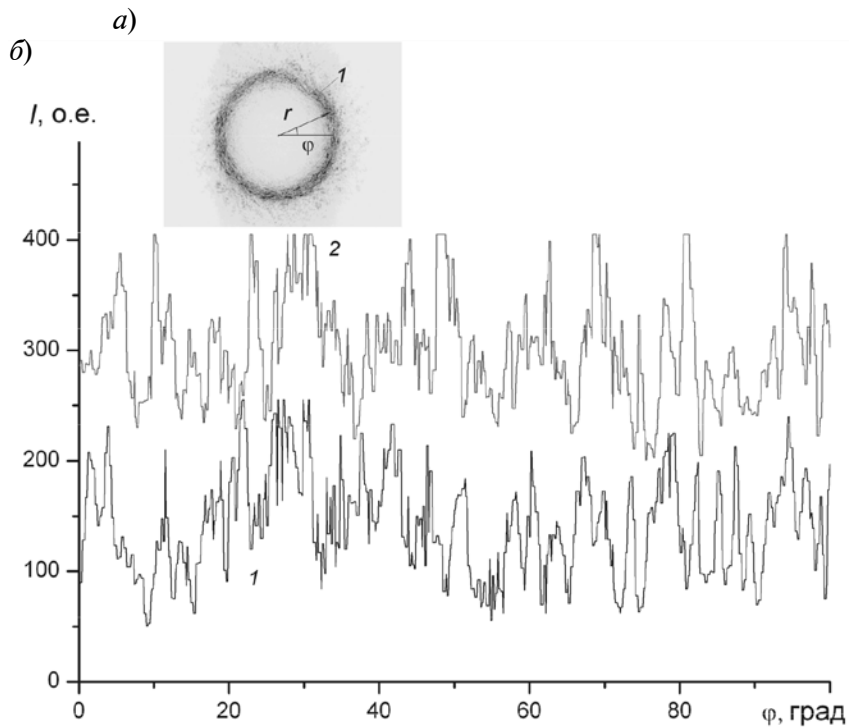


Рис. 2. Распределения интенсивности света на изображениях лазерного пучка, выходящего из волоконного световода, в плоскости, перпендикулярной оси: *a* – инвертированное изображение пучка *1*; *b* – зависимость интенсивностей пучков *1* и *2* от азимутального угла при постоянном значении расстояния *r* до оси световода. Изображение *2* получено после перемещения плоскости наблюдения на  $\Delta L = 50$  мкм вдоль оси волокна (график *2* смещен по вертикали относительно графика *1*)

ний можно полагать одинаковыми. Однако в связи с тем, что при перемещении плоскости наблюдения в свободном пространстве вдоль оси ВС изменяются линейные размеры распределений, в общем случае, ФВК следует рассчитывать для различных значений расстояния до оси ВС ( $r_1$  и  $r_2$ ). Пример ФВК для указанных распределений, а также автокорреляционная функция (АКФ) для  $I_1(\varphi)$  приведены на рис. 3. Эллиптичность зерен спеклов (см. рис. 2, *a*) подтверждает наличие группы оптических вихрей, имеющих одинаковое направления волнового фронта [1].

Смещение на величину  $\Delta\varphi \neq 0$  максимума ФВК азимутальных распределений интенсивности (см. рис. 3), измеренных в плоскостях, смещенных вдоль оси друг относительно друга, характеризует поворот спекл-картины на величину  $\Delta\varphi$ . Поворот спекл-картины при перемещении плоскости наблюдения можно наблюдать визу-

ально на экране монитора. Смещение на угол  $\Delta\varphi_{12}$  можно обнаружить и при визуальном анализе зависимостей  $I_1(\varphi)$  и  $I_2(\varphi)$ . Но определить точное значение  $\Delta\varphi_{12}$  в этом случае затруднительно. Расчетное значение  $\Delta\varphi$ , соответствующее максимальному значению ФВК (см. рис. 3), составило приблизительно 1,6 град, а угловая скорость вращения  $\Delta\varphi/\Delta L = 32$  град/мм. Проведенные исследования показали, что вблизи выходного торца ВС величина  $\Delta\varphi$  увеличивается примерно пропорционально расстоянию между плоскостями наблюдения  $\Delta L$ , а в дальней зоне дифракции указанный эффект практически отсутствует. Значение  $\Delta\varphi$  зависит, в основном, от условий ввода излучения. Однако условия распространения излучения в световоде также влияют на величину  $\Delta\varphi$ , в частности, угловые скорости вращения для различных волноводных мод могут различаться. Указанные эффекты имели место при всех использованных

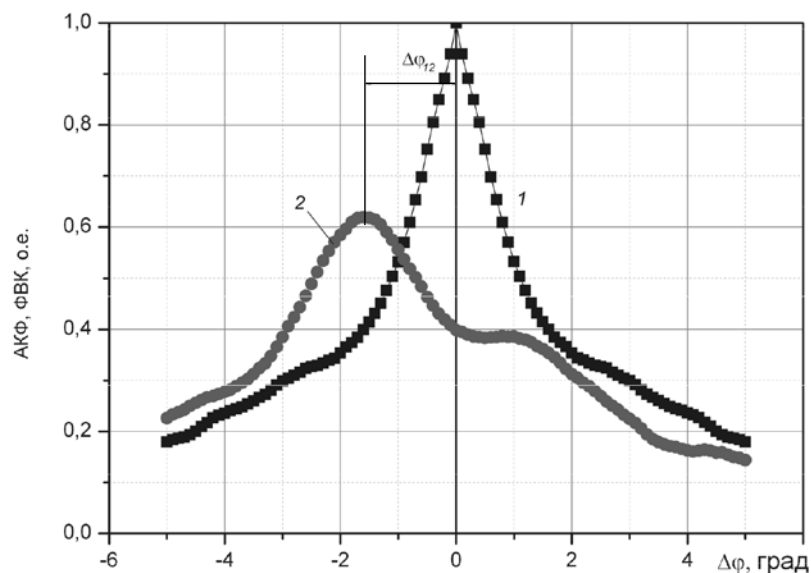


Рис. 3. Автокорреляционная функция (АКФ) (1) распределения интенсивности света на изображении 1 (см. рис. 2, а) и функция взаимной корреляции (ФВК) (2) изображений 1 и 2 (см. рис. 2, б).  
Значение расстояния  $r$  постоянно

длинах волн излучения и для всех волоконных световодов.

Уменьшение максимального значения ФВК, по сравнению с максимумом АКФ, обусловлено трансформацией спекл-структур, называемой кипением спеклов. Другими словами, помимо поворота спекл-структуры происходят также хаотическое перемещение спеклов и изменение их формы. При этом чем больше смещение  $\Delta L$ , тем меньше величина максимального значения ФВК.

На фазу оптических вихрей, распростра-

няющихся по световоду, влияют изгибы, сжатия, удлинения и другие воздействия, так же как и для обычных волноводных мод. В частности, известные факты высокой чувствительности фазы оптических вихрей к изменению температуры волоконного световода (см., например, работу [8]). Следовательно, различные свойства оптических вихрей могут иметь в будущем практическое применение для создания новых типов волоконно-оптических датчиков физических величин.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кизеветтер, Д.В. Численное моделирование спекл-структуры, образованной излучением оптических вихрей многомодового волоконного световода [Текст] / Д.В. Кизеветтер // Квантовая электроника. — 2008. — Т. 38. — № 2. — С. 172–180.
2. Кизеветтер, Д.В. Характеристики спекл-структур излучения волоконных световодов [Текст] / Д.В. Кизеветтер // Научно-технические ведомости СПбГПУ. — 2008. — № 3. — С. 72–80.
3. Кизеветтер, Д.В. Влияние дефектов торцевых поверхностей световода на параметры модового шума при наличии оптических вихрей [Текст] / Д.В. Кизеветтер // Оптический журнал. — 2013. — Т. 80. — № 1. — С. 10–16.
4. Ильин, Н.В. Метод возбуждения оптических вихрей в градиентных волоконных световодах [Текст] / Н.В. Ильин, Д.В. Кизеветтер // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. — 2010. — № 2 (98). — С. 96–102.
5. Ильин, Н.В. Численное моделирование распределения интенсивности света вблизи выходного торца волоконного световода при наличии [Текст] / Н.В. Ильин, Д.В. Кизеветтер // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. — 2013. — № 1 (165). — С. 108–113.
6. Снайдер, А. Теория оптических волноводов [Текст] / А. Снайдер, Дж. Лав; Пер. с англ.



— М.: Изд-во «Радио и связь», 1987. — 656 с.

7. Унгер, Х.Г. Планарные и волоконные оптические волноводы [Текст] / Х.Г. Унгер; Пер. с англ. — М.: Изд-во «Мир», 1980. — 656 с.

8. Борисов, В.И. Спиральная интерферен-

ционная картина светового пучка, прошедшего многомодовое оптическое волокно [Текст] / В.И. Борисов, В.И. Лебедев, А.Н. Куканов // Письма в ЖТФ. — 1984. — Т. 10. — № 5. — С. 287–290.

#### REFERENCES

1. Kiesewetter D.V. Numerical simulation of a speckle pattern formed by radiation of optical vortices in a multimode optical fibre. *Quantum Electron*, 2008, № 38(2), pp. 172–180. (rus)

2. Kiesewetter D.V. Kharakteristiki spekl-struktur izlucheniia volokonnykh svetovodov. *St. Petersburg State Polytechnical University Journal*, 2008, № 3, pp. 72–80. (rus)

3. Kiesewetter D.V. Vliianie defektov tortsevykh poverkhnostei svetovoda na parametry modovogo shuma pri nalichii opticheskikh vikhrei. *Journal of Optical Technology*, 2013, Vol. 80, № 1, pp. 10–16. (rus)

4. Il'in N.V., Kiesewetter D.V. Method of optical vortices excitation in graded index optical fibers. *St. Petersburg State Polytechnical University Journal: Physics and mathematics*, 2010, № 2 (98),

pp. 96–102. (rus)

5. Il'in N.V., Kiesewetter D.V. The numerical simulation of the light intensity distribution in proximity to the output end of optical fiber given the optical vortices. *St.-Petersburg State Polytechnical University Journal: Physics and mathematics*, 2013, № 1 (165), pp. 108–113. (rus)

6. Snyder A.W., Love J. *Optical Waveguide Theory*. Moscow, Izd-vo «Radio i sviaz'», 1987, 656 p. (rus)

7. Unger, H.G. *Planar Optical Waveguides and Fibres*. — Moscow: Izd-vo «Mir», 1980, 656 p. (rus)

8. Borisov V.I., Lebedev V.I., Kukanov A.N. Spiral'naia interferentsionnaia kartina svetovogo puchka, proshedshego mnogomodovoe opticheskoe volokno. *JETP Letters*, 1984, Vol. 10, № 5, pp. 287–290. (rus)

---

**КИЗЕВЕТТЕР Дмитрий Владимирович** — доктор физико-математических наук, доцент кафедры техники высоких напряжений, электроизоляционной и кабельной техники Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29  
dmitrykiesewetter@gmail.com

**ИЛЬИН Никита Владимирович** — аспирант кафедры техники высоких напряжений, электроизоляционной и кабельной техники Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29  
nv.ilyn@gmail.com.