

УДК 53.083.91: 535.3

Н.В. Ильин , Д.В. Кизеветтер

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

N.V. Ilin, D.V. Kiesewetter

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

**THE NUMERICAL SIMULATION OF THE LIGHT INTENSITY DISTRIBUTION
IN PROXIMITY TO THE OUTPUT END OF OPTICAL FIBER GIVEN THE
OPTICAL VORTICES**

Методом численного моделирования получены распределения интенсивности светового пучка вблизи выходного торца волоконного световода для случая интерференции плоской волны и оптического вихря световода. Определены основные свойства указанных интерференционных картин: спиралеобразный вид и их вращение при перемещении плоскости наблюдения.

ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ. ВОЛОКОННЫЙ СВЕТОВОД. ЭФФЕКТ МАГНУСА. ОПТИЧЕСКИЕ ВИХРИ. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ.

By the use of numerical simulation light intensity distributions have been obtained in proximity to the output end of optical fiber for the interference between the plane wave and the optical vortex of fiber. The main properties of those interference patterns such as helical type and their rotation during displacement of the observation plane were determined.

INTERFERENCE. OPTICAL FIBER. MAGNUS EFFECT. OPTICAL VORTICES. INTENSITY DISTRIBUTION.

Известный в механике эффект Магнуса [1] имеет аналог в оптике и называется оптическим эффектом Магнуса. Исследование указанного эффекта представлено в большом количестве научных публикаций, в частности, теоретические вопросы рассмотрены в работах [2, 3], оптический эффект Магнуса в волоконных световодах (ВС) — в работах [5, 6]. Подробному изучению эффекта вращения спекл-структуры в волоконных свето-

водах под действием различных внешних факторов посвящены как диссертации, так и статьи; например, при изменении поляризации входящего излучения — статья [3], при скручивании волокна — диссертация [7], в магнитном поле — статья [8].

Основные свойства интерференционных картин, формируемых оптическими вихрями и волноводными модами, можно выявить, если рассматривать интерференцию одиноч-



ных волн, имеющих плоский волновой фронт, и одиночных вихрей. Известно, что интерференционная картина расходящегося пучка со спиралеобразным волновым фронтом и опорной плоской волной представляет собой спираль в плоскости наблюдения. Интерференционная картина в сердцевине волоконного световода обычной волноводной моды и оптического вихря обладают сходным свойством, причем фаза спирали изменяется вдоль оси волокна. Другими словами, имеет место вращение интерференционной картины при перемещении плоскости наблюдения вдоль волокна. Аналогичными свойствами обладают и спекл-структуры (СПС), сформированные в результате интерференции оптических вихрей и волноводных мод волоконного световода.

В большинстве теоретических и экспериментальных работ исследуются распределения интенсивности либо в ближней, либо в дальней зонах дифракции. Экспериментально исследовать интерференционную картину волн в сердцевине ВС вдоль оси волокна не представляется возможным. В дальней зоне дифракции (ДЗД) в любом направлении относительно оси световода фазы интерферирующих волн, обусловленные выходящим излучением как обычных волноводных мод, так и оптических вихрей, изменяются одинаково в зависимости от расстояния до выходного торца. Поэтому при изменении расстояния от выходного торца до плоскости изображения вращения СПС не наблюдается, а линейные размеры интерференционной картины увеличиваются пропорционально расстоянию до торца, т. е. в ДЗД угловое распределение интенсивности остается неизменным.

В настоящее время остаются малоизученными характеристики спекл-структур и интерференционных картин, возникающих при участии оптических вихрей, при трансформации из ближней в дальнюю зону дифракции.

Исследованию распределений интенсивности при интерференции излучения оптических вихрей и волны с плоским волновым фронтом вблизи поверхности выходного торца световода и посвящена данная работа.

Методика расчета

Для расчетов использовались выражения для напряженности электромагнитного поля в

приближении слабонаправляемых мод [10,11], образующих линейно-поляризованные модовые группы [10] в ВС со ступенчатым профилем показателя преломления (ППП):

$$\begin{aligned}EH_x(r, \varphi) &= i \cdot \frac{\beta \cdot a}{u} \cdot J_{m+1} \left(\frac{u \cdot r}{a} \right) \cdot \cos((m+1) \cdot \varphi); \\EH_y(r, \varphi) &= i \cdot \frac{\beta \cdot a}{u} \cdot J_{m+1} \left(\frac{u \cdot r}{a} \right) \cdot \sin((m+1) \cdot \varphi); \\HE_x(r, \varphi) &= -i \cdot \frac{\beta \cdot a}{u} \cdot J_{m-1} \left(\frac{u \cdot r}{a} \right) \cdot \cos((m-1) \cdot \varphi); \\HE_y(r, \varphi) &= i \cdot \frac{\beta \cdot a}{u} \cdot J_{m-1} \left(\frac{u \cdot r}{a} \right) \cdot \sin((m-1) \cdot \varphi); \end{aligned} \quad (1)$$

где r, φ – координаты цилиндрической системы, β – постоянная распространения, a – радиус сердцевины, m – азимутальный индекс моды, J_n – функции Бесселя n -го порядка, u – собственное число, зависящее от m и радиального индекса моды s .

Решения (1) соответствуют обычным волноводным модам, азимутальную зависимость которых (в виде синуса или косинуса) следует рассматривать как стоячую волну по координате φ . Функция вида $\exp(-i\ell\varphi)$ также является решением волнового уравнения в ВС [11], но описывает волну, которую следует считать бегущей по координате φ . Если принять во внимание движение волнового фронта вдоль оси световода с фазовой скоростью ω/β , то с учетом движения по φ результирующее движение волнового фронта является спиралеобразным. Решение, соответствующее волне, бегущей по координате φ , может быть получено линейной комбинацией двух решений (1) т. е. двух мод с фазовым смещением по азимутальному углу на $\pi/2$:

$$R \cdot \exp(i\ell\varphi) = R \cos(\ell\varphi) + iR \sin(\ell\varphi), \quad (2)$$

где R – радиальная зависимость.

Аналогично случаю образования линейно-поляризованных групп, оптические вихри с зависимостью (2) формируются парой HE - и EH -мод, имеющих азимутальные зависимости с одинаковыми тригонометрическими функциями поперечных составляющих напряженности электромагнитного поля.

Расчет дифракции производился численным методом с использованием формулы

$$E(x', y') = \frac{ik}{4\pi} (1 + \cos \theta) \times \int_{(S)} E(x, y) \frac{\exp(-ik|r-r'|)}{|r-r'|} dx dy. \quad (3)$$

где $k = 2\pi/\lambda$ (λ – длина волны излучения, θ – угол между осью Oz и прямой, проходящей через точки $(0, 0)$ в плоскости Oz (x', y') в плоскости наблюдения $X'O'Y'$. Плоскость торца – XOY , координаты точек в этой плоскости – (x, y) , радиус-вектор – r ; распределение электрической напряженности – $E(x, y)$. Расстояние отсчитывается по оси Oz . Точка $0'$ также лежит на оси Oz . Плоскость наблюдения – $X'O'Y'$, точки в этой плоскости имеют координаты (x', y') . Расстояние от плоскости XOY до плоскости $X'O'Y'$, т. е. расстояние до плоскости наблюдения, обозначим как L_p .

Для увеличения скорости расчетов использовались матричные операторы в среде MATLAB. Расчетные распределения интенсивности визуализировались. Были выполнены расчеты для случая интерференции оптического вихря различного порядка и плоской электромагнитной волны в световоде со ступенчатым ППП на выходном торце ВС при различных расстояниях от выходного торца. Использование при расчетах плоской волны с равномерным распределением напряженности по сердцевине позволило не задавать конкретного типа моды (например, HE_{11}) и в то же время выявить основные свойства интерференционных картин. Примеры распределений интенсивности для ВС с радиусом сердцевины $a = 100$ мкм, числовой апертурой $NA = 0,22$ при длине волны $0,6328$ мкм приведены на рис. 1. Выбранные расстояния от выходного торца (20 и 400 мкм) позволяют определить изменения распределений интенсивности при переходе от ближней к дальней зоне дифракции: при расстоянии 20 мкм распределение приблизительно соответствует распределению в ближней, а при 400 мкм – проявляются свойства, характерные для дальней зоны дифракции, но область локализации излучения изменяется незначительно. Рассчитывались также функции взаимной корреляции (ФВК) распределений интенсивности как зависимости от $\Delta\varphi$ при различных расстояниях от выходного торца по формуле

$$F_{SC}(\Delta\varphi) = \frac{1}{2\pi(r_1 - r_2)} \int_{r_1}^{r_2} \int_0^{2\pi} (I_1(r, \varphi) - \bar{I}_1)(I_2(k_p r, \varphi - \Delta\varphi) - \bar{I}_2) r dr d\varphi, \quad (4)$$

где I_1, I_2 – распределения интенсивности на двух различных расстояниях от выходного торца, k_p – коэффициент пропорциональности, учитывающий расходимость излучения.

Пример визуализированных ФВК для указанных случаев приведен на рис. 2. Значение ФВК зависит как от азимутального угла, так и от расстояния до оси; темные области изображения (рис. 2) соответствуют минимальным значениям ФВК, светлые – максимальным. Изменение углового положения максимумов и минимумов интенсивности при изменении расстояния L_p до выходного торца ВС можно рассматривать как вращение интерференционной картины с некоторой ее трансформацией.

Выявленные закономерности

Выполненные расчеты позволяют описать основные закономерности трансформации распределений интенсивности интерференционных картин, формируемых оптическим вихрем и плоской волной на выходном торце ВС. Из рис. 1 следует, что интерференционные картины, имеющие в ближней зоне дифракции радиальное распределение интенсивности, при трансформации в дальней зоне приобретают спиралеобразный вид. Можно предположить, что данное свойство сохранится и при большом количестве интерферирующих оптических вихрей и плоской волны. Таким образом, спиралеобразный вид зерен спеклов при определенных углах выхода излучения, описанный в работе [12], можно объяснить результатом интерференции оптических вихрей и волноводных мод, имеющих плоский волновой фронт. Полученные результаты расчетов объясняет также экспериментально выявленный эффект вращения спеклов, представленный в работе [13].

При увеличении расстояния от выходного торца световода до плоскости наблюдения происходит вращение интерференционной картины, т. е. вращение продолжается в свободном пространстве. При увеличении расстояния L_p угловая скорость вращения ($\Delta\varphi/\Delta L_p$) умень-

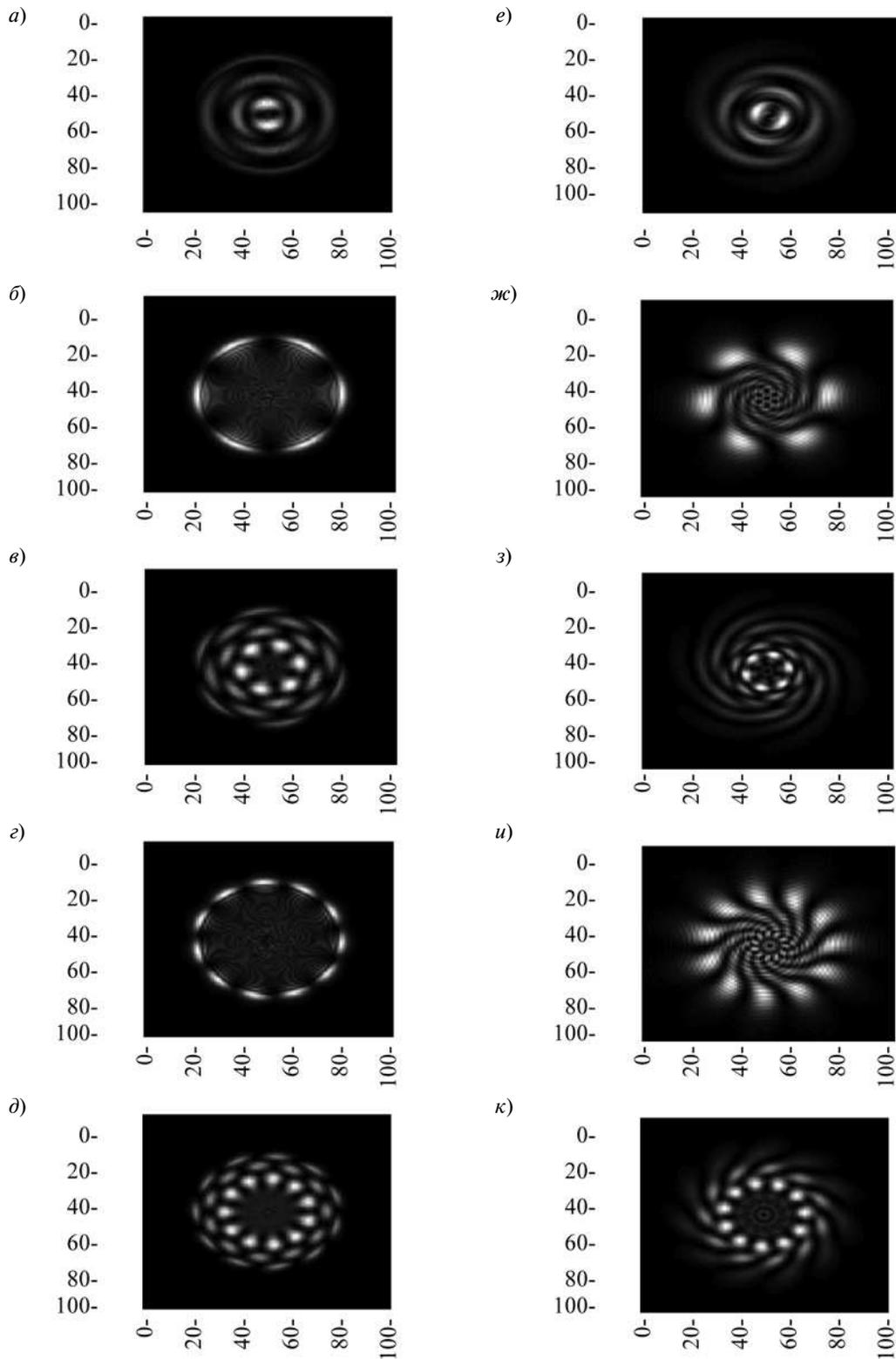


Рис. 1. Визуализированные распределения интенсивности светового пучка на расстояниях 20 мкм (*a – д*) и 400 мкм (*e – к*) от выходного торца для случаев: $m = 1, s = 10$ (*a, e*); $m = 5, s = 1$ (*б, ж*); $m = 5, s = 10$ (*в, з*); $m = 10, s = 1$ (*г, и*); $m = 10, s = 10$ (*д, к*).

По осям Ox и Oy отложены расстояния в микрометрах

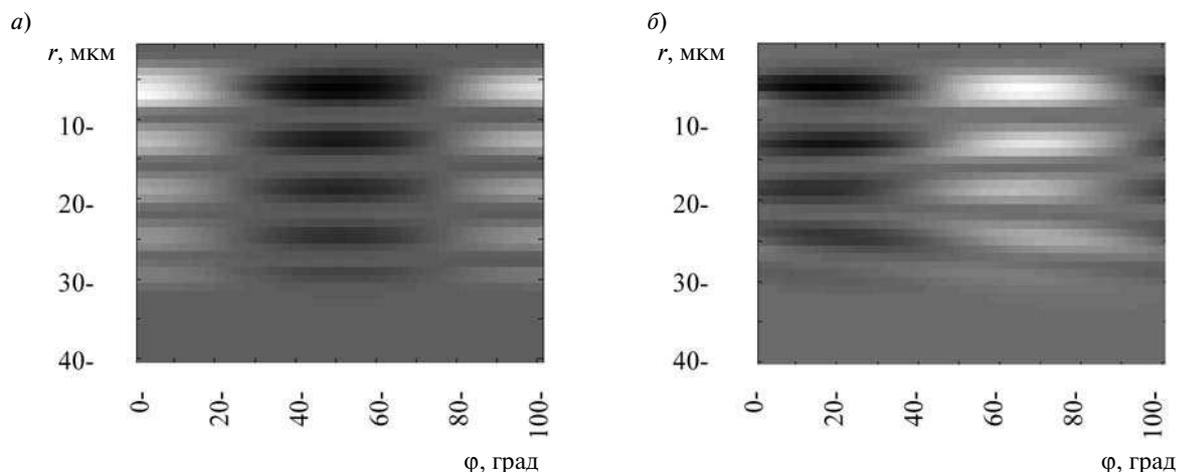


Рис. 2. Визуализированные функции взаимной корреляции распределений интенсивности на расстоянии 20 мкм (а) и 400 мкм (б) от выходного торца для случая $m = 1, s = 10$

шается и постепенно снижается до нуля в ДЗД. Угловая скорость вращения интерференционной картины зависит от индексов моды.

Использование численного моделирования позволило выявить основные свойства интер-

ференционных картин, формируемых плоской электромагнитной волной и оптическим вихрем при трансформации из ближней зоны дифракции в дальнюю и объяснить ранее полученные экспериментальные данные.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Прондталь, Л.** Эффект Магнуса и ветряной ко- рабль [Текст] / Л. Прондталь // Успехи физических наук. – 1925. – Т. 5. – Вып. 1-2. – С. 1–27.
2. **Болотовский, Б.М.** Оптический аналог эффекта Магнуса [Текст] / Б.М. Болотовский, С.Н. Столяров // Письма в ЖЭТФ. – 1977. – Т. 25. – Вып. 3. – С. 148 – 150.
3. **Блиох, К.Ю.** Оптический эффект Магнуса как следствие анизотропии фазы Берри [Текст] / К.Ю. Блиох, Ю.П. Блиох // Письма в ЖЭТФ. – 2004. – Т. 79. – Вып. 11. – С. 647–650.
4. **Садыков, Н.Р.** Поляризационные эффекты, обусловленные взаимным влиянием траектории и поляризации [Текст] / Н.Р. Садыков // Известия РАН. Серия физическая. – 2006. – Т. 70. – Вып. 4. – С. 532 – 533.
5. **Воляр, А.В.** Изменение знака топологического заряда оптических вихрей поля многомодового волокна [Текст] / А.В. Воляр, С.Н. Лаптева, Т.А. Фадеева // Письма в ЖЭТФ. – 1994. – Т. 20. – Вып. 5. – С. 27 – 31.
6. **Даршт, М.Я.** Поворот изображения в много- модовом оптическом волокне при смене знака циркулярной поляризации [Текст] / М.Я. Даршт, Б.Я. Зельдович, Р. Коваршик, Н.Д. Кундикова [Текст] // Известия Челябинского научного центра. – 2003. – Вып. 2 (19). – С. 10 – 14.
7. **Катаевская, И.В.** Взаимовлияние поляриза- ции и траектории света при его распространении в оптическом волокне [Текст]: Дис. ... канд. физ.- мат. наук: 01.04.05 / Катаевская Ирина Витальевна. [Место защиты: Ин-т электрофизики УрО РАН] – Челябинск, 1999. – 105 с. – Библиогр. : С. 92 – 104, ГРБ ОД 61 00-1/683-1.
8. **Даршт, М.Я.** Наблюдение «магнитного» пово- рота спекл-картины света, прошедшего через опти- ческое волокно [Текст] / М.Я. Даршт, И.В. Жирга- лова, Б.Я. Зельдович, Н.Д. Кундикова // Письма в ЖЭТФ. – 1994. – Т. 59. – Вып. 11. – С. 734 – 735.
9. **Большаков, М.В.** Особенности распростра- нения когерентного поляризованного света в опти- ческих волокнах [Текст] / Дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.04.05 / Большаков Максим Вячеславович. [Место защиты: Ин-т электрофизики УрО РАН] – Челябинск, 2007. – 148 с. – Библиогр. С. 139 – 148, ГРБ ОД 61 07-1/1241.
10. **Унгер, Х.Г.** Планарные и волоконные опти- ческие волноводы [Текст]: Пер. с англ. / Х.Г. Унгер. – М.: Изд-во «Мир», 1980. – 656 с.
11. **Содха, М.С.** Неоднородные оптические вол- новоды [Текст]: Пер. с англ. / М.С. Содха, А.К. Гха- так. – М.: Изд-во «Связь», 1980. – 216 с.
12. **Кизеветтер, Д.В.** Многомодовые свето- воды. Поляризационные и интерференционные



эффекты в многомодовых волоконных световодах [Текст] / Д.В. Кизеветтер. – Лейпциг: LAP Lambert Academic Publishing, 2011. – 232 с. – ISBN 978-3-8433-0441-2.

13. **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.

ИЛЬИН Никита Владимирович – аспирант кафедры физической электроники Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

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

КИЗЕВЕТТЕР Дмитрий Владимирович – доктор физико-математических наук, доцент кафедры электрической изоляции, кабелей и конденсаторов Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

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