

# Краткие сообщения

УДК 535.394

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОДОВОГО СОСТАВА ИЗЛУЧЕНИЯ, РАСПРОСТРАНЯЮЩЕГОСЯ В МАЛОМОДОВОМ ОПТИЧЕСКОМ ВОЛОКНЕ

*М.В. Большаков<sup>1</sup>, М.А. Комарова<sup>2</sup>, Н.Д. Кундикова<sup>3</sup>*

**Исследована возможность восстановления модового состава излучения, распространяющегося в оптическом волокне со ступенчатым профилем показателя преломления, по распределению поля на выходном торце волокна. Разработан и протестирован метод определения комплексных амплитуд мод оптического волокна с помощью генетического алгоритма и продемонстрирована возможность его использования.**

*Ключевые слова: оптическое волокно, моды оптического волокна, генетический алгоритм.*

Интерес к волоконной оптике обусловлен множествами достоинств, обеспеченных структурой оптических волокон, и явлений, возникающих в нем, а также благодаря развитию фундаментальных и прикладных исследований в оптике и квантовой электронике. Хотя теория оптических волноводов хорошо разработана (например, [1, 2]), определение характеристик когерентного излучения остается весьма актуальной задачей. Практическая реализация многомодовых систем всегда осложнялась из-за множества нерешенных проблем. Такие проблемы возникают как в экспериментальных, так и в теоретических задачах, обусловленных особенностями многомодового волноводного распространения. Важнейшим вопросом в разработках и исследованиях таких систем является разложение световых лучей по модам в оптическом волноводе [3, 4]. Знание модового состава волокна необходимо, например, для определения дисперсии материала, образующего волновод [5], может эффективно использоваться в оптических коммуникациях, использующих волоконные лазеры и усилители [6]. Следует отметить, что волоконные лазеры, накачиваемые через оболочку, требуют полного знания и анализа модового состава исходного излучения, например, чтобы оптимизировать оптическую схему накачки [7]. Приблизительные методы для многомодового волокна, которые предполагали, что модовый состав непрерывен и распределение поля азимутально-симметрично уже известны достаточно давно (например, [8]), но до настоящего времени не было проведено точного анализа модового состава волокна.

В 1994 году был впервые предсказан и экспериментально обнаружен эффект поворота спекл-картины света при прохождении через оптическое волокно, помещенное во внешнее продольное магнитное поле при смене знака магнитного поля или его включении [9]. Это явление представляет собой наибольший интерес. Таким образом, прикладной характер носит перспективность использования оптических волокон в качестве датчиков физических полей (электрического и магнитного поля, механические напряжения и др.) и инструмента исследований в квантовой нелинейной оптике. Вместе с тем ряд проблем, связанных с влиянием магнитного поля на распространение света в волокне, недостаточно изучен. Одна из проблем заключается в согласовании экспериментально полученных данных с теоретическими. Если бы удалось в теории получить коэффициенты при модах, которые были возбуждены в результате экспериментальной работы, то можно было бы приблизить модель к эксперименту. В общем случае задача нахождения коэффициентов при различных модах представляется сложной задачей оптимизации. Наиболее подходящим методом оптимизации для решения этой задачи является генетический алгоритм [10, 11].

<sup>1</sup> Большаков Максим Вячеславович – кандидат физико-математических наук, доцент, кафедра оптики и спектроскопии, Южно-Уральский государственный университет.

<sup>2</sup> Комарова Марианна Алексеевна – аспирант, кафедра оптики и спектроскопии, Южно-Уральский государственный университет.  
E-mail: marianna@mail.ru

<sup>3</sup> Кундикова Наталия Дмитриевна – доктор физико-математических наук, профессор, декан физического факультета, отдел нелинейной оптики Института электрофизики РАН, кафедра оптики и спектроскопии, Южно-Уральский государственный университет.  
E-mail: knd@susu.ac.ru

Для того чтобы правильно задавать модовый состав в оптическом волокне, необходимо контролировать его на выходе. Выбор коэффициентов при разных модах в пучке и определяет модовый состав излучения оптического волокна. Все вышеизложенное и определяет актуальность данного исследования.

В настоящей статье исследуется возможность использования генетического алгоритма для определения модового состава излучения оптического волокна. Фактически исследование посвящено решению обратной задачи волоконной оптики – восстановлению модового состава излучения во входной торцевой области оптического волновода по наблюдаемой интерференционной картине (коротко – спекл-картине). Целью данной работы являлась именно разработка алгоритма для определения коэффициентов при различных модах оптического волновода.

Предлагаемый метод состоит в подборе таких комплексных амплитуд  $C_{m,N}$  при модах, чтобы распределение интенсивности (спекл-картина) совпадало с измеренным распределением интенсивности. Распределение поля на выходе из волокна рассчитывалось по выражению [12]:

$$E^{\pm}(r, \varphi, z) = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ \pm i \end{pmatrix} \cdot \left\{ \sum_{m \neq 1} \sum_N C_{\mp, m, N} e^{\mp i m \varphi} F_{m, N}(r) e^{i z (\beta_{m, N} + \delta \beta_{m, N}^{(2)})} + \right. \\ \left. + \sum_m \sum_N C_{\pm, m, N} e^{\pm i m \varphi} F_{m, N}(r) e^{i z (\beta_{m, N} + \delta \beta_{m, N}^{(1)})} + \right. \\ \left. + \sum_N C_{\mp, 1, N} e^{\mp i m \varphi} F_{1, N}(r) e^{i z \beta_{1, N}} (e^{i 2 z \delta \beta_{1, N}^{(2)}} + 1) \right\} + \\ \left. + \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ \mp i \end{pmatrix} \cdot \left[ e^{\pm i \varphi} \sum_N C_{\mp, 1, N} F_{1, N}(r) e^{\pm i z \beta_{1, N}} (e^{i 2 z \delta \beta_{1, N}^{(2)}} - 1) \right], \right. \quad (1)$$

где знак «+» в верхнем регистре  $E^{\pm}(r, \varphi, z)$  означает, что на входной торец волокна падает излучение с правой циркулярной поляризацией, а знак «-» – с левой. Затем распределение поля преобразовывалось в распределение интенсивности.

В общем случае задача нахождения коэффициентов  $C_{m,N}$  при различных модах представляется сложной задачей оптимизации. Наиболее подходящим методом оптимизации для решения данной задачи является генетический алгоритм. Этот алгоритм может эффективно применяться для решения задач дискретной оптимизации, определенных на конечных множествах произвольной природы. Комплексные амплитуды  $C_{m,N}$  при различных модах можно представить функцией

$C_{m,N} = c_{m,N} \cdot e^{\psi_{m,N}}$ . В программе они задавались с помощью генератора случайных чисел. Если на входной торец волокна падает свет с циркулярной поляризацией, то каждой моде, распространяющейся в волокне, соответствуют два коэффициента  $C_{-,m,N} = c_{-,m,N} \cdot e^{\psi_{-,m,N}}$  и  $C_{+,m,N} = c_{+,m,N} \cdot e^{\psi_{+,m,N}}$ , где знаки «+» и «-» в обозначениях соответствуют знакам при  $m$  в формуле (1). Таким образом, каждая мода задается четырьмя коэффициентами: двумя амплитудными  $c_{m,N}^+$ ,  $c_{m,N}^-$  и двумя фазовыми  $\psi_{m,N}^+$ ,  $\psi_{m,N}^-$ .

Подбор комплексных амплитуд  $C_{m,N}$  при модах осуществляли так, чтобы эталонное распределение поля совпало с каким-либо расчетным распределением поля. В программе вычислялись амплитудные  $A$  и фазовые  $\varphi$  распределения  $x$  и  $y$  компонент поля, по которым и производилось сравнение распределений поля. Для сравнения использовалась функция среднеквадратичного отклонения. Такие жесткие условия обеспечили получение одного решения, которое скатывалось к эталонным коэффициентам при модах.

Для моделирования было выбрано маломодовое оптическое волокно со ступенчатым профилем показателя преломления со следующими параметрами: показатель преломления сердцевины  $n = 1,47$ , показатель преломления оболочки  $n = 1,46588$ , радиус сердцевины волокна  $\rho = 4,5$  мкм, длина волокна  $d = 40$  см. Для данного оптического волокна и длины волны света, распространяющейся в нем, равной 0,633 мкм, возбуждаются 4 моды. Были произведены тестовые

## Краткие сообщения

---

расчеты, найденные коэффициенты при четырех модах находились с некоторой погрешностью. Средняя погрешность для амплитудных и фазовых коэффициентов составляла 8 %.

Таким образом, был разработан и протестирован метод определения комплексных амплитуд мод оптического волокна с помощью генетического алгоритма. Основным преимуществом данного метода является нахождение одного единственного экстремума, обеспеченного жесткими условиями сравнения распределений поля и большим размером популяции (параметр генетических операторов).

### Литература

1. Adams, M.J. An introduction to optical waveguides / M.J. Adams. – J. Wiley and Sons, 1981. – 401 p.
2. Снайдер, А. Теория оптических волноводов / А. Снайдер, Д. Лав. – М.: Радио и связь, 1987. – 656 с.
3. Kaiser, T. Complete modal decomposition for optical fibers using CGH-based correlation filters / T. Kaiser, D. Flamm, S. Schroter, M. Duparre // Optics Express. – 2009. – V. 17, № 11. – P. 9347–9356.
4. Shapira, O. Complete modal decomposition for optical waveguides / O. Shapira, A.F. Abouraddy, J.D. Joannopoulos, Y. Fink // Physical Review Letters. – 2005. – V. 94, № 14. – P. 143902.
5. Feit, M.D. Calculation of dispersion in graded-index multimode fibers by a propagating-beam method / M.D. Feit, J.A. Fleck, Jr. // Applied Optics. – 1979. – V. 18, № 16. – P. 2843–2851.
6. Huo, Y. Analysis of transverse mode competition and selection in multicore fiber lasers / Y. Huo, P.K. Cheo // Josa B. – 2005. – V. 22, № 11. – P. 2345–2349.
7. Gong, M. Numerical modeling of transverse mode competition in strongly pumped multimode fiber lasers and amplifiers / M. Gong, Y. Yuan, C. Li, P. Yan, H. Zhang, S. Liao // Optics Express. – 2007. – V. 15, № 6. – P. 3236–3246.
8. Snyder, A.W. Modes of optical waveguides / A.W. Snyder, W.R. Young // Journal Optical Society of America. – 1978. – V. 68, № 3. – P. 297–307.
9. Наблюдение «магнитного» поворота спекл-картины света, прошедшего через оптическое волокно / М.Я. Даршт, И.В. Жиргалова, Б.Я. Зельдович, Н.Д. Кундикова // Письма в ЖЭТФ. – 1994. – Т. 59, № 11. – С. 734–736.
10. Гладков, Л.А. Генетические алгоритмы / Л.А. Гладков, В.М. Курейчик, В.В. Курейчик. – М.: Физматлит, 2006. – 320 с.
11. Емельянов, В.В. Теория и практика эволюционного моделирования / В.В. Емельянов, В.М. Курейчик, В.В. Курейчик. – М.: Физматлит, 2003. – 432 с.
12. Большаков, М.В. Особенности распространения когерентного поляризованного света в оптических волокнах / М.В. Большаков, Н.С. Ваганова, Н.Д. Кундикова // Общая и техническая физика. – 2006. – Вып. 1(31). – С. 10–15.

*Поступила в редакцию 13 сентября 2012 г.*

## DETERMINATION OF THE MODE COMPOSITION PROPAGATING IN A FEW-MODE OPTICAL FIBER

M.V. Bolshakov<sup>1</sup>, M.A. Komarova<sup>2</sup>, N.D. Kundikova<sup>3</sup>

The possibility for regeneration of a mode structure of radiation extending in the optical fiber with step index by field distribution at out fiber end is studied in the article. Test method for complex amplitudes of optical fiber modes is developed with the help of genetic algorithm and the possibility for its application is shown.

*Keywords: optical fiber, optical fiber modes, genetic algorithm.*

### References

1. Adams M.J. *An introduction to optical waveguides*. J. Willey and Sons, 1981. 401 p.
2. Snaider A., Lav D. *Teoriia opticheskikh volnovodov* (Optical Waveguide Theory). Moscow: Radio i svyaz', 1987. 656 p. (in Russ.). [Snyder A.W., Love J. *Optical Waveguide Theory*. Chapman and Hall, 1983. 734 p.] (in Eng.).
3. Kaiser T., Flamm D., Schroter S., Duparre M. Complete modal decomposition for optical fibers using CGH-based correlation filters. *Optics Express*. 2009. Vol. 17, no. 11. pp. 9347–9356.
4. Shapira O., Abouraddy A.F., Joannopoulos J.D., Fink Y. Complete modal decomposition for optical waveguides. *Physical Review Letters*. 2005. Vol. 94, no 14. p. 143902.
5. Feit M.D., Fleck J.A., Jr. Calculation of dispersion in graded-index multimode fibers by a propagating-beam method. *Applied Optics*. 1979. Vol. 18, no. 16. pp. 2843–2851.
6. Huo Y., Cheo P.K. Analysis of transverse mode competition and selection in multicore fiber lasers. *Josa B*. 2005. Vol. 22, no 11. pp. 2345–2349.
7. Gong M., Yuan Y., Li C., Yan P., Zhang H., Liao S. Numerical modeling of transverse mode competition in strongly pumped multimode fiber lasers and amplifiers. *Optics Express*. 2007. Vol. 15, no 6. pp. 3236–3246.
8. Snyder A.W., Young W.R. Modes of optical waveguides. *Journal Optical Society of America*. 1978. Vol. 68, no. 3. pp. 297–307.
9. Darshat M.Ya., Zhirgalova I.V., Zel'dovich B.Ya., Kundikova N.D. *Pis'ma v ZhETF*. 1994. Vol. 59, no. 11. pp. 734–736. (in Russ.).
10. Gladkov L.A., Kureichik V.M., Kureichik V.V. *Geneticheskie algoritmy* (Genetic algorithms). M.: Fizmatlit, 2006. 320 p.
11. Emel'ianov V.V., Kureichik V.M., Kureichik V.V. *Teoriia i praktika evoliutsionnogo modelirovaniia* (Theory and practice of evolutionary simulation). Moscow: Fizmatlit, 2003. 432 p. (in Russ.).
12. Bolshakov M.V., Vaganova N.S., Kundikova N.D. *Obshchaia i tekhnicheskaiia fizika*. 2006. Issue. 1(31). pp. 10–15. (in Russ.).

<sup>1</sup> Bolshakov Maxim Vyacheslavovich is Cand. Sc. (Physics and Mathematics), associate professor, Optics and Spectroscopy Department, South Ural State University.

<sup>2</sup> Komarova Marianna Alekseevna is Post-graduate student, Optics and Spectroscopy Department, South Ural State University.  
E-mail: marianna@mail.ru

<sup>3</sup> Kundikova Nataliya Dmitrievna is Dr. Sc. (Physics and Mathematics), Professor, Dean of Physics Faculty, Joint Nonlinear Optics Laboratory of IEF RAS, Optics and Spectroscopy Department, South Ural State University.

E-mail: knd@susu.ac.ru