

ВОЛОКОННАЯ ОПТИКА

Исследование эксплуатационных свойств пластиковых оптических волокон, используемых в светофоре*

С.Савович, А.Джорджевич, Р.Минь, И.Савович

Исследованы рабочие характеристики многомодового пластикового оптического волокна (ПОВ), используемого в системе светофора. С этой целью предложена аналитическая функция, позволяющая прогнозировать угловое распределение мощности на выходном конце многомодового ПОВ при строго коаксиальном вводе пучка на входе волокна. Показано, как взаимодействие мод влияет на угловое распределение выходной мощности вдоль волокна. Обнаружено, что по мере увеличения длины ПОВ угловое распределение выходной мощности расширяется, пока не достигается стационарное распределение. Это расширение несущественно для коротких ПОВ длиной до 10 м. В результате можно определить эффективную площадь излучения на выходе ПОВ любой длины в составе различных систем освещения, таких как светофоры, системы освещения зданий и мостов.

Ключевые слова: пластиковое оптическое волокно, взаимодействие мод, поток мощности, светофор.

1. Введение

Пластиковые оптические волокна (ПОВ) изготавливаются из недорогих пластиков с окнами пропускания в видимой области (500 – 800 нм), таких как полиметилметакрилат (ПММА), полистирол и поликарбонаты. По сравнению с оптическими волокнами из диоксида кремния, которые требуют осторожного обращения с соблюдением предохранительных мер, ПОВ гораздо более просты в обращении, обладают большей устойчивостью к изгибу, ударам и вибрации. В настоящее время ПОВ зарекомендовали себя как успешное средство связи на близких расстояниях, где их использование экономически выгодно. Благодаря новым технологическим достижениям сети на основе ПОВ становятся весьма конкурентоспособными во множестве важных приложений, требующих передачи данных на короткие расстояния, таких как домашние сети, передача данных внутри транспортных средств и промышленное управление. ПОВ также широко используются в системах обнаружения, освещения и иллюминации благодаря их низкой стоимости, малой массе, прозрачности в видимой области и механической гибкости.

Затухание мод [1, 2] и величина взаимодействия мод [2 – 5] являются важными факторами, определяющими передаточные характеристики пластиковых оптических волокон. Взаимодействие мод, обусловленное наличием

примесей, а также неоднородностями, возникающими в процессе изготовления волокна (например, микроизгибы, неоднородности границы сердцевина – оболочка, флуктуации распределения показателя преломления), приводит к передаче мощности между соседними модами. По сравнению с оптическими кварцевыми волокнами ПОВ характеризуются гораздо более сильным взаимодействием мод и большим их затуханием [1, 2, 5 – 7].

Угловое распределение мощности на выходе оптического волокна тщательно изучалось в ближнем и дальнем полях. Исследования связи мод и предсказания структуры выходного поля излучения проводились методами геометрической оптики (в лучевом приближении) [8, 9]. Структуры поля рассчитывались в зависимости от условий на входе в волокно и его длины с использованием уравнения для потока мощности [6, 7, 10 – 13], а также уравнений Фоккера–Планка и Ланжевена [14]. Для характеристики взаимодействия мод использовался коэффициент связи D , определяющий скорость обмена мощностью между модами [3, 11, 12, 15]. Было показано, что моделирование волокна с использованием этого параметра позволяет правильно предсказывать эффекты взаимодействия мод, наблюдаемые на практике (см., напр., [16, 17]).

Хотя светодиодные матрицы и светофоры получили широкое распространение, последние все еще не так безопасны, как это необходимо. Когда требуется заменить светодиодную матрицу или светофор нуждается в ремонте, приходится прерывать движение в одной полосе и использовать механизмы для поднятия специалиста-ремонтника со всеми вытекающими отсюда опасностями, не считая экономических затрат и нарушения дорожного движения. Была предложена новая система светофора со светодиодными матрицами в основании и пучком оптических волокон, направляющих свет в верхнюю часть светофора – на диски [18]. Светофор сконструирован таким образом, что жгут оптических волокон, соединенный с осветительной пластиной светофора (рис.1), может быть помещен непосредственно в несущую трубу свето-

* Перевод с англ. В.Л.Дербова.

S.Savović. University of Kragujevac, Faculty of Science, R. Domanovića 12, 34000 Kragujevac, Serbia; e-mail: savovic@kg.ac.rs

A.Djordjević. City University of Hong Kong, 83 Tat Chee Avenue, Kowloon, Hong Kong, China

R.Min. Center for Cognition and Neuroergonomics, Beijing Normal University at Zhuhai, China

I.Savović. University of Belgrade, 11000 Belgrade, Serbia

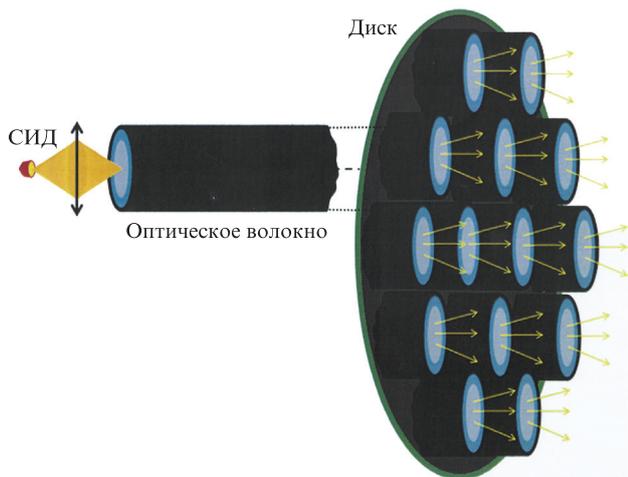


Рис.1. Общая схема осветительного прибора [18].

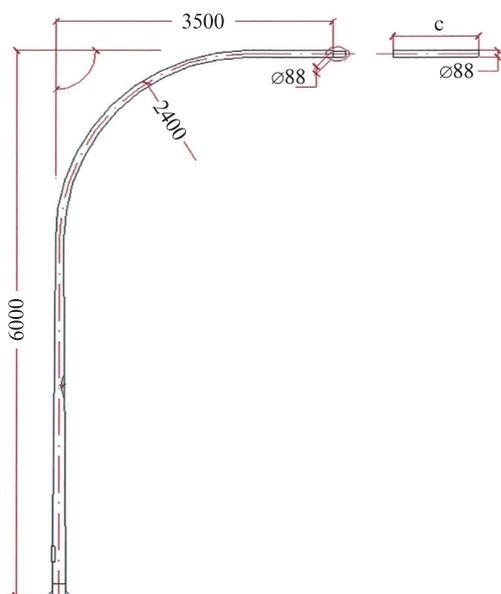


Рис.2. Схема установки светофора (размеры даны в миллиметрах) [18].

фора (рис.2), что исключает необходимость дальнейших изменений. В настоящей работе представлены результаты численного расчета эволюции распределения мощности моды вдоль волокна с изменением расстояния от входного конца волокна для ПОВ, используемого в системе светофора, описанного в работе Ф.Рез-Осон и др. [18], а также показано, как связь мод влияет на угловое распределение мощности на выходе волокна. Это представляет интерес для оценки эффективной площади излучения на выходном конце волокна как части светофорной системы.

2. Уравнение для потока мощности

Уравнение потока мощности имеет следующий вид [10]:

$$\frac{\partial P(\theta, z)}{\partial z} = -\alpha(\theta)P(\theta, z) + \frac{D}{\theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\theta \frac{\partial P(\theta, z)}{\partial \theta} \right), \quad (1)$$

где $P(\theta, z)$ – выходное угловое распределение мощности; z – расстояние от входного конца волокна; θ – угол распро-

странения луча относительно оси волокна; D – коэффициент связи, который считается постоянным [6, 11]; $\alpha(\theta)$ – коэффициент ослабления моды. Граничные условия задаются в виде $P(\theta_{cr}, z) = 0$, где θ_{cr} – критический угол волокна, и $D(\partial P/\partial \theta) = 0$ при $\theta = 0$. Условие $P(\theta_{cr}, z) = 0$ означает, что моды с бесконечно высокими потерями не обладают мощностью. Условие $D(\partial P/\partial \theta) = 0$ при $\theta = 0$ означает, что взаимодействие мод ограничено модами, распространяющимися с $\theta > 0$. За исключением области вблизи отсечки коэффициент ослабления постоянен, $\alpha(\theta) = \alpha_0$, во всей области углов направляемых мод $0 \leq \theta \leq \theta_{cr}$ [11] (в решении это проявляется как множитель $\exp(-\alpha_0 z)$, не зависящий от θ). В результате зависимость $\alpha(\theta)$ не нужно учитывать при решении уравнения (1) для связи мод, и уравнение потока мощности приобретает вид [6, 12]

$$\frac{\partial P(\theta, z)}{\partial z} = \frac{D}{\theta} \frac{\partial P(\theta, z)}{\partial \theta} + D \frac{\partial^2 P(\theta, z)}{\partial \theta^2}. \quad (2)$$

Если же распределение поля на входе в волновод центрировано на $\theta_0 = 0$ [14] и справедливо граничное условие $D(\partial P/\partial \theta) = 0$ при $\theta = 0$, то уравнение (2) сводится к уравнению

$$\frac{\partial P(\theta, z)}{\partial z} = D \frac{\partial^2 P(\theta, z)}{\partial \theta^2}. \quad (3)$$

Распределение мощности с удалением от входного конца волокна остается под теми же углами, но ширина его растет. Если рассматривать $P(\theta, z)$ как распределение вероятности, то видно, что уравнение (3) представляет собой специальное уравнение Фоккера–Планка с постоянным коэффициентом диффузии D [14]. Решение этого уравнения записывается как [19]

$$P(\theta, z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_z^2}} \exp\left(-\frac{\theta^2}{2\sigma_z^2}\right). \quad (4)$$

Дисперсию σ_z^2 выходного углового распределения мощности (4) при длине волокна z можно рассчитать по формуле

$$\sigma_z^2 = \sigma_{z=0}^2 + 2Dz, \quad (5)$$

где $\sigma_{z=0}^2$ – дисперсия входного распределения пучка. Коэффициент связи D согласно [19] определяется как

$$D = \frac{\sigma_{z=0}^2 - \sigma_z^2}{2z}. \quad (6)$$

Используя уравнение (5), запишем (4) в виде

$$P(\theta, z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi(\sigma_{z=0}^2 + 2Dz)}} \exp\left[-\frac{\theta^2}{2(\sigma_{z=0}^2 + 2Dz)}\right]. \quad (7)$$

С учетом затухания уравнение (7) принимает вид

$$P(\theta, z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi(\sigma_{z=0}^2 + 2Dz)}} \exp\left[-\frac{\theta^2}{2(\sigma_{z=0}^2 + 2Dz)}\right] \exp(-\alpha_0 z). \quad (8)$$

Уравнение (8) описывает пространственные изменения распределения мощности вдоль многомодового оптического волокна со ступенчатым профилем показателя преломления длиной z , когда распределение мощности на входе центрировано на $\theta_0 = 0$ со стандартным отклонением $\sigma_{z=0}$. Мы полагаем, что нами впервые предложена аналитическая функция (8), описывающая угловое распределение мощности на выходе многомодового оп-

тического волокна при условии, что на входе пучок строго центрирован и направлен по оси волокна, – это наиболее часто встречающийся случай при практическом использовании многомодовых оптических волокон. По сравнению с ранее предложенной нами аналитической функцией (4), которая учитывает только коэффициент связи мод D , функция (8) учитывает также коэффициент ослабления мод α_0 .

3. Численные результаты и их обсуждение

Мы исследовали изменения пространственного распределения мощности в многомодовом ПОВ со ступенчатым профилем показателя преломления, используемом в недавно предложенной светофорной системе [18]. Рас-

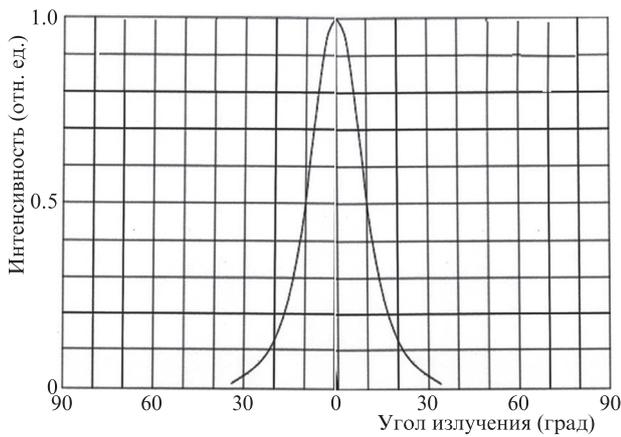


Рис.3. Зависимость относительной интенсивности от угла излучения светодиода Hebei I.T.520PG0C [18].

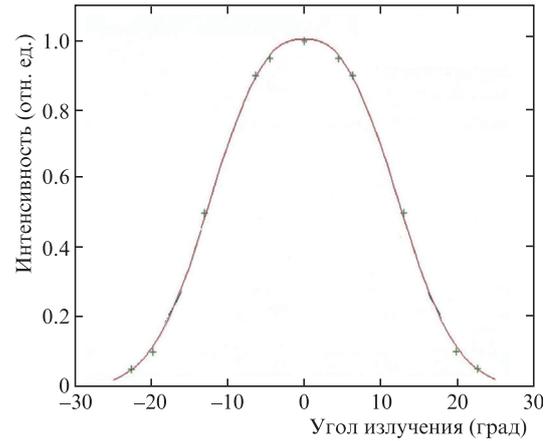


Рис.4. Зависимость относительной интенсивности, экспериментально измеренной на выходном конце волокна, от угла излучения для светодиодного пучка, введенного по центру вдоль оси волокна [18].

сматривалось волокно марки TORAY PGU-CD1001-22E с сердцевиной из ПММА и оболочкой из фторированного полимера. Показатель преломления сердцевины $n_1 = 1.492$, диаметр волокна $b = 1.0$ мм, $NA = 0.5$, коэффициент ослабления $\alpha_0 = 0.15$ дБ/м. В волокно вводилось излучение светодиода (СИД) Hebei I.T. 520PG0C с $\sigma_{z=0} = 9^\circ$ (рис.3) [18]. Для такого волокна в эксперименте [18] было получено нормированное выходное угловое распределение мощности при центральном ($\theta_0 = 0$) вводе пучка света от СИД вдоль оси волокна (длина волокна равна 10 м), причем стандартное отклонение экспериментального углового распределения мощности на выходе волокна составило 11.5° (рис.4). Подставив эти значения

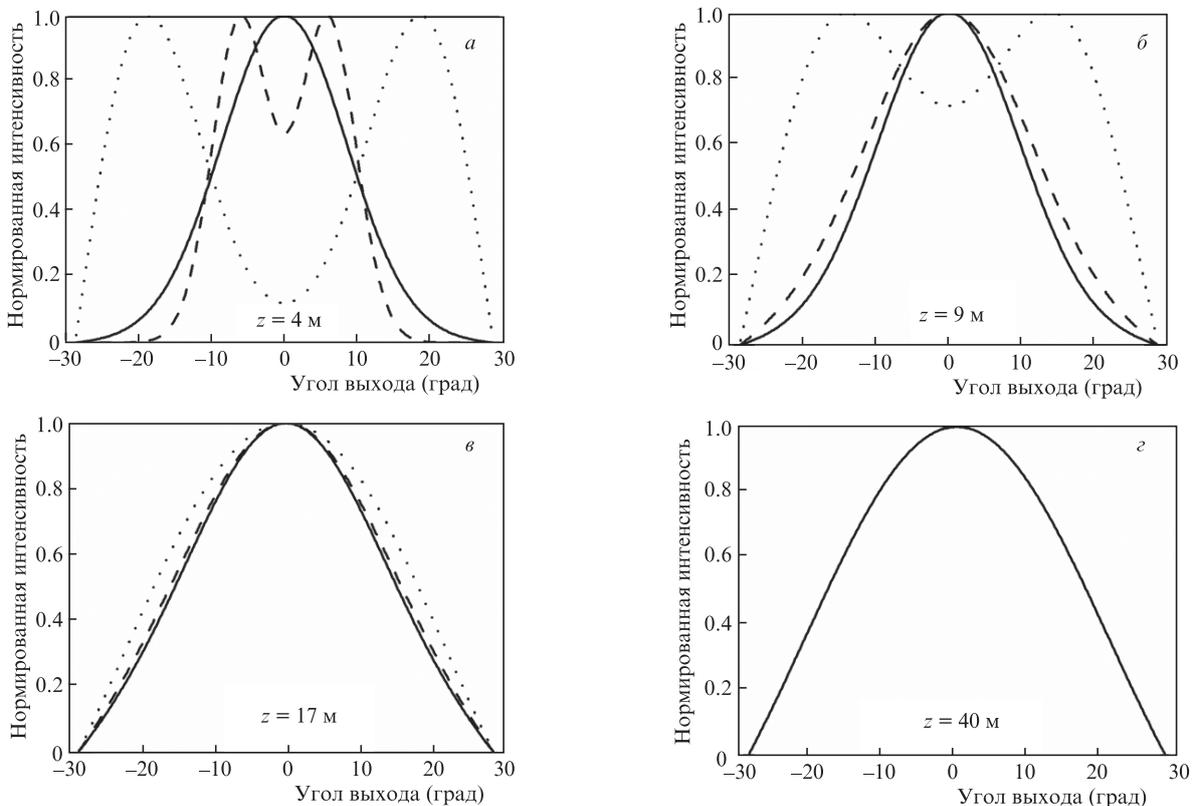


Рис.5. Нормализованные угловые распределения выходной мощности в различных точках вдоль ПОВ, рассчитанные для входного гауссова распределения ($\sigma_{z=0} = 9^\circ$) с измеренными в воздухе углами ввода $\theta_0 = 0$ (сплошная кривая), 12° (штриховая кривая) и 24.3° (пунктирная кривая) для $z = 4$ (а), 9 (б), 17 (в) и 40 м (г).

в уравнение (6), имеем для коэффициента связи $D = 7.8 \times 10^{-4}$ рад²/м.

Для облегчения сравнения результатов мы использовали вычисленное значение коэффициента связи D при решении уравнения для потока мощности (2), что позволило определить длину взаимодействия $L_{\text{соуп}}$, на которой достигается равновесное распределение мод (PPM), а также длину z_s , на которой устанавливается стационарное распределение (CP) в волокне, использованном в эксперименте F.Perez-Осон и др. [18]. Применяв явный конечно-разностный метод [12] для решения уравнения (2), мы получили угловые распределения мощности на выходе при различных углах ввода и длинах волокна (рис.5). Приведены результаты для углов ввода $\theta_0 = 0, 8^\circ$ и 16° внутри волокна (измеренные в воздухе углы $\theta_0 = 0, 12^\circ$ и 24.3°). Углы ввода, близкие к критическому углу $\theta_{\text{кр}} = 18.9^\circ$ внутри волокна ($\theta_{\text{кр}} = 28.8^\circ$ в воздухе), не рассматривались, поскольку при таких углах нельзя пренебрегать коэффициентом ослабления $\alpha(\theta)$ при решении исходного уравнения (1) для потока мощности.

Для входного пучка было выбрано гауссово распределение с $\sigma_{z=0} = 9^\circ$ (такое же значение $\sigma_{z=0}$ использовалось в эксперименте F.Perez-Осон и др. [18] (см. рис.3)). Длина волокна z увеличивалась от нуля до длины достижения CP. Из-за взаимодействия мод средние точки всех модовых распределений сдвигались к 0, в результате чего PPM достигалось на длине волокна $L_{\text{соуп}} = 17$ м (рис.5,б). Взаимодействие мод продолжается и на длине за $L_{\text{соуп}}$, пока не уравниются все ширины распределений и не будет достигнуто CP при $z_s = 40$ м (рис.5,в). При длинах $z > z_s$ дальнейшее расширение углового распределения мощности не происходит. Таким образом, мы определили эффективную площадь излучения на выходном конце ПОВ произвольной длины, используемого в составе светофорной системы, предложенной в [18]. Полученные результаты могут быть применимы при оптимизации числа волокон, расстояния между ними и их положения на диске светофора.

В заключение отметим, что для реализации большей эффективной площади излучения следует использовать волокно достаточной длины (в идеале требуется волокно с длиной $z > z_s$), при которой распределение энергии в каждой моде более не изменяется с длиной распространения. Такая большая длина волокна является обычной при использовании ПОВ в строительных и мостовых световых конструкциях. Отметим также, что в случае прокладки оптического волокна с более резкими изгибами (с радиусом $r \leq 0.30$ м [20]), чем радиус изгиба $r = 2.5$ м [18], при расчете углового распределения мощности следует использовать разные коэффициенты связи мод для изогнутых участков волокна.

4. Заключение

Исследовано изменение углового распределения мощности в многомодовом пластиковом оптическом волокне, используемом в системе светофора, с увеличением длины волокна. Предложена аналитическая функция для прогнозирования углового распределения мощности на выходном конце многомодового оптического волокна, когда распределение пучка на входе волокна направлено по центру вдоль оси волокна. Обнаружено, что с увеличением длины волокна угловое распределение мощности расширяется до тех пор, пока не достигнет стационарного состояния. Это уширение незначительно для коротких волокон длиной примерно до 10 м. Указанным методом можно рассчитать эффективную площадь излучения на выходе любого ПОВ произвольной длины. Для получения большой эффективной площади излучения следует использовать волокно достаточной длины. Эта информация может быть полезна при использовании многомодовых ПОВ в составе светофорных систем, подсветки зданий и мостов.

Настоящее исследование стало возможным частично благодаря гранту Министерства образования, науки и технологического развития Сербии (соглашение № 451-03-68/2020-14/200122), а также гранту Научного фонда Республики Сербия (соглашение № СТРСФ-6379382) и гранту на стратегические исследования Городского университета Гонконга (проект № CityU 7004600).

1. Kitayama K., Ikeda M. *Appl. Opt.*, **17**, 3979 (1978).
2. Mateo J., Losada M.A., Garcés I., Zubía J. *Opt. Express*, **14**, 9028 (2006).
3. Dugas J., Maurel G. *Appl. Opt.*, **31**, 5069 (1992).
4. Jiang G., Shi R.F., Garito F. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **9**, 1128 (1997).
5. Garito A.F., Wang J., Gao R. *Science*, **281**, 962 (1998).
6. Gambling W.A., Payne D.P., Matsumura H. *Appl. Opt.*, **14**, 1538 (1975).
7. Zubía J., Durana G., Aldabaldetrekú G., Arrue J., Losada M.A., Lopez-Higuera M. *J. Lightwave Technol.*, **21**, 776 (2003).
8. Eve M., Hannay J.H. *Opt. Quantum Electron.*, **8**, 503 (1976).
9. Arrue J., Aldabaldetrekú G., Durana G., Zubía J., Garcés I., Jiménez F. *J. Lightwave Technol.*, **23**, 1253 (2005).
10. Gloge D. *Bell Syst. Tech. J.*, **51**, 1767 (1972).
11. Rousseau M., Jeunhomme L. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, **25**, 577 (1977).
12. Djordjevich A., Savović S. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **12**, 1489 (2000).
13. Savović S., Djordjevich A. *Appl. Opt.*, **41**, 7588 (2002).
14. Savović S., Djordjevich A. *Appl. Opt.*, **41**, 2826 (2002).
15. Jeunhomme L., Fraise M., Pocholle J.P. *Appl. Opt.*, **15**, 3040 (1976).
16. Losada M.A., Mateo J., Garcés I., Zubía J., Casao J.A., Pérez-Vela P. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **16**, 1513 (2004).
17. Losada M.A., Garcés I., Mateo J., Salinas I., Lou J., Zubía J. *J. Lightwave Technol.*, **20**, 1160 (2002).
18. Pérez-Ocón F., Pozo A.M., Rubiño M., Rabaza O. *Eng. Struct.*, **96**, 1 (2015).
19. Savović S., Djordjevich A. *Appl. Opt.*, **46**, 1477 (2007).
20. Savović S., Djordjevich A. *Appl. Opt.*, **47**, 4935 (2008).