

Влияние геометрии и модового состава излучения на рассеивающие свойства кварц-полимерного оптического волокна со светоотражающей оболочкой Tefzel

© А.А. Маковецкий

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

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

Поступила в редакцию 01.04.2021 г.

В окончательной редакции 23.04.2021 г.

Принята к публикации 26.04.2021 г.

Для кварц-полимерного оптического волокна с диаметром световедущей сердцевины $400\ \mu\text{m}$ и с рассеивающей светоотражающей оболочкой из термопластичного сополимера тетрафторэтилена с этиленом марки Tefzel проведен численный расчет гибридных мод. Для выбранных мод были рассчитаны радиальный профиль и определяющая рассеяние величина χ — относительная доля энергии моды, распространяющейся по светоотражающей оболочке. Функция $\chi(m, s)$ монотонно возрастает с увеличением азимутального числа m и уменьшается с увеличением радиального числа s . Наибольшее значение χ достигается у моды с максимально возможным для данного оптического волокна значением $m = 953$, при котором существует только одна мода с $s = 1$. При уменьшении диаметра световедущей сердцевины рассеивание возрастает.

Полученные расчетно-теоретические результаты были качественно подтверждены экспериментами по измерению рассеяния в кварц-полимерных оптических волокнах со светоотражающей оболочкой Tefzel с диаметрами световедущей сердцевины 400 и $200\ \mu\text{m}$.

Ключевые слова: многомодовое оптическое волокно, рассеивающая светоотражающая оболочка, характеристическое уравнение, расчет радиальных профилей мод, доля излучения моды, распространяющегося по оболочке.

DOI: 10.21883/OS.2021.09.51351.2097-21

Введение

Визуально наблюдаемое рассеяние света в оптических волокнах (ОВ) давно привлекает внимание исследователей с точки зрения создания на его основе гибких протяженных источников света для широкого спектра применений [1–3]. Для создания ОВ с эффективным рассеянием (боковым свечением) используется несколько методов, в том числе многократное микроизгибание оси волокна [4], включение рассеивающих центров в сердцевину [5] или оболочку волокна [3], включение люминесцентных центров в сердцевину волокна [6], радиационное облучение ОВ с германосиликатной сердцевиной [7], создание асимметрии в геометрии сердцевины/оболочка и другие методы.

Наиболее разработанным методом создания преформ рассеивающих кварц-кварцевых ОВ является метод внешнего осаждения — Outside Vapor Deposition (OVD). С его помощью на поверхность цилиндрического штабика из кварцевого стекла наносят слой стекла с газовыми пузырями. После перетяжки преформы в сердцевине волокна у границы со светоотражающей оболочкой формируются нано- и микроразмерные пузыри, вызывающие рассеяние проходящего по ОВ излучения. Таким методом компания Corning Inc. создала продукт под названием Fibrance TM Light Diffusing Fiber [8]. Рассеивающие

пузыри в сердцевине преформы создают также методом модифицированного химического осаждения из паровой фазы (MCVD) [9].

Рассеивающие кварц-полимерные ОВ создают внесением рассеивающих добавок в жидкую полимерную композицию для нанесения светоотражающего покрытия [10].

Заметим, что при исследовании оптических свойств рассеивающих ОВ использовались феноменологические модели, модовый состав излучения не учитывался.

Кварц-полимерное оптическое волокно со светоотражающей оболочкой из сополимера тетрафторэтилена с этиленом марки являются специальным видом кварц-полимерных ОВ, у которых светоотражающая оболочка одновременно является и защитной оболочкой. Этот полимер является кристаллизующимся полимером, т.е. имеющими в объеме материала как аморфную фазу (показатель преломления $n = 1.393$), так и кристаллическую фазу. Последняя состоит из анизотропных кристаллов различной морфологии (кристаллитов, фибрилл, ламелей, сферолитов). Их показатели преломления слегка отличаются от показателя преломления аморфной фазы. Степень кристалличности полимера составляет 40–60% [11]. Вследствие этого при распространении света по ОВ наблюдается сильное его рассеяние, видимое под любым углом наблюдения (рис. 1).

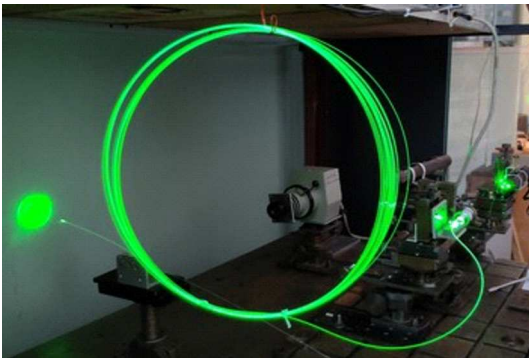


Рис. 1. Фотография бухты ОВ длиной 20 м (диаметр бухты 220 мм) при ее засветке излучением лазера LG Laser 303 с $\lambda = 532$ нм.

Целью данной работы является теоретическое исследование зависимости эффективности рассеяния излучения от геометрии и модового состава излучения в многомодовых кварц-полимерных ОВ со светоотражающим покрытием Tefzel, а также качественная проверка полученных результатов на экспериментах по измерению рассеяния в данных ОВ.

Характеристическое уравнение и алгоритм его решения

Собственные числа гибридных мод оптического волокна со ступенчатым профилем показателя преломления с бесконечной оболочкой задаются характеристическим уравнением [12]:

$$\left(\frac{1}{w} \frac{Kn'(m, w)}{Kn(m, w)} + \frac{1}{u} \frac{Jn'(m, u)}{Jn(m, u)} \right) \left(\frac{n_2^2}{w} \frac{Kn'(m, w)}{Kn(m, w)} + \frac{n_1^2}{u} \frac{Jn'(m, u)}{Jn(m, u)} \right) - \left(\frac{V^2}{u^2 w^2} \right)^2 \frac{m^2 \beta^2}{k_0^2} = 0, \quad (1)$$

где $Jn(m, u)$, $Kn(m, w)$, $Jn'(m, u)$ и $Kn'(m, w)$ — функции Бесселя первого рода, модифицированные функции Бесселя второго рода и их производные по u и w соответственно, m — азимутальное модовое число, $k_0 = 2\pi/\lambda$ — волновое число в вакууме, n_1 и n_2 — показатели преломления сердцевин и оболочки ОВ. Величины u и w связаны с осевой постоянной распространения β и приведенной частотой V соотношениями:

$$u = a(n_1^2 k_0^2 - \beta^2)^{1/2}, \quad w = a(\beta^2 - n_2^2 k_0^2)^{1/2}, \\ V = ak_0(n_1^2 - n_2^2)^{1/2},$$

где a — радиус сердцевин ОВ.

В качестве переменной выберем величину u , выразим через нее величины w и β . Обозначим левую часть уравнения (1) через $Fs(u, m)$, $u \in (0, V)$. Разобьем этот интервал на $N = 10^5$ равных частей точками с координатами $u_j = V(j-1)/N$, $j = 1, 2, \dots, N, N+1$. Построим

в системе Mathcad графики функций $\text{sign}(Fs(u_j, m))$ для ОВ с параметрами: $n_1 = 1.456$ (кварцевое стекло), $n_2 = 1.393$ (Tefzel), $a = 200 \mu\text{m}$ (диаметр сердцевин — $400 \mu\text{m}$). Графики функций $\text{sign}(Fs(u_j, m))$, рассчитанные для нескольких значений азимутального числа m , приведены на рис. 2. Решения уравнения (1) лежат на каждом из отрезков (u_j, u_{j+1}) , в конечных точках которых функция $\text{sign}(Fs(u_j, m))$ меняет значение с -1 на $+1$ или наоборот. Определив все такие отрезки для заданного значения азимутального числа m , затем с помощью процедуры Mathcad $\text{root}(f(x), x)$ определяли решения $u_{m,s}$, где s — радиальное число.

Качественный анализ решений характеристического уравнения

Отметим основные свойства решений характеристического уравнения для КП-ОВ/Tefzel/400 μm .

1. Интервал решений уравнения (1) при увеличении азимутального числа сужается от $\approx (0, V)$ при $m = 1$ до одной точки при $m = m_{\text{max}} = 953$.

2. Семейство решений уравнения (1) состоит из пар близко стоящих друг к другу решений, которые на рис. 1 в большинстве своем визуально не различимы.

3. Число гибридных мод уменьшается от 653 мод при $m = 1$ до одной моды при $m = 953$.

В данной работе не стояла задача исследования надмолекулярной структуры полимерной светоотражающей оболочки. Предполагалось, что она фиксирована, так что интенсивность рассеяния распространяющейся по ОВ моды определялась долей ее энергии χ , распространяющейся по оболочке:

$$\chi(m, s) = \frac{\int_0^{a1.1} |E_{m,s}^z(r, \varphi)|^2 r dr}{\int_0^a |E_{m,s}^z(r, \varphi)|^2 r dr + \int_a^{a1.1} |E_{m,s}^z(r, \varphi)|^2 r dr},$$

где $E_{m,s}^z(r, \varphi)$ — поперечный профиль моды с азимутальным числом m и радиальным числом s . Выражение для $E_{m,s}^z(r, \varphi)$ имеет вид

$$E_{m,s}^z(r, \varphi) = \exp(im\varphi) \begin{cases} Jn\left(m, u_{m,s} \frac{r}{a}\right), & 0 \leq r \leq a, \\ \frac{Jn(m, u_{m,s})}{Kn(m, w_{m,s})} Kn\left(m, w_{m,s} \frac{r}{a}\right), & r \geq a. \end{cases}$$

Рассчитанные значения величин $\chi(u_{m,s})$ для всех мод с азимутальным числом $m = 1$ приведены на рис. 3. Видно, что кривая расщепляется на две кривые, соответствующие ЕН- и НЕ-модам ОВ. Верхняя кривая построена для четных значений радиального числа s , нижняя — для нечетных. В дальнейшем будем анализировать верхние ветви зависимостей $\chi(u_{m,s})$.

На рис. 4 приведены рассчитанные зависимости $\chi(u_{m,s})$ для мод КП-ОВ/Tefzel/400 μm с другими значениями азимутального числа m . Отметим основные свойства приведенных кривых.

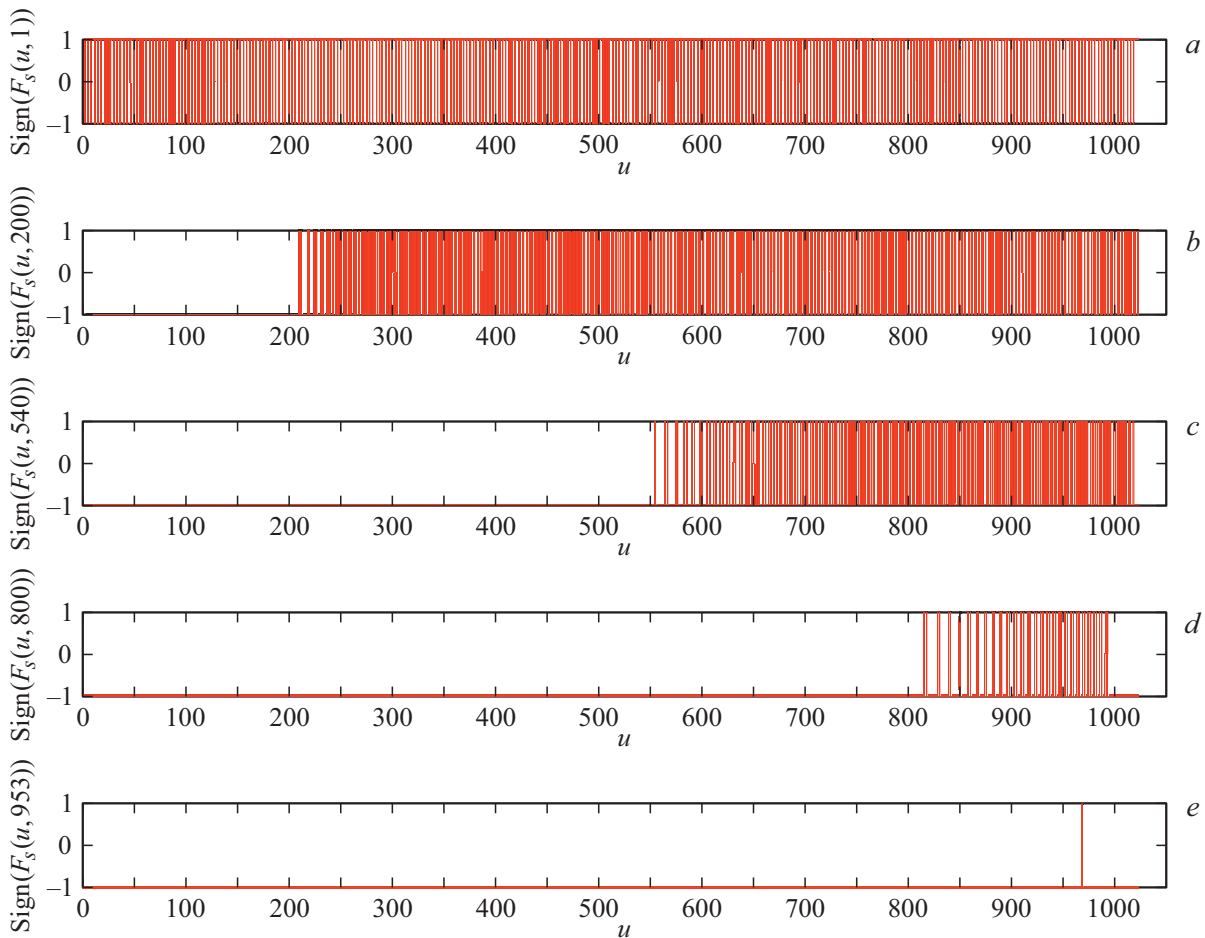


Рис. 2. Графики функций $\text{sign}(F_s(u_{j,m}))$, качественно иллюстрирующие количество и расположение гибридных мод КП-ОВ/Tefzel/ $400\ \mu\text{m}$ для $m = 1$ (a), 200 (b), 540 (c), 800 (d) и 953 (e).

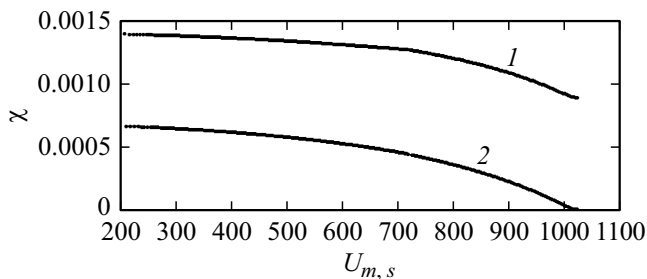


Рис. 3. Рассчитанные значения $\chi(u_{m,s})$ гибридных мод КП-ОВ/Tefzel/ $400\ \mu\text{m}$ при $m = 1$ для четных (1) и для нечетных s (2).

1. При любом допустимом значении азимутального числа m наибольшее значение величина χ достигает при значении радиального числа $s = 1$. При увеличении s величина χ монотонно убывает.

2. При увеличении азимутального числа m величины χ возрастают, достигая своего максимального значения $\chi_{\text{max}} = 3.395 \cdot 10^{-3}$ для $m_{\text{max}} = 953$. Отметим, что при $m = m_{\text{max}}$ существует только одна мода.

На рис. 5 изображены рассчитанные радиальные профили нескольких мод КП-ОВ/Tefzel/ $400\ \mu\text{m}$, поясняющие и дополняющие кривые, представленные на рис. 2. Из них видно, что для мод с радиальным числом $s = 1$ радиальные профили представляет собой „одногорбые“ кривые. При $s > 1$ профили моды — осциллирующие кривые, с уменьшением амплитуды осцилляций при

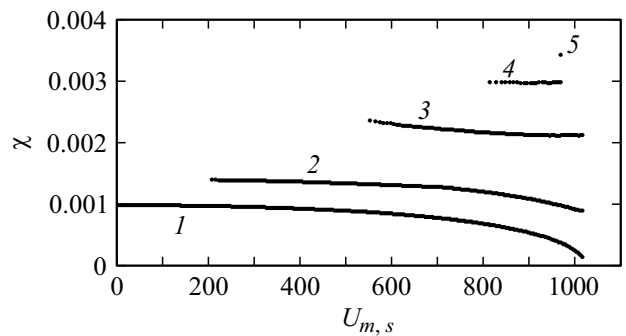


Рис. 4. Рассчитанные значения величин χ гибридных мод КП-ОВ/Tefzel/ $400\ \mu\text{m}$ для $m = 1$ (1), 200 (2), 540 (3), 800 (4) и 953 (5).

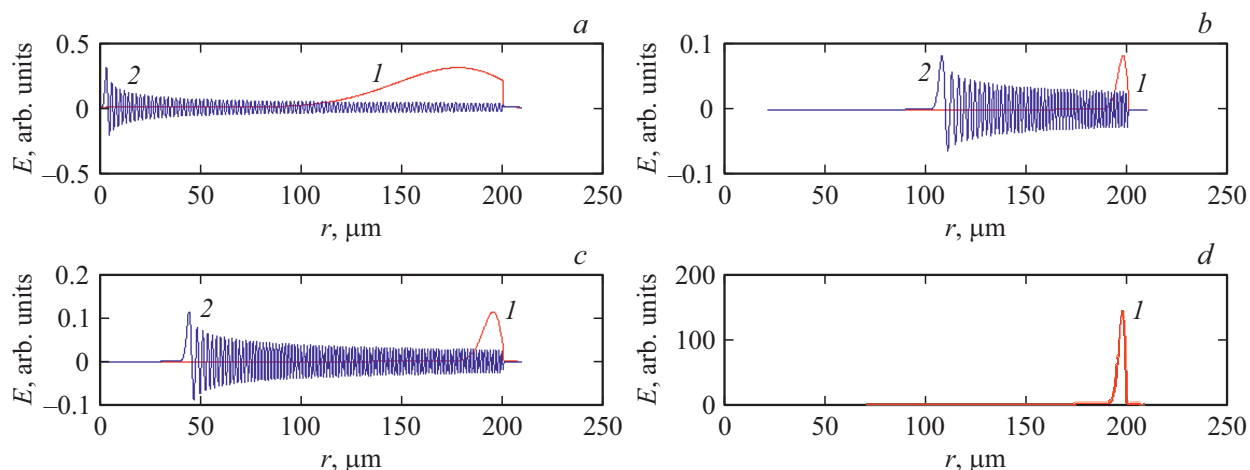


Рис. 5. Рассчитанные радиальные профили гибридных мод КП-ОВ/Tefzel/400 μm для $m = 1$ (a), 200 (b), 540 (c) и 953 (d). Профили с индексами 1 соответствуют $s = 1$, с индексами 2 — $s = s_{\text{max}}$.

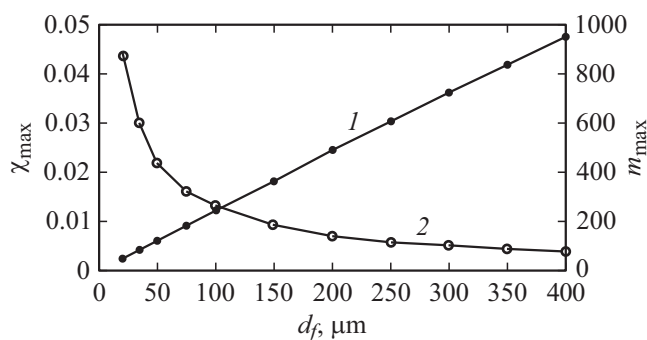


Рис. 6. Рассчитанные зависимости величин m_{max} (1) и χ_{max} (2) от диаметра световедущей сердцевины d_f для КП-ОВ/Tefzel/ d_f .

увеличении расстояния от оси волокна r . При $m > 1$ в центре волокна образуется темное пятно (характерный признак гибридных мод, оптических вихрей). Это пятно соответствует каустике косых лучей в геометрической оптике. При этом чем больше азимутальное число, тем шире каустика, поле в сердцевине сосредотачивается во все более тонком цилиндре у границы раздела с оболочкой. Наконец, при $m = 953$ остается только одна мода с самой широкой каустикой и самым узким цилиндром, в котором она сосредоточена. Именно эта мода имеет наибольшее значение χ среди всех остальных мод данного ОВ.

Представляет практический интерес изучение зависимости величин χ_{max} и m_{max} от диаметра световедущей сердцевины d_f . Рассчитанные зависимости приведены на рис. 6. Из них следует, что интенсивность рассеяния излучения в КП-ОВ/Tefzel/ d_f может существенно возрасти при уменьшении диаметра светоотражающей сердцевины d_f от 400 до 50 μm . При этом максимальное значение m при уменьшении диаметра сердцевины уменьшается.

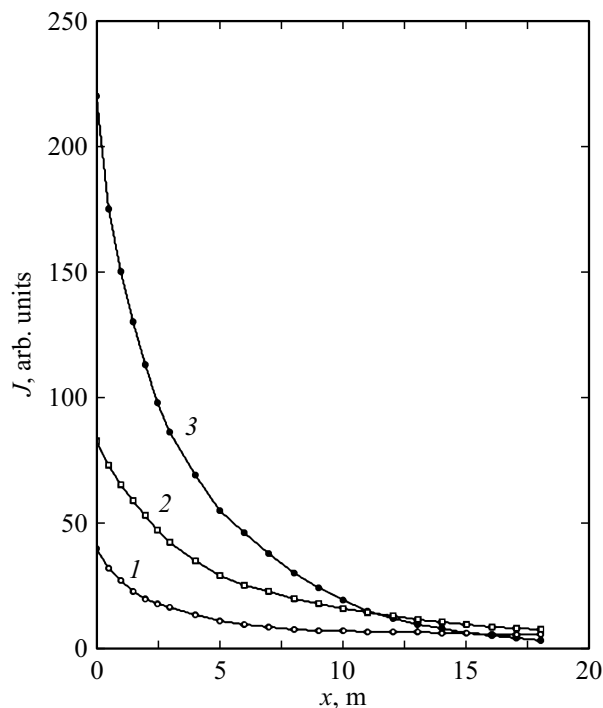


Рис. 7. Распределения интенсивностей бокового рассеяния света $J_s(x)$ вдоль оси КП-ОВ/Tefzel/400 μm при $\delta = 1.5 \text{ mm}$ (1), 3 mm (2), 5 mm (3). Длина ОВ 18.5 м, $\lambda = 532 \text{ nm}$; шаг измерений — 1 м.

Анализ рассеяния в оптическом волокне КП-ОВ/Tefzel/400 μm

Для возбуждения гибридных мод ОВ сфокусированное излучение лазера LG-303 ($\lambda = 532 \text{ nm}$) необходимо вводить в торец волокна под углом к оси ОВ и со смещением относительно его центра [13,14]. Это достигалось поперечным сдвигом δ оси лазера относительно оси фоку-

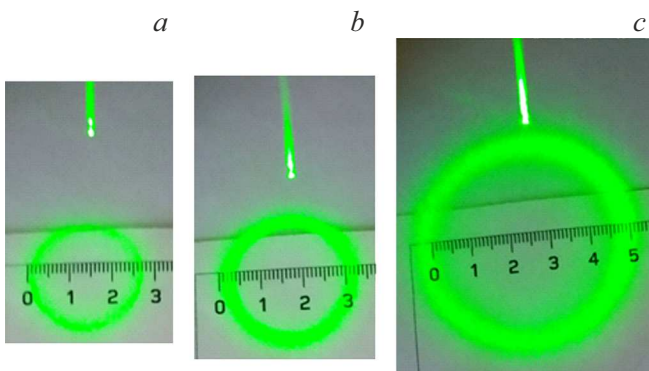


Рис. 8. Фото пятен излучения $\lambda = 532$ nm в дальнем поле КП-ОВ/Tefzel/400 μm : при $\delta = 2.0$ mm (a), 3 mm (b) и 5 mm (c). Расстояние от торца ОВ до экрана $h = 48$ mm.

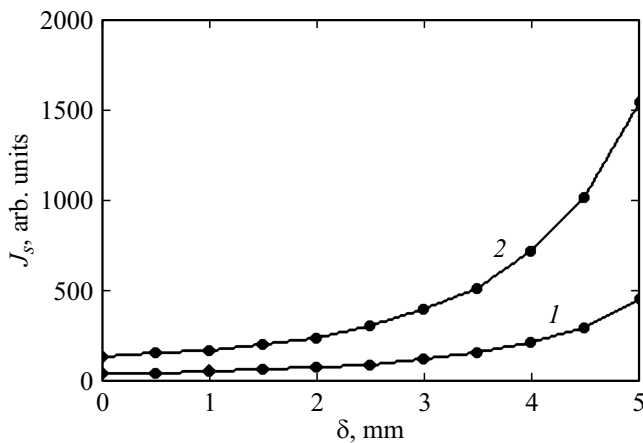


Рис. 9. Зависимости интенсивности бокового рассеяния света J_s от величины δ для КП-ОВ со светоотражающей оболочкой Tefzel для $d_f = 400 \mu\text{m}$ (1), $200 \mu\text{m}$ (2). Измерения проведены в начале ОВ ($x = 0.5$ m); $\lambda = 532$ nm.

сирующего объектива $10\times/0.4$ с помощью механического юстировочного столика. Различные группы гибридных мод возбуждались варьированием величины δ .

Для измерения распределения интенсивности рассеянного излучения вдоль оси ОВ $J_s(x)$ с помощью ФЭУ для каждого выбранного расстояния x до входного торца ОВ регистрировалось излучение, рассеянное участком оболочки ОВ длиной ≈ 25 mm. При этом измеряемый участок ОВ устанавливали параллельно светочувствительному торцу ФЭУ на расстоянии 5 mm от него [15].

Распределения интенсивностей бокового рассеяния света $J_s(x)$ вдоль оси ОВ с $d_f = 400 \mu\text{m}$ для трех значений δ приведены на рис. 7. Соответствующие им фото пятен излучения, выходящего из ОВ, представлены на рис. 8. Из рис. 7 следует, что чем больше величина δ (больше значение азимутального числа m у возбужденных мод), тем интенсивнее было рассеяние и тем быстрее оно ослабевало вдоль оси ОВ. Например, вблизи входного торца ОВ интенсивность рассеяния J_s при $\delta = 5$ mm была примерно в 6 раз выше, чем при засветке

с $\delta = 1.5$ mm. При этом суммарная (по всей длине ОВ) интенсивность рассеянного оболочкой излучения при $\delta = 5$ mm в несколько раз превышала интенсивность излучения, прошедшего через ОВ.

На рис. 9 приведены измеренные зависимости, иллюстрирующие зависимость интенсивности рассеяния КП-ОВ/Tefzel от диаметра световедущей сердцевины. Из приведенных кривых видно, что у ОВ с диаметром сердцевины $200 \mu\text{m}$ интенсивность рассеяния заметно выше, чем у ОВ с сердцевиной диаметром $400 \mu\text{m}$. Это качественно подтверждает выводы, сделанные в расчетной части статьи.

Заключение

Сформулируем основные результаты настоящей работы.

1. Численным решением характеристического уравнения проведен расчет гибридных мод (параметров $u_{m,s}$) кварц-полимерного оптического волокна со светоотражающей оболочкой Tefzel и с диаметром световедущей сердцевины $400 \mu\text{m}$. Для каждой гибридной моды определена величина χ — доля энергии, распространяющаяся по оболочке и определяющая интенсивность ее рассеяния.

2. Величина $\chi(u_{m,s})$ монотонно возрастает с увеличением азимутального числа m и уменьшается с увеличением радиального числа s . Наибольшее значение χ достигается для моды с максимально возможным для данного оптического волокна значением $m = 953$, при котором существует только одна мода со значением $s = 1$.

3. Полученные расчетно-теоретические результаты были качественно подтверждены экспериментами по измерению рассеяния в кварц-полимерных оптических волокнах со светоотражающей оболочкой Tefzel с диаметрами световедущей сердцевины 400 и $200 \mu\text{m}$.

Финансирование работы

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

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Rawson E.G. // Appl. Opt. 1974. V. 13. N 10. P. 2370.
- [2] Arie A., Karoubi R., Gur Y.S., Tur M. // Appl. Opt. 1986. V. 25. N 11. P. 1754.
- [3] Spigulis J., Pfafrods D., Stafekis M., Jelinska-Platace W. // Proc. SPIE. 1997. V. 2967. P. 231.
- [4] Costello A., Nyikal J., Yu V.Y., McCloud P. // J. Paediatrics and Child Health. 1995. V. 31. N 1. P. 1.

- [5] Logunov S.L., Bennett K.W., Fewkes E.J., Klubben W.S., Paniccia M. // *J. Lightwave Technology*. 2019. V. 37. N 22. P. 5667–5673. doi 10.1109/JLT.2019.2928697
- [6] Кизеветтер Д.В., Славина А.Ю., Левин В.М., Баскаков Г.Г. // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2012. № 1/6. С. 119.
- [7] Ероньян М.А., Комаров А.В., Ломасов В.Н., Реуцкий А.А., Унтилов А.А., Устинов С.В. // Сб. трудов Междунар. Конф. Прикладная оптика — 2018. СПб., 19–21 декабря 2018 г. Т. 1. С. 134.
- [8] Corning Fibrance Light-Diffusing Fibers // http://www.corning.com/corning_fibrance_light-diffusing_fibers/product_information_sheet
- [9] Bisyarin M.A., Eronyan M.A., Kulesh A.Yu., Meshkovskiy I.K., Reutsky A.A., Shcheglov A.A., Ustinov S.V. // *J. Opt. Soc. Am. B*. 2017. V. 34. N 11. P. 2396. doi 10.1364/JOSAB.34.002396
- [10] Lanzarini-Lopes M., Garcia-Segura S., Hristovski K., Messerly M., Simon A.J., Westerhoff P. // *J. Opt. Soc. Am. Part B*. 2019. V. 36. N 6. P. 1623. doi 10.1364/JOSAB.36.001623
- [11] Энциклопедия полимеров. Т. 3. М.: Советская энциклопедия. 1977. 793 с.
- [12] Snitzer E. // *J. Opt. Soc. Am.* 1961. V. 51. N 5. P. 491.
- [13] Bolshtyansky M.A., Savchenko A.Yu., Zel'dovich B.Ya. // *Opt. Lett.* 1999. V. 24. N 7. P. 433.
- [14] Кизеветтер Д.В., Ильин Н.В. // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2013. № 3(177). С. 151.
- [15] Маковецкий А.А., Замятин А.А., Ряховский Д.В. // *Радиотехн. и электрон.* 2021. Т. 66. № 3. С. 279. doi 10.31857/S0033849421030141