

Исследование структуры и свойств

Structure and properties research

**Физические методы
исследования и контроля**

**Physical methods
of research and monitoring**

DOI: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2020-86-7-27-32>

ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ КВАРЦ-ПОЛИМЕРНОГО ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА СО СВЕТООТРАЖАЮЩЕЙ ОБОЛОЧКОЙ ИЗ ТЕРМОПЛАСТИЧНОГО ФТОРПОЛИМЕРА

© **Александр Александрович Замятин, Александр
Андреевич Маковецкий*, Игорь Петрович Шилов,
Денис Владимирович Лапшин**

Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники имени В. А. Котельникова РАН, Россия, 141190, Московской обл., г. Фрязино, пл. Акад. Введенского 1; *e-mail: maz226@ms.ire.rssi.ru

*Статья поступила 10 марта 2020 г. Поступила после доработки 22 апреля 2020 г.
Принята к публикации 27 апреля 2020 г.*

Кварцевые оптические волокна (ОВ) с диаметром световедущей сердцевины 400 – 800 мкм, изготовленные из биосовместимых материалов, широко применяют в лазерной медицине. В работе представлены результаты исследования оптических параметров кварц-полимерного ОВ со светоотражающей оболочкой из термопластичного сополимера тетрафторэтилена с этиленом и влияния на эти параметры условий нанесения оболочки. Покрытие из расплава полимера наносили на поверхность кварцевого волокна фильерным способом на вытяжной установке непосредственно во время вытяжки. Числовую апертуру определяли по распределению выходящего из ОВ лазерного излучения в дальнем поле, оптические потери — по распределению рассеянного светоотражающей оболочкой излучения по длине ОВ. Параметры рассеяния проходящего по ОВ лазерного излучения оценивали по интенсивности и индикатрисе рассеяния. Исследовали образцы ОВ с кварцевой сердцевиной (диаметр — 400 мкм) и светоотражающей оболочкой (толщина — 70 – 90 мкм) длиной до 50 м, у которых светоотражающая оболочка выполняла одновременно и защитную функцию. Выявили, что качество нанесенного покрытия и оптические параметры волокна зависят от скорости вытяжки ОВ (скорости нанесения покрытия) V_d . При $V_d \leq 2$ м/мин формировалось гладкое покрытие, при $V_d > 2$ м/мин — шершавое, которое (при $V_d = 6$ м/мин) переходило в так называемую «акулью кожу». Установили также, что рассеяние проходящего по ОВ излучения вызвано структурой полимера, которая в своем составе имеет кристаллическую и аморфную фазы с различными показателями преломления. Наименьшее рассеяние фиксировали у образцов ОВ с гладким покрытием. Суммарные оптические потери на длине волны $\lambda = 532$ нм у них составили 300 – 720 дБ/км, номинальная числовая апертура — 0,44. Кроме того, полученные данные показали, что короткие (1,5 – 3 м) образцы обеспечивают пропускание 80 – 93 % введенной мощности.

Ключевые слова: кварц-полимерное оптическое волокно; светоотражающая оболочка из термопластичного фторполимера; рассеяние света; числовая апертура; оптические потери.

STUDY OF THE OPTICAL PARAMETERS OF A SILICA-POLYMERIC OPTICAL FIBER WITH A REFLECTIVE COATING MADE OF A THERMOPLASTIC FLUOROPOLYMER

© **Aleksandr A. Zamyatin, Aleksandr A. Makovetskii*, Igor P. Shilov, Denis V. Lapshin**

Fryazino Branch Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics, RAS, 1, pl. Akad. Vvedenskogo, Fryazino, Moscow obl., 141190, Russia; *e-mail: maz226@ms.ire.rssi.ru

Received March 10, 2020. Revised April 22, 2020. Accepted April 27, 2020.

Silica optical fibers (OF) having a core diameter of 400 – 800 μm made of biocompatible materials are widely used in laser medicine. The results of studying the optical parameters of novel silica-polymeric optical fiber with a reflective thermoplastic copolymer coating (tetrafluoroethylene – ethylene) and the influence of coating conditions on these optical parameters are presented. Coatings from polymer melt were applied to the silica fiber surface by orifice drawing. The numerical aperture of the drawn OF was measured by distribution of the laser radiation emerging from OF in the far field. The optical losses were determined by the distribution of the radiation scattered by the reflective coating along the OF length. The scattering parameters of the laser radiation transmitted through OF were estimated by the intensity and indicatrix of scattering. We studied OF samples up to 50 m in length with a silica core of about 400 μm in diameter and reflective coating with a thickness of 70 – 90 μm , the reflective coating also performed a protective function. The quality of applied coating and optical parameters of the OF samples depended on the speed of fiber drawing (coating speed) V_d . A smooth coating was obtained at $V_d \leq 2$ m/min. When $V_d > 2$ m/min the coating became rough, turning into the so-called “shark skin” at $V_d = 6$ m/min. Observed scattering of radiation passing through the studied OF samples was attributed to the polymer structure which contained both crystalline and amorphous phases with different values of the refractive index. The smallest scattering was observed in a smooth-coated OF. The total optical loss at a wavelength $\lambda = 532$ nm amounted to 300 – 720 dB/km (a nominal numerical aperture was 0.44). Short (1.5 – 3 m) OF samples were shown to provide a transmission of 80 – 93% of the input power.

Keywords: silica-polymeric optical fiber; thermoplastic fluoropolymer reflective coating; light scattering; numerical aperture; optical losses.

Введение

Кварцевые оптические волокна (ОВ) с диаметром световедущей сердцевины 400 – 800 мкм широко применяют в лазерной медицине для транспортировки лазерного излучения в оптическом и ближнем ИК-диапазонах излучения [1 – 4]. Существует два основных типа таких ОВ: кварц-кварцевые и кварц-полимерные. У первых в качестве светоотражающей оболочки используют кварцевое стекло, легированное фтором, у вторых — кремнийорганические эластомеры [5, 6]. Поверх оболочек наносят защитное покрытие из биосовместимого термопластичного полимера. Недостаток кварц-кварцевых ОВ — низкая числовая апертура (0,22). У кварц-полимерных ОВ числовая апертура выше (0,4), но для их формирования требуется двойное полимерное покрытие.

Использование в качестве материала для покрытия термопластичных полимеров с высоким содержанием фтора (показатель преломления меньше, чем у кварцевого стекла) [7] позволяет изготовить многомодовые кварц-полимерные ОВ с высокой ($>0,4$) числовой апертурой. В этом случае светоотражающая оболочка одновременно выполняет и защитную функцию.

Цель работы — исследование оптических параметров кварц-полимерного ОВ со светоотражающей оболочкой из термопластичного сополимера тетрафторэтилена с этиленом и влияния на эти параметры условий нанесения оболочки.

Оборудование, материалы, методы

Покрытие из расплава полимера наносили на поверхность кварцевого волокна фильерным способом на вытяжной установке (высота установ-

ки — 3,5 м) непосредственно во время вытяжки. Установка включала: механизм подачи заготовки (скорость $V_f = 0,5 - 10$ м/мин), высокотемпературную печь с графитовым нагревательным элементом (температура $T_m = 500 - 2200$ °C), измеритель диаметра вытягиваемого волокна, механизм вытягивания (скорость $V_d = 0,5 - 10$ м/мин).

Для плавления термопласта использовали трубчатую печь сопротивления, внутрь которой перед вытяжкой помещали стеклянную фильеру с гранулами термопласта (диапазон температуры — 100 – 350 °C, точность поддержания температуры — 0,5 °C). Плавление гранул происходило непосредственно в фильере. Покрытие на вытягиваемое кварцевое волокно наносилось за счет адгезии расплава к поверхности ОВ при его прохождении через фильеру с расплавом [8].

Фильеры изготавливали из тонкостенных стеклянных труб марки СЛ-96-1 (внешний диаметр — 26 или 32 мм) с коническими участками на концах. Длина цилиндрической части фильеры составляла 150 – 160, конической — 35 – 40 мм. Внутренний выходной диаметр фильеры — 0,7 – 1 мм.

Измерения проводили с использованием лазера LG 303 (длина волны $\lambda = 532$ нм). Числовую апертуру оценивали по распределению выходящего из ОВ лазерного излучения в дальнем поле. За величину апертурного угла принимали угол, при котором интенсивность поля излучения уменьшалась до уровня 0,05 от максимальной интенсивности.

Схемы определений оптических параметров ОВ приведены на рис. 1. Входную апертуру возбуждающего луча измеряли с помощью регулируемого сдвига оси лазера относительно оси объ-

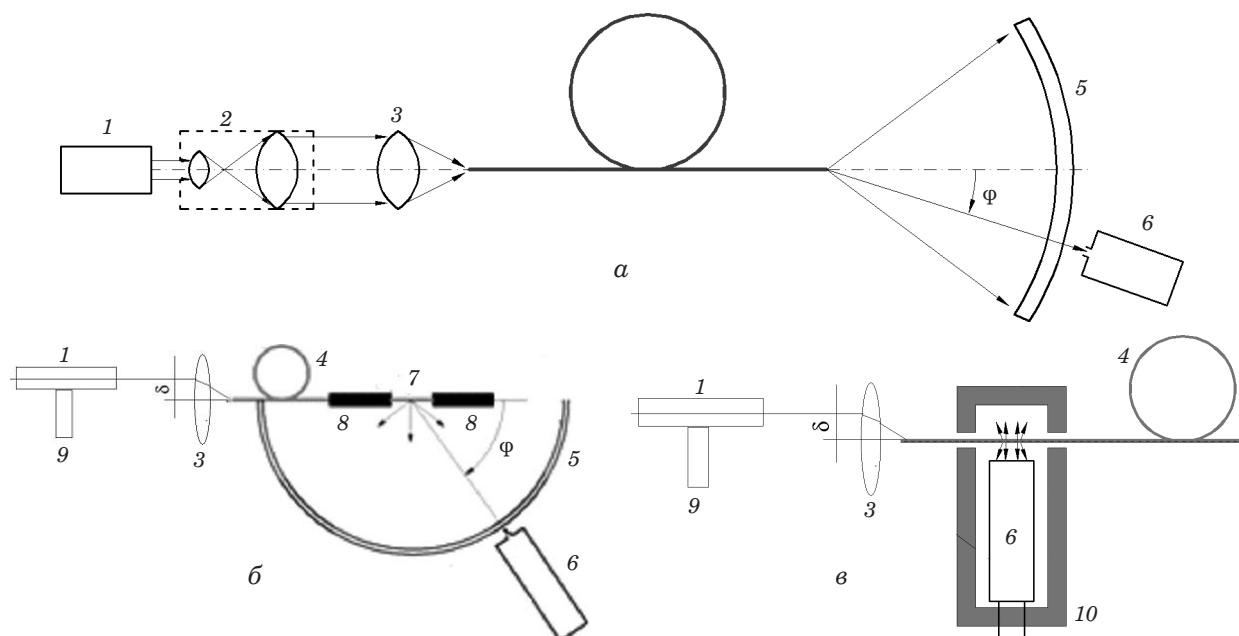


Рис. 1. Схемы измерений профиля поля излучения ОБ в дальней зоне (а), индикатрисы рассеяния (б) и регистрации рассеянного светотражающей оболочкой лазерного излучения (в): 1 — лазер LG 303; 2 — расширитель лазерного луча; 3 — фокусирующий объектив; 4 — исследуемый образец ОБ; 5 — гониометр; 6 — фотоприемник ФЭУ-51; 7 — открытый участок оболочки ОБ длиной 10 мм; 8 — экранирующие трубочки на ОБ; 9 — юстировочный столик, обеспечивающий сдвиг оси лазера относительно оси объектива; 10 — кожух ФЭУ; φ — угол наблюдения

Fig. 1. The measurement schemes of the far-field radiation profiles of the OF (a), scattering indicatrix (b), and scheme for registration of laser radiation scattered by reflective coating (c): 1 — laser LG 303; 2 — laser beam expander; 3 — focusing lens; 4 — OF sample; 5 — goniometer; 6 — photodetector FEU-51; 7 — open section of the OF coating (length — 10 mm); 8 — screening tubes on the OF; 9 — the laser feed mechanism providing a shift of the laser axis relative to the lens axis; 10 — photodetector cage; φ — viewing angle

ектива на величину $\delta < 5$ мм. Максимальный сдвиг ($\delta = 5$ мм) соответствовал входной апертуре 0,4. Диаметр входной диафрагмы фотоприемника ФЭУ-51 составлял 10, расстояние от диафрагмы до открытого участка оболочки — 120 мм.

Для повышения чувствительности регистрации рассеянного излучения и возможности измерения распределения его интенсивности по длине ОБ расстояние от светочувствительного слоя фотоприемника до рассеивающей оболочки ОБ составляло ~ 20 мм (аналогичное расстояние при измерении индикатрисы рассеяния — 120 мм).

Оптические потери в ОБ оценивали методом бокового рассеяния излучения [9]. Поскольку интенсивность рассеяния $I_s(l)$ пропорциональна интенсивности проходящего по ОБ излучения $I(l)$, для оптических потерь справедлива формула

$$\alpha_\lambda = \frac{10}{l} \lg \frac{I_s(0)}{I_s(l)}, \quad (1)$$

где l — расстояние вдоль оси ОБ от входного торца до места регистрации излучения.

Для световедущих сердцевин использовали штабики из оптического кварцевого стекла марок КУ-1 (для УФ-диапазона), КВ (для видимого диапазона) и КУВИ-1 (для ближнего ИК-диапазона).

В качестве материала для покрытия применяли сополимер тетрафторэтилена с этиленом марки Tefzel.

Обсуждение результатов

Исследовали образцы ОБ с кварцевой сердцевинной (диаметр — 400 мкм) и светотражающей оболочкой (толщина — 70–90 мкм) длиной до 50 м, у которых светотражающая оболочка одновременно выполняла и защитную функцию. Установили, что качество наносимого покрытия и оптические параметры ОБ зависят от скорости вытяжки волокна (скорости нанесения покрытия) V_d . При $V_d < 2$ м/мин формировалось гладкое покрытие, при $V_d \geq 2$ м/мин — шершавое, которое с возрастанием V_d (при $V_d = 6$ м/мин) переходило в так называемую «акулю кожу» [10]. При дальнейшем увеличении скорости ($V_d \geq 7$ м/мин) фиксировали срыв наносимого покрытия, что предположительно можно объяснить переходом расплава полимера из вязкотекучего в высокоэластичное состояние.

На рис. 2 приведены ОБ с покрытиями, сформированными при различных скоростях вытяжки. Видно, что с ростом скорости качество покрытия ухудшается. Это связано с неустойчивостью течения расплава в фильере, обусловленной воз-

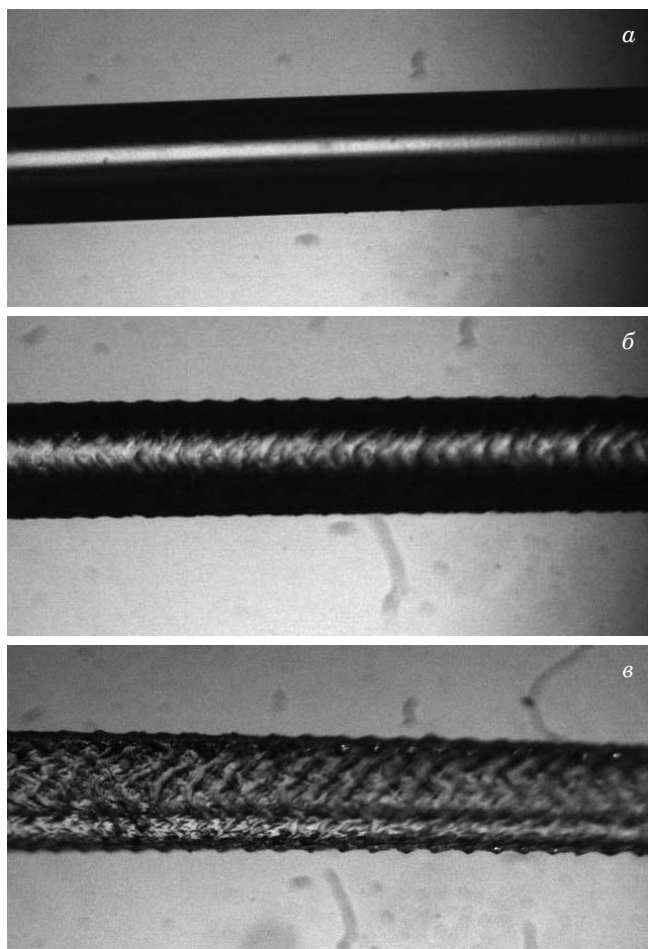


Рис. 2. Кварцевые волокна с покрытием, вытянутые при скоростях 2 (а), 3 (б) и 6 м/мин (в) (температура расплава $T = 270^\circ\text{C}$, диаметр фильеры $d_a = 720\text{ мкм}$, толщина покрытия $\sim 70\text{ мкм}$)

Fig. 2. Coated silica fibers drawn at a speed of 2 (a), 3 (b) and 6 m/min (c) (melt temperature $T = 270^\circ\text{C}$, die diameter $d_a = 720\text{ }\mu\text{m}$, coating thickness $\sim 70\text{ }\mu\text{m}$)

никающими в расплаве упругими (высокоэластичными) напряжениями, которые накладываются на сдвиговые напряжения вязкого течения. Заметим, что неустойчивость типа «акульей кожи» (эластичная турбулентность) возникает при напряжениях сдвига $\tau_c = 0,1 - 0,3\text{ МПа}$ [11].

При прохождении лазерного излучения по сформированному ОБ фиксировали его рассеяние оболочкой, что вызвано структурой полимера, имеющего в своем составе кристаллическую и аморфную фазы с различными значениями показателя преломления. Интенсивность рассеянного излучения, которое можно было наблюдать под любым углом наблюдения к оси ОБ, зависела от качества нанесенного покрытия и апертуры введенного излучения.

Как известно, индикатриса рассеяния света характеризует оптическую неоднородность материала, по которому он распространяется [12 – 15]. На рис. 3 приведены индикатрисы рассеяния

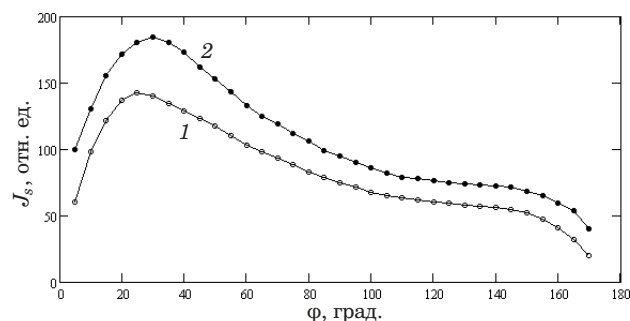


Рис. 3. Зависимости интенсивности рассеянного светотражающей оболочкой излучения от угла наблюдения для ОБ, сформированных при скоростях нанесения покрытия 2 (1) и 7 м/мин (2)

Fig. 3. Dependences of the intensity of radiation scattered by the reflective coating on the viewing angle for OF formed at different speed of coating 2 (1) and 7 m/min (2)

для образцов ОБ, сформированных при разных скоростях вытяжки. Видно, что форма кривой практически не зависит от скорости нанесения покрытия. Отметим, что форма индикатрисы рассеяния не зависит и от апертуры введенного в ОБ излучения.

Зависимости интенсивности рассеяния J_s от входной апертуры введенного излучения NA_{in} для различных скоростей нанесения покрытия представлены на рис. 4. Рассеянное излучение регистрировали на участках ОБ, отстоящих на расстоянии 30 см от входного торца ОБ. Измерения проводили на коротких (0,4 – 0,6 м) отрезках ОБ, для которых апертура возбуждающего излучения NA_{in} совпадала с выходной апертурой NA_{out} . Последнюю оценивали по формуле

$$NA_{out} \approx \sin[\arctg(H/2D)], \quad (2)$$

где D — диаметр пятна излучения; $H = 60\text{ мм}$ — расстояние от выходного торца ОБ.

Видно, что чем больше апертура введенного излучения, тем выше интенсивность рассеяния. Это связано с тем, что глубина проникновения моды излучения в оболочку тем больше, чем больше ее апертура. Увеличение интенсивности рассеяния при повышении скорости нанесения покрытия связано с ростом шероховатости нанесенного покрытия.

На рис. 5 представлены распределения интенсивности рассеянного излучения по длине волокна $J_s(x)$ для ОБ длиной 18,5 м, измеренные при различных значениях апертуры возбуждающего луча NA_{in} . Видно, что чем больше апертура, тем выше интенсивность рассеяния на начальном участке ОБ и тем сильнее она ослабевает при увеличении расстояния x до входного торца ОБ. Это свидетельствует о значительном вкладе рассеяния в суммарные оптические потери, особенно при большой ($>0,3$) апертуре. Расчеты пока-

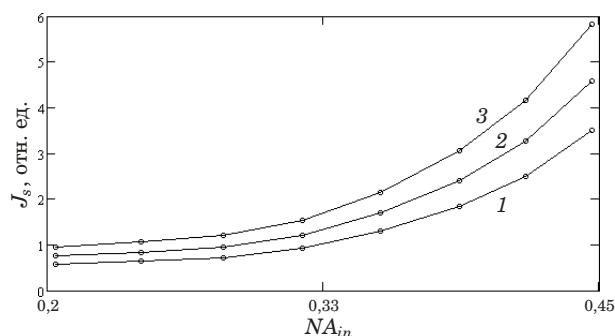


Рис. 4. Зависимости интенсивности рассеянного оболочкой излучения J_s от входной апертуры возбуждающего луча NA_{in} для ОБ, сформированных при скоростях вытяжки 1 (1), 3 (2) и 7 м/мин (3)

Fig. 4. Dependences of the intensity of radiation scattered by the coating J_s on the input aperture of the excitatory beam NA_{in} for OF formed at different drawing speed 1 (1), 3 (2), and 7 m/min (3)

зывают, что при $NA_{in} = 0,4$ суммарное рассеянное оболочкой излучение может в несколько (3–5) раз превышать излучение, прошедшее через ОБ.

Суммарные оптические потери α (длина волны $\lambda = 532$ нм) оценивали, используя формулу (1). Получили: $\alpha = 720$ дБ/км — при $NA_{in} = 0,4$, $\alpha = 500$ — при $NA_{in} = 0,3$ и $\alpha = 320$ дБ/км — при $NA_{in} = 0,2$. Полученные значения существенно выше данных по оптическим потерям в кварц-полимерных ОБ со светоотражающей оболочкой из кремнийорганического эластомера марки СИЭЛ 159/167 и защитным покрытием из полиамида П610 [6]. Однако короткие (1,5–3 м) куски исследуемых ОБ обеспечивают пропускание 80–90 % введенного излучения и имеют номинальную числовую апертуру 0,4, что позволяет использовать их в лазерной медицине.

Заключение

Таким образом, проведенные исследования показали, что многомодовые ОБ с кварцевой сердцевинной и светоотражающей оболочкой из термопластичного сополимера тетрафторэтилена с этиленом характеризуются значительным боковым рассеянием света светоотражающей оболочкой. Интенсивность рассеяния зависит от условий ввода излучения (чем выше апертура введенного излучения, тем интенсивнее рассеяние). При этом доля рассеянного излучения может составлять существенную часть введенного в ОБ излучения. Несмотря на дополнительные оптические потери вследствие рассеяния светоотражающей оболочкой короткие (1,5–3 м) отрезки многомодовых ОБ имеют высокую числовую апертуру (0,4) и обеспечивают пропускание до 90 % введенного излучения.

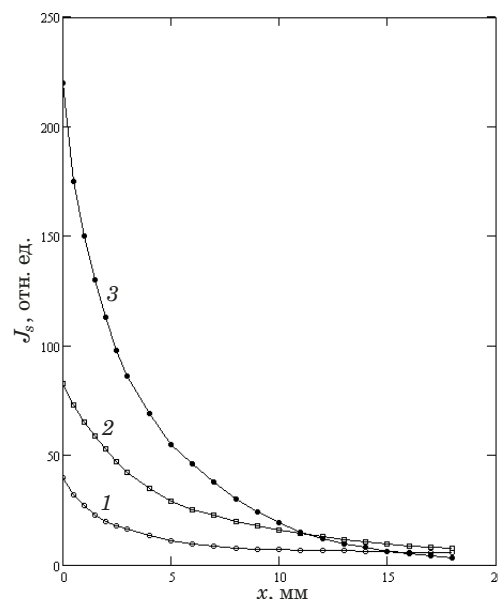


Рис. 5. Зависимости интенсивности рассеянного оболочкой излучения J_s от расстояния x между входным торцом ОБ и местом регистрации излучения (вдоль оси ОБ) для $NA_{in} = 0,2$ (1), 0,3 (2) и 0,42 (3) (скорость вытяжки $V_d = 2$ м/мин)

Fig. 5. Dependences of the intensity of radiation scattered by the coating J_s on the distance x between the input endface and the site of radiation registration (along the OF axis) for $NA_{in} = 0.2$ (1), 0.3 (2), and 0.42 (3) (drawing speed $V_d = 2$ m/min)

Финансирование

Работа выполнена в рамках государственного задания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тучин В. В. Лазеры и волоконная оптика в биомедицинских исследованиях. — М.: Издательство физико-математической литературы, 2010. — 501 с.
2. Даниелян Г. Л., Шилов И. П., Кочмарев Л. Ю. и др. Волоконно-оптические зонды на основе кварцевых световодов повышенной числовой апертуры для люминесцентной диагностики опухолей / Медицинская физика. 2014. № 1. С. 51–58.
3. Qiu Y., Wang Y., Xu Y., et al. Quantitative optical coherence elastography based on fiber-optic probes for in situ measurement of tissue mechanical properties / Biomedical Optics Express. 2016. Vol. 7. N 2. P. 688–700. DOI: 10.1364/BOE.7.000688.
4. Зубов Б. В., Даниелян Г. Л., Чевокин В. Л. и др. Световоды и сенсоры на основе многоканальных волоконных жгутов для биомедицины и научных исследований / Фотон-экспресс. 2019. № 6. С. 326–327. DOI: 10.24411/2308-6920-2019-16170.
5. Danielyan G., Shilov I., Zamyatin A., et al. Multi channels fiber optic reflex probes for fluorescent and UV-VIS-NIR spectroscopy based on novel types of multimode fiber optics bundles / Proc. SPIE 11075, Novel Biophotonics Techniques and Applications V. 2019. DOI: 10.1117/12.2526606.
6. Боганов А. Г., Бубнов М. М., Дянов Е. М. и др. Волоконный световод из безводного кварцевого стекла с отражающей оболочкой из силиконовой резины / Квантовая электроника. 1981. Т. 8. № 1. С. 176–178.
7. French R. H., Rodríguez-Parada J. M., Yang M. K., et al. Optical properties of polymeric materials for concentrator photovoltaic systems / Solar Energy Materials and Solar Cells. 2011. Vol. 95. N 8. P. 2077–2086. DOI: 10.1016/j.solmat.2011.02/025.

8. Пат. 2402497 РФ, МПК C03B37/02. Способ изготовления оптического волокна / Замятин А. А., Иванов Г. А., Маковецкий А. А., Шилов И. П.; заявитель и патентообладатель ФИРЭ им. В. А. Котельникова РАН. — № 2008 147430/03; заявл. 02.12.2008; опубл. 27.10.2010. Бюл. № 30.
9. Кизеветтер Д. В. Методы измерения затухания в волоконных световодах. — СПб.: Политех-Пресс, 2019. — 81 с.
10. Miller E., Rothstein J. Control of the sharkskin instability in the extrusion of polymer melts using induced temperature gradient / *Rheologica Acta*. 2004. Vol. 44. N 2. P. 160 – 173. DOI: 10.1007/s00297-004-0393-4.
11. Малкин А. Я. Неустойчивость при течении растворов и расплавов полимеров / Высокомолекулярные соединения. 2006. Т. 48. № 7. С. 1241 – 1262.
12. Алексеев В. В., Лихачев М. Е., Бубнов М. М. и др. Исследование индикатрисы рассеяния в высоколегированных волоконных световодах на основе кварцевого стекла / *Квантовая электроника*. 2011. Т. 41. № 10. С. 917 – 923. DOI: 10.1070/QE2011v041n10ABEH014695.
13. Лойко Н. А., Мискевич А. А., Лойко В. А. Рассеяние поляризованного и естественного света монослоем сферических однородных пространственно упорядоченных частиц при освещении по нормали / *Оптика и спектроскопия*. 2018. Т. 125. № 5. С. 800 – 805. DOI: 10.1134/S0030400X18110188.
14. Фарафонов В. Г., Устимов В. И., Прокопьева М. С. и др. Рассеяние света малыми частицами: эллипсоидальная модель с использованием квазистатического подхода / *Оптика и спектроскопия*. 2018. Т. 125. № 6. С. 623 – 634. DOI: 10.1134/S0030400X1812007X.
15. Levin A. D., Shmytkova E. A., Khlebtsov B. N. Multipolarization Dynamic Light Scattering of Nonspherical Nanoparticles in Solution / *J. Phys. Chem. C*. 2017. Vol. 121. P. 3070 – 3077. DOI: 10.1021/acs.jpcc.6b10226.
- for Biomedicine and scientific research / *Foton-Ékspress*. 2019. N 6. P. 326 – 327. DOI: 10.24411/2308-6920-2019-16170 [in Russian].
5. Danielyan G., Shilov I., Zamyatin A., et al. Multi channels fiber optic reflex probes for fluorescent and UV-VIS-NIR spectroscopy based on novel types of multimode fiber optics bundles / *Proc. SPIE 11075, Novel Biophotonics Techniques and Applications V*. 2019. DOI: 10.1117/12.2526606.
6. Boganov A. C., Bubnov M. M., Dianov E. M., et al. Glass fiber waveguide made of anhydrous quartz glass with a reflecting silicone-rubber cladding / *Quantum Electronics*. 1981. Vol. 11. N 1. P. 101 – 102.
7. French R. H., Rodríguez-Parada J. M., Yang M. K., et al. Optical properties of polymeric materials for concentrator photovoltaic systems / *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2011. Vol. 95. N 8. P. 2077 – 2086. DOI: 10.1016/j.solmat.2011.02/025.
8. RF Pat. 2402497, IPC C03B 37/02. A method of manufacturing an optical fiber / Zamyatin A. A., Ivanov G. A., Makovetskii A. A., Shilov I. P.; applicant and patent holder FIRE — N 2008 147430/03; appl. 02.12.2008; publ. 27.10.2010. Byull. N 30 [in Russian].
9. Kisevetter D. V. Methods of measuring attenuation in optical fibers. — St. Petersburg: Politekh-Press, 2019. — 81 p. [in Russian].
10. Miller E., Rothstein J. Control of the sharkskin instability in the extrusion of polymer melts using induced temperature gradient / *Rheologica Acta*. 2004. Vol. 44. N 2. P. 160 – 173. DOI: 10.1007/s00297-004-0393-4.
11. Malkin A. Ya. Flow instability in polymer solutions and melts / *Vysokomol. Soed.* 2006. Vol. 48. N 7. P. 1241 – 1262 [in Russian].
12. Alekseev V. V., Likhachev M. E., Bubnov M. M., et al. Angular distribution of light scattered from heavily doped silica fibres / *Kvant. Élektronika*. 2011. Vol. 41. N 10. P. 917 – 923. DOI: 10.1070/QE2011v041n10ABEH014695 [in Russian].
13. Loiko N. A., Miskevich A. A., Loiko V. A. Scattering of Polarized and Natural Light by a Monolayer of Spherical Homogeneous Spatially Ordered Particles under Normal Illumination / *Optika Spektrosk.* 2018. Vol. 125. N 5. P. 800 – 805. DOI: 10.1134/S0030400X18110188 [in Russian].
14. Farafonov V. G., Ustimov V. I., Prokopenko M. S., et al. Light Scattering by small particles: an ellipsoidal model that uses a quasistatic approach / *Optika Spektrosk.* 2018. Vol. 125. N 6. P. 623 – 634. DOI: 10.1134/S0030400X1812007X [in Russian].
15. Levin A. D., Shmytkova E. A., Khlebtsov B. N. Multipolarization Dynamic Light Scattering of Nonspherical Nanoparticles in Solution / *J. Phys. Chem. C*. 2017. Vol. 121. P. 3070 – 3077. DOI: 10.1021/acs.jpcc.6b10226.

REFERENCES