

ПРИМЕНЕНИЕ РАДИОТЕХНИКИ  
И ЭЛЕКТРОНИКИ В БИОЛОГИИ И МЕДИЦИНЕ

УДК 535.36

РАСSEИВАЮЩИЕ СВОЙСТВА ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА  
С КВАРЦЕВОЙ СВЕТОВЕДУЩЕЙ СЕРДЦЕВИНОЙ  
И СО СВЕТООТРАЖАЮЩЕЙ ОБОЛОЧКОЙ  
ИЗ ФТОРИРОВАННОГО ТЕРМОПЛАСТИЧНОГО ПОЛИМЕРА

© 2021 г. А. А. Маковецкий<sup>а, \*</sup>, А. А. Замятин<sup>а</sup>, Д. В. Ряховский<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,  
пл. Введенского, 1, Фрязино Московской обл., 141190 Российская Федерация

\*E-mail: maz226@ms.ire.rssi.ru

Поступила в редакцию 09.12.2019 г.

После доработки 15.09.2020 г.

Принята к публикации 21.10.2020 г.

Экспериментально исследованы рассеивающие свойства оптического волокна с кварцевой световедущей сердцевинной и светоотражающей оболочкой из фторированного термопластичного сополимера тетрафторэтилена с этиленом марки Tefzel. Установлено, что при распространении излучения ( $\lambda = 532$  нм) по данному волокну наблюдается заметное рассеяние эванесцентной части волны, распространяющейся по светоотражающей оболочке. Измерены индикатриса рассеяния излучения оболочкой, распределение интенсивности рассеянного излучения вдоль оси волокна и его зависимость от условий ввода излучения в оптическое волокно. Проведен расчет суммарного рассеянного излучения и сравнение его с излучением, прошедшим через оптическое волокно. Обсуждена возможность использования данных оптических волокон в лазерной медицине.

DOI: 10.31857/S0033849421030141

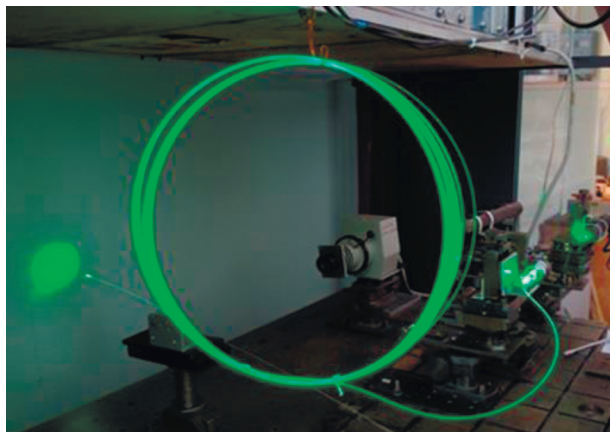
ВВЕДЕНИЕ

Оптические волокна (ОВ) со световедущей сердцевинной из чистого кварцевого стекла диаметром 200...600 мкм, полимерной светоотражающей оболочкой из полидиметилсилоксановых эластомеров и защитной оболочкой из термопластичных полимеров (в частности, сополимера тетрафторэтилена с этиленом марки Tefzel) широко используются в медицине для доставки лазерного излучения УФ-, видимого и ближнего ИК-диапазонов к биообъекту в хирургических, терапевтических, диагностических и других целях [1], (см.: Polymerico Technologies: [http://www.polimerico.com/tech/whitepapers/\\_2006NOV.htm](http://www.polimerico.com/tech/whitepapers/_2006NOV.htm)). Данные ОВ принято называть кварц-полимерными ОВ, они имеют малые оптические потери, высокую числовую апертуру, высокую механическую прочность и биосовместимы с живой тканью. Вследствие высокой оптической однородности и чистоты материалов сердцевинной и светоотражающей оболочки рассеяние проходящего по данному ОВ излучения пренебрежимо мало.

Отметим, что сополимер марки Tefzel имеет показатель преломления меньший, чем у кварцевого стекла (1.396 и 1.456 соответственно). Его оптические свойства были исследованы на пленках [2]. Но из-за высокого светорассеяния в нем этот

материал не использовался непосредственно в качестве материала светоотражающей оболочки в кварц-полимерном ОВ.

Однако группа ученых из компании Corning Incorporated показала, как надо превращать недостатки оптического материала в его достоинство (см. Corning Fibrance Light-Diffusing Fibers // [http://www.corning.com/corning\\_fibrance\\_light-diffusing\\_fibers/product\\_information\\_sheet](http://www.corning.com/corning_fibrance_light-diffusing_fibers/product_information_sheet)). Они создали преформу с сердцевинной из непоглощающего стекла с рассеивающими центрами и перетянули ее в оптическое волокно, создав новый продукт под названием Fibrance TM Light Diffusing Fiber (Fibrance TM светорассеивающее волокно). В таком ОВ ослабление света определяется не поглощением в сердцевине, а его рассеянием в ней с последующим высвечиванием через боковую поверхность ОВ. Это волокно действует как длинный и гибкий цилиндрический рассеиватель, как струна света или светящаяся направляющая проволока. Текущая линейка продуктов обеспечивает 1, 5 и 10 м диффузионной длины (т.е. длины волокна, необходимой для потери 90% света). Интенсивность рассеянного света уменьшается экспоненциально по длине волокна. В силу логарифмической чувствительности глаз человека свечение волокна представляется однородным. Данные волокна предназначены для использо-

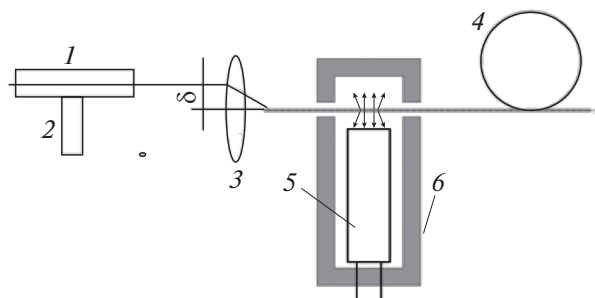


**Рис. 1.** Фотография бухты ОВ длиной 20 м (диаметр бухты – 220 мм) при его засветке излучением лазера LG Laser 303 ( $\lambda = 532$  нм). Ввод излучения в волокно – через объектив “ $\times 10, 04$ ” (с 10-кратным увеличением и апертурой 0.4); соосная засветка; расстояние от объектива до лазера – 10 см; апертура выходящего из ОВ луча  $\approx 0.1$ .

вания при анатомическом освещении, для фотодинамической терапии и фототерапии, для снижения хирургического риска, при инфекциях и др. [3].

Предметом исследования в данной работе является кварц-полимерное ОВ с рассеивающей светоотражающей оболочкой Tefzel – качественный аналог волокон Fibrance TM Light Diffusing Fiber. В отличие от волокна компании Corning Inc. наше волокно полностью изготовлено из коммерчески доступных материалов. Светорассеяние в нем происходит не в сердцевине, а в тонком слое оболочки у границы с сердцевиной.

Цель данной работы – исследовать рассеивающие свойства данного кварц-полимерного оптического волокна.



**Рис. 2.** Схема регистрации рассеянного оболочкой ОВ излучения с  $\lambda = 532$  нм: 1 – LG Laser 303, 2 – столик подачи лазера, обеспечивающий сдвиг оси лазера относительно оси объектива на величину  $\delta$ , 3 – фокусирующий объектив “ $\times 10, 04$ ”, 4 – исследуемое ОВ, 5 – фотоприемник ФЭУ-51, 6 – кожух фотоприемника.

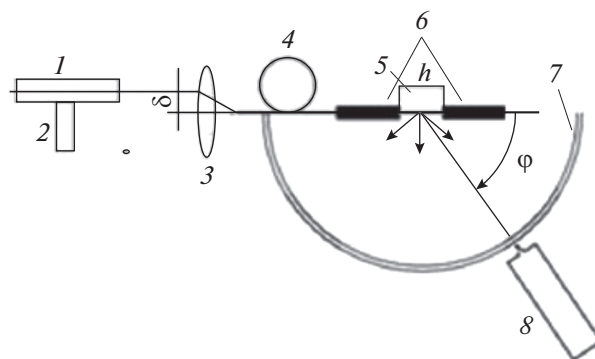
## 1. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Для исследований на вытяжной установке были изготовлены образцы ОВ длиной до 50 м с диаметром световедущей сердцевины 400 мкм и толщиной светоотражающей оболочки 70...90 мкм. Покрытие на вытягиваемое кварцевое волокно наносили из расплава термопласта фильерным способом непосредственно во время вытяжки [4, 5]. Значение показателя преломления Tefzel  $n_T = 1.398$  ( $\lambda = 0.63$  мкм), кварцевого стекла –  $n_S = 1.457$ . В качестве преформ ОВ использовали штабики из кварцевого стекла марки КУВИ; температура расплава термопласта при нанесении покрытия – 270°C; скорость вытяжки – 1.5...4.5 м/мин.

При распространении лазерного излучения (0.63 мкм; 532 нм) по изготовленным ОВ наблюдалось сильное его рассеяние оболочкой Tefzel (рис. 1). Его можно было наблюдать под любым углом обзора к оси ОВ. В наших экспериментах регистрировались распределение интенсивности бокового рассеянного излучения по длине ОВ при различных условиях ввода излучения в волокно, выходное излучение, а также индикатриса рассеяния.

Схема регистрации бокового рассеянного излучения приведена на рис. 2. Для каждого выбранного расстояния  $x$  до входного торца ОВ регистрировалось излучение  $J_s(x)$ , рассеянное участком оболочки ОВ длиной  $\approx 25$  мм. При этом измеряемый участок ОВ устанавливали параллельно светочувствительному торцу ФЭУ на расстоянии 5 мм от него. Для возбуждения ОВ использовали лазер LG Laser 303 с длиной волны излучения  $\lambda = 532$  нм и мощностью 150...300 мВт.

На рис. 3 приведена схема измерения индикатрисы рассеяния участка светоотражающей оболочки Tefzel при засветке ОВ излучением с  $\lambda = 532$  нм [6].



**Рис. 3.** Схема измерения индикатрисы рассеяния: 1 – лазер LG Laser 303, 2 – столик подачи лазера, обеспечивающий сдвиг оси лазера относительно оси объектива, 3 – фокусирующий объектив “ $\times 10, 04$ ”, 4 – исследуемое ОВ, 5 – открытый участок ОВ длиной 10 мм, 6 – экранирующие трубочки на ОВ, 7 – гониометр, 8 – ФЭУ-51.

Исследуемое ОВ длиной 0.6 м было возбуждено излучением LG Laser 303 мощностью  $\approx 150$  мВт. Поперечный сдвиг оси лазерного луча относительно осей объектива и торца ОВ при измерении индикатрисы составлял  $\delta = 5$  мм, что соответствовало апертуре входного луча ОВ  $\approx 0.4$ . В эксперименте регистрировалось излучение, рассеянное участком оболочки длиной  $h = 10$  мм, находившимся на расстоянии 30 см от входного торца ОВ. При этом расстояние от рассеивающего участка до фотоприемника составляло 150 мм, диаметр диафрагмы на входе ФЭУ – 10 мм, интервал углов наблюдения – 5...175 град, угловое разрешение 1 град.

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

### 2.1. Распределение интенсивности бокового рассеяния по длине ОВ при различных условиях ввода в него излучения $\lambda = 532$ нм

Распределение интенсивности рассеянного излучения по длине ОВ  $J_s(x)$  зависело от условия ввода излучения. Оно варьировалось путем изменения поперечного сдвига оси лазерного луча относительно соосно установленных объектива и торца ОВ – величины  $\delta$ . Чем больше величина  $\delta$ , тем под большим углом к нормали торца ОВ падал сфокусированный луч, тем интенсивнее было рассеяние на начальном участке ОВ и тем сильнее оно затухало при увеличении расстояния до входного торца ОВ. На рис. 4 приведены распределения  $J_s(x)$  для ОВ длиной 18.5 м, измеренные с шагом 1 м для различных значений величины  $\delta$ . Диффузионная длина составила  $l_d \approx 10$  м ( $\delta = 5$  мм) и  $l_d \approx 15$  м ( $\delta = 2$  мм). Отметим, что для уменьшения диффузионной длины надо использовать ОВ с меньшим, чем у исследованных, диаметром световедущей сердцевины. Это связано с тем, что чем меньше ее диаметр, тем больше относительная доля излучения в ОВ распространяется по оболочке.

На рис. 5 приведены измеренные зависимости интенсивностей рассеяния света  $J_s$  от величины  $\delta$  в начале ОВ ( $x = 0.5$  м) и в его конце ( $x = 18.0$  м) для ОВ длиной 18.5 м, дополняющие кривые рис. 4. Из приведенных зависимостей видно, что на входе ОВ интенсивность рассеяния  $J_s$  монотонно увеличивается с увеличением  $\delta$ . На конце же ОВ интенсивность рассеяния  $J_s$  имеет вид выпуклой вверх кривой с максимумом при  $\delta = 3.5$  мм.

Отметим также, что для любого расстояния  $x$  до входного торца ОВ интенсивность бокового рассеяния  $J_s(x)$  пропорциональна интенсивности излучения  $J_i(x)$ , распространяющегося по ОВ, т. е.  $J_s(x) \sim J_i(x)$ . Следовательно, по функции  $J_s(x)$  можно оценивать оптические потери  $\alpha$  в волокне [7]:

$$\alpha = 10 \lg \left( \frac{J_s(0)}{J_s(x)} \right) x^{-1}, \quad (1)$$

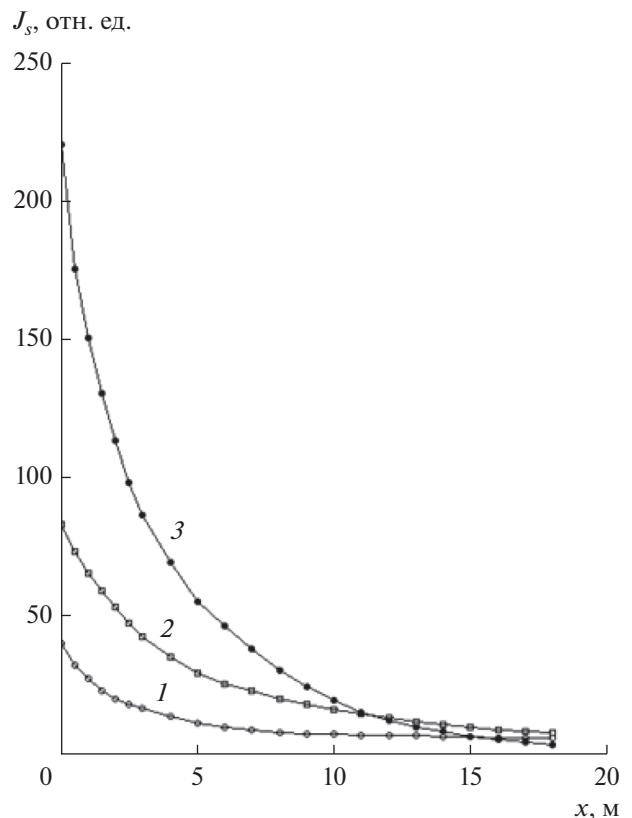


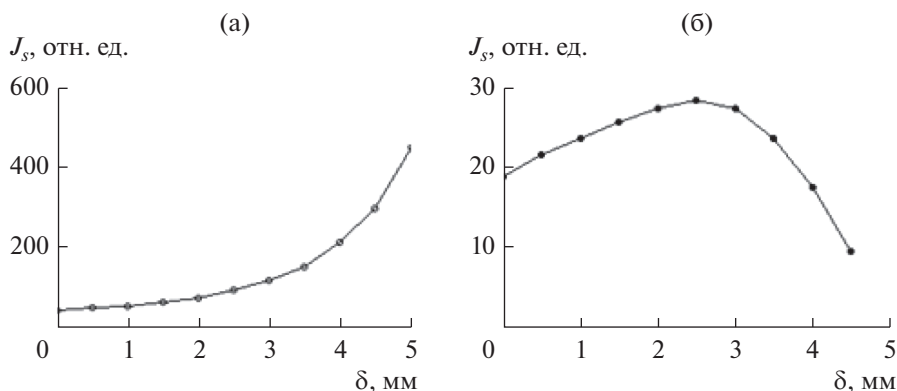
Рис. 4. Распределения интенсивностей бокового рассеяния света  $J_s(x)$  вдоль оси ОВ, полученные при  $\delta = 0$  (1), 2 (2) и 5 мм (3); длина ОВ 18.5 м;  $x$  – расстояние вдоль оси ОВ от входного торца до места регистрации излучения;  $\lambda = 532$  нм.

где  $x$  – расстояние вдоль оси ОВ от входного торца до места регистрации излучения.

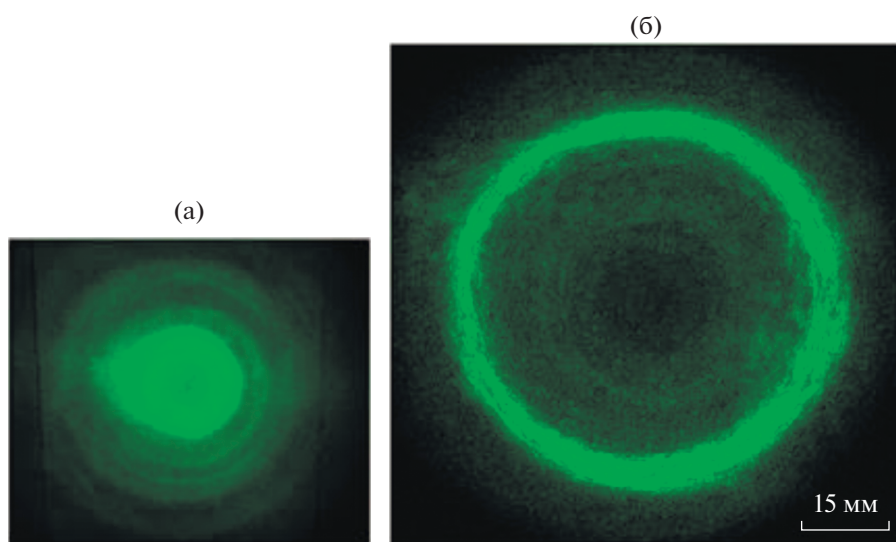
### 2.2. Измерение интенсивности прошедшего через ОВ излучения $\lambda = 532$ нм при различных условиях его ввода

Отметим, что в зависимости от величины  $\delta$  в многомодовом ОВ возбуждаются различные группы обыкновенных мод (меридиональные лучи) и группы мод со спиралевидным волновым фронтом – оптические вихри (косые лучи) [8]. При  $\delta = 0...2$  мм возбуждаются волноводные моды с относительно низкой выходной апертурой 0.05...0.15 (рис. 6а). При  $\delta > 2$  в поле излучения появляются оптические вихри. При  $\delta = 5$  мм (максимальное значение  $\delta$  для использованного объектива) возбуждается группа вихрей с апертурой выходного излучения  $\approx 0.4$  (рис. 6б).

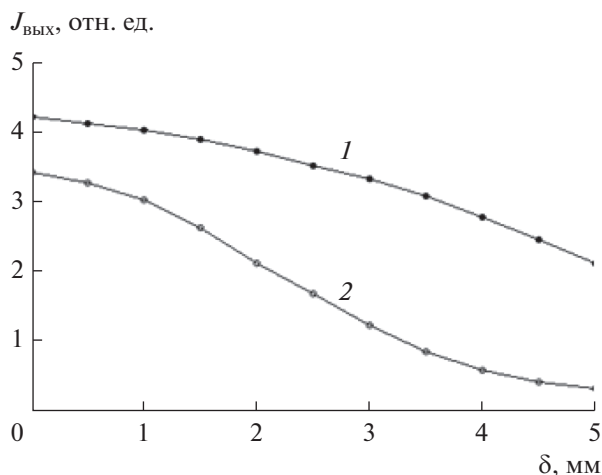
На рис. 7 приведены измеренные зависимости интенсивности излучения на выходе ОВ  $J_{\text{вых}}$  от величины  $\delta$  для ОВ различной длины. Поскольку интенсивность измеряемого в эксперименте рассеянного излучения на несколько порядков слабее ин-



**Рис. 5.** Зависимости интенсивностей бокового рассеяния света светоотражающей оболочкой Tefzel  $J_s$  от смещения оси лазерного луча относительно оси объектива  $\delta$ , измеренные в начале ОВ,  $x = 0.5$  м (а) и на его конце,  $x = 18.5$  м (б);  $\lambda = 532$  нм.



**Рис. 6.** Фотоизлучения ОВ в дальней зоне при соосном возбуждении  $\delta = 0$  мм (а) и при возбуждении с  $\delta = 5$  мм (б);  $\lambda = 532$  нм. Расстояние от выходного торца ОВ до экрана – 53 мм, масштаб одинаков для обоих фото.



**Рис. 7.** Зависимость интенсивности прошедшего через ОВ излучения  $\lambda = 532$  нм от величины  $\delta$  для ОВ длиной 0.6 м (1) и 18.5 м (2).

тенсивности излучения, распространяющегося по ОВ, для измерений  $J_{\text{вых}}$  была использована стопка из четырех аттенюаторов с ослаблением  $\approx 12$  у каждого. Это позволило провести измерения в линейном режиме работы фотоприемника.

По кривой 1 рис. 7, соответствующей короткому (0.6 м) ОВ, можно судить об эффективности ввода излучения в ОВ, так как суммарные оптические потери на столь коротком ОВ незначительны. При этом относительно небольшое уменьшение  $J_{\text{вых}}$  при возрастании  $\delta$  для столь короткого отрезка ОВ можно объяснить снижением эффективности ввода излучения в ОВ при увеличении  $\delta$  от 0 до 5 мм. Следовательно, ослабление сигнала приблизительно в 12 раз на выходе из относительно длинного ОВ (18.5 м) при изменении  $\delta$  от 0 до 5 мм свидетельствует о существенном рассеянии оболочкой введенного в ОВ излучения. Можно предположить, что рассеяние излучения оболоч-

кой – главный механизм оптических потерь в исследованных ОВ. Чем выше апертура введенного излучения, тем выше потери на рассеяние. Наибольший вклад в потери на рассеяние вносят оптические вихри (см. рис. 6б). Эти предположения были подтверждены прямыми измерениями.

Отметим также, что по кривым рис. 7 можно оценить суммарную интенсивность  $J_{s,\Sigma}(18.5, \delta)$  рассеянного излучения ОВ длиной 18.5 м:

$$J_{s,\Sigma}(18.5, \delta) \approx J_{\text{ВЫХ}}(0.6, \delta) - J_{\text{ВЫХ}}(18.5, \delta), \quad (2)$$

где  $J_{\text{ВЫХ}}(18.5, \delta)$  и  $J_{\text{ВЫХ}}(0.6, \delta)$  – интенсивности излучения, выходящего из ОВ длиной 18.5 и 0.6 м соответственно.

### 2.3. Измерение индикатрисы рассеяния и суммарного рассеянного оболочкой Tefzel излучения $\lambda = 532$ нм

Результаты измерений индикатрисы рассеяния с шагом измерений 5 град приведены на рис. 8. Рассеяние имеет широкий угол обзора (практически полный телесный угол). Максимальное рассеяние наблюдается при  $\varphi \approx 30$  град, что связано со структурой полимера.

С помощью измеренных индикатрисы рассеяния (рис. 8) и кривой распределения интенсивности рассеяния по длине ОВ (см. рис. 3) в системе Mathcad были сделаны оценки суммарного (по всей длине ОВ) рассеянного излучения  $J_{s,\Sigma}$ . Для этого сначала просуммировали рассеянное отрезком оболочки ОВ длиной  $h$  в пределах полного телесного угла:

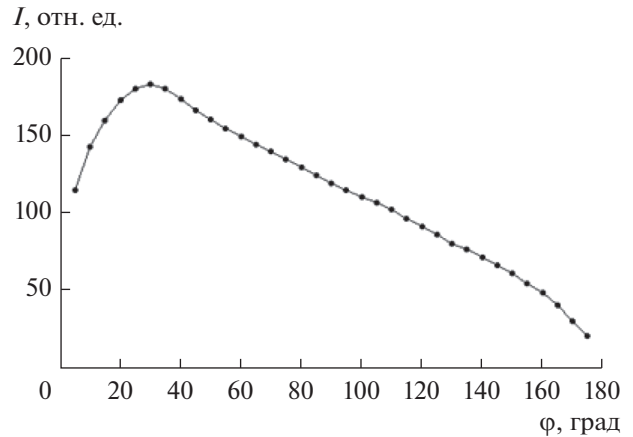
$$J_{sh} \approx \sum_{i=1}^{35} I_i \frac{8\rho^2}{D^2} \left( \left| \cos\left(\frac{\pi\varphi_{i+1}}{180}\right) - \cos\left(\frac{\pi\varphi_i}{180}\right) \right| \right), \quad (3)$$

а затем просуммировали величину  $J_{sh}$  по всей длине ОВ:

$$J_{s\Sigma} \approx \left( \sum_{j=1}^{18} \frac{(l_{j+1} - l_j) J_{s_j}}{h J_{s_1}} \right) J_{sh}, \quad (4)$$

В формулах (3) и (4)  $I_i$  – значение индикатрисы рассеяния для направления  $\varphi_i$  (см. рис. 8),  $D = 10$  мм – диаметр диафрагмы ФЭУ,  $\rho = 150$  мм – расстояние от наблюдаемого участка оболочки ОВ до диафрагмы ФЭУ,  $h = 10$  мм – длина наблюдаемого участка ОВ при измерении индикатрисы рассеяния,  $l_j$  – координата  $j$ -го дискрета на оси ОВ,  $J_{s_j}$  – значение интенсивности рассеяния для  $j$ -го дискрета ОВ (см. рис. 4).

Отметим, что практический интерес представляет не абсолютное значение  $J_{s,\Sigma}$ , а ее сравнение с интенсивностью выходящего из ОВ излучения  $J_{\text{ВЫХ}}$ . Рассчитанные оценки величины  $J_{s,\Sigma}$  и измеренные значения величины  $J_{\text{ВЫХ}}$  для нескольких значений  $\delta$  приведены в табл. 1. Из приведенных



**Рис. 8.** Индикатриса рассеяния излучения  $\lambda = 532$  нм участком оболочки Tefzel длиной 10 мм, расположенным на расстоянии  $\approx 15$  см от выходного торца ОВ. Кривая получена при рассогласовании осей лазера и объектива  $\delta = 5$  мм; диаметр входной диафрагмы ФЭУ 10 мм; расстояние от открытого участка оболочки до входной диафрагмы ФЭУ 150 мм.

данных видно, что при соосном возбуждении ( $\delta = 0$  мм) величина рассеянного излучения составляет незначительную часть от прошедшего через ОВ излучения – около 8%. При  $\delta = 2$  мм эта величина возрастает до  $\approx 60\%$ , а при  $\delta = 5$  мм суммарная интенсивность рассеянного излучения в  $\approx 3.8$  раз больше интенсивности излучения, прошедшего через ОВ.

### 2.4. Качественное исследование температурной зависимости рассеянного оболочкой Tefzel излучения $\lambda = 532$ нм

Представляет интерес изучение влияния температуры на интенсивность рассеяния излучения  $\lambda = 532$  нм оболочкой Tefzel в интервале температур от комнатной ( $23^\circ\text{C}$ ) до температуры ее плавления ( $250...270^\circ\text{C}$ ). Нагрев ОВ проводили в печи сопротивления, используемой для плавления гранул Tefzel в фильтре для нанесения покрытий [5]. Корпус этой печи прозрачный. Печь сопротивления представляет собой намотанную на стеклянную трубку диаметром 40 мм нихромовую проволоку (диаметром 0.5 мм); шаг намотки 2.5 мм.

**Таблица 1.** Соотношения интенсивностей рассеянного оболочкой и прошедшего через ОВ излучений ( $\lambda = 532$  нм) для различных значений  $\delta$

$\delta$ , мм	$J_{s\Sigma}$ , отн. ед.	$J_{\text{ВЫХ}}$ , отн. ед.	$\chi = J_{s\Sigma}/J_{\text{ВЫХ}}$
0	$5.6 \times 10^5$	$7.2 \times 10^6$	0.08
2	$1.56 \times 10^6$	$2.62 \times 10^6$	0.6
5	$1.56 \times 10^6$	$4.1 \times 10^5$	3.8



Поэтому при помещении подсвеченного ОВ в такую печь рассеянное излучение  $\lambda = 532$  нм можно наблюдать визуально. При температурах 23...235°C интенсивность рассеяния визуально не изменялась. При дальнейшем повышении температуры интенсивность рассеяния уменьшается, достигая минимальной величины при 255°C. В интервале температур 255...270°C интенсивность рассеяния визуально не изменяется. Исчезновение рассеяния вызвано плавлением кристаллической фазы полимера. После извлечения ОВ из печи сопротивления свечение локально нагретого участка оболочки Tefzel восстанавливалось через 1–2 с.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследованные в работе многомодовые оптические волокна с кварцевой сердцевиной и светоотражающей оболочкой из кристаллизующегося термопластичного полимера Tefzel, изготовленные из коммерчески доступных материалов, демонстрируют заметное рассеяние распространяющегося по нему излучения  $\lambda = 532$  нм в широком угле обзора. Это качественно приравнивает их к стеклянным волокнам с рассеивающей сердцевиной Corning Fibrance Light-Diffusing Fibers.

Интенсивности рассеяния излучения  $\lambda = 532$  нм оболочками исследованных ОВ зависят от условий ввода излучения в ОВ. Чем выше апертура введенного излучения, тем глубже эванесцентная часть волны заходит в оболочку и тем интенсивнее рассеяние. При этом суммарная интенсивность рассеянного излучения может в несколько раз превышать интенсивность излучения, прошедшего через ОВ.

Оптические волокна исследованного типа могут быть рекомендованы к использованию в каче-

стве гибких протяженных светорассеивателей при анатомическом освещении, для фотодинамической терапии и фототерапии, для снижения хирургического риска, при инфекциях и других применений в медицине и биологии. Однако для практического их применения необходимо разработать линейку таких ОВ с меньшими диффузионными длинами, чем у исследованных ОВ, и провести более детальные исследования механизмов рассеяния света в них.

Работа выполнена в рамках государственного задания.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тучин В.В. Лазеры и волоконная оптика в биомедицинских исследованиях. М.: Физматлит, 2010.
2. French R.H., Rodríguez-Parada J.M., Yang M.K. et al. // Solar Energy Materials and Solar Cells. 2011. V. 95. № 8. P. 2077.
3. Klubben W.S., Logunov S.L., Fewkes E.J. et al. // Proc. SPIE. 2016. V. 9702. P. 970218.
4. Замятин А.А., Иванов Г.А., Маковецкий А.А., Шилов И.П. Способ изготовления оптического волокна. Патент РФ на изобретение № 2402497. Оpubл. офиц. бюл. "Изобретения. Полезные модели". № 30 от 27.10.2010.
5. Маковецкий А.А., Замятин А.А., Аксёнов В.А. // Оптический журн. 2019. Т. 86. № 3. С. 78.
6. Маковецкий А.А., Замятин А.А., Ряховский Д.В. // Спецвыпуск Фотон-Экспресс Наука 2019. 2019. № 6. С. 360.
7. Кизеветтер Д.В., Ильин Н.В. // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2013. № 3. С. 151.
8. Кизеветтер Д.В., Славина А.Ю., Левин В.М., Баскаков Г.Г. // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2012. № 1/6. С. 119.