ВОЛОКОННАЯ И ИНТЕГРАЛЬНАЯ ОПТИКА

Оптические свойства высокоапертурных кварцевых волокон с оболочкой из аморфных перфторированных полимеров

В.И.Соколов, И.О.Горячук, А.А.Замятин, А.А.Маковецкий, Д.В.Ряховский

Изготовлены образцы оптических кварцевых волокон со светоотражающей оболочкой из аморфных перфторированных сополимеров перфтор-2,2-диметил-1,3-диоксола и перфторпропилвинилового эфира. Сополимеры обладают высокой оптической прозрачностью и сверхнизким показателем преломления n = 1.293 – 1.314 в видимом и ближнем ИК диапазонах длин волн, что позволяет формировать оптические волокна с высокой числовой апертурой. Полимерная оболочка наносилась на кварцевую световедущую жилу волокна фильерным способом как из расплавов, так и из растворов сополимеров. Исследованы оптические потери, апертурные и рассеивающие свойства сформированных кварц-полимерных волокон. Проведено их сравнение с оптическими свойствами волокон со светоотражающими оболочками из кремний-органических эластомеров и из поликристаллических фторполимеров.

Ключевые слова: *аморфные перфторированные полимеры, сверхнизкий показатель преломления, кварц-полимерные оптические волокна, оптические потери, апертурные и рассеивающие свойства кварц-полимерных волокон.*

1. Введение

Фторсодержащие полимерные материалы, обладающие высокой оптической прозрачностью и низким показателем преломления в видимом и ближнем ИК диапазонах длин волн, востребованы во многих областях оптики и фотоники [1, 2]. Они используются, например, для создания полимерных оптических волокон (ОВ) в системах внутриобъектовой передачи данных [3], а также в микропроцессорных вычислительных устройствах на печатных платах с целью формирования высокоскоростных оптических шин передачи данных на основе массивов планарных волноводов [4, 5]. Фторсодержащие полимеры являются биосовместимыми материалами, поэтому на их основе возможно создание высокоапертурных волоконно-оптических зондов для лазерной медицины [6].

В настоящее время считается, что наилучшими материалами для создания таких устройств являются аморфные полностью фторированные (так называемые перфторированные) полимеры [1, 2, 4, 7]. Помимо сверхнизкого показателя преломления и высокой оптической прозрачности в видимом диапазоне спектра, они обладают еще одним важным достоинством – более низким поглощением в ближней ИК области, в том числе в телекоммуникационном диапазоне длин волн вблизи 1550 нм. Это следствие замены легких атомов водорода в молекуле полимера на более тяжелые атомы фтора, которая приводит к смещению колебательных обертонов v_i (i = 0, 1, 2, …) колебаний связи C–F в сторону бóльших длин волн по сравнению с обертонами колебаний C–H-связи [8].

В.И.Соколов, И.О.Горячук. Федеральный научно-исследовательский центр «Кристаллография и фотоника» РАН, Россия, 119333 Москва, Ленинский просп., 59
А.А.Замятин, А.А.Маковецкий, Д.В.Ряховский. Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова РАН, 141190 Московская обл., Фрязино, пл. Введенского, 1;
e-mail: maz226@ms.ire.rssi.ru

Поступила в редакцию 1 марта 2022 г.

В связи со сложностью технологического процесса синтеза, низким выходом целевого продукта и, как следствие, высокой стоимостью таких полимеров коммерчески доступные материалы выпускают только компании Duont (Teflon AF^{TM}, показатель преломления n_D = 1.29), AGC Inc. (Cytop^{TM}, n_D = 1.34), Solvay (Haflon^{TM}, n_D = 1.327). В России для создания аналогичных продуктов было предложено использовать оригинальный метод полимеризации при сверхвысоком (12–15 тыс. атм.) давлении [9]. Данный метод позволяет получать полимеры практически из всех известных в настоящее время перфторированных мономеров, многие из которых при обычных условиях не вступают в реакцию радикальной полимеризации. При этом выход полезного продукта достигает 60% и более.

В работе [10] методом полимеризации при сверхвысоком давлении осуществлен синтез перфторированных сополимеров перфтор-2,2-диметил-1,3-диоксола (D1) и перфторпропилвинилового эфира (E1). Данные сополимеры являются аморфными и обладают очень низким показателем преломления n = 1.293–1.314 в видимом и ближнем ИК диапазонах длин волн. В настоящей работе сообщается об использовании этих сополимеров для формирования светоотражающей оболочки на кварцевой световедущей жиле с целью создания высокоапертурных кварц-полимерных ОВ. Исследование оптических свойств изготовленных волокон показало их преимущество по сравнению с ОВ, в которых светоотражающая оболочка формируется из кремнийорганических эластомеров или поликристаллических фторполимеров.

2. Оптические свойства аморфных перфторированных сополимеров

Для синтеза аморфных перфторированных сополимеров использовались мономеры перфтор-2,2-диметил-1,3-диоксол D1 и перфторпропилвиниловый эфир E1, которые представляют собой бесцветные прозрачные жидкости. Синтез проводился путем радикальной сополимери-

зации этих мономеров без использования каких-либо инициаторов в тефлоновой ампуле объемом 5 см^3 при температуре 60 °C и давлении 15 тыс. атм. Длительность синтеза составляла 14 сут. Были получены сополимеры $D1_{1-x}E1_x$ с молярной концентрацией перфторпропилвинилового эфира $x = 0.1 - 0.9$ (от 10% до 90%) (рис.1).

Концентрации звеньев D1 и E1 в сополимерах определяли из соотношения интегральных интенсивностей CF_3-групп диоксольного и эфирного фрагментов цепи методом спектроскопии ЯМР. Для измерений использовался спектрометр Bruker AM-300. На рис.2 представлен типичный спектр ЯМР ^{19}F (резонансная частота 282.40 МГц) сополимера $D1_{1-x}E1_x$, измеренный в перфторбензоле. Сигнал с химическим сдвигом $\delta = -82.59$ ppm определяется двумя трифторметильными группами диоксола D1, сигналы с $\delta = -84.36$ и -84.71 ppm – трифторметильной группой эфира E1. Как следует из анализа рис.2, молярная концентрация перфторпропилвинилового эфира E1 в данном сополимере составляла 11%.

Исследование структуры сополимеров $D1_{1-x}E1_x$ проводилось нами ранее методом широкоуглового рентгеновского рассеяния с использованием дифрактометра Rigaku Miniflex600 [10]. Было показано, что дифрактограммы этих сополимеров не содержат резких пиков, но имеют широкие «гало», что свидетельствует об аморфности данных материалов. Также было получено, что показатель преломления n этих сополимеров снижается при уменьшении молярной концентрации x эфира E1 в макромолекуле полимера и для длины волны 632.8 нм составляет 1.294–1.314, т.е. является значительно более низким, чем показатель преломления кварца $n \approx 1.46$. Это позволяет использовать данные перфторполимеры для создания светоотражающей оболочки кварцевых волокон, работающих в видимом диапазоне длин волн.

Для оценки пригодности аморфных перфторированных полимеров $D1_{1-x}E1_x$ с целью создания оболочек оптических волокон, работающих в телекоммуникационном диапазоне длин волн вблизи 1550 нм, нами был измерен их показатель преломления в ближней ИК области спектра. При этом использовался спектроскопический рефрактометрический комплекс на базе многоволнового рефрактометра Аббе DR-M2/1550 (Atago, Япония). Рефрактометр был оснащен CCD-камерой C10633 (Hamamatsu), чувствительной в диапазоне длин волн 900 – 1600 нм. Источником света служила галогеновая лампа мощностью 250 Вт, расположенная в непосредственной близости от входной щели монохроматора M266 (Solar Laser Systems, Белоруссия). К выходной щели монохроматора был присоединен специальный многожильный волоконно-оптический кабель, включающий семь кварцевых оптических волокон с диаметром световедущей жилы 1.0 мм. На торце кабеля, обращенном к выходной щели монохроматора, жилы были расположены в виде линии, параллельной щели. На другом торце кабеля, который использовался для подсветки образца, нанесенного на рабочую грань измерительной призмы рефрактометра, жилы располагались внутри круга. Такая конструкция обеспечивала эффективный сбор монохроматического излучения, что позволяло проводить измерение показателя преломления сополимеров в телекоммуникационном диапазоне длин волн вблизи 1550 нм.

Результаты измерений приведены на рис.3. Из них следует, что показатель преломления сополимера $D1_{1-x}E1_x$ с $x = 0.39$ составляет 1.3159–1.3160 в диапазоне 1500–1600 нм, т.е. он существенно меньше, чем показатель преломления кварца $n = 1.444$ вблизи $\lambda = 1550$ нм. Таким образом, сополимеры перфтор-2,2-диметил-1,3-диоксола и перфторпропилвинилового эфира могут быть использованы в качестве оболочки кварцевых волокон для систем высокоскоростной оптической передачи информации, работающих в телекоммуникационном диапазоне вблизи $\lambda = 1550$ нм.

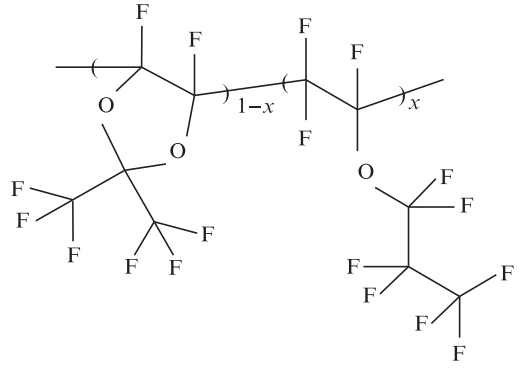

Рис.1. Структура макромолекулы перфторированного сополимера $D1_{1-x}E1_x$, синтезированного методом сверхвысокого давления без использования инициаторов радикальной полимеризации (x – молярная концентрация перфторпропилвинилового эфира E1).

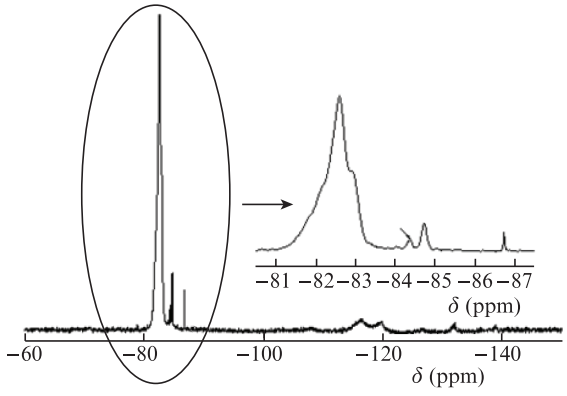

Рис.2. ЯМР-спектр ^{19}F (резонансная частота 282.40 МГц) сополимера $D1_{1-x}E1_x$ с $x = 0.11$, измеренный в перфторбензоле (δ – химический сдвиг).

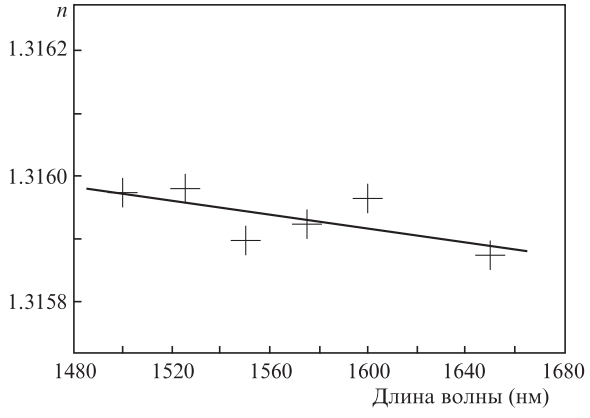

Рис.3. Результаты измерений показателя преломления $n(\lambda)$ перфторированного сополимера $D1_{1-x}E1_x$ с $x = 0.39$ вблизи $\lambda = 1550$ нм (сплошная линия – линейная интерполяция).

3. Нанесение оболочки из аморфного перфторированного сополимера на кварцевую световедущую жилу оптического волокна

Светоотражающее покрытие из аморфного перфторированного сополимера наносилось на вытягиваемую кварцевую жилу непосредственно во время вытяжки. Поскольку аморфные перфторированные сополимеры $D1_{1-x}E1_x$ являются термопластичными полимерами, растворимыми во фторсодержащих органических растворителях, покрытия из них можно наносить как из раствора, так и из расплава. В обоих случаях использовался фильерный способ нанесения. Покрытия формировались при прохождении жилы диаметром d_f = 200 мкм через фильеру за счет адгезии расплава (раствора) к поверхности жилы.

3.1. Нанесение полимерной оболочки на ОВ из расплава

Вытяжная установка (рис.4) включала механизм подачи заготовки со скоростью V_f = 0.5–10 мм/мин, печь с графитовым нагревательным элементом, позволяющую нагревать волокно до температуры T_m = 200–2200 °C, механизм вытягивания волокна (скорость вытягивания V_d = 0.5 – 10 м/мин) и измеритель диаметра волокна в полимерной оболочке. Точность поддержания температуры в печи составляла ±0.5 °C, а высота вытяжной установки – 3.5 м.

Фильера для нанесения фторполимерного покрытия представляла собой кварцевую трубку с внешним и внутренним диаметрами 10.5 и 8.0 мм соответственно и с диаметром выходного отверстия d_a = 440–460 мкм. Порошок сополимера $D1_{1-x}E1_x$ засыпался в фильеру, которая затем устанавливалась в печь. Плавление порошка проводили под вакуумом 50 мбар с целью обезгаживания расплава фторполимера в течение 20–30 мин. Конструкция печи позволяла визуально следить за процессом плавления порошка в фильере.

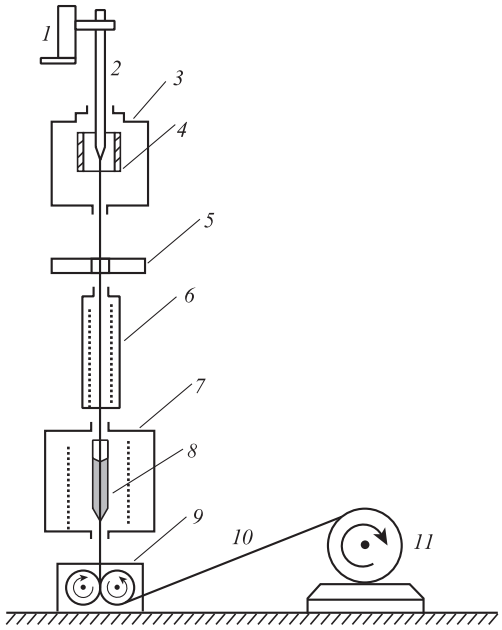

Рис.4. Схема установки для вытяжки кварц-полимерного ОВ с нанесением светоотражающей оболочки из расплава аморфного перфторированного сополимера:
1 – механизм подачи заготовки; *2* – кварцевая заготовка ОВ; *3* – печь с графитовым нагревательным элементом *4*; *5* – измерители диаметра вытягиваемого волокна; *6* – печь для подогрева вытягиваемого волокна; *7* – печь для плавления термопластичного полимера (высота 200 мм); *8* – фильера с расплавом термопластичного полимера; *9* – механизм вытягивания ОВ; *10* – вытягиваемое волокно; *11* – приемный барабан.

Интервал температур, в котором порошки аморфных перфторированных сополимеров $D1_{1-x}E1_x$ переходят в расплавленное состояние, составляет 140–300 °C в зависимости от молярной концентрации. При этом их вязкость изменяется в пределах 10^3–10^2 Па·с. Наш опыт нанесения покрытий из расплавов кристаллизующегося фторполимера марки Tefzel и полиамида П12-Э показал, что вязкость 100–500 Па·с вполне приемлема для получения беспузырного прозрачного расплава. Исходя из требуемой вязкости, для каждого исследованного сополимера подбирали свою рабочую температуру. При этом оценку вязкости проводили методом капиллярной вискозиметрии, основанным на измерении времени подъема столба жидкости в капилляре до заданного уровня под действием приложенного к нему разрежения [11]:

$$\eta \cong \left(\frac{R}{2l}\right)^2 \Delta p t, \qquad (1)$$

где η – вязкость расплава; R – радиус капилляра; Δp – разность давлений окружающей среды и внутри капилляра; l и t – высота столба жидкости в капилляре и время ее достижения соответственно.

В экспериментах по нанесению светоотражающей оболочки из расплава использовался сополимер $D1_{1-x}E1_x$ с молярной концентрацией E1 x = 0.29. Масса начальной засыпки порошка в фильеру составляла 1.5–2.0 г (1.3 – 1.8 см^3). Скорость вытяжки ОВ (скорость нанесения покрытия) была 1.2–1.8 м/мин. Заправку вытягиваемого волокна в фильеру с расплавом проводили способом, описанным в [12]. При толщине нанесенного покрытия h_c = 50–60 мкм длина вытянутых образцов ОВ составляла 8–10 м.

3.2. Нанесение светоотражающей оболочки из растворов сополимеров

В качестве растворителей для сополимеров $D1_{1-x}E1_x$ использовались перфторированные растворители гексафторбензол и перфтордекалин. Концентрация сополимеров в растворах составляла 10–18 мас.%, вязкость растворов (при комнатной температуре) – от 1 до 5 Па·с.

Покрытие из раствора сополимера наносилось на вытягиваемое кварцевое волокно диаметром d_f = 200 мкм с помощью стеклянной фильеры с выходным диаметром 380 мкм, толщина нанесенного жидкого покрытия составляла примерно 60 мкм. Для выпаривания растворителя из нанесенной жидкой оболочки использовалась термопечь сопротивления высотой 350 мм с диапазоном регулирования температуры 40–300 °C. Отметим, что рабочая температура термопечи не должна превышать температуру кипения растворителя.

Одна из проблем, возникающих при нанесении полимерных оболочек на ОВ из растворов, заключается в образовании пузырей в полимерной пленке при испарении растворителя. На рис.5,*а* представлена фотография

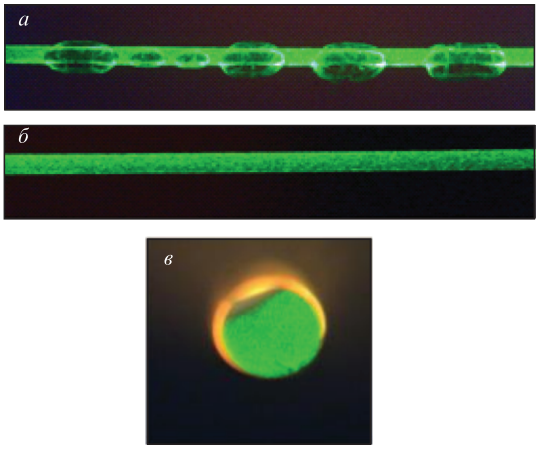

Рис.5. Фотографии подсвеченных излучением с λ = 532 нм поверхностей образцов КП-ОВ/200 мкм с оболочками из $D1_{0.61}E1_{0.39}$, нанесенными из раствора: образца, сформированного при температуре термопечи 75 °C и скорости нанесения покрытия 1.8 м/мин (*а*), и образца, сформированного при 70 °C и 2.0 м/мин (*б*). Внешний диаметр цилиндрических участков оболочек d_c = 228 мкм, средняя толщина полимерного покрытия h_c = 14 мкм. На рис.5,*в* – фотография поперечного сечения ОВ образца *б*.

образца ОВ с диаметром кварцевой световедущей жилы 200 мкм при подсветке его излучением с λ = 532 нм. Светоотражающая оболочка наносилась из 18-процентного раствора сополимера $D1_{0.61}E1_{0.39}$ в гексафторбензоле (температура кипения 81 °C). Температура термопечи составляла 75 °C, скорость нанесения покрытия – 1.8 м/мин. Видно, что цилиндрические участки полимерной оболочки чередуются с участками с газовыми пузырями. Последние образовались под внешней поверхностью покрытия, над тонким слоем беспузырного полимера в процессе выпаривания растворителя.

Отметим, что задача получения бездефектного покрытия была решена путем уменьшения температуры и увеличения скорости вытягивания ОВ (рис.5,*б*). Однако средняя толщина полимерной оболочки, сформированной после выпаривания растворителя, составляла всего 14 мкм. К тому же нанесенная оболочка была заметно неконцентрическая (рис.5,*в*), что связано с низкой вязкостью раствора. Поэтому при распространении излучения в данном ОВ наблюдалось заметное его «вытекание» в оболочку (оболочка светилась). При нанесении оболочки из расплава сополимера таких проблем не возникало, т. е. в этом случае процесс более технологичный, чем нанесение оболочек из растворов.

4. Исследование оптических свойств кварц-полимерных ОВ со светоотражающей оболочкой из аморфных перфторированных полимеров и их сравнение с оптическими свойствами других кварц-полимерных ОВ

Преимуществом кварц-полимерных (КП) ОВ со светоотражающей оболочкой из аморфных перфторированных полимеров по сравнению с ОВ с оболочками из кремнийорганических эластомеров, фторированных акрилатов (Polymer-Clad-Fibers, Hard-Clad-Silica Fibers) и кристаллизующихся фторполимеров (типа Tefzel) является большая номинальная числовая апертура NA = $\sqrt{n_s^2 - n_c^2}$, где n_s – показатель преломления кварца; n_c – показатель преломления полимера. Так, для излучения с λ = 632.8 нм NA = 0.37 (Hard-Clad-Silica), 0.4 (СИЭЛ-159-305), 0.42 (Tefzel), тогда как для ОВ с оболочкой из $D1_{1-x}E1_x$ NA = 0.55 – 0.62.

Экспериментальную оценку номинальной числовой апертуры NA многомодового ОВ можно сделать по меридиональным лучам, измеряя их угловую расходимость в дальнем поле. Номинальной числовой апертуре соответствуют меридиональные лучи с наибольшей (для данного ОВ) угловой расходимостью.

Для получения меридиональных лучей использовался объектив с числовой апертурой 0.65, большей, чем оцениваемая NA (0.6). При этом падающее на объектив излучение лазера LG-303 (λ = 532 нм) должно полностью заполнить его входную диафрагму. Для расширения исходного лазерного пучка лазер размещался на расстоянии 6 м от объектива. Сфокусированное объективом излучение соосно вводилось в ОВ. Выходящее из ОВ излучение проектировалось в пятно на экране, расположенном на расстоянии h = 50 мм от выходного торца ОВ, и фотографировалось. Оценка числовой апертуры проводилась по формуле

$$\mathrm{NA} \approx \sin\left(\mathrm{Arctan}\left(\frac{D}{2h}\right)\right), \qquad (2)$$

где D – диаметр пятна.

На рис.6 приведены фотографии пятен излучений, выходящих из КП-ОВ /200 мкм (200 мкм – диаметр сердцевины ОВ) со светоотражающими оболочками из СИЭЛ-159-315 и $D1_{0.71}E1_{0.29}$. На фотографиях видны характерные для меридиональных мод спекл-структуры. Видно также, что излучение, выходящее из первого ОВ, существенно менее расходящееся, чем излучение, выходящее из второго ОВ. Диаметры пятен излучения $D \approx 42$ мм (оболочка из СИЭЛ-159-315) и $D \approx 75$ мм (оболочка из $D1_{0.71}E1_{0.29}$), откуда с использованием формулы (2) следуют оценки номинальной числовой апертуры: NA ≈ 0.4 и NA ≈ 0.6 соответственно.

Оптические потери исследованных ОВ были оценены методом бокового рассеяния излучения [14]. Поскольку интенсивность рассеянного излучения $J_s(x)$ в любом сечении x ОВ пропорциональна интенсивности проходящего по нему излучения $I(x)$, то для оптических потерь α_λ справедливо выражение

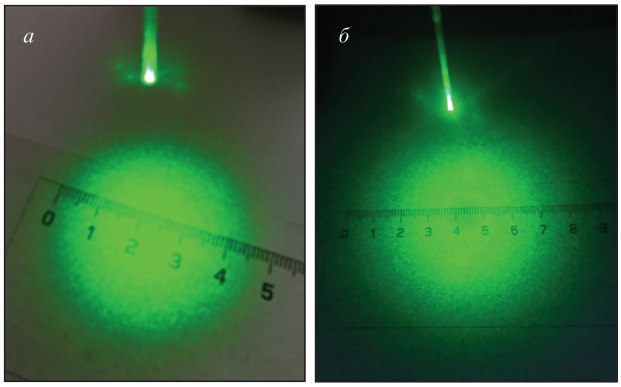

Рис.6. Фотографии пятен излучения меридиональных мод в дальнем поле КП-ОВ/200 мкм с покрытием из СИЭЛ-159-315 (*а*) и КП-ОВ/200 мкм с покрытием из $D1_{0.71}E1_{0.29}$ (*б*). Расстояние от торцов ОВ до экрана h = 50 мм, цена деления масштабной линейки – 1 мм, длина каждого образца ОВ – 50 см.

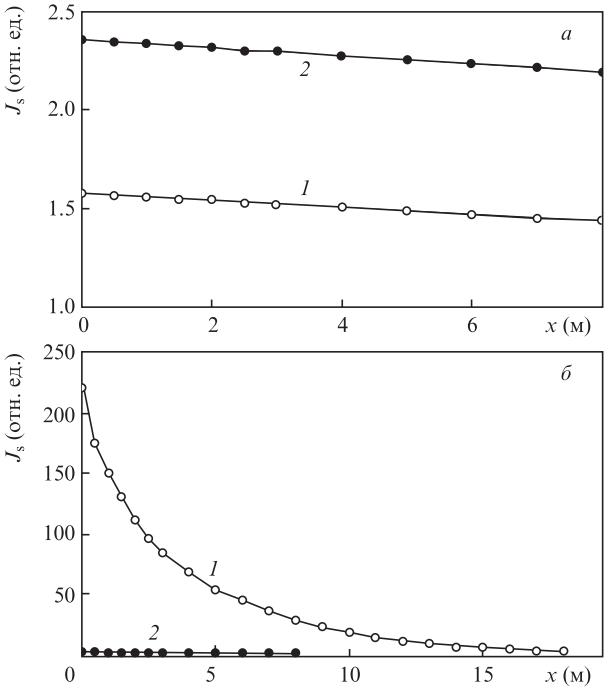

Рис.7. Распределения интенсивностей бокового рассеяния света $J_s(x)$ вдоль осей КП-ОВ/200 мкм с покрытием из СИЭЛ-159-315 (*1*) и с покрытием из $D1_{0.71}E1_{0.29}$ (*2*) (*а*), а также КП-ОВ/200 мкм с покрытием Tefzel (*1*) и с покрытием из $D1_{0.71}E1_{0.29}$ (*2*) (*б*). Все измерения проведены при одинаковых условиях возбуждения; λ = 532 нм.

$$\alpha_\lambda = 10\lg\left(\frac{J_s(0)}{J_s(x)}\right)x^{-1}, \qquad (3)$$

где x – расстояние вдоль оси ОВ от входного торца до места регистрации излучения. На рис.7 показаны измеренные распределения интенсивности рассеянного излучения $J_s(x)$ по длине ОВ для КП-ОВ/200 мкм с покрытиями из $D1_{0.71}E1_{0.29}$ (из расплава), СИЭЛ-159-315 и Tefzel. Все три ОВ вытянуты из одной и той же преформы из кварцевого стекла (КУВИ, завод им. Дзержинского, Гусь-Хрустальный). Оптическое волокно с покрытием из СИЭЛ-159-315, имеющее относительно низкие интенсивность рассеяния и оптические потери, было выбрано в качестве эталонного. ОВ с покрытием Tefzel, напротив, характеризуется сильным светорассеянием, т.к. фторполимер Tefzel является кристаллизующимся полимером. Для каждого выбранного расстояния x регистрировалось излучение, рассеянное участком оболочки ОВ длиной примерно 5 мм. При этом измеряемый участок ОВ устанавливался параллельно светочувствительному торцу ФЭУ-51 на расстоянии 5 мм от него; шаг измерений составил 0.5–1 м. Схема измерения приведена в работе [13].

Из рис.7 следует, что у входного торца интенсивность рассеяния в КП-ОВ/200 мкм с покрытием из $D1_{0.71}E1_{0.29}$ примерно в 1.5 раза больше, чем в КП-ОВ/200 мкм с покрытием из СИЭЛ-159-315, и примерно на два порядка меньше, чем в КП-ОВ/200 мкм с покрытием Tefzel. Соответственно, имеем оценки оптических потерь для излучения на λ = 532 нм: $\alpha_\lambda \approx 50$ дБ/км ($D1_{0.71}E1_{0.29}$) и $\alpha_\lambda \approx$ 40 дБ/км (СИЭЛ-159-315). В работе [15] для спектрального диапазона 800–1100 нм оптические потери в аналогичном КП-ОВ/200 мкм с покрытием СИЭЛ-159-315 были в пределах от 10 до 2.2 дБ/км. Поэтому для КП-ОВ/200 мкм с покрытием из $D1_{0.71}E1_{0.29}$ для этого же спектрального диапазона оптические потери можно оценить как 12.5–2.8 дБ/км.

5. Заключение

Методом полимеризации при сверхвысоком давлении без использования фотоинициаторов синтезированы аморфные сополимеры перфтор-2,2-диметил-1,3-диоксола и перфторпропилвинилового эфира. Сополимеры обладают высокой оптической прозрачностью в спектральном диапазоне 400–1600 нм и имеют сверхнизкий показатель преломления n = 1.293 – 1.314.

Изготовлены лабораторные образцы кварц-полимерных оптических волокон с диаметром сердцевины 200 мкм, со светоотражающими оболочками из синтезированных аморфных перфторированных сополимеров, нанесенными фильерным способом из их растворов или расплавов. При этом образцы ОВ со светоотражающей оболочкой толщиной 50–60 мкм, нанесенной из расплава, имели высокую числовую апертуру NA = 0.6. Интенсивность бокового рассеяния и оптические потери в них были на уровне соответствующих параметров кварц-полимерных ОВ со светоотражающей оболочкой из кремнийорганических эластомеров типа СИЭЛ.

Сформированные кварц-полимерные ОВ со светоотражающими оболочками из аморфных перфторированных сополимеров могут быть использованы для создания высокоапертурных волоконно-оптических зондов, в частности зондов для лазерной медицины.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН (в части синтеза аморфных перфторированных сополимеров) и Фрязинского филиала Института радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова РАН (в части использования перфторированных сополимеров при изготовлении кварц-полимерных оптических волокон).

1. Tanio N., Koike Y. *Polym. J.*, **32**, 43 (2000).
2. Groh W., Zimmermann A. *Macromoleculs*, **24**, 6660 (1991).
3. Large M.C.J., Poladian L., Barton G.W., van Eijkelenborg M.A. *Microstructured Polymer Optical Fibers* (Sydney: Springer Science, 2008).
4. Eldada L., Shacklette L.W. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron*., **6**, 54 (2000).
5. Соколов В.И., Ахманов А.С., Игумнов С.М., Молчанова С.И., Савельев А.Г., Тютюнов А.А., Хайдуков Е.В., Хайдуков К.В., Панченко В.Я. *Вестник РФФИ*, № 3, 82 (2014).
6. Шилов И.П., Даниелян С.Л., Замятин А.А., Маковецкий А.А., Кочмарев Л.Ю. *Оптический журн*., **86** (4), 59 (2019).
7. Vitale A., Bongiovanni R., Amedure D. *Chem. Rev*., **115**, 8835 (2015).
8. Groh W. *Makromol. Chem*., **189**, 2861 (1988).
9. Жаров А.А., Гузяева И.А. *Известия АН. Сер. химическая*, № 6, 1199 (2010).
10. Соколов В.И., Бойко В.Э., Горячук И.О., Игумнов С.М., Молчанова.И., Погодина Ю.Е., Полунин Е.В. *Известия АН. Сер. химическая*, № 7, 1284 (2017).
11. Замятин А.А., Маковецкий А.А., Милявский Ю.С. *Журн. прикл. химии*, **75** (10), 1717 (2002).
12. Замятин А.А., Иванов Г.А., Маковецкий А.А., Шилов И.П. Патент № 2402497 РФ (приоритет от 03.12.2008).
13. Кизеветтер Д.В. *Методы измерения затухания в волоконных световодах* (СПб: Политех-Пресс, 2019).
14. Маковецкий А.А., Замятин А.А., Ряховский Д.В. *Оптика и спектроскопия*, **127** (3), 47717 (2019).
15. Бубнов М.М. Док. дис. (Москва, ИОФ РАН, 2009).