

ОТЕЧЕСТВЕННЫЕ РАДИАЦИОННО-СТОЙКИЕ ВОЛОКОННЫЕ СВЕТОВОДЫ

А.Л. Томашук¹
Д.А. Дворецкий²
В.А. Лазарев²
А.Б. Пнев²
В.Е. Карасик²
М.Ю. Салганский³
П.Ф. Кашайкин¹
В.Ф. Хопин³
А.Н. Гурьянов³
Е.М. Дианов¹

tomashuk@fo.gpi.ru
ddvoretzkiy@gmail.com

¹ Научный центр волоконной оптики РАН, Москва, Российская Федерация

² МГТУ им. Н.Э. Баумана, НОЦ «Фотоника и ИК-техника», Москва,
Российская Федерация

³ Институт химии высокочистых веществ РАН им. Г.Г. Девярых, Нижний Новгород,
Российская Федерация

Аннотация

Обобщены результаты исследования микроскопических механизмов радиационно-наведенных оптических потерь в радиационно-стойких волоконных световодах с сердцевиной из нелегированного и легированного фтором кварцевого стекла, а также создания лабораторной технологии радиационно-стойких волоконных световодов с сердцевиной из нелегированного кварцевого стекла, содержащего большой избыток кислорода. Установлено, что за счет избытка кислорода подавляются все механизмы радиационно-наведенных оптических потерь. Прямое экспериментальное сравнение созданных волоконных световодов и промышленного радиационно-стойкого световода фирмы J-fiber (Германия) показало, что радиационно-наведенные оптические потери в разработанных волоконных световодах в несколько раз меньше, чем в световоде фирмы J-fiber, на длине волны 1,31 и 1,55 мкм в условиях γ -облучения от источника ⁶⁰Со при значениях мощности дозы 7,6 Гр/с и мощности приблизительно до 28 кГр

Ключевые слова

Волоконный световод, радиационно-наведенное поглощение света, радиационная стойкость

Поступила в редакцию 15.06.2016
© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016

Введение. Под действием ионизирующего излучения в сетке кварцевого стекла волоконного световода (ВС) возникают точечные дефекты (радиационные центры окраски (РЦО)), поглощающие световой сигнал, распространяющийся по ВС. В результате в ВС возникают радиационно-наведенные потери (РНП) света, приводящие к ошибкам в работе волоконно-оптической системы связи или датчика вплоть до полной утраты работоспособности. Обеспечение радиационной стойкости ВС — это минимизировать РНП до приемлемого уровня.

Радиационная стойкость ВС (РНП) в первую очередь определяется химическим составом его сердцевин и светоотражающей оболочки. Стандартные ВС для линий оптической связи имеют сердцевину из германосиликатного стекла и оболочку из нелегированного кварцевого стекла и не являются радиационно-стойкими ввиду наличия РЦО, связанных с атомами германия. Такие ВС неприменимы в системах волоконно-оптической связи и датчиках, работающих в присутствии сильных полей ионизирующего излучения, а также в условиях возможного возникновения таких полей в атомной энергетике и космосе.

Для повышения радиационной стойкости германий и другие легирующие добавки, кроме фтора, должны быть исключены из химического состава ВС. Волоконный световод с сердцевиной из нелегированного кварцевого стекла и со светоотражающей оболочкой из фторсиликатного стекла были разработаны и за рубежом [1], и в России [2]. Такие световоды имеют более высокую радиационную стойкость, чем стандартные ВС, содержащие германий. Позднее было установлено, что небольшая добавка фтора в сердцевину позволяет несколько повысить радиационную стойкость ВС [3–6].

Цель настоящей работы — исследование микроскопических механизмов РНП в ВС с сердцевиной из нелегированного кварцевого стекла и легированного фтором, выявление зависимости РНП от химического состава и технологических режимов, а также создание по результатам исследований лабораторной технологии радиационно-стойких ВС, не уступающих зарубежным аналогам.

Физические механизмы радиационно-наведенных потерь в радиационно-стойких волоконных световодах. Сравнительные исследования формы спектра РНП и ее зависимости от дозы γ -облучения в ВС с различными технологическими параметрами позволили установить природу всех РЦО, ответственных за РНП в ВС с сердцевиной из нелегированного и легированного фтором кварцевого стекла [7]. Этими РЦО оказались два типа автолокализованных дырочных состояний ($АДС_1$ и $АДС_2$, или *self-trapped holes*, STH_1 и STH_2) [8] и Cl^0 -центр, возникающий вследствие радиационно-индуцированного разрыва связи Si–Cl и выхода нейтрального атома хлора в междузелье сетки [9]. Причина возникновения Cl^0 -центра — вхождение хлора в сетку стекла в процессе его синтеза из $SiCl_4$ и O_2 при изготовлении преформы.

Микроскопические структуры $АДС_1$ и $АДС_2$ приведены на рис. 1. Радиационные центры окраски появляются в результате рассеяния γ -кванта на p -электроны атома кислорода, не участвующем в химической связи. Возникшая на месте электрона дырка может быть локализована на p -орбитали одного атома кислорода ($АДС_1$, рис. 1, а) или одновременно на двух p -орбиталях соседних атомов кислорода ($АДС_2$, рис. 1, б). Очевидно, что для возникновения $АДС_2$ требуется, чтобы валентный угол O–Si–O был меньше нормального, т. е. тетраэдр SiO_4 должен быть деформирован. Следует отметить, что на необходимость напряжений сетки стекла и вызванных ими деформаций для возникновения $АДС_2$ в исследованиях других авторов внимания обращено не было.

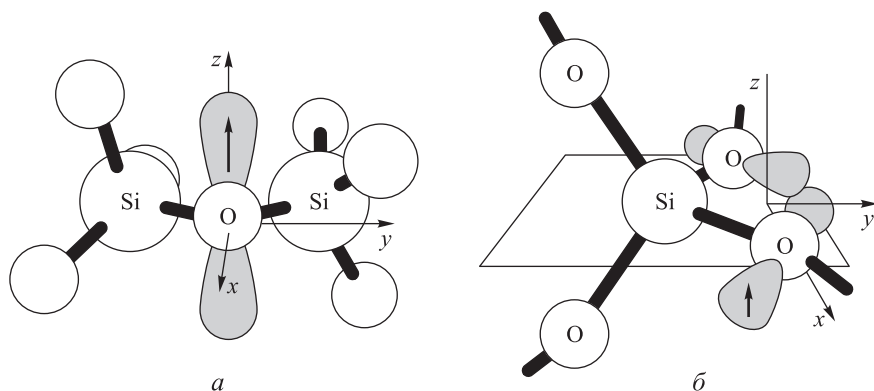
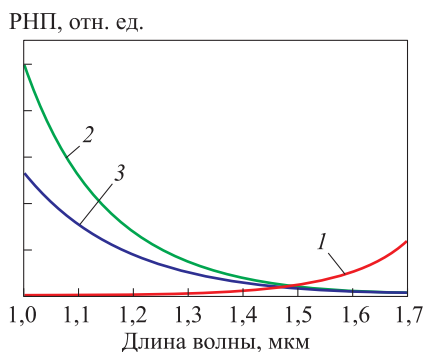


Рис. 1. Микроскопические структуры автолокализованных дырочных состояний первого АДС₁ (а) и второго АДС₂ (б) типов [8]

Спектры РНП, вызванные каждым возможным РЦО, схематично показаны на рис. 2. Максимумы полос РНП этих РЦО находятся в УФ-области (Cl⁰-центр), в видимой области (АДС₂) и в диапазоне значений 1,8...2,2 мкм (АДС₁), в то время как РНП в коммуникационном спектральном окне ($\approx 1,3...1,55$ мкм) определяется достаточно интенсивными хвостами полос таких РЦО.

Рис. 2. Спектральные зависимости РНП, вызванных АДС₁ (1), АДС₂ (2) и Cl⁰-центром (3) в световоде с сердцевинной из нелегированного и легированного фтором кварцевого стекла (соотношение амплитуд трех РНП примерно соответствует неоптимизированному ВС с сердцевинной из нелегированного кварцевого стекла при $D \approx 100$ кГр и $d \approx 5$ Гр/с)



Соотношение амплитуд РНП трех рассматриваемых РЦО, показанное на рис. 2, имеет место в неоптимизированном ВС с сердцевинной из нелегированного кварцевого стекла при дозе излучения $D \approx 100$ кГр и мощности дозы $d \approx 5$ Гр/с.

Было установлено [7], что РНП от АДС₁ и Cl⁰-центра возрастают с увеличением дозы ионизирующего излучения монотонно по сублинейному закону и зависят от мощности дозы относительно слабо, что является «нормальным» поведением для РЦО в ВС на основе кварцевого стекла. В то же время проявления РНП, вызванных АДС₂, заметно отличаются от РНП, вызванных АДС₁. В процессе облучения эти РНП резко увеличиваются до достижения значения дозы $D \approx 1$ кГр, сильно превосходя интенсивностью два других механизма РНП, после чего начинают плавно снижаться по мере продолжения облучения.

Радиационно-наведенные потери, вызванные АДС₂, зависят от мощности дозы: с ее увеличением РНП также заметно возрастает, а при ее малых значе-

ниях, например, в космических условиях ($d \approx 10^{-6} \dots 10^{-5}$ Гр/с), РНП, вызванные АДС₂, практически не проявляются [8]. Автолокализованные дырочные состояния АДС₂ обладают значительно меньшим временем жизни, чем два других РЦО: при завершении облучения АДС₂ мгновенно распадаются.

Немонотонная зависимость концентрации АДС₂ от дозы объясняется тем, что в процессе облучения происходит радиационно-индуцированная перестройка сетки стекла ВС: напряженные связи при разрыве не восстанавливаются, а атомы смещаются так, чтобы создать ненапряженные связи. Другими словами, из сетки стекла исчезают напряженные (деформированные) тетраэдры SiO₄, поэтому концентрация АДС₂ в процессе облучения, достигнув максимума, снижается.

Приведенный выше анализ позволяет объяснить наблюдавшееся повышение радиационной стойкости при легировании сердцевин из кварцевого стекла фтором (см. работу [6]). Во-первых, присутствие фтора в парогазовой смеси при синтезе стекла сердцевин препятствует вхождению хлора в сетку стекла, т. е. впоследствии под облучением не возникает радиационно-наведенный Cl⁰-центр. Во-вторых, не формируются малозвенные деформированные кольца — на месте их возможного появления в сетку стекла входит атом фтора, превращая кольцо в кластер. В результате подавляются деформации и вызванные ими АДС₂. Немаловажен тот факт, что в силу большей химической активности фтор не создает РЦО, аналогичный Cl⁰-центру. Радиационный центр окраски АДС₁ за счет фтора не подавляется.

Установлено [7], что в ВС с сердцевиной из кварцевого стекла без фтора за счет оптимизации технологических режимов можно сильно подавить все три РЦО.

Технология радиационно-стойких волоконных световодов с сердцевиной из нелегированного кварцевого стекла. Для изготовления преформ радиационно-стойких ВС использован процесс осаждения кварцевого стекла из парогазовой смеси исходных реагентов на внутреннюю стенку опорной трубы из кварцевого стекла — MCVD-процесс [10] — как наиболее распространенный и изученный в России. В начале процесса при подаче в опорную трубу SiCl₄, SiF₄ и O₂ осаждаются слои фторсиликатного стекла — светоотражающая оболочка будущего световода с показателем преломления, меньшим, чем у сердцевин. Затем при подаче SiCl₄ и O₂ осаждается сердцевина будущего ВС из нелегированного кварцевого стекла. Для радикального повышения радиационной стойкости ВС необходимо обеспечить сильный избыток кислорода в парогазовой смеси при синтезе стекла сердцевин: отношение молярных расходов O₂ и SiCl₄ должно составлять $r \geq 75$ [7].

Исследования поперечных срезов преформ ВС на электронном микроскопе с рентгеновским анализатором химического состава показали следующее: при таком избытке кислорода подавляется вхождение хлора в стекло, так что его содержание в сердцевине не превышает 0,01 вес. %. Измерения эволюции спектра РНП с дозой γ -облучения в таких ВС действительно не выявили признаков

присутствия Cl^0 -центра, который вносит наибольший вклад в РНП в световодах, полученных при небольшом избытке кислорода ($r \leq 20$) [7].

Установлено, что при $r \geq 75$ эффективно подавляются и АДС₂. Во-первых, это обусловлено тем, что избыточный кислород, входящий в сетку стекла в виде пероксидных связей $-O-O-$, резко снижает концентрацию напряженных (деформированных) малозвенных колец в сетке. Во-вторых, температура стеклования кварцевого стекла, обогащенного пероксидными связями, снижается и может стать равной температуре стеклования фторсиликатного стекла светоотражающей оболочки. В последнем случае в процессе вытяжки ВС сердцевина и оболочка затвердевают одновременно, и поэтому не происходит «вмораживания» деформаций в сетке.

Оказалось, что большой избыток кислорода в сердцевине ($r \geq 75$) приводит к подавлению АДС₁ [7], хотя физический механизм этого эффекта пока неясен.

Следовательно, подавляются все три РЦО, и поэтому метод создания избытка кислорода в сердцевине для повышения радиационной стойкости перспективнее метода фторирования; тем более что добавка фтора в сердцевину ухудшает волноводные свойства ВС при наличии внешней оболочки, образованной материалом опорной трубы.

Реализовано четыре конструкции (А–Г) радиационно-стойких ВС с сердцевиной из нелегированного кварцевого стекла с большим избытком кислорода. Зависимость показателя преломления преформ ВС различных конструкций от радиальной координаты приведена на рис. 3. Используются два способа осаждения слоев оболочки: 1) прямое легирование фтором, при котором в опорную трубу одновременно подают $SiCl_4$, SiF_4 и O_2 ; 2) легирование фтором пористого слоя [11, 12], при котором сначала осаждают пористый слой SiO_2 при подаче в трубу $SiCl_4$ и O_2 , а затем при обратном ходе горелки вдоль трубы и подаче в трубу SiF_4 происходит легирование и проплавление слоя. Прямое легирование позволяло получить фторсиликатную оболочку с показателем преломления на 0,005 меньше показателя сердцевины, а легирование пористого слоя, при котором вводили большую концентрацию фтора в стекло — на 0,008...0,010 меньше показателя сердцевины [7].

В конструкции А (рис. 3, а, кривая 1) использована опорная труба F300 фирмы «Геркус» (Германия) из нелегированного кварцевого стекла, а оболочка нанесена прямым легированием. Таким образом, разность показателей преломления сердцевины и оболочки $\Delta n = 0,005$ и размер поля моды в этой конструкции соответствовали стандарту оптической связи, что позволяет стыковать и сваривать такой световод со стандартными связными ВС без внесения дополнительных оптических потерь. Недостаток этой конструкции — возможные оптические потери вследствие рассеяния света во внешнюю оболочку и изгибная чувствительность ВС, что обусловлено малостью величины Δn .

В конструкции Б (рис. 3, а, кривая 2) периферийная часть оболочки выполнена методом пропитки пористого слоя ($\Delta n = 0,0075$), а часть оболочки, непо-

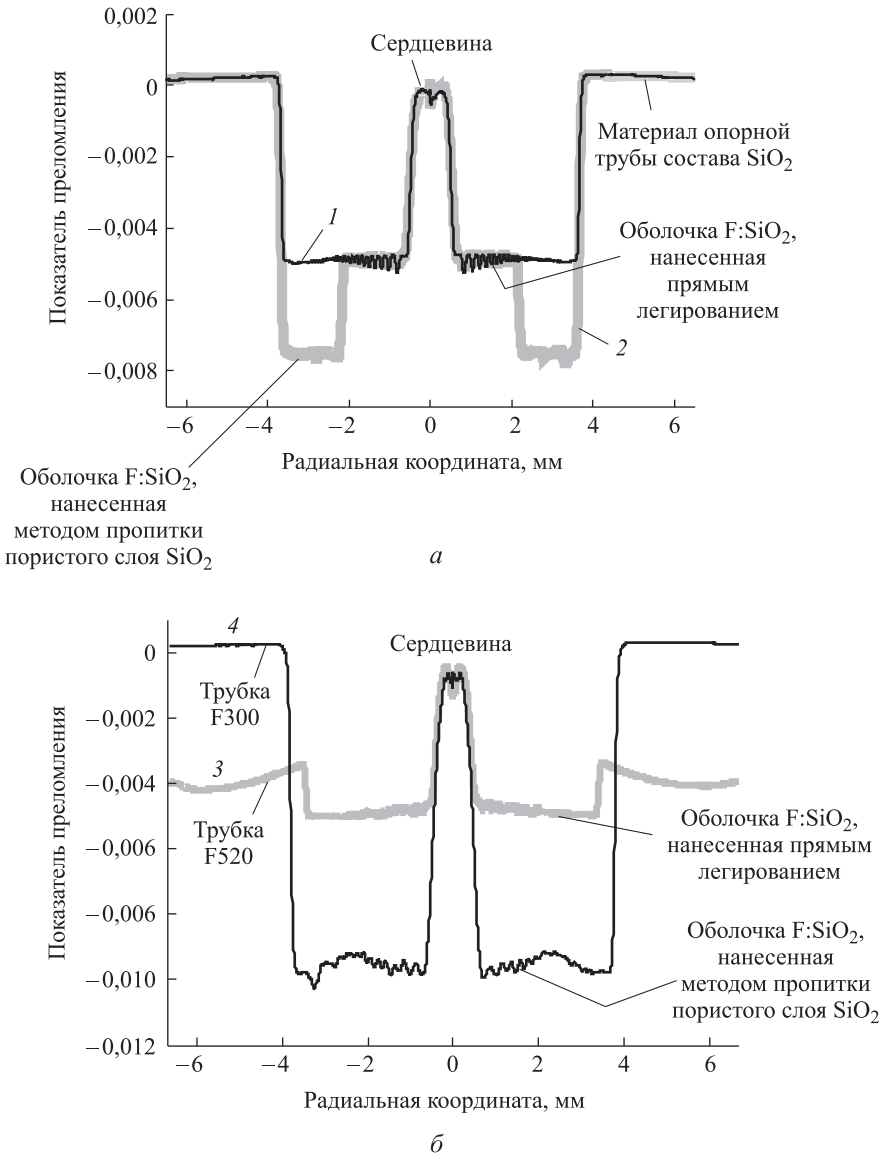


Рис. 3. Зависимость показателя преломления преформ BC 1412, 1416 (1) конструкции А, BC 1305 (2) конструкции Б от радиальной координаты (а) и зависимость профиля показателя преломления преформ BC 1304 (3) конструкции В, BC 1500, 1510 (4) конструкции Г от радиальной координаты (б)

средственно примыкающая к сердцевине, нанесена прямым легированием ($\Delta n = 0,005$). Эта конструкция также обеспечивает стандартный размер поля моды, но в отличие от конструкции А такой ВС ввиду наличия «провала» показателя преломления на периферии оболочки в значительной степени защищен от оптических потерь и обладает существенно меньшей изгибной чувствительностью [13].

Конструкция В (рис. 3, б, кривая 3) так же, как и конструкции А и Б, обеспечивает стандартный размер поля моды. Отличие от конструкции А заключается только в типе опорной трубы — применена труба F520 фирмы «Геркус» (Германия) из фторсиликатного стекла. Ее показатель преломления на 0,004 меньше, чем трубы F300, что обеспечивает защиту от оптических потерь, а также уменьшает изгибную чувствительность ВС, подобно тому, как действует провал показателя преломления на периферии оболочки в конструкции Б. При изготовлении преформы под действием высокой температуры происходил частичный выход фтора из материала опорной трубы, что привело к повышению показателя преломления внешней оболочки преформы вблизи обеих стенок трубы (см. рис. 3, б).

В конструкции Г (см. рис. 3, б, кривая 4) вся оболочка осаждена методом пропитки пористого слоя и имеет весьма низкий показатель преломления ($\Delta n = 0,0095$). Как и в конструкциях А и Б, использована опорная труба F300 из нелегированного кварцевого стекла. Волоконный световод такой конструкции обладает наименьшими оптическими потерями и наименьшей изгибной чувствительностью. Хотя размер поля моды этого световода меньше стандартного, конструкция Г отлично подходит для изготовления радиационно-стойких датчиков, так как размер поля моды в этом случае не критичен.

В экспериментах соотношение расходов O_2 и $SiCl_4$ в сердцевине r варьировали от преформы к преформе с тем, чтобы можно было точно определить оптимальное значение r_{opt} . Зависимость РНП, вызванных АДС₂, от величины r имеет резкий «резонансный» характер, а оптимальное значение r_{opt} зависит от конкретной конструкции (А–Г). Это объясняется тем, что температура стеклования оболочки в каждой конструкции различна. Например, температура стеклования оболочки в конструкции А выше, чем в других, поскольку фтор отсутствует в опорной трубе, а его количество в нанесенной оболочке мало. Поэтому выравнивание температур стеклования сердцевины и оболочки в конструкции А достигается при меньшем значении r_{opt} , чем в трех других конструкциях. Преформы ВС (см. рис. 3) получены при соотношении расходов O_2 и $SiCl_4$ в сердцевине, близком к оптимальному.

Вытяжка является «закалочным» процессом, при котором вероятно вмораживание в сетку стекла деформаций, не успевающих претерпеть релаксацию до момента остывания ВС. Действительно, в работе [3] экспериментально установлено, что применительно к радиационно-стойким ВС с сердцевиной из легированного фтором кварцевого стекла снижение натяжения вытяжки 0,6...0,1 Н уменьшало РНП приблизительно в 3 раза, а уменьшение скорости вытяжки с 120 до 10 м/мин — в 2 раза (длина волны $\lambda = 1,31$ мкм). Было установлено, что РНП сильно зависит от режимов вытяжки, поэтому в лабораторной технологии радиационно-стойких ВС существенно снизили значение этих параметров по сравнению со значениями, обычно используемыми для других типов ВС.

Сравнение радиационной стойкости разработанных волоконных световодов и зарубежного аналога. Было проведено сравнение радиационной стой-

кости шести образцов с показателем преломления (см. рис. 3) и промышленно выпускаемого радиационно-стойкого ВС фирмы J-fiber (Германия).

Волоконные световоды были облучены один за другим от источника γ -излучения ^{60}Co при $d = 7,6$ Гр/с и комнатной температуре в течение 59...61 мин до $D \approx 27...28$ кГр; в процессе облучения и в течение 15 мин после завершения облучения измерялись РНП при $\lambda = 1,31$ и 1,55 мкм — наиболее актуальных длинах волн для практических применений (ВС фирмы J-fiber облучали 75 мин). Интенсивность зондирующего света очень мала — 0,5 мкВт, следовательно, фотообесцвечивание РЦО практически исключено.

Эволюция РНП во времени для исследованных ВС при $\lambda = 1,31$ и 1,55 мкм приведена на рис. 4. Все световоды превзошли зарубежный аналог по радиационной стойкости во всем диапазоне значений доз и на указанных длинах волн. При этом разность РНП в российских ВС и ВС фирмы J-fiber возрастает с дозой: при $D = 27$ кГр (через 59 мин облучения) РНП в российских ВС приблизительно

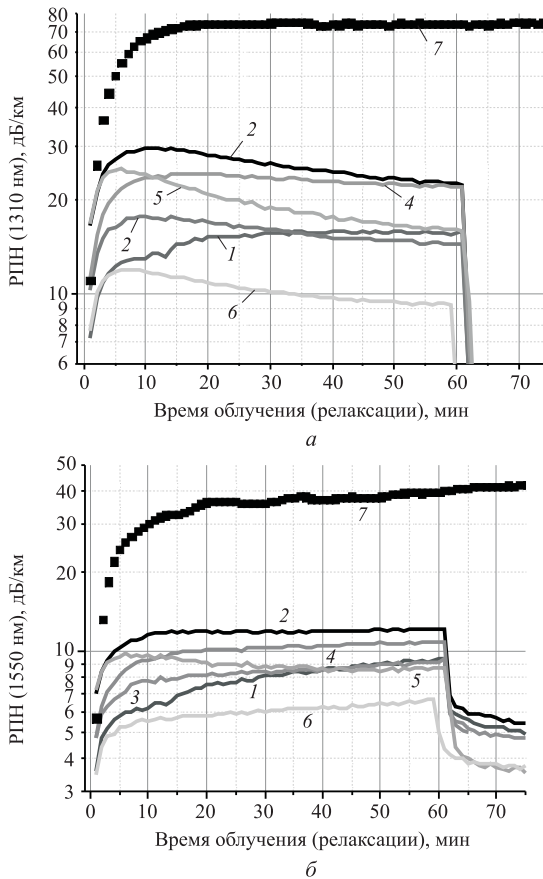


Рис. 4. Эволюция РНП в ВС 1304 (1), 1305 (2), 1412 (3), 1416 (4), 1500 (5) и 1510 (6) в процессе их γ -облучения в течение 59...61 мин и последующей релаксации в течение 15 мин (мощность дозы 7,6 Гр/с) и в радиационно-стойком ВС MIL-PRF-49291/7-01 фирмы J-fiber, который непрерывно облучали 75 мин при длине волны $\lambda = 1,31$ (а) и 1,55 мкм (б)

в 3–8 раз меньше при длине волны $\lambda = 1,31$ мкм и в 3–6 раз меньше при длине волны $\lambda = 1,55$ мкм.

Проанализируем эволюцию РНП с дозой. У ВС наблюдается «классическое» монотонное возрастание РНП с дозой на указанных длинах волн. В то же время для большинства российских ВС на $\lambda = 1,31$ мкм РНП изменяются немонотонно: после достижения максимума приблизительно через 5...15 мин РНП начинают снижаться по мере дальнейшего увеличения дозы. Показательно, что при $\lambda = 1,55$ мкм для большинства российских ВС ход РНП, наоборот, монотонный. Различие поведения при двух длинах волн обусловлено тем, что в этих случаях доминируют различные РЦО: при $\lambda = 1,31$ мкм — АДС₂ для которых свойственен немонотонный ход РНП с дозой, а при $\lambda = 1,55$ мкм — АДС₁ с монотонным ходом. Таким образом, абсолютно подавить эти РЦО невозможно даже в ВС с оптимизированными параметрами. Однако уровень РНП, обусловленный остаточными РЦО, оказался в несколько раз ниже, чем в радиационно-стойком ВС фирмы J-fiber.

По мнению авторов настоящей работы, разброс РНП в ВС (см. рис. 4) никак не указывает на принципиально более высокую радиационную стойкость той или иной конструкции ВС, но обусловлен случайными вариациями технологических режимов. Так, ВС 1500 и 1510 конструкции Г были номинально идентичными, однако их РНП отличаются примерно в 2 раза при длине волны $\lambda = 1,31$ мкм (рис. 4, а); при $\lambda = 1,55$ мкм разность РНП несколько меньше (рис. 4, б). Таким образом, различие обусловлено коротковолновым РЦО АДС₂. Различие концентраций этого РЦО в двух номинально идентичных ВС могло возникнуть вследствие вариаций режимов вытяжки (по-видимому, температуры), приведших к несколько большей деформированности сетки стекла ВС 1500.

По всей видимости, небольшой разброс РНП в идентичных радиационно-стойких ВС неизбежен. Так, разброс РНП более чем в 2 раза имеет место и в идентичных радиационно-стойких ВС фирмы «Фуджикура» [5].

Заключение. Исследована природа РНП в коммуникационных спектральных окнах в ближнем ИК-диапазоне в ВС с сердцевиной из нелегированного кварцевого стекла и легированного фтором. Выявлены три конкретные РЦО, создающие это РНП: два типа автолокализованных дырочных состояний (АДС₁ и АДС₂) и атом хлора в междуузелье сетки (Cl⁰-центр).

Изобретен способ значительного подавления всех трех РЦО в ВС с сердцевиной из нелегированного кварцевого стекла, состоящий в создании существенного избытка кислорода над тетрахлоридом кремния в парогазовой смеси при синтезе стекла сердцевины. Ввиду избытка кислорода подавляется вхождение хлора в стекло (подавляется Cl⁰-центр) и существенно снижаются деформации сетки стекла — предшественники АДС₂. Оказалось, что избыток кислорода подавляет и третий РЦО — АДС₁ — хотя механизм подавления пока неясен. Солегирирование сердцевины фтором также позволяет существенно подавить два из трех РЦО — АДС₂ и Cl⁰-центр, но АДС₁ при этом не подавляются.

При использовании MCVD-процесса для изготовления преформ ВС создана лабораторная технология радиационно-стойких ВС с сердцевиной из нелегированного кварцевого стекла, синтезированного при значительном избытке кислорода. Разработанные ВС в несколько раз по радиационной стойкости превосходят промышленно выпускаемый радиационно-стойкий ВС фирмы J-fiber.

Благодарности. Коллектив авторов выражает благодарность М.М. Бубнову, М.Е. Лихачеву, В.М. Машинскому и С.Л. Семенову (сотрудникам НЦВО РАН) за полезное обсуждение полученных результатов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Chigusa Y., Watanabe M., Kyoto M., Ooe M., Matsubara T. γ -Ray and neutron irradiation characteristics of pure silica core single mode fiber and its life time estimation // IEEE Transactions on Nuclear Science. 1988. Feb. Vol. 35. No. 1.
2. Долгов И.И., Иванов Г.А., Чаморовский Ю.К., Яковлев М.Я. Радиационно-стойкие одномодовые оптические волокна с кварцевой сердцевиной // Фотон-Экспресс. 2005. № 6 (46). С. 4–10.
3. Aikawa K., Izoë K., Shamoto N., Kudoh M., Tsumanuma T. Radiation resistant single-mode optical fiber and method of manufacturing thereof. U.S. Patent 7440673, Oct. 21, 2008.
4. Matthijsse P., Gooijer F., Flammer I., Regnier E., Kuyt G. Fluorine-doped optical fiber. U.S. Patent 7689093, Mar. 30, 2010.
5. Wijnands T., Aikawa K., Kuhnhen J., Ricci D., Weinand U. Radiation tolerant optical fibers: From sample testing to large series production // J. Lightw. Technol. 2011. Nov. Vol. 29. No. 22. P. 3393–3400.
6. Wijnands T., De Jonge L.K., Kuhnhen J., Hoeffgen S.K., Weinand U. Optical absorption in commercial single mode optical fibers in a high energy physics radiation field // IEEE Trans. Nucl. Sci. 2008. Aug. Vol. 55. No. 4. P. 2216–2222.
7. Радиационно-стойкий волоконный световод, способ его изготовления и способ повышения радиационной стойкости волоконного световода (варианты) / А.Л. Томашук, М.Ю. Салганский, П.Ф. Кашайкин, В.Ф. Хопин, А.Б. Пнев, В.Е. Карасик, А.Н. Гурьянов, Е.М. Дианов. Патент РФ № 2537523, дата подачи заявки (приоритета) от 13.09.2013 г., решение о выдаче патента от 07.10.2014, опубликован 10.01.2015 г. Бюлл. № 1.
8. Griscom D.L. Self-trapped holes in pure-silica glass: A history of their discovery and characterization and an example of their critical significance to industry // J. Non-Cryst. Solids. 2006. Vol. 352. P 2601–2617.
9. Griscom D.L., Friebele E.J. Fundamental radiation-induced defect centers in synthetic fused silica: atomic chlorine, delocalized E' centers, and a triple state // Phys. Rev. B. 1986. Vol. 34. No. 11. P. 7524–7533.
10. Nagel S.R., MacChesney J.B., Walker K.L. An overview of the modified chemical vapor deposition (MCVD) process and performance // IEEE J. Quantum Electron. 1982. Vol. 18. No. 4. P. 459–476.

11. *Kirchhof J., Unger S., Grau L., Funke A., Kleinert P.* A new MCVD technique for increased efficiency of dopant incorporation in optical fiber fabrication // *Cryst. Res. Technol.* 1990. Vol. 25. P. 29–34.

12. *Guryanov A.N., Salganskii M.Yu., Khopin V.F., Kosolapov A.F., Semenov S.L.* High-aperture optical waveguides based on fluorine-doped silica glass // *Inorg. Mater.* 2009. Vol. 45. No. 7. P. 823–826.

13. *Himeno K., Matsuo S., Guan N., Wada A.* Low-bending-loss single-mode fibers for fiber-to-the-home // *J. Lightw. Technol.* 2005. Vol. 23. No. 11. P. 3494–3499.

Томашук Александр Леонидович — канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, заместитель директора по международным связям Научного центра волоконной оптики РАН (Российская Федерация, 119333, Москва, ул. Вавилова, д. 38).

Дворецкий Дмитрий Алексеевич — канд. техн. наук, старший научный сотрудник НОЦ «Фотоника и ИК-техника» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5).

Лазарев Владимир Алексеевич — канд. техн. наук, старший научный сотрудник НОЦ «Фотоника и ИК-техника» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5).

Пнев Алексей Борисович — канд. техн. наук, заведующий лабораторией НОЦ «Фотоника и ИК-техника» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5).

Карасик Валерий Ефимович — д-р техн. наук, профессор, директор НОЦ «Фотоника и ИК-техника» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5).

Салганский Михаил Юрьевич — канд. хим. наук, научный сотрудник Института химии высококчистых веществ РАН им. Г.Г. Девярых (Российская Федерация, 603950, Нижний Новгород, ул. Тропинина, д. 49).

Кашайкин Павел Федорович — аспирант Научного центра волоконной оптики РАН (Российская Федерация, 119333, Москва, ул. Вавилова, д. 38).

Хопин Валерий Федорович — канд. хим. наук, научный сотрудник Института химии высококчистых веществ РАН им. Г.Г. Девярых (Российская Федерация, 603950, Нижний Новгород, ул. Тропинина, д. 49).

Гурьянов Алексей Николаевич — д-р хим. наук, профессор Института химии высококчистых веществ РАН им. Г.Г. Девярых (Российская Федерация, 603950, Нижний Новгород, ул. Тропинина, д. 49).

Дианов Евгений Михайлович — академик РАН, научный руководитель Научного центра волоконной оптики РАН (Российская Федерация, 119333, Москва, ул. Вавилова, д. 38).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Томашук А.Л., Дворецкий Д.А., Лазарев В.А., Пнев А.Б., Карасик В.Е., Салганский М.Ю., Кашайкин П.Ф., Хопин В.Ф., Гурьянов А.Н., Дианов Е.М. Отечественные радиационно-стойкие волоконные световоды // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение.* 2016. № 5. С. 111–124. DOI: 10.18698/0236-3933-2016-5-111-124

RADIATION-RESISTANT OPTICAL FIBERS

A.L. Tomashuk¹
 D.A. Dvoretzkiy²
 V.A. Lazarev²
 A.B. Pnev²
 V.E. Karasik²
 M.Yu. Salganskiy³
 P.F. Kashaykin¹
 V.F. Khopin³
 A.N. Guryanov³
 E.M. Dianov¹

tomashuk@fo.gpi.ru
 ddvoretzkiy@gmail.com

¹ Fiber Optics Research Center, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

² Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

³ Institute of Chemistry of High-Purity Substances, Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod, Russian Federation

Abstract

This article summarizes the results of the research of the microscopic mechanisms of radiation-induced attenuation of light (RIA) in radiation-resistant optical fibers with an undoped and F-doped silica core. We created a laboratory technology for radiation-resistant optical fibers with an undoped high-oxygen-excess silica core. Our research discovered that oxygen excess in the core promotes significant suppression of all the RIA mechanisms. Direct experimental comparison of the fibers developed and an industrial radiation-resistant fiber of the “J-fiber” company shows that RIA in the former fibers is a few times lower than in the latter at the wavelengths of 1.31 and 1.55 μm in the course of γ -irradiation from a ⁶⁰Co-source at a dose rate of 7.6 Gy/s up to a dose of at least ~28 kGy

Keywords

Optical fiber, radiation-induced attenuation of light, radiation resistance

REFERENCES

- [1] Chigusa Y., Watanabe M., Kyoto M., Ooe M., Matsubara T. γ -Ray and neutron irradiation characteristics of pure silica core single mode fiber and its life time estimation. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 1988, Feb., vol. 35, no. 1.
- [2] Dolgov I.I., Ivanov G.A., Chamorovskiy Yu.K., Yakovlev M.Ya. Radiation resistant single-mode optical fibers with a silica core. *Fotonexpress*, 2005, no. 6(46), pp. 4–10 (in Russ.).
- [3] Aikawa K., Izoë K., Shamoto N., Kudoh M., Tsumanuma T. Radiation resistant single-mode optical fiber and method of manufacturing thereof. U.S. Patent 7440673, Oct. 21, 2008.
- [4] Matthijsse P., Gooijer F., Flammer I., Regnier E., Kuyt G. Fluorine-doped optical fiber. U.S. Patent 7689093, Mar. 30, 2010.
- [5] Wijnands T., Aikawa K., Kuhnhen J., Ricci D., Weinand U. Radiation tolerant optical fibers: From sample testing to large series production. *J. Lightw. Technol.*, 2011, Nov., vol. 29, no. 22, pp. 3393–3400.

- [6] Wijnands T., De Jonge L.K., Kuhnenn J., Hoeffgen S.K., Weinand U. Optical absorption in commercial single mode optical fibers in a high energy physics radiation field. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 2008, Aug., vol. 55, no. 4, pp. 2216–2222.
- [7] Tomashuk A.L., Salganskiy M.Yu., Kashaykin P.F., Khopin V.F., Pnev A.B., Karasik V.E., Gur'yanov A.N., Dianov E.M. Radiatsionno-stoykiy volokonny svetovod, sposob ego izgotovleniya i sposob povysheniya radiatsionnoy stoykosti volokonnogo svetovoda (varianty) [Radiation resistant optical fiber and method of manufacturing thereof, a method of increasing radiation resistance of an optical fiber (Options)]. Patent RF no. 2537523, 07.10.2014.
- [8] Griscom D.L. Self-trapped holes in pure-silica glass: A history of their discovery and characterization and an example of their critical significance to industry. *J. Non-Cryst. Solids*, 2006, vol. 352, pp. 2601–2617.
- [9] Griscom D.L., Friebele E.J. Fundamental radiation-induced defect centers in synthetic fused silica: atomic chlorine, delocalized E' centers, and a triple state. *Phys. Rev. B*, 1986, vol. 34, no. 11, pp. 7524–7533.
- [10] Nagel S.R., MacChesney J.B., Walker K.L. An Overview of the modified chemical vapor deposition (MCVD) process and performance. *IEEE J. Quantum Electron*, 1982, vol. 18, no. 4, pp. 459–476.
- [11] Kirchhof J., Unger S., Grau L., Funke A., Kleinert P. A new MCVD technique for increased efficiency of dopant incorporation in optical fiber fabrication. *Cryst. Res. Technol.*, 1990, vol. 25, pp. 29–34.
- [12] Guryanov A.N., Salganskii M.Yu., Khopin V.F., Kosolapov A.F., Semenov S.L. High-aperture optical waveguides based on fluorine-doped silica glass. *Inorg. Mater.*, 2009, vol. 45, no. 7, pp. 823–826.
- [13] Himeno K., Matsuo S., Guan N., Wada A. Low-bending-loss single-mode fibers for fiber-to-the-home. *J. Lightw. Technol.*, 2005, vol. 23, no. 11, pp. 3494–3499.

Tomashuk A.L. — Cand. Sci. (Phys.-Math.), senior researcher, Deputy Director for International Relations of Fiber Optic Research Center, Russian Academy of Sciences (ul. Vavilova 38, Moscow, 119333 Russian Federation).

Dvoretzkiy D.A. — Cand. Sci. (Eng.), senior researcher of SEC Photonics and IR-Technics, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation).

Lazarev V.A. — Cand. Sci. (Eng.), senior researcher of SEC Photonics and IR-Technics, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation).

Pnev A.B. — Cand. Sci. (Eng.), Head of the Laboratory of SEC Photonics and IR-Technics, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation).

Karasik V.E. — Dr. Sci. (Eng.), professor, Director of SEC Photonics and IR-Technics, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation).

Salganskiy M.Yu. — Cand. Sci. (Chem.), researcher of Institute of Chemistry of High-Purity Substances, Russian Academy of Sciences (Tropinina ul. 49, Nizhny Novgorod, 603950 Russian Federation).

Kashaykin P.F. — post-graduate student of Fiber Optic Research Center, Russian Academy of Sciences (ul. Vavilova 38, Moscow, 119333 Russian Federation).

Khopin V.F. — Cand. Sci. (Chem.), researcher of Institute of Chemistry of High-Purity Substances, Russian Academy of Sciences (ul. Tropinina 49, Nizhny Novgorod, 603950 Russian Federation).

Guryanov A.N. — Dr. Sci. (Chem.), professor of Institute of Chemistry of High-Purity Substances, Russian Academy of Sciences (ul. Tropinina 49, Nizhny Novgorod, 603950 Russian Federation).

Dianov E.M. — Academician of the Russian Academy of Sciences, Scientific Director of Fiber Optic Research Center, Russian Academy of Sciences (ul. Vavilova 38, Moscow, 119333 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Tomashuk A.L., Dvoretzkiy D.A., Lazarev V.A., Pnev A.B., Karasik V.E., Salgansky M.Yu., Kashaykin P.F., Khopin V.F., Guryanov A.N., Dianov E.M. Radiation-Resistant Optical Fibers. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Priborostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Instrum. Eng.], 2016, no. 5, pp. 111–124.

DOI: 10.18698/0236-3933-2016-5-111-124

Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана

Подписано в печать 30.09.2016

Формат 70 × 108/16

Усл.-печ. л. 11,0

Отпечатано в типографии МГТУ им. Н.Э. Баумана

Тираж 100 экз.