
РАДИАЦИОННО-СТОЙКИЕ GERMANOSILIKATNYE MNOGOMODOVYE VOLOKONNYE SVETOVODY

© 2022 г. Д. Р. Девятьяров¹, *, М. А. Ероньян^{1, 2}, А. Ю. Кулеш¹,
И. К. Мешковский², К. В. Дукельский³

¹АО “Концерн “Центральный научно-исследовательский институт “Электроприбор”,
Малая Посадская, 30, Санкт-Петербург, 197046 Россия

²Санкт-Петербургский Национальный исследовательский университет информационных
технологий, механики и оптики (ИТМО), Кронверкский пр., 49, Санкт-Петербург, 197101 Россия

³АО “НПО “Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова”,
ул. Бабушкина, 36/1, Санкт-Петербург, 192171 Россия

*e-mail: parkur89@yandex.ru

Поступила в редакцию 07.02.22 г.

После доработки 16.03.22 г.

Принята к публикации 05.04.22 г.

Рассмотрено влияние γ -облучения на оптические потери на длине волны 1.31–1.55 мкм многомодовых кварцевых волоконных световодов с сердцевинной, легированной 20 мол. % GeO_2 . Германиевые кислородно-дефицитные центры в материале сердцевины являются основной причиной низкой радиационной стойкости таких оптических волокон. Устранение этих дефектов в процессе MCVD технологии изготовления заготовок снижает наведенное радиацией затухание в германосиликатных световодах до уровня, близкого к световодам с сердцевинной из чистого кварцевого стекла. Увеличение наведенных радиацией оптических потерь в исследованных волокнах в значительной степени обусловлено вкладом релеевского рассеяния.

Ключевые слова: оптические волокна, германосиликатные световоды, γ -облучение, радиационно-наведенное затухание, радиационная стойкость, рассеяние

DOI: 10.31857/S0132665122040060

ВВЕДЕНИЕ

Широко используемые в линиях оптической связи германосиликатные волоконные световоды (ГВС) существенно уступают по радиационной стойкости фторсиликатным волоконным световодам (ФВС) с сердцевинной из чистого кварцевого стекла и оболочкой, легированной фтором [1].

Тем не менее, есть информация [2], что легированные 20 мол. % GeO_2 многомодовые кварцевые световоды являются более радиационно-стойкими, чем ФВС.

Радиационно-наведенное затухание (РНЗ) ФВС обусловлено двумя основными дефектами: примесным хлором [3] и “дырками” на немостиковом атоме кислорода [4]. Хлор входит в стекло при осаждении слоев чистого кварцевого стекла в хлорсодержащей атмосфере. Образованию второго дефекта способствуют окислительные условия получения кварцевого стекла сердцевины [5]. Эти два основных дефекта стеклообразной матрицы из чистого кварцевого стекла создают РНЗ на поглощение в видимом и ультрафиолетовом участках оптического спектра и порождают структурные неоднородности в сетке кварцевого стекла и, как следствие, РНЗ на рассеяние в спектраль-

ной области особой его прозрачности (1.3–1.6 мкм) [6]. Дефицит кислорода в кварцевом стекле сердцевины ФВС исключает образование “дырок” на немостиковом атоме кислорода и способствует существенному снижению РНЗ [7].

Причины, вызывающие понижение радиационно-оптической устойчивости (РОУ) чистого кварцевого стекла при его легировании GeO_2 , действуют противоположным образом. Так, присутствие хлора [8] в сердцевине ГВС повышает их РОУ, в то время как восстановление стекла германосиликатной сердцевины приводит к образованию чувствительных к облучению германиевых кислородно-дефицитных центров (ГКДЦ) [9]. В многомодовых ГВС, изготовленных методом модифицированного химического парофазного осаждения (MCVD), центральная часть (до 25%) стекла сердцевины содержит ГКДЦ [10]. Поэтому РНЗ изготавливаемых MCVD методом одномодовых ГВС с 4.5 мол. % GeO_2 в сердцевине после дозы γ -облучения 1.25 кГр может достигать 450 дБ/км на длине волны 1.55 мкм [11].

Доминирующим механизмом РНЗ в ближней инфракрасной области спектра является рассеяние, а не поглощение излучения [5, 12]. Поэтому РНЗ ГВС зависит также от РОУ материала оболочки и свойств полимерного защитного покрытия [13, 14].

Сопоставление причин РНЗ с сердцевиной из чистого и легированного GeO_2 кварцевого стекла открывает новые технологические подходы для повышения РОУ многомодовых ГВС.

Цель настоящей работы заключалась в анализе механизмов, определяющих РНЗ при $\lambda = 1.3\text{--}1.55$ мкм материалов оболочки и сердцевины с 20 мол. % GeO_2 для многомодовых ГВС, изготовленных MCVD методом, при устранении газофазным травлением центральной зоны заготовки, содержащей ГКДЦ.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

На MCVD комплексе изготовлены две заготовки для многомодовых ГВС № 1 и № 2 со ступенчатым профилем показателя преломления сердцевины.

На внутреннюю поверхность метровой кварцевой трубы с наружным диаметром 25 мм и толщиной стенки 3 мм наносили слои оболочки и сердцевины. Последующим сжатием трубы при температуре 2200–2250°C уменьшали диаметр внутреннего канала до 2–3 мм. В процессе этой операции трубу продували кислородом, содержащим 10^{-6} и 5×10^{-3} мас. % влаги для заготовки 1 и 2 соответственно. Перед окончательным сжатием трубы в штабик-заготовку проводили операцию внутреннего газофазного травления [15] смесью SF_6 и кислорода при температуре 1700–1800°C. В процессе этой операции удаляли до 30% внутреннего слоя сердцевины, содержащего ГКДЦ. Окончательное сжатие трубы в штабик-заготовку осуществляли при температуре 2250°C.

Содержание GeO_2 в сердцевине этих заготовок ≈ 20 мол. %. Оболочка заготовки ГВС № 1 легирована 1.5 мол. % P_2O_5 и дополнительно фтором для компенсации изменения показателя преломления кварцевого стекла, связанного с введением фосфора. В заготовке ГВС № 2 оболочка состояла из чистого кварцевого стекла.

Разность показателей преломления чистого кварцевого стекла сердцевины и оболочки (Δn), измеренная на рефрактометре Р-101 для обеих заготовок была одинаковой, равной 0.03, что соответствует содержанию в кварцевом стекле 20 мол. % GeO_2 . Их геометрические параметры, измеренные на этом же приборе, представлены в табл. 1.

Из заготовок, нагретых в графитовой печи до температуры $\approx 2150^\circ\text{C}$, вытягивали волокна диаметром 60, 125 и 160 мкм с нанесением полимерного УФ-отверждаемого эпоксиакрилатного покрытия. Обозначение ГВС состояло из номера заготовки и величины диаметра волокна, разделенных косой линией.

Таблица 1. Параметры заготовок

№ ГВС	Диаметр заготовки, мм	Диаметр сердцевины, мм	Диаметр оболочки, мм
1	15.2	4	5.6
2	14.9	2.4	4

Спектральную зависимость оптических потерь световодов определяли методом обрыва, сравнения пропускания излучения для короткого и длинного отрезков волокна с использованием анализатора оптического спектра марки Yokogawa AQ6370C. Измерения оптических потерь до 20 дБ/км и более производили на отрезках волокна длиной 200 и 20 м соответственно.

РНЗ измеряли при комнатной температуре. Свернутый в бухту отрезок ГВС облучали источником γ -излучения ^{60}Co на установке К-120000. Мощность облучения величиной 1 Gy/s задавали определенным расстоянием волокна от источника излучения. Для однородности радиационного поля в пределах 10% бухту волокна изгибали по форме поверхности источника γ излучения. Величина зондирующего сигнала на длине волны 1.31 и 1.55 мкм была в пределах 3–5 μW , выше которого возможно фотообесцвечивание радиационных дефектов [2]. В радиационно-безопасную зону измерительного оборудования (FOD-1208 Optical Tester) зондирующее излучение передавали по 20 метровым отрезкам испытуемого волокна. Регистрируемое прибором РНЗ в процессе облучения колебалось в пределах $\pm 5\%$. Результаты этих измерений представлены слаженной линией.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Спектр исходных оптических потерь ГВС 1/125 и ГВС 2/160 содержит полосы поглощения ОН-группами (рис. 1), свидетельствующие об их содержании на уровне 0.5 и 6 ppm соответственно. Поэтому оптические потери для этих световодов на длине волны 1.55 мкм существенно отличались: 0.4 и 2 дБ/км.

ГВС из заготовки № 1 имели высокий уровень РНЗ (рис. 2), что обусловлено влиянием фосфора, содержащегося в оболочке. Ранее также было отмечено, что оболочка световода, легированная фосфором, существенно снижает их РОУ [13]. Близкие значения РНЗ при $\lambda \leq 1$ мкм для волокон разного диаметра (ГВС 1/60 и ГВС 1/125) могут свидетельствовать о том, что излучение не проникает в оболочку, и она не влияет на РОУ ГВС.

После удаления полимерного покрытия с облученного ГВС 1/125 потери РНЗ снизились (рис. 3). Этот факт обусловлен блокировкой выхода рассеянного в сердцевине излучения в окружающую среду из-за большой разницы показателей преломления стекла оболочки и воздуха.

Зависимость разницы РНЗ от $1/\lambda^4$ для ГВС 1/125 до и после удаления покрытия (Δ РНЗ) может свидетельствовать о релеевском рассеянии в ближней инфракрасной спектральной области (рис. 4). Не зависящее от длины волны увеличение оптических потерь (≈ 8 дБ/км) обусловлено, вероятно, неоднородностями стекла с размером более длины волны излучения [17].

На длине волны 1.31 мкм световоды разного диаметра ГВС 2/60 и ГВС 2/160 при облучении ведут себя одинаково (рис. 5). Однако с увеличением длины волны излучения световод меньшего диаметра имеет более высокий уровень РНЗ. Это может быть обусловлено разной толщиной оболочки из кварцевого стекла. Поэтому с уменьшением диаметра волокна увеличивается доля излучения необратимо проникающего в полимерную эпоксиакрилатную оболочку, показатель преломления которой выше, чем у

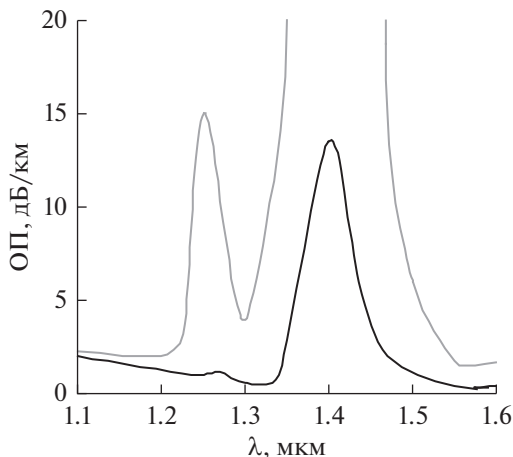


Рис. 1. Спектральная зависимость оптических потерь ГВС 1/125 (черная линия) и ГВС 2/160 (серая линия) до облучения.

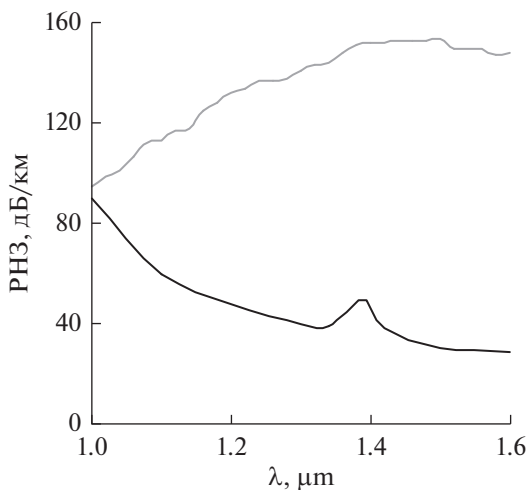


Рис. 2. Спектральная зависимость РНЗ для ГВС 1/60 (серая линия) и для ГВС 1/125 (черная линия). Измерения проводили через сутки после облучения дозой 1 кГр.

кварцевого стекла. Ранее аналогичное явление обнаружено для многомодовых ФВС с разной толщиной оболочки [17].

РНЗ коммерческого одномодового ГВС SMF 28 существенно выше, чем у исследуемых многомодовых световодов с оболочкой из чистого кварцевого стекла (рис. 5), что обусловлено высоким содержанием дефектных ГКДЦ. Проникающее в полимерную оболочку излучение рассеивается в окружающую среду [18], несмотря на то, что у воздуха показатель преломления существенно ниже.

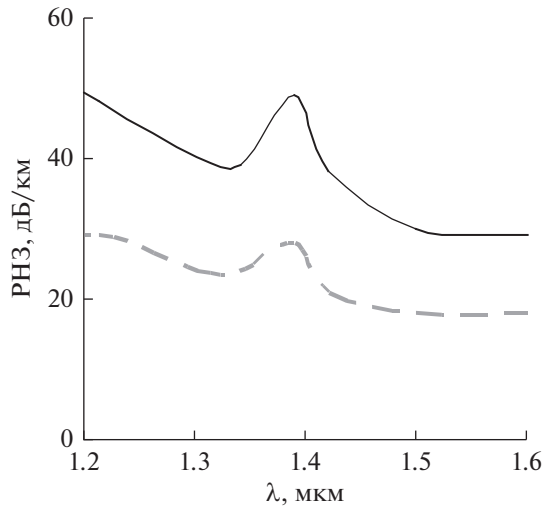


Рис. 3. Спектральная зависимость РНЗ ГВС 1/125 с покрытием (черная линия) и после его удаления (серая линия). Измерения проводили через сутки после облучения дозой 1 кГр.

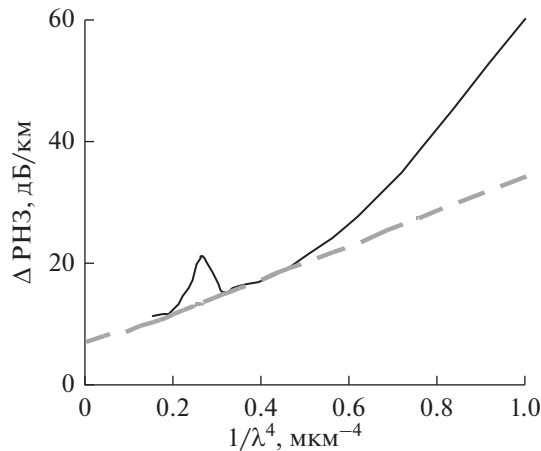


Рис. 4. Сопоставление Δ РНЗ при удалении полимерного покрытия для ГВС 1/125 (сплошная линия) с релейской зависимостью (пунктирная линия).

РНЗ наших многомодовых ГВС с 20 мол. % GeO_2 в сердцевине сопоставимо с РНЗ многомодовых световодов с сердцевиной из чистого кварцевого стекла фирмы Nufern [17] (табл. 2).

Использование в MCVD процессе тонкостенных опорных кварцевых труб приводит к снижению температуры высокотемпературного сжатия заготовки и, как следствие, к снижению концентрации ГКДЦ. Это способствует повышению РОУ ГВС, для которых РНЗ с 10 мас. % GeO_2 в сердцевине при дозе гамма-облучения 1 кГр не превышают 4 дБ/км на длине волны 1.55 мкм [19].

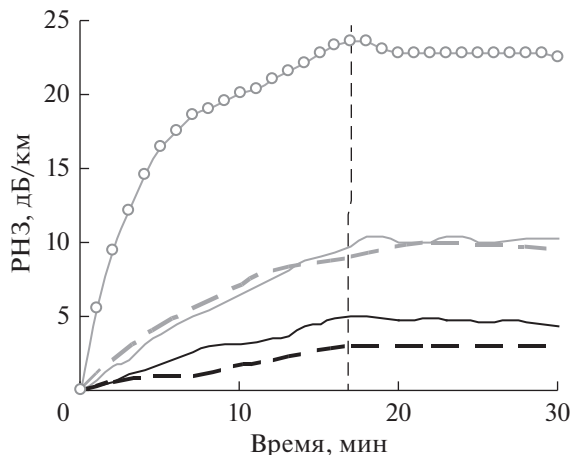


Рис. 5. Зависимость РНЗ на длине волны 1.31 (серые линии) и 1.55 мкм (черные линии) для ГВС 2/60 (сплошные линии), ГВС 2/160 (пунктирные линии) и ГВС SMF 28 (линия с маркерами), измеренная в процессе и после 17 мин облучения.

В процессе гамма облучения эпоксиакрилатная оболочка выделяет водород, который устраняет НВОС, способствуя повышению радиационной стойкости световодов с сердцевинной из чистого кварцевого стекла [20]. Такое явление для ГВС может привести к образованию ГКДЦ и снижению РОУ, так как в отличие от световодов с сердцевинной из чистого кварцевого стекла для ГВС не водород, а кислород способствует радиационной стойкости [21].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, результаты исследований РОУ ГВС выявили основные факторы, влияющие на РНЗ таких оптических волокон. Наличие фосфора в оболочке ГВС существенно снижает их РОУ, а специфика MCVD процесса их изготовления приводит к восстановлению германосиликатного стекла сердцевинны с образованием чувствительных к радиации ГКДЦ. Изменение РНЗ в ближней инфракрасной области оптического спектра связано с ростом релеевского рассеяния и поэтому определяется также материалом полимерного защитного покрытия. Удаление ГКДЦ из сердцевинны высоко легированных GeO_2 многомодовых световодов с оболочкой из кварцевого стекла показало возможность достижения для них РОУ сопоставимой с ФВС с сердцевинной из чистого кварцевого стекла.

Таблица 2. Сравнение РОУ на длине волны 1.31 мкм при дозе облучения 500 Гр исследованного многомодового ГВС с аналогами фирмы Nufem

Обозначение световода	Состав сердцевинны	Лигатура оболочки	РНЗ, дБ/км
ГВС 2/160	$0.8\text{SiO}_2 + 0.2\text{GeO}_2$	—	3
GR62/5/125-24-НТА	SiO_2	F	4.84
GR100/140-24-НТА	—	F	5.35

БЛАГОДАРНОСТИ

Коллектив авторов выражает благодарность академику РАН проф. В.Г. Пешехонову за поддержку настоящей работы и директору НТК “Ядерная физика” В.Н. Ломасову за радиационную обработку световодов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Girard S., Kuhnhen J., Gusarov A., Brichard B., Van Uffelen M., Ouerdane Y., Boukenter A., Marcandella C. Radiation Effects on Silica-Based Optical Fibers: Recent Advances and Future Challenges // IEEE Trans. Nucl. Sci. 2013. V. 60. № 3. P. 2015–2036.
2. Sanada K., Shamoto T., Inada K. Radiation resistance characteristics of graded index fibre with a core of Ge-F-doped or B and F-codoped SiO₂ glass // J. Non-Cryst. Solids. 1995. V. 189. P. 283–290.
3. Nagasawa K., Tanabe M., Yahagi K. Gamma-ray-induced absorption bands in pure-silica-core fibers // Jpn. J. Appl. Phys. 1984. V. 23. P. 1608–1613.
4. Morana A., Cannas M., Girard S., Boukenter A., Vaccaro L., Perisse J., Mace J.-R., Ouerdane Y., Boscaino R. Origin of the visible absorption in radiation-resistant optical fibers // Opt. Mater. Express. 2013. V. 3. P. 1769–1777.
5. Hanafusa H., Hibino Y., Yamamoto F. Drawing condition dependence of radiation-induced loss in optical fibers // Ell. Let. 1986. V. 22. № 2. P. 106–108.
6. Bisyarin M.A., Dukelskiy K.V., Eronyan M.A., Komarov A.V., Lomasov V.N., Meshkovskiy I.K., Reutsky A.A., Shcheglov A.A., Ustinov S.V. Radiation-induced loss of silica optical fibers with fluorine-doped cladding // Mater. Res. Express 1986. V. 22. № 2. P. 106–108.
7. Tomashuk A.L., Dianov E.M., Golant K.M., Khrapko R.R., Spinov D.E. Performance of special radiation-hardened optical fibers intended for use in the telecom spectral windows at a megagray level // IEEE Trans. Nucl. Sci. 1998. V. 45. № 3. P. 1566–1569.
8. Shibata S., Nakahara M. Fluorine and chlorine effects on radiation-induced loss for GeO₂-doped silica optical fibers // J. of Lightw. Technol. 1985. V. LT-3. № 4. P. 860–863.
9. Dong L., Pinkstone J., Russell P.St.J., Payne D.N. Ultraviolet absorption in modified chemical vapor deposition preforms // J. Opt. Soc. Am. B. 1994. V. 11. № 10. P. 2106–2111.
10. Di Francesca D., Boukenter A., Agnello S., Girard S., Alessi A., Paillet P., Marcandella C., Richard N., Gelardi F.M., Ouerdane I.Y. X-ray irradiation effects on fluorine-doped germanosilicate optical fibers // Optical Materials Express. 2014. V. 4. № 8. P. 1683.
11. Ju S., Watekar P.R., Ryu Y.-T., Lee Y., Kang S.G., Kim Y., Linganna K., Kim Y.H., Han W.-T. Fabrication and Gamma-Ray Irradiation Effect on Optical and Mechanical Properties of Germanosilicate Glass Fibers with Inner Cladding of B and F Doped Silica Glasses // Fiber and Integrated Optics. 2019. V. 38. № 4. P. 191–207.
12. Wen J., Peng G.-D., Luo W., Xiao Z., Chen Z., Wang T. Gamma irradiation effect on Rayleigh scattering in low water peak single-mode optical fibers // Optics Express. 2011. V. 19. №. 23. P. 232271–23278.
13. Girard S., Keurincq J., Ouerdane Y., Meunier J.-P., Boukenter A. Gamma-rays and pulsed X-ray radiation responses of germanosilicate single-mode optical fibers: Influence of cladding codopants // J. Lightw. Technol. 2004. V. 22. P. 1915–1922.
14. Gao Y., Feng G., Liu Y., Zhou S., Zhu S. The Loss of Optical Fiber with Pure Quartz Core and Fluorine-Doped Glass Cladding // Optics and Photonics Journal. 2013. V. 3. P. 117–121.
15. Mazzaresse D., Oulundsen G.E., McMahon T.F., Owsiany M.T. Method of collapsing a tube for an optical fiber preform, Patent US 6718800 B2 (08.03.1999).
16. Ainslie B.J., Beales K.J., Day C.R. and Rush J.D. Interplay of design parameters and fabrication condition on the performance of monomode fibers made by MCVD // IEEE J. Quant. Electron. 1981. V. QE-17. № 3. P. 854–857.
17. Alam M., Abramczyk J., Manyam U., Farroni J., Guertin D. Performance of optical fibers in space radiation environment // Proc. 6th Internat. Conf. on Space Optics, June 2006.
18. Bisyarin M.A., Eronyan M.A., Kulesh A.Yu., Meshkovskiy I.K., Reutsky A.A., Shcheglov A.A., Ustinov S.V. Light-emitting optical fibers with controllable anomalous small-angle scattering // Journal of the Optical Society of America B. 2017. V. 34. № 11. P. 2396–2399.
19. Anokin E.V., Guryanov A.N., Gusovsky D.D., Dianov E.M., Mashinsky V.M., Miroshnichenko S.I., Zverev Y.B., UV and gamma radiation damage in silica glass and fibres doped with germanium and cerium // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B 65. 1992. P. 392–396.
20. Deparis O., Griscom D.L., Megret P., Decreton M., Blondel A. Influence of the cladding thickness on the evolution of the NBOHC band in optical fibers exposed to gamma radiations // J. Non-Cryst. Solids. 1997. V. 216. P. 124–128.
21. Di Francesca D., Agnello S., Girard S., Alessi A., Marcandella C., Paillet P., Boukenter A., Gelardi F.M., Ouerdane Y. O₂-loading treatment of Ge-doped silica fibers: a radiation hardening process // J. Lightw. Techn. 2016. V. 34. P. 2311–2316.