

09.5

Радиационно-стойкие градиентные многомодовые волоконные световоды на основе фторсиликатного стекла

© Е.А. Поспелова^{1,2}, П.Ф. Кашайкин^{1,2}, И.А. Мальцев², О.Л. Вохмянина², Ю.О. Шаронова²,
И.С. Азанова², А.Л. Томашук^{1,2}

¹ Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Научный центр волоконной оптики им. Е.М. Дианова РАН, Москва, Россия

² Пермская научно-производственная приборостроительная компания, Пермь, Россия

E-mail: pospelovaea@prprk.ru

Поступило в Редакцию 7 февраля 2023 г.

В окончательной редакции 10 марта 2023 г.

Принято к публикации 10 марта 2023 г.

При использовании технологии MCVD разработаны радиационно-стойкие многомодовые волоконные световоды (МВС) на основе фторсиликатного стекла с градиентным профилем показателя преломления. Проведено сравнение радиационно-наведенных потерь света (РНП) в разработанных МВС с литературными данными для мировых аналогов, изготовленных методом PCVD. Установлено, что у МВС, полученного методом MCVD, РНП на длине волны $\lambda = 1310$ nm при дозах γ -облучения до 10 kGy на 1–2 dB/km (на 19–29%) меньше, чем у МВС Super RadHard, изготовленного методом PCVD и имевшего, как считалось ранее, рекордную радиационную стойкость.

Ключевые слова: радиационно-наведенные потери света, многомодовый градиентный волоконный световод, радиационная стойкость.

DOI: 10.21883/PJTF.2023.09.55325.19523

Многомодовые волоконные световоды (МВС) с градиентным профилем показателя преломления являются актуальным типом волоконных световодов для локальных систем оптической связи [1], систем связи с модовым уплотнением [2] и волоконно-оптических датчиков [3]. Во многих применениях МВС находится или может оказаться в поле ионизирующего излучения (в космическом пространстве, ядерных установках, военной технике), под действием которого в сетке кварцевого стекла возникают радиационные центры окраски (РЦО), поглощающие световой сигнал и создающие тем самым радиационно-наведенные потери (РНП) [4]. Стандартные МВС с сердцевиной, легированной германием, демонстрируют высокие РНП из-за образования большого количества РЦО, связанных с атомами германия [5]. Поэтому встала задача разработки технологии радиационно-стойких МВС.

В фирме „j-fiber“ (Германия) удалось разработать радиационно-стойкие германосиликатные МВС OptiGrade 50/125 R.H. [6]. Можно предположить, что для снижения РНП при синтезе германосиликатной преформы создавался сильный избыток кислорода в парогазовой смеси, что может приводить к некоторому подавлению предшественников германиевых РЦО [7]. Однако РНП в таких радиационно-стойких МВС, по-видимому, лишь незначительно снижены по сравнению с РНП в стандартных германосиликатных МВС.

Для радикального повышения радиационной стойкости МВС необходимо было исключить германий из химического состава. Наиболее подходящим решением представлялось использование фторсиликатного стек-

ла [8–10], при этом желательно ввести в кварцевое стекло значительную концентрацию фтора (в оболочке фторсиликатного МВС для обеспечения числовой апертуры $NA = 0.2$ и разницы показателей преломления сердцевины и оболочки $\Delta n = 0.015$ необходимо иметь как минимум 4.1 wt.% фтора [11]). Это оказалось возможным только в методе плазмохимического осаждения кварцевого стекла из парогазовой фазы внутри опорной трубки (plasma chemical vapor deposition, PCVD) [12], который и используется для изготовления радиационно-стойких фторсиликатных МВС Super RadHard в фирме „Draka“ (США) [9] и МВС Radiation Resistant Multi-mode Fibre (RRF) в фирме „YOFC“ (Китай) [10]. Считается, что Super RadHard демонстрирует рекордно низкие РНП на актуальных для применения МВС длинах волн $\lambda = 850$ и 1300 nm [9,13].

В России технология PCVD не развита в промышленном масштабе, а для получения преформ в лабораторных и производственных условиях используется „неплазменный“ метод модифицированного химического осаждения стекла из парогазовой фазы внутри опорной трубки при ее нагреве (modified chemical vapor deposition, MCVD) [8,14]. При использовании как MCVD-, так и PCVD-процессов внутри опорной трубки проводится послойное осаждение фторсиликатного стекла оболочки и сердцевины преформы МВС из парогазовой смеси кислорода, тетрахлорида и тетрафторида кремния. Создание градиентного профиля показателя преломления (так называемого α -профиля [1]) обеспечивается плавным изменением состава парогазовой смеси от слоя к слою (от максимального содержания

тетрафторида кремния на краю сердцевины до минимального его содержания в середине сердцевины). Из-за большей толщины осажденных слоев стекла отклонение реального профиля показателя преломления от модельного α -профиля в преформах, полученных с помощью MCVD-процесса, как правило, более значительно, чем в PCVD-преформах. Несмотря на это, в ПАО „ПНППК“ разработаны МВС GIMMSC(50/125) [15] из фторсиликатного стекла с использованием метода MCVD для получения преформ с хорошим соответствием получаемого профиля показателя преломления расчетному α -профилю (рис. 1). GIMMSC(50/125) имеют оптические параметры, соответствующие стандарту OM2 [16].

Из-за ограничения на предельную концентрацию фтора в кварцевом стекле преформы в MCVD-процессе числовая апертура GIMMSC(50/125) оказалась на уровне $NA \sim 0.16$ при ширине полосы пропускания не менее $600 \text{ MHz} \cdot \text{km}$, а у мировых аналогов МВС Super RadHard, RRF и OptiGrade 50/125 R.H., получаемых по технологии PCVD, $NA = 0.2$ [6,9,10]. Световая мощность, вводимая в МВС, пропорциональна NA^2 , т.е. примерно в 1.56 раза меньше (на $\sim 1.9 \text{ dB}$) для GIMMSC(50/125), чем для МВС, изготавливаемых по технологии PCVD.

Однако для МВС в радиационном поле важна не только введенная световая мощность, но и скорость ее уменьшения по мере распространения сигнала по МВС из-за эффекта РНП. Поэтому целью настоящей работы стала оценка радиационной стойкости разработанных МВС GIMMSC(50/125), а также ее сравнение с данными для мировых аналогов.

Гамма-облучение МВС проводилось на источнике ^{60}Co при мощности дозы 1.2 Gy/s до дозы 10 kGy . В процессе облучения регистрировался спектр пропускания МВС в ближнем ИК-диапазоне (от 950 до 1750 nm), а по значению пропускания рассчитывались РНП.

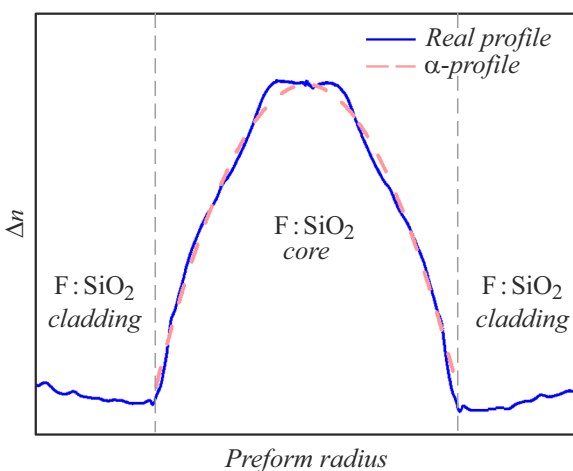


Рис. 1. Профиль показателя преломления преформы GIMMSC(50/125) (сплошная линия) и модельный α -профиль [1], заложенный в программу послойного осаждения стекла в MCVD-процессе (штриховая линия)

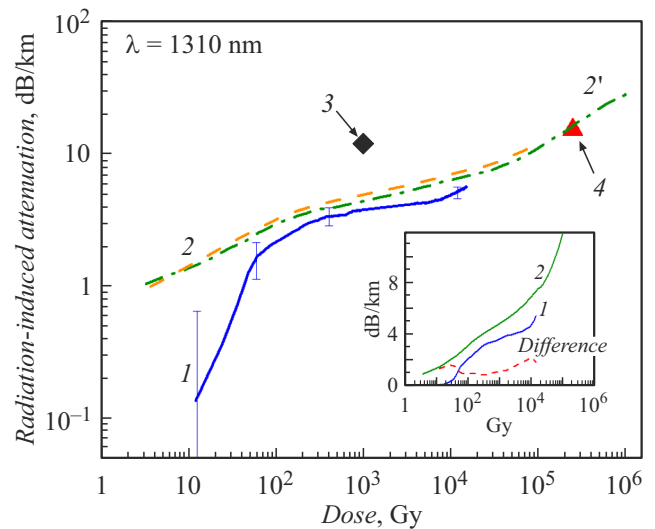


Рис. 2. Зависимость РНП в МВС от дозы облучения на длине волны $\lambda = 1310 \text{ nm}$ при комнатной температуре. 1 — GIMMSC(50/125) при мощности дозы γ -излучения 1.2 Gy/s и введенной световой мощности $0.5 \mu\text{W}$; 2 и 2' — Super RadHard фирмы „Draka“ при введенной световой мощности $7 \mu\text{W}$ и мощности дозы γ -излучения 1 и 0.5 Gy/s соответственно [13]; 3 — OptiGrade 50/125 R.H. фирмы „j-fiber“ при введенной световой мощности $1 \mu\text{W}$ [6]; 4 — RRF фирмы „YOFC“ при мощности дозы 1 Gy/s [10]. На вставке — GIMMSC(50/125) (1.2 Gy/s) (1) и РНП Super RadHard (1 Gy/s) (2) и их разность (штриховая линия).

На рис. 2 приведена зависимость РНП от дозы облучения на длине волны $\lambda = 1310 \text{ nm}$ одного из МВС GIMMSC(50/125), оказавшаяся примерно посередине разброса по партии из 14 номинально одинаковых МВС (граничные значения разброса показаны вилками ошибки). Также на рис. 2 показаны РНП в МВС фирм „Draka“, „j-fiber“ и „YOFC“. Для МВС двух последних фирм из литературы (работы [6] и [10]) известны значения РНП только при двух фиксированных дозах 1 и 250 kGy соответственно, а для Super RadHard фирмы „Draka“ известна дозовая зависимость РНП [13].

В МВС из фторсиликатного стекла РНП в ближнем ИК-диапазоне, на длине волны λ вблизи 850 , 1300 и 1550 nm , определяются поглощением радиационно-индуцированными автолокализованными дырочными состояниями (АДС) в сетке кварцевого стекла [17]. Отличительная особенность АДС в том, что их концентрация экстремально сильно возрастает с увеличением мощности дозы [18] и интенсивности зондирующего света [17].

Видно, что дозовые зависимости РНП Super RadHard и GIMMSC(50/125) очень схожи по форме, при этом РНП GIMMSC(50/125) на $1\text{--}2 \text{ dB/km}$ меньше при меньшей на порядок интенсивности зондирующего света в нашем эксперименте по сравнению с условиями для Super RadHard (0.5 и $7 \mu\text{W}$ соответственно) и при несколько большей мощности дозы в нашем случае

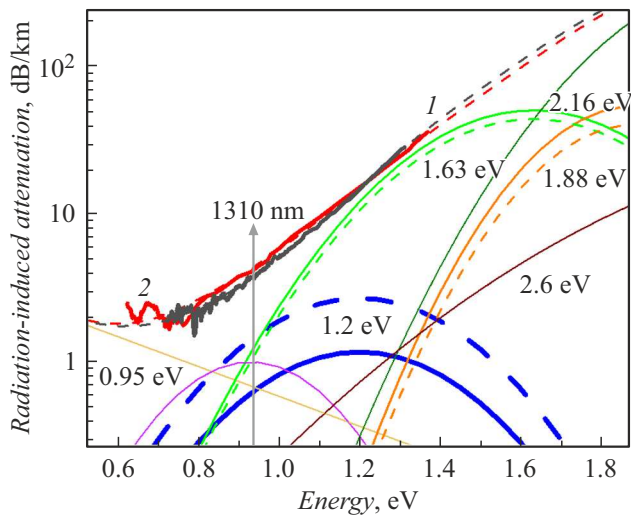


Рис. 3. Спектры РНП при дозе 1 кГу при комнатной температуре и их разложения на составляющие для радиационно-стойких МВС. 1 — GIMMSC(50/125) производства ПАО „ЛНППК“ при мощности дозы 1.2 Gy/s (гауссовы компоненты для GIMMSC(50/125) показаны под кривыми 1 и 2 сплошными линиями); 2 — Super RadHard фирмы „Draka“ при мощности дозы 0.5 Gy/s [13] (гауссовы компоненты для Super RadHard показаны под кривыми 1 и 2 штриховыми линиями). Сплошными линиями 1 и 2 представлена экспериментальная кривая, штриховыми — кривая суммы разложения гауссовых компонент.

(1.2 и 1 Gy/s соответственно) [13]. Следовательно, при измерении в идентичных условиях разница РНП у этих МВС будет еще больше. Но даже из сравнения РНП при разных условиях измерения (рис. 2) следует, что при длине МВС больше 2 км световая мощность в GIMMSC(50/125) будет больше, чем в случае Super RadHard, из-за меньших РНП, несмотря на то что введенная световая мощность на ~ 1.9 dB меньше из-за меньшей числовой апертуры (вставка на рис. 2). В относительных единицах в диапазоне доз 10^2 – 10^4 Gy РНП в Super RadHard на 19–29% больше, чем в GIMMSC(50/125).

Отметим, что РНП RRF фирмы „YOFC“ при дозе 250 кГу хорошо совпадают с РНП для Super RadHard, а РНП у германосиликатного МВС OptiGrade 50/125 R.H. в ~ 3 раза больше (рис. 2), как и следовало ожидать.

Для прояснения физической природы больших РНП у Super RadHard, чем у GIMMSC(50/125), мы сравнили спектры РНП этих МВС в диапазоне длин волн 950–1700 nm (рис. 3). Разложение спектров РНП на гауссовы компоненты, для которого использовались известные из литературы полосы поглощения АДС [4,18], указывает на полосу АДС с центром на 1.2 eV ($\sim 1 \mu\text{m}$) [18] как на источник больших РНП на длине волны $\lambda = 1310$ nm в Super RadHard, чем в GIMMSC(50/125) (рис. 3).

Таким образом, фторсиликатные МВС GIMMSC(50/125), разработанные в ПАО „ЛНППК“, имеют более высокую радиационную стойкость, чем аналогичные МВС фирм „Draka“ и „YOFC“: РНП в GIMMSC(50/125) на длине волны $\lambda = 1310$ nm на 1–2 dB/km меньше, что позволяет компенсировать недостаток введенной световой мощности из-за меньшей апертуры. В относительных единицах в диапазоне доз 10^2 – 10^4 Gy РНП в Super RadHard на 19–29% больше, чем в случае GIMMSC(50/125).

Возникает вопрос о том, является ли превосходство в радиационной стойкости у GIMMSC(50/125) свойством фторсиликатных МВС, изготовленных при помощи MCVD-метода, как таковых (меньшая концентрация фтора, большая температура опорной трубы при осаждении стекла, чем в случае PCVD) или результатом оптимизации технологических процессов, проведенной в ПАО „ЛНППК“.

Когда работа уже готовилась к публикации, появился интересный результат по достижению высокой радиационной стойкости германосиликатных МВС с высоким содержанием оксида германия (20 mol.% GeO_2) [19], возможно открывающий новые перспективы для развития технологии радиационно-стойких МВС.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] D.R.S. Montero, C.V. García, in *Current developments in optical fiber technology*, ed. by S.W. Harun, H. Arof (IntechOpen, 2013), ch. 4. DOI: 10.5772/54245
- [2] K. Lenglé, X. Insou, P. Jian, N. Barré, B. Denolle, L. Bramerie, G. Labroille, *Opt. Express*, **24** (25), 28594 (2016). DOI: 10.1364/OE.24.028594
- [3] S. Fang, B. Li, D. Song, J. Zhang, W. Sun, L. Yuan, *Opt. Photon. J.*, **3** (2B), 265 (2013). DOI: 10.4236/opj.2013.32B062
- [4] S. Girard, A. Alessi, N. Richard, L. Martin-Samos, V. De Michele, L. Giacomazzi, S. Agnello, D. Di Francesca, A. Morana, B. Winkler, I. Reghioua, P. Paillet, M. Cannas, T. Robin, A. Boukenter, Y. Ouerdane, *Rev. Phys.*, **4**, 100032 (2019). DOI: 10.1016/j.revip.2019.100032
- [5] V.B. Neustruev, *J. Phys.: Condens. Matter.*, **6** (35), 6901 (1994). DOI: 10.1088/0953-8984/6/35/003
- [6] OptiGrade 50/125 R.H. Radiation Hard Fiber [Электронный ресурс]. [https://publications.leoni.com/fileadmin/j-fiber/publications/data_sheets/jf_optigrade_rad-hard_50-125.pdf?1581763103_\(дата_обращения_24.01.2023\)](https://publications.leoni.com/fileadmin/j-fiber/publications/data_sheets/jf_optigrade_rad-hard_50-125.pdf?1581763103_(дата_обращения_24.01.2023)).
- [7] D. Di Francesca, S. Agnello, S. Girard, A. Alessi, C. Marcandella, P. Paillet, A. Boukenter, F.M. Gelardi, Y. Ouerdane, *J. Lightwave Technol.*, **34** (9), 2311 (2016). DOI: 10.1109/JLT.2016.2533670
- [8] M.A. Bisyarin, K.V. Dukelskiy, M.A. Eronyan, A.V. Komarov, V.N. Lomasov, I.K. Meshkovskiy, A.A. Reutsky, A.A. Shcheglov, S.V. Ustinov, *Mater. Res. Express*, **6** (2), 026202 (2019). DOI: 10.1088/2053-1591/aaec3f

- [9] Data sheet PG style_Super RadHard 50/125 μm GI-Multimode fiber [Электронный ресурс].
http://staticres.prysmiangroup.com/ds/en/business_markets/markets/fibre/downloads/datasheets/Data-sheet-PG-style_Super-RadHard-50um-GI-MMF_2012-05.pdf
(дата обращения 24.01.2023).
- [10] Radiation Resistant Multi-mode Fibre (RRF), p. 48 [Электронный ресурс].
<https://en.yofc.com/upload/20200509/1e7s2clpsc2njp4b.pdf>
(дата обращения 24.01.2023).
- [11] K. Aikawa, K. Izoe, N. Shamoto, M. Kudoh, T. Tsumanuma, U.S. Patent 7440673 (2008).
- [12] A.H.E. Breuls, M.J.N. Van Stralen, A.H. Van Bergen, U.S. Patent 6260510 B1 (2001).
<https://patentimages.storage.googleapis.com/27/5a/db/f022edcdf53a9e/US6260510.pdf>
- [13] J. Blanc, F. Achten, A. Alessi, A. Amezcua, J. Kuhnhenh, A. Pastouret, D. Ricci, I. Toccafondo, IEEE Trans. Nucl. Sci, **68** (7), 1407 (2021). DOI: 10.1109/TNS.2021.3074633
- [14] K. Schuster, S. Unger, C. Aichele, F. Lindner, S. Grimm, D. Litzkendorf, J. Kobelke, J. Bierlich, K. Wondraczek, H. Bartelt, Adv. Opt. Technol., **3** (4), 447 (2014). DOI: 10.1515/aot-2014-0010
- [15] GIMMSC. Волокно оптическое многомодовое радиационно-стойкое с градиентным профилем показателя преломления [Электронный ресурс].
<https://pnprk.ru/production#collectionov> (дата обращения 24.01.2023).
- [16] Стандарт ISO/IEC 11801.
- [17] D.L. Griscom, J. Non-Crist. Solids, **352** (23-25), 2601 (2006). DOI: 10.1016/j.jnoncrysol.2006.03.033
- [18] A.L. Tomashuk, A.V. Filippov, P.F. Kashaykin, M.Yu. Salgansky, S.A. Vasiliev, O.V. Zverev, A.N. Guryanov, S.L. Semjonov, J. Non-Cryst. Solids, **566**, 120880 (2021). DOI: 10.1016/j.jnoncrysol.2021.120880
- [19] Д.Р. Деветьяров, М.А. Ероньян, А.Ю. Кулеш, И.К. Мешковский, К.В. Дукельский, Физика и химия стекла, **48** (4), 451 (2022). DOI: 10.1134/S108765962204006X [D.R. Devetyarov, M.A. Eronyan, A.Yu. Kulesh, I.K. Meshkovskii, K.V. Dukelskii, Glass Phys. Chem., **48**, 303 (2022). DOI: 10.31857/S0132665122040060].