

ЭФФЕКТ РАДИАЦИОННОГО УПРОЧНЕНИЯ ВОЛОКОННЫХ СВЕТОВОДОВ С СЕРДЦЕВИНОЙ ИЗ НЕЛЕГИРОВАННОГО SiO_2 И ПОЛУЧЕНИЕ СВЕТОВОДОВ С РЕКОРДНО ВЫСОКОЙ СТОЙКОСТЬЮ К ВОЗДЕЙСТВИЮ ИМПУЛЬСНОГО ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ

А. В. Филиппов^{1*}, А. Л. Томашук², А. Н. Моисеенко¹, О. М. Таценко¹, Е. А. Бычкова¹, С. В. Галанова¹, В. Д. Селемир¹, Н. В. Завьялов¹, А. В. Грунин¹, М. Ю. Салганский², П. Ф. Кашайкин², А. Н. Гурьянов², Е. М. Дианов²

¹ Научно-технический центр физики Российского федерального ядерного центра – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики (НТЦФ «РФЯЦ-ВНИИЭФ») г. Саров Нижегородской обл.

² Научный центр волоконной оптики Российской академии наук (НЦВО РАН)

Введение

Целью нашей работы было экспериментальное исследование радиационно наведенного поглощения (РНП) в оптических волокнах с сердцевиной из нелегированного кварца и оболочки содержащей фтор, а так же ряда германосиликатных волокон на длине волны зондирующего излучения 1550 нм.

Ранее было проведено довольно большое количество исследований радиационно наведенного поглощения в оптических волокнах под непрерывным гамма-облучением [1-2]. Однако исследований РНП при импульсном воздействии гамма-излучения имеется совсем немного [3-4], особенно в диапазоне мощностей доз 10^6 – 10^9 Гр/с.

Особенностью наиболее часто используемых волокон является то, что те из них, которые проявляют наилучшую радиационную стойкость к непрерывному облучению, являются самыми нестойкими к импульсному воздействию и наоборот.

По данным ряда работ было установлено, что наименьшее РНП после импульса ионизирующего излучения демонстрируют световоды с сердцевиной из кварцевого стекла, легированного азотом, и оболочкой из нелегированного кварцевого стекла. Примерно такой же уровень РНП после импульса демонстрируют и световоды с фосфором, однако при непрерывном воздействии и при больших временах после импульса ($> 0,1$ с) РНП в них является наибольшим из всех типов световодов (рис. 1) [1]. Наихудшим типом световодов для импульсного воздействия оказались световоды с сердцевиной из нелегированного кварцевого стекла, которые, как хорошо известно, демонстрируют наименьшее

РНП при непрерывном воздействии. Таким образом, наблюдалось интересное противоречие (антикорреляция): чем хуже световод для непрерывного воздействия (световод с фосфором), тем он лучше для импульсного воздействия.

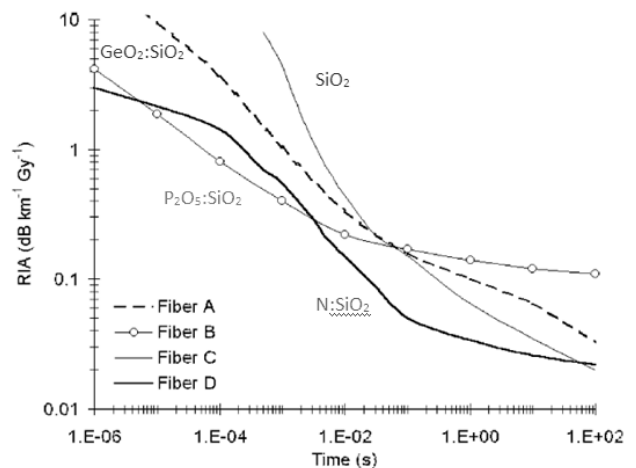


Рис. 1. Значения РНП для нескольких видов волокон

Механизмы возникновения радиационно наведенных потерь

Вкратце рассмотрим физические причины такого поведения волокон из чистого кварца. Существуют несколько механизмов возникновения РНП в волокнах с сердцевиной из нелегированного кремния.

1. Возникновение самолокализованных электронов, т. е. электронов, которые были выбиты

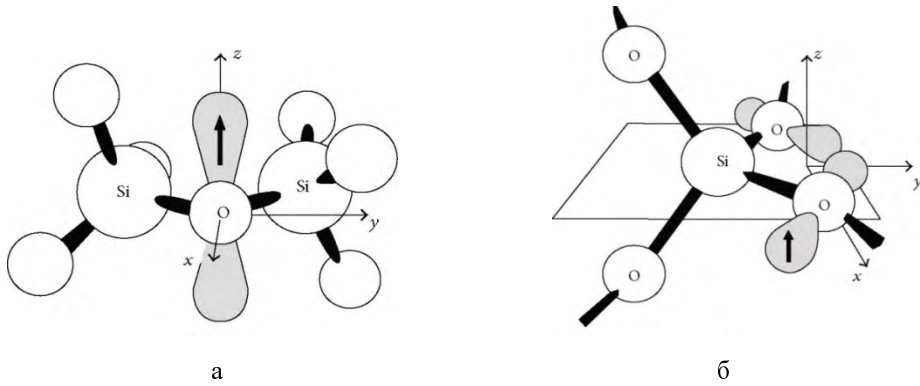


Рис. 2. Структура сетки кварцевого стекла с дыркой на p -орбитали атома кислорода: а) STN_1 , б) STN_2 . Стрелкой показан остающийся электрон на p -орбитали

высокоэнергетичными гамма квантами из валентной зоны и «осевших» вблизи дна зоны проводимости. Как следствие образование двух РЦО:

1) атома кремния, связанного с тремя, а не четырьмя, атомами кислорода (трехкоординированного кремния, известного также как E' -центр [5]),

2) атома кислорода, соединенного лишь с одним атомом кремния («немостиковым кислородом» [6]). Возникает поглощение в видимом и ультрафиолетовом (УФ) спектральных диапазонах.

2. Рассеяние гамма кванта на одном из электронов, образующих связь $Si-O$, и образование Cl -центра окраски [5]. Максимум поглощения этого РЦО также приходится на УФ диапазон, однако полоса поглощения очень широкая, покрывает и ближний-ИК диапазон.

3. Наконец, высокоэнергетичный гамма квант может рассеяться и на электроне, не участвующем в химической связи. Это приводит к образованию автолокализованных дырочных состояний STN . В предыдущих работах установлено [7], что STN бывают двух типов. В STN_1 положительный заряд («дырка») локализован на одном атоме кислорода, в STN_2 – одновременно на двух соседних атомах одного тетраэдра SiO_4 (рис. 2). STN_1 и STN_2 имеют полосы поглощения с центрами на 660 и 760 нм соответственно, при этом эти полосы очень широкие и покрывают актуальный для применений в оптической связи и датчиках ближний-ИК диапазон ($\sim 1,3-1,6$ мкм).

Именно возникновение дефектов, связанных с STN и стало основным объектом данного исследования.

Популяция STN очень сильно зависит от мощности дозы [8], так что, например, при космических применениях ($\sim 10^{-6}$ Гр/с) они вовсе не проявляются.

При мощности дозы 1–10 Гр/с, характерной для многих применений в атомной энергетике и характерной для γ -источника ^{60}Co , ее влияние куда заметней при низких температурах, однако тут световоды с сердцевиной из чистого кварца демонстрируют наилучшую стойкость.

Когда же мы переходим в диапазон мощностей $\sim 10^6-10^9$ Гр/с, мы получаем очень большую популяцию STN и, как следствие, световоды из нелигированного кварца демонстрируют наибольшие РНП.

Совсем недавно было открыто [9], что кроме деформационных STN (рис. 2) в световодах проявляются и «собственные» STN . Они могут возникнуть на недеформированных или слабо деформированных тетраэдрах SiO_4 . Положительный заряд дырки у собственных STN компенсируется в значительно меньшей степени, чем у деформационных STN . По этой причине собственные STN очень нестабильны и проявляются только при пониженной температуре при непрерывном облучении или на очень коротких временах при импульсном облучении.

Во-первых, возникает вопрос, возможно ли устранить STN , которые определяют РНП после импульсного воздействия? Если «да», то какой уровень РНП может быть достигнут на временах, наиболее актуальных для практических применений световодов – $10^{-3}-10^{-2}$ с.

Во-вторых, представляло интерес сравнение этого уровня с рекордным РНП, достигнутым в сплошных и полых световодах в зарубежных работах.

Постановка экспериментов

Исследования проводились на линейном индукционном ускорителе электронов ЛИУ-30.

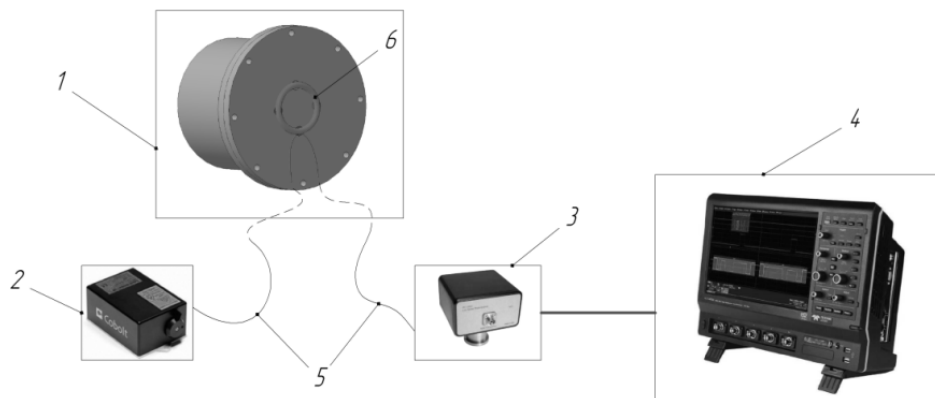


Рис. 3. Схема измерения: 1 – выходной фланец ускорителя ЛИУ-30, 2 – лазер, 3 – фотоприемник, 4 – осциллограф, 5 – подводящие оптические волокна, 6 – образец

Таблица 1

Исследованные образцы

Световод	Химический состав		$\Delta n (10^{-3})$	Примечания
	сердцевины	оболочки		
1224	SiO ₂	F:SiO ₂	9,5	Оптимизированный малонапряженный световод
1218			7,5	Небольшая добавка фтора в сердцевине (0,41 вес.%), световод напряженный
1308			5	Световод сильно напряженный
1220			9,5	Напряжения снижены за счет присутствия хлора в сердцевине (230 вес. ppm)
M1				
SMF-28 (Ge1)	GeO ₂ :SiO ₂	SiO ₂		Стандартный световод для оптической связи
J-fiber (Ge2)				Радиационно-стойкий немецкий световод, одобренный для применений в армии США
ПАНДА (Ge3)				Стандартная германосиликатная ПАНДА производства ПНППК

Спектр тормозного излучения линейного ускорителя ЛИУ-30 непрерывный, с распределением энергии в диапазоне от 0,1 до 30 МэВ и средней энергией по гамма-квантам 5 МэВ, длительность импульса ~20 нс [10].

Исследуемые образцы оптического волокна длиной порядка 100 м, сформированные в виде катушек с диаметром ~40–120 мм помещались в поле тормозного излучения ускорителя (рис. 3).

Диаметр катушек выбирался исходя из требований по минимально допустимому радиусу изгиба для данного типа волокна (3–10 мм) и диаметра пятна облучения в пучке гамма квантов. Измерение дозы облучения осуществлялось по методу

дозиметрии ИКС с помощью алюмофосфатных стекол ИС-7. Мощность дозы в ходе исследований варьировалась в диапазоне $(0,5-5) \cdot 10^9$ Гр/с. Начальные исследования проводились при комнатной температуре.

Изменение пропускания световодов под действием ионизирующего излучения регистрировалось по изменению мощности проходящего через исследуемые образцы лазерного излучения с длиной волны 1550 нм. Следует учесть, что время распространения зондирующего лазерного излучения по образцу составляет величину порядка 500 нс ($5 \cdot 10^{-7}$ с), что значительно больше длительности импульса тормозного излучения ускорителя ЛИУ-30.

Результаты экспериментов

Эффект радиационного упрочнения

На рис. 4 даны кривые эволюции РНП, нормированного на дозу в импульсе, в световоде 1224 после трех последовательных импульсов с дозами 0,37, 7,07 и 24 Гр. Мы видим, что РНП при малых временах, менее 10^{-6} с, занижено из-за радиационно-индуцированной люминесценции.

Видно, что нормированное на дозу РНП при больших временах ($>10^{-6}$ с), на которых паразитный эффект эмиссии перестает сказываться, снижается с каждым выстрелом, и поэтому рассмотрение нормированного на дозу РНП не совсем в этом случае адекватно. Напомним, что такое нормирование на дозу смело делалось в западных работах [8], так как, с одной стороны, про легированные световоды, которые в основном ранее и изучались, было известно, что зависимость РНП от дозы близка к линейной, а с другой стороны, РНП в нелегированных световодах так подробно не изучалось, так как они считались неперспективными для применений при импульсном воздействии из-за большого РНП в них.

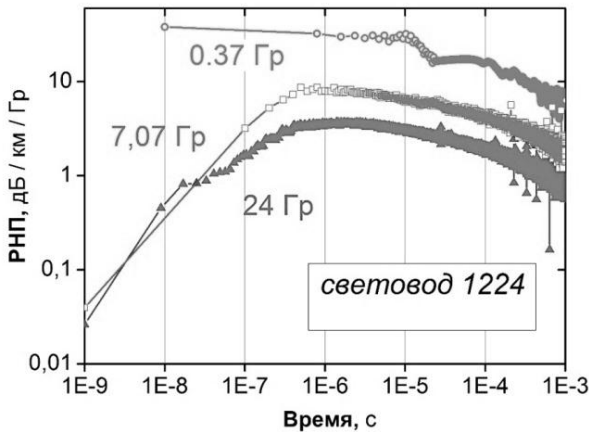


Рис. 4. Эволюция во времени РНП, нормированного на дозу в импульсе в световоде 1224

Снижение нормированного на дозу РНП с каждым импульсом на рис. 4 физически означает, что при облучении необратимо гибнут предшественники собственных СТН, т. е. происходит процесс радиационного упрочнения световода путем предоблучения.

На сводном рис. 5 показана зависимость РНП от дозы в двух важнейших временных срезах – 10^{-2} и 10^{-3} с – для лучших нелегированных световодов 1224, 1220, световода М1 и схематично –

для германосиликатной ПАНДЫ (в предположении ее строго линейной зависимости от дозы, хотя в реальности она зависит от дозы незначительно сублинейно, но это не оказывает заметного влияния на результат (см. ниже).

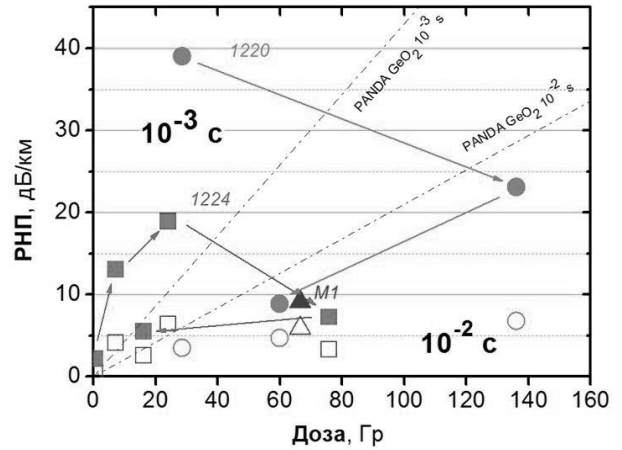


Рис. 5. Зависимость РНП от дозы в импульсе для двух временных срезов после импульса – 10^{-2} и 10^{-3} с.

Расположенные выше (рис. 5) заполненные символы соответствуют РНП в момент времени 10^{-3} с, строго под ними – незаполненные символы, соответствующие РНП после того же импульса облучения в момент времени 10^{-2} с. Представленные на рис. 5 данные по трем первым выстрелам для световода 1224 соответствуют выстрелам, временные эволюции РНП при которых рассматривались на предыдущем рис. 4. Видно, что следующий выстрел дозой 75 Гр привел к еще более полному подавлению «духов» и РНП заметно уменьшилось. Последний «контрольный выстрел» дозой 16 Гр подтвердил, что действительно произошел эффект радиационного упрочнения, особенно сильный для РНП в момент времени 10^{-3} с.

Предоблучение приводит к некоторому возрастанию стабильного во времени РНП. Однако при дозе предоблучения всего ~ 100 Гр такое РНП на рабочей длине волны 1,55 мкм возрастет лишь незначительно, на величину $\sim 0,15$ дБ/км, что многократно меньше, чем РНП через 10^{-3} – 10^{-2} с после импульса. Таким образом, метод малодозного предоблучения для повышения стойкости световода к импульсному воздействию применим в реальной практике.

На рис. 6, на основании данных работы [9], мы качественно показали вклады собственных и деформационных СТН в РНП после импульсного воздействия.

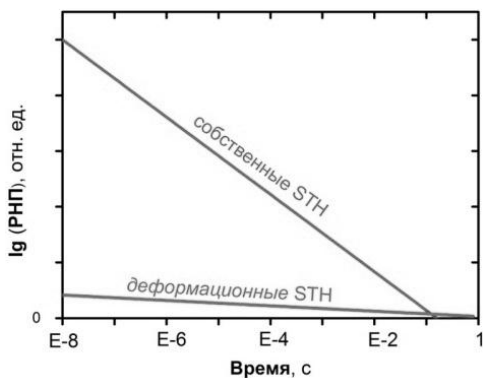


Рис. 6. Качественное (приблизительное) представление вкладов собственных и деформационных STH в РНП в зависимости от времени после импульсного воздействия

Сравнение РНП радиационно-упрочненного световода с сердцевиной из нелегированного SiO₂ и сплошных световодов с сердцевиной, легированной германием, фосфором, или азотом

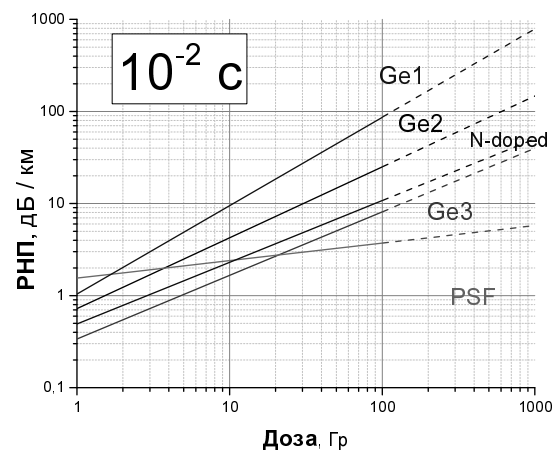
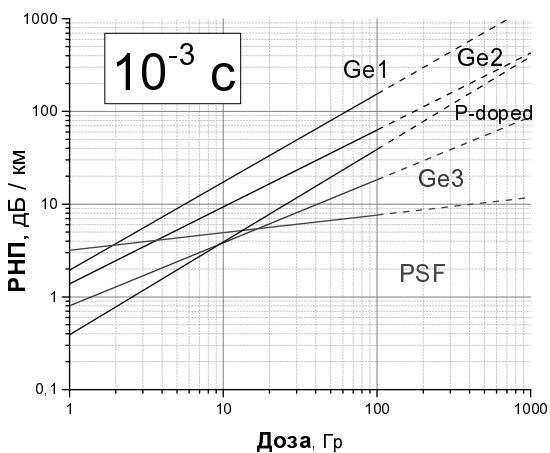


Рис. 7. Зависимости РНП от дозы облучения в моменты времени 10⁻³ с и 10⁻² с,

Из рис. 7 видно, что световод 1224 будет иметь в разы меньшее РНП после импульса, чем любые другие (сплошные) световоды, начиная с дозы примерно 20 Гр. Но и при меньших дозах прогнозируемое РНП у световода 1224 невелико: менее 5 и менее 3 дБ/км в моменты времени 10⁻³ и 10⁻² с соответственно.

Для многих применений, по-видимому, актуальны импульсные воздействия небольшой дозы <20 Гр. Однако при взрывном выделении ядерной энергии фактором поражения является не только интенсивное (импульсное) воздействие в течение до 10 мкс (его влияние на световод мы и исследуем в описываемых экспериментах), но и т.н. «последствие», которое развивается до времени ~100 с с гораздо меньшей мощностью дозы, но суммарно, за счет своей длительности, дает огромную поглощенную дозу в световоде. Поэтому в этом случае все световоды из рис. 7, кроме PSF, проявив сравнительно малое РНП через 10⁻³–10⁻² с после импульса, полностью потемнеют ко времени 1–10 с (РНП>10 дБ/км) и после этого будут релаксировать до приемлемого уровня в течение не менее десятков секунд. При этом радиационно-упрочненный световод 1224 не только в моменты времени 10⁻² с и 10⁻³ с но и 100 с, будет обладать вполне приемлемым уровнем РНП, хотя это утверждение надо еще подкрепить расчетами и, возможно, дальнейшими экспериментами. (Есть вероятность, что в момент времени 10⁻³ с РНП все же слегка превысит 5 дБ/км, но затем с ходом времени до конца последствия будет только падать.)

Сравнение РНП радиационно-упрочненного световода с сердцевиной из нелегированного SiO₂ и световодов с полый сердцевиной

Достаточно очевидно, что большей радиационной стойкостью должны обладать фотоннокристаллические световоды с полый сердцевиной (ФКС-ПС), чем сплошные световоды, так как в этом случае почти вся световая мощность распространяется по воздуху, в котором РЦО не индуцируются.

РНП в обоих ФКС-ПС лежит ниже, чем у нашего радиационно-упрочненного предоблучением световода 1224. При этом на актуальных временах 10⁻³–10⁻² с РНП в световоде 1224 выше всего в 3–4 раза при t = 10⁻² с, и в 2,5–3,5 раз выше при t = 10⁻³ с.

С одной стороны, в превосходстве ФКС-ПС нет ничего удивительного, так как основная доля мощности распространяется в них по воздуху, где

нет РЦО. С другой стороны, малость превосходства ФКС-ПС над нашим сплошным световодом говорит о том, насколько полно в нем нам удалось подавить РЦО (т. е. собственные СТН) путем предварительного малодозного облучения тремя первыми выстрелами (рис. 4).

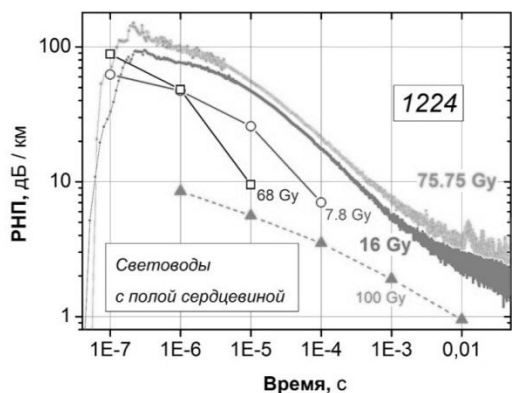


Рис. 8. Эволюция РНП в световоде 1224 и двух различных фотоннокристаллических световодах с поллой сердцевинной (ФКС-ПС)

Заключение

1) Основным фактором радиационно-наведенного поглощения света (РНП) в световодах с сердцевиной из нелегированного кварцевого стекла на малых временах после импульсного воздействия ионизирующего излучения ($<10^{-2}$ с) являются собственные автолокализованные дырочные состояния (АДС) в сетке стекла, а не деформационные, как считалось ранее.

2) Предварительное облучение таких световодов малой дозой (~ 100 Гр) приводит к многократному снижению РНП при последующих импульсных облучениях из-за того, что собственные АДС больше не возникают. При этом такое малодозное предоблучение не оказывает сколь либо заметного влияния на деформационные АДС, ответственные за РНП при непрерывном облучении световода.

3) В наиболее актуальном временном интервале (10^{-3} – 10^{-2} с после импульсного воздействия ионизирующего излучения) световоды с сердцевиной из нелегированного кварцевого стекла, радиационно-упрочненные путем предварительного малодозного облучения, демонстрируют РНП на длине волны 1,55 мкм лишь в 2,5–4 раза более высокое, чем, согласно литературным данным, РНП для фотоннокристаллических световодов с поллой сердцевинной, у которых лишь 2–3 % световой мощности распространяется по стеклу.

Список литературы

1. Girard S., Kuhnenn J., Gusarov A., Brichard B., M. Van Uffelen, Ouerdane Y., Boukenter A., and Marcandella C. Radiation effects on silica-based optical fibers: recent advances and future challenges // IEEE Trans. Nucl. Sci., 2013. Vol. 60. N. 3. P. 2015–2036.

2. Wijnands T., De Jonge L. K., Kuhnenn J., Hoeffgen S. K., and Weinand U. Optical absorption in commercial single mode optical fibers in a high energy physics radiation field // IEEE Trans. Nucl. Sci., 2008. V. 55. N. 4. P. 2216–2222.

3. Girard S., Brichard B., Baggio J., Berghmans F., Decreton M. Comparative study of pulsed X-ray and γ -ray radiation-induced effects in pure-silica-core optical fibers // RADECS 2005.

4. Girard S., Baggio J., Bisutti J. 14-MeV Neutron, γ -Ray, and Pulsed X-Ray Radiation-Induced Effects on Multimode Silica-Based Optical Fibers // IEEE Trans. Nucl. Sci., 2006. V. 53. N. 6. P. 3750–3757.

5. Griscom D. L. and 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, N. 11, pp. 7524–7533.

6. H. Hosono, K. Kajihara, T. Suzuki et al. Vacuum ultraviolet optical absorption band of non-bridging oxygen hole centers in SiO₂ glass // Solid State Communication, 2002. Vol. 122, pp. 117–120.

7. Griscom D. L. Electron spin resonance characterization of self-trapped holes in amorphous silicon dioxide // J. Non-Cryst. Solids, 1992. Vol. 149. N. 1–2, pp. 137–160.

8. S. Girard, J. Keurinck, A. Boukenter, J.-P. Meunier, Y. Ouerdane, B. Azaïs, P. Charre, and M. Vié Gamma-rays and pulsed X-ray radiation responses of nitrogen-, germanium-doped and pure silica core optical fibers // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B, 2004. Vol. 215, pp. 187–195.

9. Kashaykin P. F., Tomashuk A. L., Salgansky M. Yu., Guryanov A. N., and Dianov E. M. Anomalies and peculiarities of radiation-induced light absorption in pure silica optical fibers at different temperatures // Journal of Applied Physics, 2017. V. 121, pp. 213–216.

10. Pavlovskij A. I., Bossamykin V. S., Gerasimov A. I. et al. High-power pulsed electron beam accelerator (lia-30) with radial lines // ПТЭ, 1998. Т. 41. № 2. С. 13–25.