



DOI: 10.22184/FRos.2019.13.5.444.450

Опыт разработки термостойкого, радиационно-стойкого и водородостойкого оптического волокна

И. С. Азанова¹, azanova@pnppk.ru, Д. И. Шевцов¹, О. Л. Вохмянина¹, И. Д. Саранова¹, А. Н. Смирнова¹, М. И. Булатов¹, Е. А. Пospelova¹, Ю. О. Шаронова¹, Т. В. Димакова¹, П. Ф. Кашайкин², А. Л. Томашук², А. Ф. Косолапов², С. Л. Семёнов²

¹ ПАО «Пермская научно-производственная приборостроительная компания», Пермь, Россия

² Научный центр волоконной оптики РАН, Москва, Россия

Разработана технология изготовления, освоено серийное производство и проведены испытания оптического волокна с кварцевой сердцевиной стойкого к повышенным температурам, ионизирующему излучению и водородосодержащей среде. Такие оптические волокна могут быть использованы в кабелях для специальных систем телеметрии, бортовых кабелей авиакосмической техники, геофизических кабелях для измерения температуры в скважине.

Ключевые слова: оптическое волокно, ионизирующее излучение, повышенная температура, водородосодержащая среда

Статья получена: 24.04.2019. Принята к публикации: 04.06.2019.

Experience of the Development of Heat-resistant, Radiation-resistant and Hydro-resistant Optical Fibre

I. S. Azanova¹, azanova@pnppk.ru, D. I. Shevtsov¹, O. L. Vokhmyanina¹, I. D. Saranova¹, A. N. Smirnova¹, M. I. Bulatov¹, E. A. Pospelova¹, Yu. O. Sharonova¹, T. V. Dimakova¹, P. F. Kashaykin², A. L. Tomashuk², A. F. Kosolapov², S. L. Semenov²

¹ PJSC «Perm Scientific and Production Instrument-Making Company», Perm, Russia

² Fibre Optics Research Centre of RAS, Moscow, Russia

The manufacturing technology of pure-silica-core optical fibre mass production has been developed and mastered. Research for its resistance to elevated temperatures, ionizing radiation and hydrogen-containing medium was conducted. These optical fibres can be used in cables for special telemetry systems, on-board cables for aerospace engineering, and geophysical cables for measuring temperature in a borehole.

Keywords: optical fibre, ionizing radiation, high temperature, hydrogen environment

Received: 24.04.2019. Accepted: 04.06.2019.

* Примечание редактора: Статья рекомендована программным комитетом конференции, проходившей в рамках специализированной выставки лазерной, оптической и оптоэлектронной техники «Фотоника. Мир лазеров и оптики. 2019».

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы появилась потребность в замене импортных оптических волокон для специальных применений, что привело к разработке ряда моделей специальных волокон на ПАО ПНППК, в частности, радиационно-стойкого волокна с сохранением поляризации излучения для волоконно-оптических гироскопов [1–3].

Дальнейшее развитие этой технологии привело к созданию серийного производства нового типа волокна – одномодового оптического волокна с сердцевиной из нелегированного кварцевого стекла ОВ-РСИ125. Основные параметры волокна представлены в таблице. Разработано две модификации с защитным покрытием двух типов – двухслойное акрилатное и полиимидное покрытие с углеродным подслоем. Также доступны модификации с силиконовым и уретанакрилатным покрытиями. Углеродное покрытие применяется для повышения долговременной надежности волокна (рис. 1), оно способствует сохранению прочности при воздействии влаги на поверхность волокна и предотвращает диффузию молекул воды и водорода в сердцевину световода.

В данной статье представлены результаты испытания оптического волокна ОВ-РСИ125 с полиимидным покрытием с углеродным подслоем на воздействие повышенной температуры, герметичность к водородосодержащей среде и различным видам ионизирующего излучения.

ИСПЫТАНИЯ НА СТОЙКОСТЬ К ПОВЫШЕННЫМ ТЕМПЕРАТУРАМ

В процессе температурного воздействия меняются оптические потери оптического волокна. Испытания на стойкость к повышенным температурам проходили следующим образом: оптическое волокно в свободной намотке диаметром 155 мм помещали в термокамеру с погрешностью поддержания температуры $\pm 2^\circ\text{C}$ в атмосфере воздуха; температура изменялась ступенчато до $+300^\circ\text{C}$, длительность выдержки 8 ч. В процессе воздействия измерялась оптическая мощность на выходе волокна с помощью измерителя мощности с погреш-

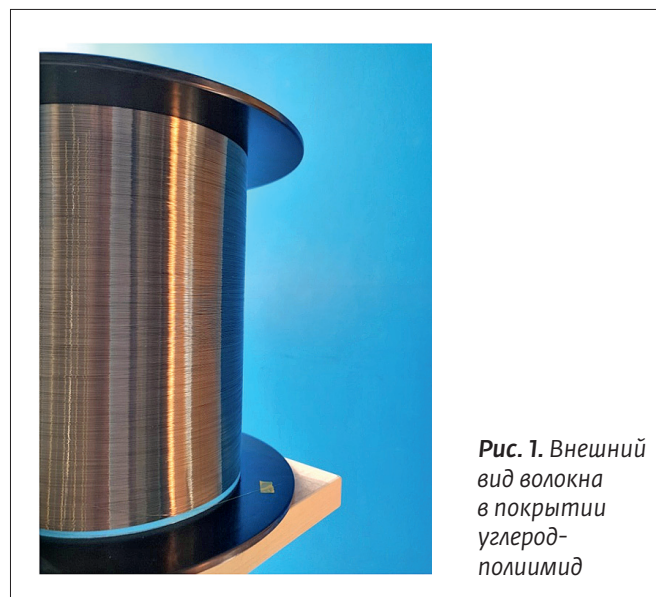


Рис. 1. Внешний вид волокна в покрытии углерод-полиимид

ностью измерения 10^{-5} мВт. Оптические потери до и после воздействия измеряли методом обрыва по ГОСТ Р МЭК 60793-1-40-2012.

Результаты испытаний графически представлены на рис. 2. При температуре 300°C оптические потери волокна увеличиваются на 0,15 дБ/км и не превышают 0,56 дБ/км. После перехода в нормальные условия оптические потери практически восстанавливаются в исходное состояние.

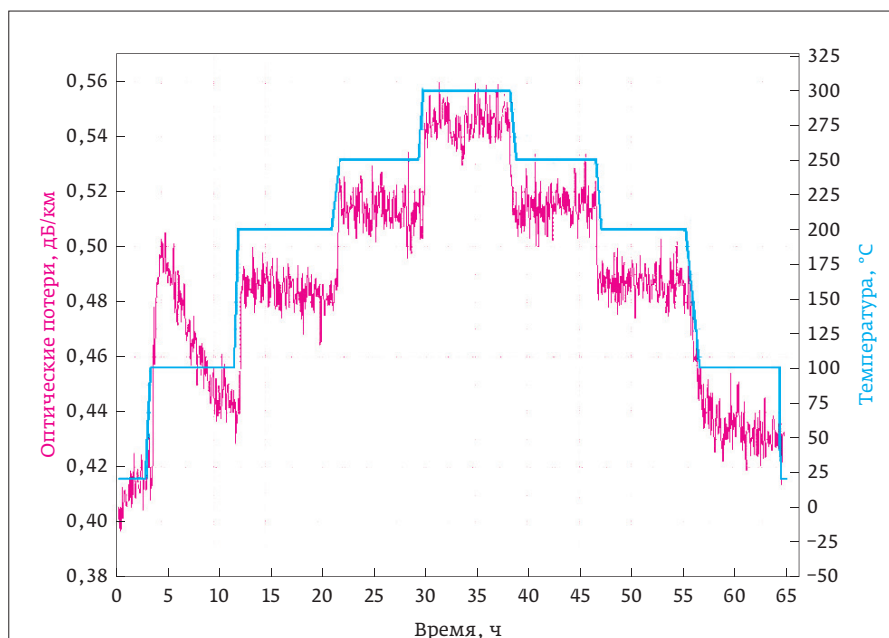
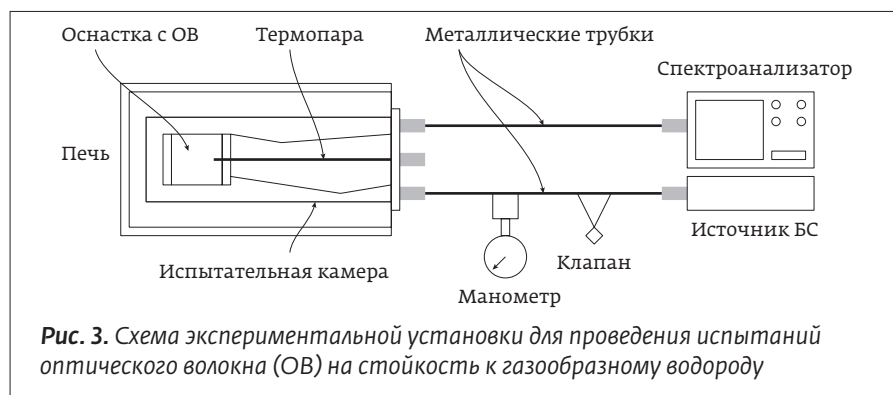


Рис. 2. Изменение оптических потерь при термоцикле, включающем нагрев до 300°C и последующее охлаждение



ИСПЫТАНИЯ НА СТОЙКОСТЬ К ГАЗООБРАЗНОМУ ВОДОРОДУ

Испытания оптического волокна на стойкость к газообразному водороду проводились в испытательной камере и сушильном шкафу согласно схеме (рис. 3). В испытательной камере размещались катушки с волокном длиной не менее 200 м, причем оба конца от каждого образца выводились наружу через гермовыводы камеры. Один конец волокна подключался к спектроанализатору для регистрации спектра пропускания волокна, второй конец – к источнику белого света. Камеру проверяют на герметичность и помещают ее в сушильный шкаф, затем в камере создают атмосферу водорода с давлением 10 бар и нагревают до температуры 100 °С. Образцы оптического волокна выдерживали в данных условиях до 40 ч, последовательно измеряя спектр пропускания волокна (рис. 4 а, б). Не зафиксировано изменение спектра пропускания волокна ОВ-РСИ125 с углерод-полиимидным покрытием (рис. 4, а). В то же

время для контрольного образца волокна без углеродного покрытия зафиксировано характерное изменение спектра пропускания на длине волны 1240 нм, что свидетельствует о проникновении молекулярного водорода (рис. 4, б).

ИСПЫТАНИЯ НА СТОЙКОСТЬ К ВОЗДЕЙСТВИЮ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ

ИЗЛУЧЕНИЯ

Волокна с сердцевиной из нелегированного кварцевого стекла, как в ОВ-РСИ125, обеспечивают высокую стойкость к воздействию ионизирующего излучения [4]. Радиационно-наведенные оптические потери (РНП) в волокнах с кварцевой сердцевиной существенно меньше, чем у германо-силикатных волокон.

Для исследования реакции оптического волокна на воздействие различных видов ионизирующего излучения была применена методика, основанная на рекомендациях документа ГОСТ РВ 6015-002-2007. Оптическое волокно длиной не менее 100 м испытывалось в свободной намотке для минимизации вклада механических напряжений в РНП. В процессе воздействия регистрировались спектр пропускания волокна, оптическая мощность на рабочих длинах волн (1,31 мкм и 1,55 мкм) на выходе волокна. Также исследовалось влияние вводимой оптической мощности (имитация эксплуатации волокна) на РНП. Образцы волокна помещались в облучательном

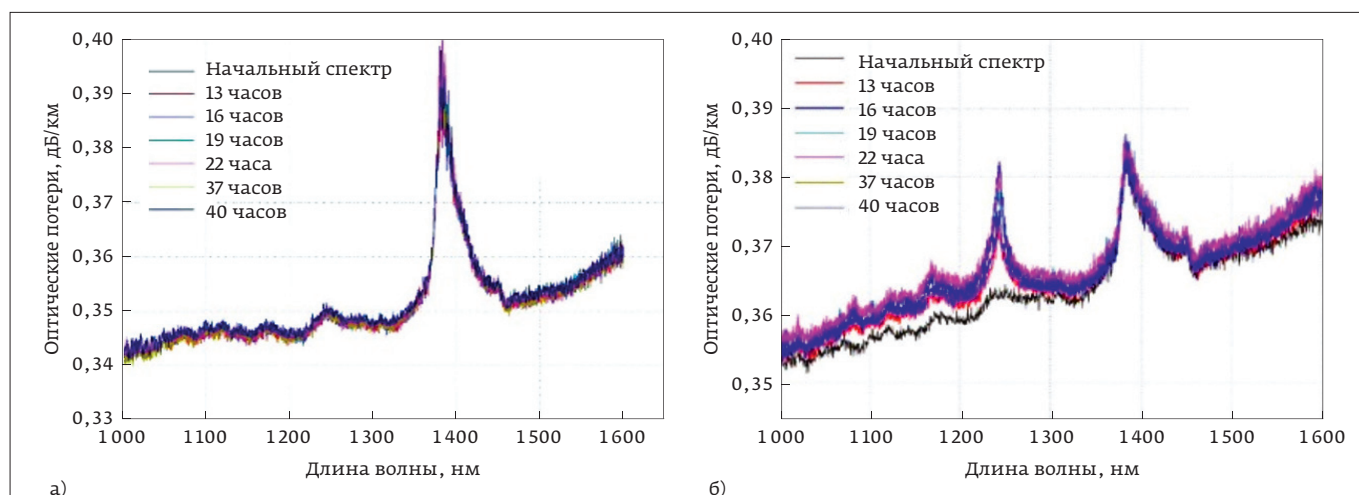
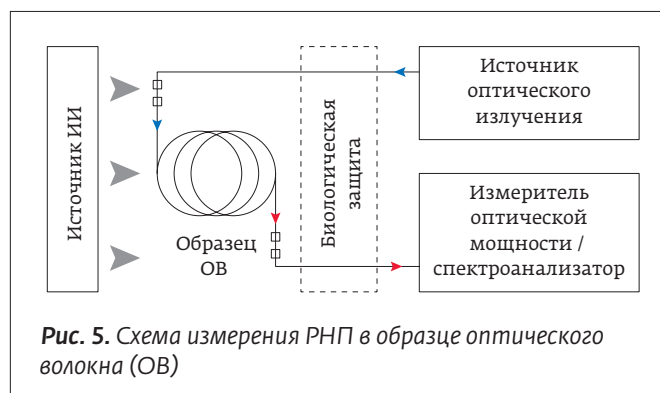


Рис. 4. Спектр оптических потерь при воздействии атмосферы водорода с давлением 10 бар и температуры 100 °С: а) образец в герметичном покрытии; б) контрольный образец



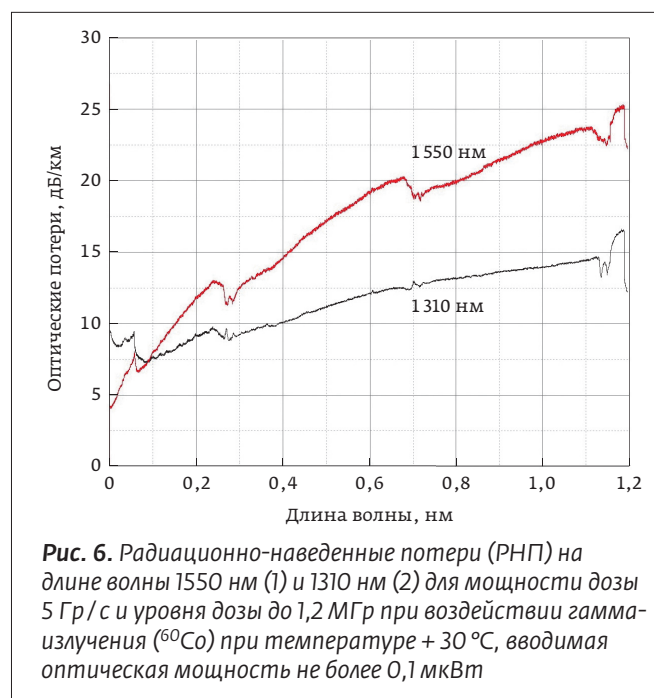
зале в область пространства с заданной мощностью дозы ионизирующего излучения, причем имелась возможность изменять температуру образцов непосредственно в этой области. Концы образцов оптического волокна подключались с помощью сварки к оптическому кабелю с таким же волокном, который прокладывался через биологическую защиту и подключался к источнику оптического излучения, измерителю оптической мощности или спектроанализатору (рис. 5).

ИСПЫТАНИЯ НА СТОЙКОСТЬ К ВОЗДЕЙСТВИЮ НЕПРЕРЫВНОГО ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ

Исследования проводились с помощью моделирующей установки ГУТ-200М на основе источника гамма излучения ^{60}Co . Образец волокна помещался в область с равномерным полем облучения 1 Гр/с или 5 Гр/с.

ИСПЫТАНИЯ ПРИ РАБОТЕ НА РАЗНЫХ ДЛИНАХ ВОЛН

На рис. 6 представлены РНП на рабочих длинах волн. Для поглощенной дозы до 100 кГр выгодно эксплуатировать данное волокно на длине волны 1,55 мкм из-за существенно меньшего РНП, на начальном



этапе облучения разница РНП для длин волн 1,55 мкм и 1,31 мкм составляет до 5 дБ/км. При этом для поглощенной дозы свыше 100 кГр преимущество – за рабочей длиной волны 1,31 мкм, для которой при дозе 1 МГр достигнуты РНП не более 15 дБ/км. В этом эксперименте вводимая оптическая мощность была менее 0,1 мВт (для исключения влияния эффекта фотообесцвечивания). При этом необходимо отметить, что РНП для рабочей длины волны $\lambda=1550$ нм более чувствительны к температуре окружающей среды. Во время облучения температура у источника гамма излучения поднималась примерно на 5 °С и далее принудительной вентиляцией охлаждалась на эти же 5 °С. Можно заметить на участках в районе доз облучения 280 кГр, 700 кГр, 1,1 МГр резкие скачки РНП на величину около 1 дБ/км, связанные с температурой в облучательной комнате.



ООО «Микро и наноголографические системы»

«Micro and nanoholographic systems» Company, Ltd.



ГОЗ-ДОЗ



Матрица линз
Френеля
Матрица дифракционных
решеток

- проведение научно-исследовательских, опытно-конструкторских и опытно-технологических работ в области голографических нанотехнологий
- изготовление голограммных и дифракционных оптических элементов
- разработка и создание оптико-голографических систем и устройств для контроля подлинности защитных голограмм
- организация и проведение тематических конференций, школ, семинаров и выставок в области голографических технологий



Оптико-электронный
сканер

ООО «МНГС» РФ, 105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1, тел.: +7(499) 263-63-44, e-mail: odinokov@bmstu.ru

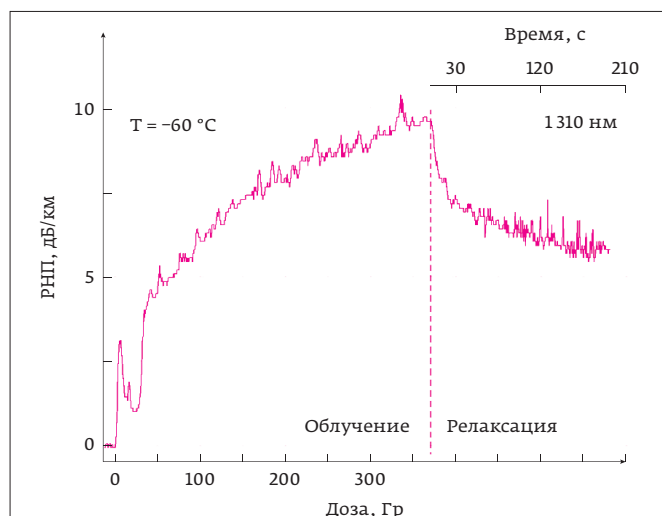


Рис. 7. Радиационно-наведенные потери (РНП) на длине волны 1310 нм при температуре минус 60 °С для мощности дозы 1,1 Гр/с и уровня дозы 370 Гр при воздействии непрерывного гамма-излучения

ВЛИЯНИЕ ПОНИЖЕННОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ СРЕДЫ

Зависимость РНП от температуры является известным фактом, повышенные температуры положительно влияют на стойкость к ионизирующему излучению. Этот эффект называется термический отжиг. В то же время пониженные температуры значительно ухудшают стойкость оптического волокна [5, 6]. Дефекты сетки стекла, возникающие при воздействии ионизирующего излучения, переходят из возбужденного состояния в промежуточное, находятся в этом состоянии долгое время и далее стремятся к исходному под действием тепловых эффектов. При пониженных температурах переход дефектов сетки стекла из промежуточного состояния в исходное происходит существенно медленнее. [7]. Целью исследования являлась проверка стойкости волокна ОВ-РСИ125 к ионизирующему излучению при пониженной температуре среды минус 60 °С. На рис. 7 представлена зависимость РНП на длине волны 1310 нм от дозы облучения до 370 Гр при температуре минус 60 °С и вводимой в обра-

зец оптической мощности 5 мкВт, а также релаксация в течение 3 минут после отключения источника гамма-излучения. Максимальные РНП при пониженных температурах с поглощенной дозой 370 Гр на образце ОВ-РСИ125 составили 10 дБ/км, что согласуется с данными работы [5].

ВЛИЯНИЕ ФОТООБЕСЦВЕЧИВАНИЯ

Яркое проявление эффекта фотообесцвечивания можно увидеть в волокне с нелегированной кварцевой сердцевиной [8]. Исследовано влияние вводимой оптической мощности в волокно ОВ-РСИ125 на радиационно-наведенные потери, что крайне важно знать при эксплуатации таких световодов. В четыре одинаковых образца волокна ОВ-РСИ125 была введена оптическая мощность от 6,5 мкВт до 4 мВт на длине волны 1550 нм с помощью оптических аттенюаторов. Волокно облучалось до дозы 1 кГр с мощностью дозы 1,3 Гр/с при температуре +30 °С.

При увеличении вводимой мощности в тысячу раз удалось снизить потери с 1,9 дБ/км до 1,1 дБ/км при поглощенной дозе 1 кГр только за счет эффекта фотообесцвечивания (рис. 8). При этом зависимость РНП от оптической мощности нелинейная и, с точки зрения эксплуатации, целесообразно вводить не

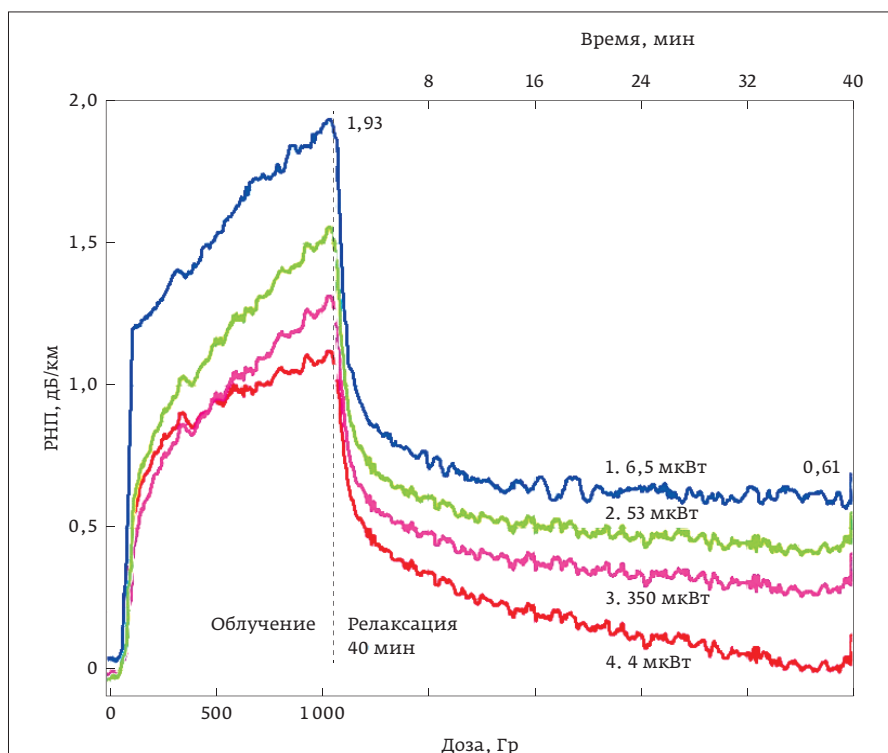
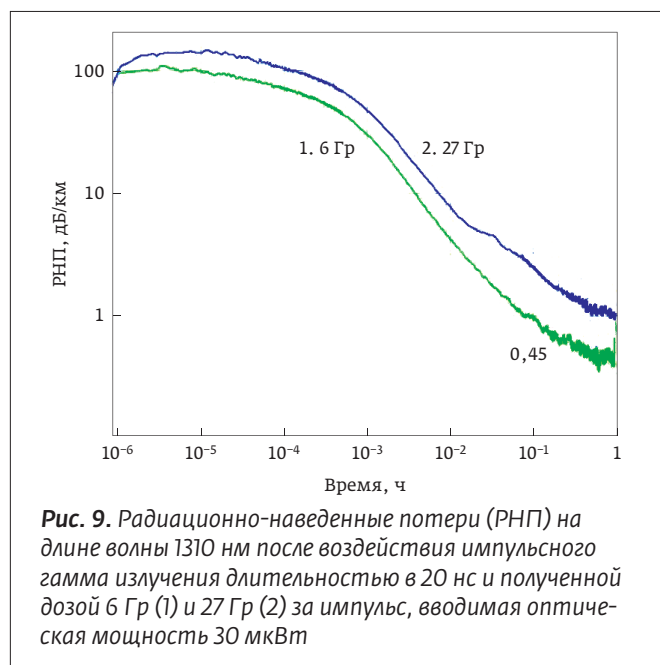
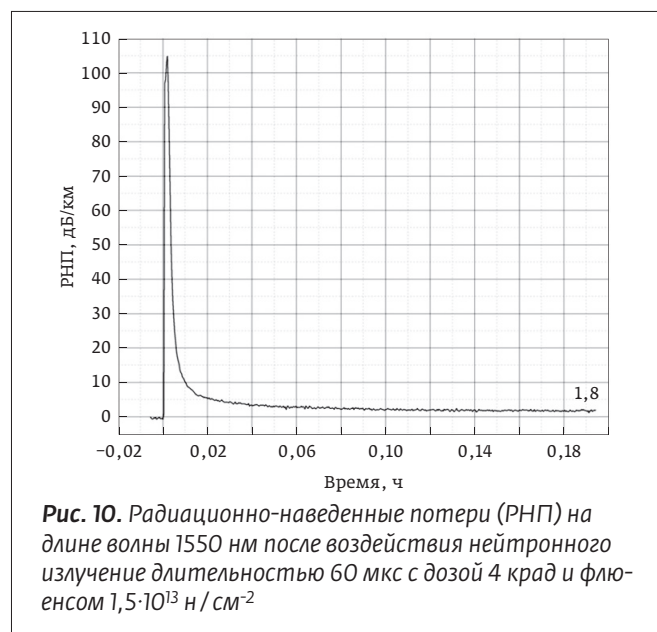


Рис. 8. Радиационно-наведенные потери (РНП) на длине волны 1550 нм, вводимая оптическая мощность варьируется от 6,5 мкВт (кривая 1) до 4 мВт (кривая 4) для мощности дозы 1,3 Гр/с и уровня дозы до 1 кГр при воздействии гамма-излучения (^{60}Co) при температуре 30 °С



менее 1 мВт оптической мощности при указанных дозах. Как показывают исследования [8], эффект проявляется как с непрерывным вводимым лазерным излучением, так и с импульсным.



ИССЛЕДОВАНИЯ НА СТОЙКОСТЬ К ВОЗДЕЙСТВИЮ ИМПУЛЬСНОГО ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ

Исследования стойкости оптического волокна ОВ-РСИ125 к воздействию импульсного гамма излучения проходили на импульсном линейном индук-



**Современным компаниям –
инновационные решения!**



Лазер DLC TOPO

ТОРТИСА PHOTONICS (Германия)

признан победителем престижной
Международной премии «Prizm Awards»
в категории «Научные лазеры»!

DLC TOPO – лазер с узкой линией и перестройкой длины волны в широком диапазоне **от 1,45 до 4 мкм**. Цифровой контроллер с сенсорным экраном обеспечивает легкое, интуитивно-понятное управление и визуализацию рабочих параметров. Ширина линии генерации 2 МГц позволяет надежно отождествлять спектральные линии анализируемых атомарных и молекулярных проб.

Применение: Эксперименты в области молекулярной спектроскопии и квантовой оптики.
Эксклюзивным представителем компании Топтика в России является компания «ЕвроЛэйз».



ЕВРОЛЭЙЗ
PHOTONICS

www.eurolase.ru

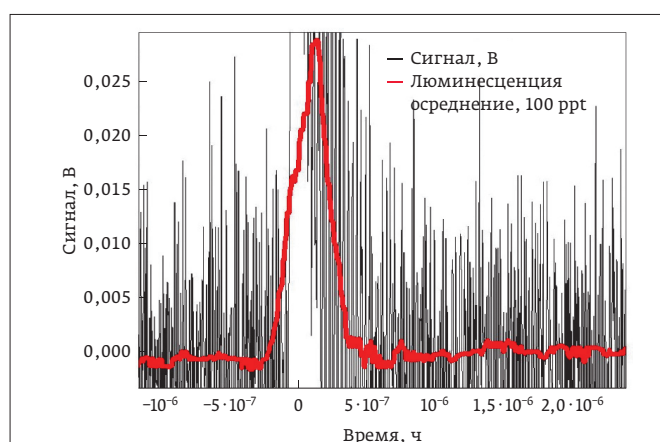


Рис. 11. Эффект люминесценции в оптическом волокне, возникающий при импульсном гамма-излучении длительностью 20 нс и полученной дозой 22 Гр за импульс. Оптическая мощность в волокно не вводилась. Черным цветом приведен сигнал с фотоприемника, красной линией – осреднение 100 Гц

ционном ускорителе электронов с длиной импульса ~20 нс. Испытаны два идентичных образца одноименного изотропного волокна на длине волны 1310 нм (мощность 30 мВт) при комнатной температуре (рис. 9). Первый образец получил дозу в импульсе 6 Гр. Чтобы достичь границу РНП 10 дБ/км, ему потребовалось около 4 мс. Через секунду образец восстановился до уровня потерь 0,45 дБ/км. Второй образец получил дозу 27 Гр и границу РНП в 10 дБ/км достиг за 7 мс. Через секунду релаксации РНП второго образца было равно 1 дБ/км. Таким образом, при разнице мощности дозы (и дозы в импульсе) до 4,5 раз РНП отличается примерно на 0,5 дБ/км через 1 с после воздействия [4].

Исследования на стойкость к воздействию импульсного нейтронного излучения показали (рис. 10), что РНП на длине волны 1550 нм составили 1,8 дБ/км через 0,2 с после воздействия длительностью 60 мкс с дозой 4 крад и флюенсом $1,5 \cdot 10^{13}$ н/см².

ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ

В работе [9] на основе серии опытов было выявлено, что люминесценция оптического волокна возникает при импульсном ионизирующем излучении при мощности дозы больше 10^7 Р/с. Временная форма люминесценции, возникающей в волокне, повторяет форму гамма импульса. Волокна ОВ-РСИ125 были испытаны в подобных условиях на импульсном линейном индукционном ускорителе электронов с длиной импульса ~20 нс. В образец волокна не вводилась оптическая мощность, детектирование сигнала производилось с помощью фотоприемника

Таблица. Геометрические и оптические параметры оптического волокна ОВ-РСИ125

| Параметр | Величина | |
|--|-----------------------|------------------|
| Тип покрытия | акрилат | углерод/полиимид |
| Рабочая длина волны, мкм | 1,31 / 1,55 | |
| Коэффициент затухания на 1,31 / 1,55 мкм, дБ/км | $\leq 0,5 / \leq 0,6$ | |
| Числовая апертура | $0,17 \pm 0,02$ | |
| Диаметр модового поля на длине волны 1,55 мкм, мкм | $8,6 \pm 0,6$ | |
| Неконцентричность сердцевины / оболочка, мкм | $\leq 0,7$ | |
| Диаметр кварцевой оболочки, мкм | 125 ± 2 | |
| Пруф-тест, % | 0,6 / 1,0 / 2,0 | 0,6 / 1,0 / 2,0 |
| Строительная длина, км | до 10 | |
| Диаметр покрытия, мкм | 250 ± 10 | 155 ± 5 |
| Рабочий диапазон температур, °С | От -55 до 85 | От -55 до 300 |

с полосой пропускания 80 МГц и запоминающего осциллографа. На графике (рис. 11) представлен сигнал, связанный с люминесценцией, где по вертикальной оси отложено напряжение с фотоприемника в вольтах. Поглощенная доза 22 Гр за импульс длительностью 20 нс соответствует мощности дозы в 10^9 Гр/с. Ширина кривой люминесценции на полувысоте составляет около 20 нс, что соответствует длительности импульса гамма-источника.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные в работе результаты подтверждают высокую стойкость к повышенной температуре эксплуатации, водородосодержащей среде, импульсному и непрерывному ионизирующему излучению оптического волокна ОВ-РСИ125, разработанного и производимого в ПАО ПНППК.

ЛИТЕРАТУРА

- Kashaykin P.F. et al. *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2019; 508: 26.
- Tomashuk A.L. et al. *Bulletin of the Lebedev Physics Institute*. 2018; 45(12): 385.
- Азанова И. С. et al. *Фотон Экспресс*. 2017; 6(142): 119.
- Azanova I. S. et al. *Foton Ekspress*. 2017; 6(142): 119.
- Tomashuk A.L. et al. Pulsed-Bremsstrahlung-Radiation Effect on Undoped- and Ge-Doped-Silica-Core Optical Fibers at Wavelength of 1.55 μ m. *Lightwave Technology*. 2016; PP(99): 1–1.
- Kashaykin P.F. et al. *Journal of Applied Physics*. 2017; 121: 213104.
- Griscom D. L. *Applied Physics letters*. 1997; 71(2): 175.
- Dianov E.M. et al. *Soviet Journal of Quantum Electronics*. 1979; 9(5): 636–637
- Sigel G.H. *IEEE Transactions on Nuclear Science*. 1981; 28(6): 4095.
- Андрьяш А. В. *Известия Челябинского научного центра*. 2003; 4(21): 20.
- Andriyash A. V. *Izvestiya Chelyabinskogo nauchnogo centra*. 2003; 4(21): 20.

6+



ТЕХНОПРОМ

VII МЕЖДУНАРОДНЫЙ ФОРУМ И ВЫСТАВКА
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО РАЗВИТИЯ

«ТЕХНОПРОМ-2019»

18-20 СЕНТЯБРЯ 2019

МВК «НОВОСИБИРСК ЭКСПОЦЕНТР»

Организатор



Правительство
Новосибирской
области

Оператор



8(800)333-54-63

звонок по России бесплатный

forumtechnoprom.com