

**ПОГЛОЩЕНИЕ СВЕТА,
НАВЕДЕННОЕ В ДВУЛУЧЕПРЕЛОМЛЯЮЩЕМ
ВОЛОКОННОМ СВЕТОВОДЕ ТИПА “ПАНДА”
С СЕРДЦЕВИНОЙ ИЗ НЕЛЕГИРОВАННОГО КВАРЦЕВОГО
СТЕКЛА ИМПУЛЬСНЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ
ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

А. Л. Томащук¹, П. Ф. Кашайкин¹, И. С. Азанова^{1,2}, А. В. Филиппов^{1,3},
Ю. О. Шаронова^{1,2}, О. Л. Вохмянина^{1,2}, Е. А. Бычкова^{1,3}, С. В. Галанова^{1,3}

Сравнивается эволюция радиационно наведенного поглощения света на $\lambda = 1.55$ мкм при различной мощности зондирующего светового сигнала после импульсного воздействия ионизирующего излучения в двулучепреломляющем волоконном световоде типа “панда” с сердцевинной из нелегированного кварцевого стекла и в изотропном волоконном световоде, вытянутом из той же заготовки до размещения в ней напрягающих стержней. Установлена высокая эффективность фотообесцвечивания радиационно наведенного поглощения в двулучепреломляющем световоде самим зондирующим сигналом на $\lambda = 1.55$ мкм.

Ключевые слова: двулучепреломляющий волоконный световод, импульсное воздействие ионизирующего излучения, радиационно наведенное поглощение, фотообесцвечивание.

Введение. Двулучепреломляющие волоконные световоды (ВС) являются актуальным типом ВС современной оптоэлектроники, т.к. используются в волоконно-оптических гироскопах (ВОГ) [1]. Чаще всего это – двулучепреломляющие ВС типа

¹ НЦВО РАН, 119333 Россия, Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: tomashuk@fo.gpi.ru.

² Пермская научно-производственная приборостроительная компания (ПНППК), 614990 Россия, Пермь, улица 25 Октября, 106.

³ Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики (РФЯЦ-ВНИИЭФ), 607188 Россия, Нижегородская обл., Саров, пр. Мира, 37.

“панда” (далее просто “панда”) [2], в которых эффект двулучепреломления обеспечивается наличием боросиликатных стержней в оболочке, симметрично расположенных с двух сторон от сердцевины ВС и создающих разные напряжения (деформации) сетки стекла сердцевины в двух ортогональных направлениях в ее сечении [2] (рис. 1).

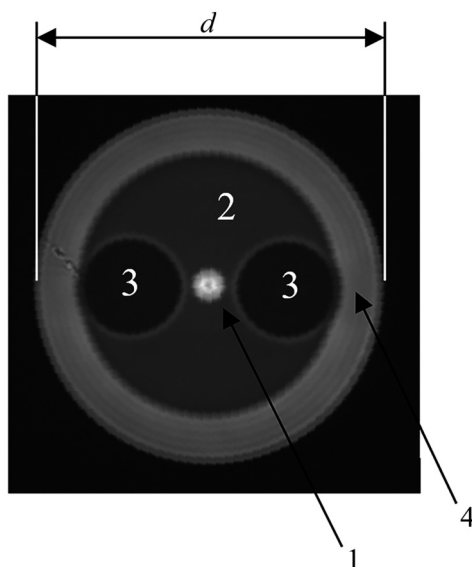


Рис. 1: Изображение торца панды, полученное на электронном микроскопе. 1 – сердцевина из нелегированного кварцевого стекла, 2 – фторсиликатная светоотражающая оболочка, 3 – напрягающие боросиликатные стержни, 4 – внешняя оболочка из нелегированного кварцевого стекла, $d = 80$ мкм.

При эксплуатации ВОГ в военной технике возможно воздействие на него импульса ионизирующего излучения, создающего в сетке стекла панды точечные дефекты (радиационные центры окраски, РЦО), поглощающие световой сигнал.

Изучение РЦО в двулучепреломляющих ВС с сердцевиной из нелегированного кварцевого стекла и их сравнение с РЦО в изотропных ВС только началось [3]. В пионерской работе [3] было установлено, что как в изотропных ВС, так и в пандах с сердцевиной из нелегированного кварцевого стекла, радиационно наведенное поглощение света (РНП) в ближнем ИК-диапазоне (рабочая длина волны ВОГ – $\lambda = 1.55$ мкм) определяется самозахваченными дырками (СД), индуцированными излучением на немостиковых p -орбиталях атомов кислорода сетки кварцевого стекла сердцевины [4–6]. СД притягивает электронные облака соседних атомов кремния, тем самым себя стабилизируя [7]. Однако такая СД отличается крайне малым временем жизни, если только длина связи Si–O не была меньше нормальной из-за деформации сетки стекла. В последнем случае

электронные плотности кремния оказываются ближе к СД, и ее время жизни поэтому увеличивается [8].

РНП в ближнем ИК-диапазоне в изотропных ВС с сердцевиной из нелегированного кварцевого стекла определяется сравнительно долгоживущими СД с широкими полосами поглощения с центрами на 660 и 760 нм [4–6]. Их сравнительно большое время жизни определяется деформациями сетки стекла, “вмороженными” в процессе вытяжки ВС. В пандах деформации сетки, вызванные вытяжкой, взаимодействуют с деформациями, вызванными напрягающими стержнями. Удивительным результатом такого взаимодействия является тот факт, что РНП в пандах определяется крайне короткоживущими СД с центром полосы поглощения на ~ 1.2 мкм [3, 8]. При этом не исключено, что концентрация долгоживущих СД в пандах несколько меньше, чем в изотропных ВС [3]. В результате, в пандах РНП на $\lambda = 1.55$ мкм на малых временах после импульсного воздействия ($< 10^{-3}$ с) оказалось очень велико, но уже на временах $\sim 10^{-2} - 10^{-3}$ с достигло рекордно низкого уровня для изотропных ВС и даже оказалось ниже его в одном из образцов [3]. Однако прямого сравнения РНП в процессе его релаксации после импульсного облучения в панде и изотропном ВС, изготовленном из той же заготовки, но до размещения в ней боросиликатных стержней, сделано не было – такое сравнение впервые делается в данном Сообщении.

Оказалось также [3], что из-за того, что рабочая длина волны ВОГ $\lambda = 1.55$ мкм покрывается полосой поглощения СД на $\lambda \sim 1.2$ мкм, при непрерывном γ -облучении при мощности дозы 0.87 Гр/с и мощности светового зондирующего сигнала на $\lambda = 1.55$ мкм в 5 мВт в пандах наблюдается эффективное подавление РНП из-за фотообесцвечивания вышеуказанной полосы. В данном Сообщении мы исследуем возможность подавления РНП в пандах путем фотообесцвечивания уже в случае импульсного, а не непрерывного воздействия ионизирующего излучения.

Эксперимент. В ПНППК была изготовлена панда с сердцевиной из нелегированного кварцевого стекла, фторсиликатной светоотражающей внутренней оболочкой с показателем преломления на 0.009 меньше, чем у сердцевины, внешней оболочкой из нелегированного кварцевого стекла и боросиликатными стержнями, внедренными в оболочку для создания двулучепреломления (структура поперечного сечения качественно показана на рис. 1). Величина двулучепреломления панды составила $7.2 \cdot 10^{-2}$. Из исходной заготовки до внедрения в нее боросиликатных стержней был также вытянут изотропный ВС.

Отрезки панды и изотропного ВС, длиной 100 м, облучались во РФЯЦ-ВНИИЭФ тормозным излучением линейного импульсного ускорителя электронов. Средняя энергия фотонов, вылетающих из танталовой мишени и падающих на свободную бухту с исследуемым ВС, составляла 5 МэВ. Длительность импульса – 20 нс. РНП измерялось на $\lambda = 1.55$ мкм как функция времени, прошедшего после импульса при непрерывной подаче зондирующего светового сигнала. Детально схема эксперимента описана в [3, 9].

Было проведено три эксперимента: в первых двух облучены два различных отрезка панды импульсами с дозами 27 и 20 Гр, соответственно, при этом интенсивность непрерывного зондирующего света на $\lambda = 1.55$ мкм в этих экспериментах сильно различалась: в первом она составила 50 мкВт, во втором – 1 мВт. В третьем эксперименте был облучен отрезок изотропного ВС импульсом дозой 22 Гр при интенсивности зондирующего света – 50 мкВт.

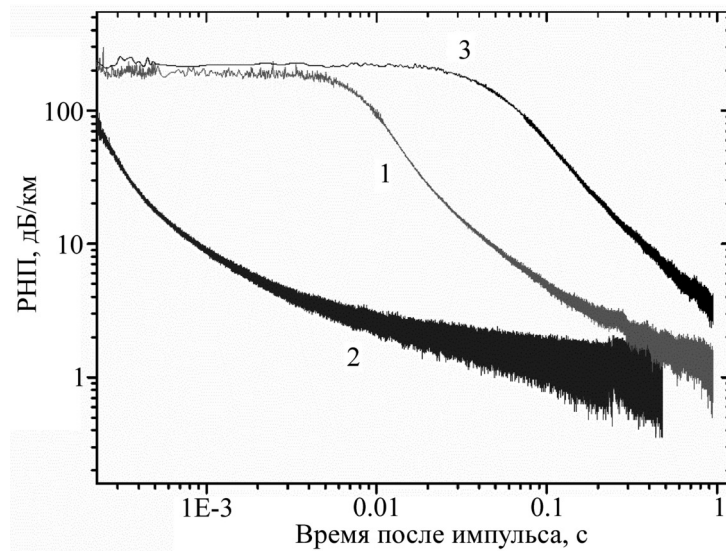


Рис. 2: Временная эволюция РНП после импульсного воздействия на ВС в трех экспериментах: 1 – облучение панды, доза в импульсе – 27 Гр, интенсивность зондирующего света – 50 мкВт; 2 – панда, 20 Гр, 1 мВт; 3 – изотропный ВС, 22 Гр, 50 мкВт.

Результаты и их обсуждение. Временная эволюция РНП после импульсного воздействия в трех экспериментах представлена на рис. 2.

Во-первых, видно, что на малых временах после импульса ($\leq 7 \cdot 10^{-3}$ с в эксперименте 1 и $\leq 3 \cdot 10^{-2}$ с в эксперименте 3) РНП превысило динамический диапазон установки в ~ 20 дБ. При дальнейшем увеличении времени видно монотонное уменьшение РНП, обусловленное распадом РЦО (в нашем случае это, очевидно, СД).

Во-вторых, видно, что в пределах динамического диапазона ход кривых существенно различен и не может объясняться небольшим различием в дозе облучения, практически сравнимым с точностью дозиметрии.

Значительно более низкое РНП на малых временах после импульса в эксперименте 2, чем 1, очевидно, объясняется более эффективным фотообесцвечиванием полосы поглощения СД на 1.2 мкм зондирующим сигналом с интенсивностью 1 мВт, чем 50 мкВт. Эффективность фотообесцвечивания со временем монотонно уменьшается по мере того, как эти СД исчезают, и на больших временах (≤ 1 с) РНП на $\lambda = 1.55$ мкм уже начинает определяться хвостами долгоживущих СД с центрами на 660 и 760 нм [10], которые излучением на $\lambda = 1.55$ мкм, очевидно, не обесцвечиваются.

РНП в панде (эксперимент 1) оказалось заметно ниже, чем в изотропном ВС (эксперимент 3), при одинаковой интенсивности зондирующего сигнала 50 мкВт. По всей вероятности, это также связано с фотообесцвечиванием полосы СД с центром на 1.2 мкм, концентрация которых многократно выше в панде, чем в изотропном ВС. Как и в случае экспериментов 1 и 2, эффективность фотообесцвечивания монотонно снижается со временем по мере исчерпания этих СД, и на больших временах (≤ 1 с) кривые 1 и 3 сближаются. Соотношение РНП в момент времени 1 с позволяет предположить, что концентрация долгоживущих СД с центрами на 660 и 760 нм в данной панде меньше, чем в изотропном ВС. Соотношение концентраций короткоживущих и долгоживущих СД в пандах и изотропных ВС с учетом деформаций сетки стекла, “вмороженных” в процессе вытяжки ВС и созданных напрягающими стержнями, требует дальнейшего интересного исследования.

Сравнение РНП панды и изотропного ВС на $\lambda = 1.55$ мкм при непрерывном γ -облучении в [3] дало противоположный результат: РНП в изотропном ВС оказалось меньше. По-видимому, это было связано с малостью интенсивности зондирующего светового сигнала в [3] (< 0.5 мкВт) и обусловленной этим малой эффективностью фотообесцвечивания.

Вывод. При релаксации РНП на $\lambda = 1.55$ мкм в панде с сердцевиной из нелегированного кварцевого стекла после импульсного воздействия ионизирующего излучения наблюдается эффективное фотообесцвечивание РНП самим непрерывным зондирующим световым сигналом. Оно существенно даже при интенсивности сигнала 50 мкВт. Обнаруженный нами эффект фотообесцвечивания способен снизить время восстановления работоспособности ВОГ после импульсного воздействия.

РНП в изотропном ВС, произведенном из той же заготовки до размещения в ней напрягающих боросиликатных стержней, оказалось заметно выше, чем в самой панели при интенсивности непрерывного зондирующего сигнала 50 мкВт, что объясняется отсутствием (или ничтожностью) эффекта фотообесцвечивания в изотропном ВС.

Работа поддержана Российским научным фондом (проект № 18-12-00436).

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] H. C. Lefevre, *The Fiber-Optic Gyroscope*, 3rd edn (Artech House, London, 2014).
- [2] Y. Sasaki, T. Hosaka, M. Horiguchi, et al., *J. Lightwave Technol.* **4**(8), 1097 (1986).
- [3] P. F. Kashaykin, A. L. Tomashuk, I. S. Azanova, et al., *J. Non-Cryst. Solids*, в печати (2018).
- [4] D. L. Griscom, *Appl. Phys. Lett.* **71**(2), 175 (1997).
- [5] A. L. Tomashuk, M. Yu. Salgansky, P. F. Kashaykin, et al., *J. Lightwave Technol.* **32**(2), 213 (2014).
- [6] D. L. Griscom, *J. Non-Cryst. Solids* **352**(23-25), 2601 (2006).
- [7] P. V. Chernov, E. M. Dianov, V. N. Karpechev, et al., *Physica Status Solidi (b)* **155**, 663 (1989).
- [8] P. F. Kashaykin, A. L. Tomashuk, M. Yu. Salgansky, *J. Appl. Phys.* **121**, 213104 (2017).
- [9] A. L. Tomashuk, A. V. Filippov, A. N. Moiseenko, et al., *J. Lightwave Technol.* **35**(11), 2143 (2017).
- [10] S. Girard, D. L. Griscom, J. Baggio, et al., *J. Non-Cryst. Solids* **352**, 2637 (2006).

Поступила в редакцию 8 ноября 2018 г.

После доработки 8 ноября 2018 г.

Принята к публикации 16 ноября 2018 г.