

АНИЗОТРОПИЯ РАДИАЦИОННО-НАВЕДЕННОГО ПОГЛОЩЕНИЯ СВЕТА В ДВУЛУЧЕПРЕЛОМЛЯЮЩЕМ ВОЛОКОННОМ СВЕТОВОДЕ НА ОСНОВЕ КВАРЦЕВОГО СТЕКЛА

П. Ф. Кашайкин^{1,2}, Е. А. Поспелова^{1,2}, А. Л. Томашук^{1,2},
Ю. О. Шаронова², О. Л. Вохмянина², И. С. Азанова^{2,3}

Впервые обнаружен эффект анизотропии радиационно-наведенного поглощения (РНП) света в двулучепреломляющем волоконном световоде (ВС) типа “Панда” с сердцевиной из нелегированного кварцевого стекла. РНП оказалось больше для света, поляризованного вдоль “медленной” оси ВС, чем вдоль “быстрой”. Непосредственно в процессе γ -облучения при дозе ~ 1 кГр (0.85 Гр/с) и температуре минус 60°C на $\lambda = 1.55$ мкм разница РНП при двух поляризациях света составила 12%. Величина эффекта анизотропии РНП возросла в процессе релаксации ВС после прекращения облучения (до $\sim 60\%$ уже через 10 мин релаксации с трендом на дальнейший рост). При комнатной температуре эффект анизотропии РНП не проявился.

Ключевые слова: двулучепреломляющий волоконный световод, кварцевое стекло, радиационно-наведенное поглощение света.

Введение. Двулучепреломляющие волоконные световоды (ВС) являются актуальным элементом современной оптоэлектроники, среди востребованных применений которых, в том числе, волоконно-оптические гироскопы (ВОГ) [1]. ВС типа “Панда” –

¹ ИОФ РАН, НЦВО им. Е. М. Дианова, 119991 Россия, Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: tomashuk@fo.gpi.ru.

² ПАО “Пермская научно-производственная приборостроительная компания” (ПАО ПНППК), 614990 Россия, Пермь, ул. 25 лет Октября, 106.

³ Пермский государственный национальный исследовательский университет (ПГНИУ), 614068 Россия, Пермь, ул. Букирева, 15.

один из самых распространенных типов двулучепреломляющих ВС для практических применений [2]. Эффект двулучепреломления в таких ВС достигается за счет наличия в оболочке двух “напрягающих” стержней из боросиликатного стекла, имеющих больший коэффициент линейного температурного расширения (КЛТР), чем окружающее их кварцевое стекло (рис. 1). В результате действия стержней показатель преломления стекла оболочки и сердцевины ВС зависит от направления вектора электрического поля распространяющейся световой волны: для поля, параллельного стержням, он больше (“медленная” ось), чем для ортогонально направленного поля (“быстрая” ось) [2].

При применении ВОГ на спутниках под действием космического ионизирующего излучения в кварцевом стекле ВС возникают точечные дефекты (радиационные центры окраски, РЦО), поглощающие распространяющийся световой сигнал (эффект радиационно-наведенного поглощения, РНП [3, 4]). Эффект РНП приводит к ухудшению соотношения “сигнал-шум” в датчике, вплоть до полного выхода его из строя. РНП увеличивается при снижении температуры из-за замедления термического распада РЦО [5]. При этом космические применения ВОГ предполагают весьма низкие температуры (минус 60 °С и ниже) [6].

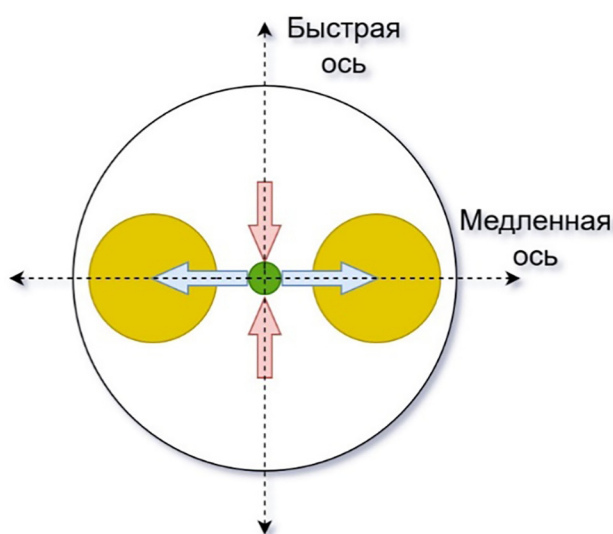


Рис. 1: Структура поперечного сечения ВС типа “Панда”. Внешний круг (сплошная черная линия) – оболочка; внутренний зеленый круг – сердцевина; желтые круги – напрягающие стержни в оболочке; черные пунктирные прямые – собственные оси ВС; серые стрелки, направленные вдоль “медленной” оси, – растягивающие напряжения, приложенные к сердцевине; розовые стрелки, направленные вдоль “быстрой” оси – сжимающие напряжения, приложенные к сердцевине.

Возникает вопрос, зависит ли при этом величина РНП от состояния поляризации света подобно тому, как от него зависит показатель преломления? Этот вопрос интересен не только с фундаментальной точки зрения, но и с практической, так как связан с возможностью выбора одного из двух направлений поляризации рабочего светового сигнала ВОГ с целью снижения РНП в ВС. Предыдущие исследования других авторов [7–10] дали противоречивые данные о наличии эффекта анизотропии РНП (в работах [7, 8] эффект наблюдался, а в работах [9, 10] – нет). Все эти исследования были проведены только на двулучепреломляющих ВС стандартного химического состава (сердцевина из германосиликатного стекла, оболочка из нелегированного кварцевого стекла) и, в основном, при импульсном облучении с высокой мощностью дозы и поэтому не имели отношения к космическим применениям. Также, все эксперименты проводились только при комнатной температуре.

Известно, что под действием ионизирующего излучения многократно меньшее РНП проявляют специальные радиационно стойкие двулучепреломляющие ВС с нестандартным химическим составом: сердцевина из нелегированного кварцевого стекла, оболочка из фторсиликатного стекла [5, 11–13], поэтому изучение РНП в таких ВС представляет наибольший интерес.

Таким образом, целью данной работы была попытка обнаружения эффекта анизотропии РНП в радиационно стойком двулучепреломляющем ВС типа “Панда” с сердцевиной из нелегированного кварцевого стекла и оболочкой из фторсиликатного стекла на рабочей длине волны ВОГ $\lambda = 1.55$ мкм. Попытка оказалась успешной.

Эксперимент. Исследовался радиационно стойкий ВС типа ПАНДА с сердцевиной из нелегированного кварцевого стекла, фторсиликатной оболочкой и боросиликатными напрягающими стержнями в оболочке [10–12]. Числовая апертура ВС составила $NA = 0.16$, величина двулучепреломления $B = 6.4 \cdot 10^{-4}$; начальные оптические потери (до γ -облучения) на $\lambda = 1.55$ мкм – $\alpha = 1.34$ дБ/км; длина волны отсечки – $\lambda_c = 1.38$ мкм.

Для проведения γ -облучений и измерения РНП отрезок ВС длиной 100 м наматывался на пластиковую катушку диаметром 80 мм и помещался в термостат, расположенный в калиброванной по мощности дозы точке в γ -облучательной камере установки ГУТ-200М. В качестве источника света использовался суперлюминесцентный волоконный эрбиевый источник (СВЭИ), работающий на длине волны $\lambda = 1.55$ мкм. Свет от СВЭИ проходил через аттенюатор, а затем через поляризатор на основе ниобата лития с волоконным выходом, к которому и приваривался исследуемый отрезок ВС. Мощность вводимого в исследуемый отрезок ВС света не превышала 1 мкВт, т. е. эффект

фотообесцвечивания РНП, существенный при милливаттной мощности [11], был пренебрежимо мал. Регистрация светового сигнала на выходе исследуемого отрезка ВС проводилась с помощью многоканального измерителя мощности ЛТК-1-ФТВ-1750 фирмы EXFO.

РНП измерялось в процессе γ -облучения до характерной для космических применений дозы ~ 1 кГр [5, 6] при мощности дозы 0.85 Гр/с и в течение 10 мин после завершения облучения. Было проведено четыре независимых опыта на отдельных отрезках ВС: при поляризации зондирующего света вдоль каждой из двух осей и при двух температурах – комнатной и минус 60 °С.

Результаты и их обсуждение. На рис. 2 представлены зависимости РНП на длине волны $\lambda = 1.55$ мкм в процессе γ -облучения и после его завершения при двух поляризациях и двух температурах.

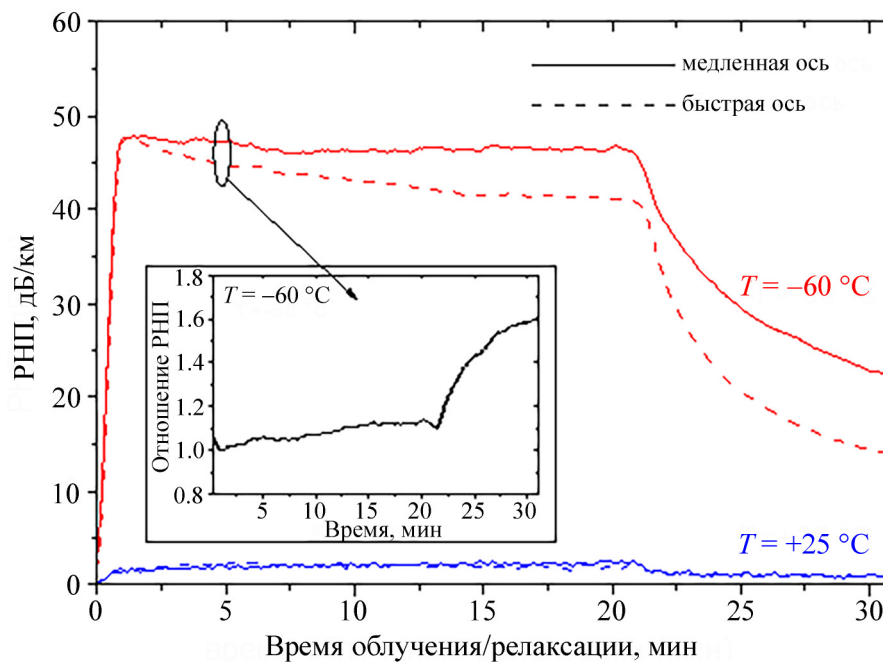


Рис. 2: РНП на $\lambda = 1.55$ мкм в процессе γ -облучения (0 – 21 мин) и сразу после его окончания (21 – 31 мин) на длине волны $\lambda = 1.55$ мкм при температуре минус 60 и +25 °С. Сплошные линии – РНП при запуске линейно-поляризованного света по “медленной” оси ВС, штриховые – по “быстрой” оси. На вставке дано отношение РНП при поляризации света по “медленной” и по “быстрой” оси при температуре минус 60 °С.

Первое, на что обращаешь внимание, это многократно большее РНП при минус 60 °С, чем при +25 °С (более, чем на порядок величины) как в процессе облучения, так и после него, что обусловлено уменьшением скорости термического распада РЦО при понижении температуры и что уже упоминалось во Введении.

Второе – это форма кривых РНП при минус 60 °С: после резкого роста в самом начале облучения РНП затем плавно уменьшается. Такое поведение характерно для samozaxvachennыx дырок (СД) в сетке кварцевого стекла [14] и объясняется тем, что в процессе γ -облучения сетка претерпевает радиационно-индуцированную перестройку, в результате которой устраняются ее деформации [15]. Поэтому концентрация СД уменьшается по мере увеличения дозы [14, 15].

При температуре минус 60 °С отчетливо видно, что в процессе облучения происходит монотонное увеличение разницы РНП при двух поляризациях зондирующего света. При этом РНП при поляризации света по “медленной” оси больше, чем по “быстрой”, практически на всей временной шкале (лишь в самом начале облучения на резком подъеме обе кривые примерно совпадают). При поглощённой дозе ~ 1 кГр разница РНП составляет около 5.3 дБ/км (46.2 и 40.9 дБ/км в “медленной” и “быстрой” осях, соответственно). После облучения (21–31 мин) эта разница становится еще больше и к концу 10-минутной релаксации достигает 8.5 дБ/км (22.3 и 13.8 дБ/км в “медленной” и “быстрой” осях, соответственно).

При температуре +25 °С РНП в ортогональных осях ВС совпадает с точностью до шумов измерения как в процессе облучения, так и при релаксации (рис. 2).

Из отношения РНП в ортогональных осях при минус 60 °С (вставка на рис. 2) видно, что в процессе облучения относительная разность РНП при поляризации по “медленной” оси к РНП при поляризации по “быстрой” оси практически линейно растет и при поглощенной дозе ~ 1 кГр (21 мин облучения) составляет около 12%. После прекращения облучения эта разница РНП начинает уже резко расти и через 10 мин релаксации достигает 60%. Это означает, что при многократно меньшей космической мощности дозы ($10^{-5} - 10^{-6}$ Гр/с) [5, 6] можно ожидать гораздо большей величины эффекта анизотропии РНП, чем наблюдалась в нашем эксперименте ($\gg 60\%$).

Таким образом, выбирая “быструю” ось в качестве рабочей, мы можем получить заметный выигрыш в радиационной стойкости в космических применениях ВС типа “Панда” при пониженной температуре.

Последующие исследования могли бы быть посвящены измерению и анализу РНП в широком спектральном диапазоне с последующей идентификацией РЦО, ответствен-

ных за анизотропию РНП. Также важным представляется построение температурной зависимости эффекта в широком диапазоне температур (от азотной до комнатной).

Известны радиационно стойкие двулучепреломляющие ВС типа “Панда” другого хим. состава – сердцевина из кварцевого стекла, легированного азотом, оболочка из нелегированного кварцевого стекла [16], проявившие в сравнительном эксперименте примерно такую же радиационную стойкость, как и ВС с нелегированной сердцевиной [17]. Поэтому возникает интересный вопрос, проявляется ли эффект анизотропии РНП и в ВС с сердцевиной из кварцевого стекла, легированного азотом?

Выводы. Впервые обнаружен эффект анизотропии РНП в двулучепреломляющем ВС типа “Панда” с сердцевиной из нелегированного кварцевого стекла при поляризации распространяющегося света вдоль ортогональных осей (“медленной” или “быстрой”). РНП при поляризации по “медленной” оси оказалось больше. Эффект наблюдался на длине волны $\lambda = 1.55$ мкм при температуре минус 60 °С, но отсутствовал при $+25$ °С.

Установлено, что разница РНП при поляризации света по “медленной” и “быстрой” осям линейно возрастает с дозой и становится равной 12% непосредственно в процессе γ -облучения со сравнительно большой мощностью дозы 0.85 Гр/с при дозе ~ 1 кГр, а при последующей релаксации после прекращения облучения уже в течение 10 мин возрастает до 60% с выраженным трендом на дальнейший рост. Следовательно, можно с уверенностью утверждать, что анизотропия РНП в космических применениях таких ВС (мощность дозы всего $\sim 10^{-5} - 10^{-6}$ Гр/с) будет многократно больше. Поэтому выбор “быстрой” оси в качестве рабочей позволит существенно снизить РНП в ВС типа “Панда” при их применении на спутниках при пониженной температуре.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации. (Соглашение № 075-11-2019-059 от 22 ноября 2019 г.)

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). DOI:10.1109/JLT.1986.1074850.
- [3] S. Girard, A. Alessi, N. Richard, et al., *Reviews in Physics* **4**, 100032 (2019). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.revip.2019.100032>.
- [4] S. Girard, A. Morana, A. Ladaci, et al., *Journal of Optics* **20**(9), 093001 (2018). DOI: <https://doi.org/10.1088/2040-8986/aad271>.

- [5] П. Ф. Кашайкин, А. Л. Томашук, М. Ю. Салганский и др., Журнал технической физики **89**(5), 752 (2019). DOI: <https://doi.org/10.1134/S1063784219050098>.
- [6] E. J. Friebele, M. E. Gingerich, and D. L. Griscom, Proc. SPIE **1791**, 177 (1993). DOI: <https://doi.org/10.1117/12.141177>.
- [7] E. J. Friebele, M. E. Gingerich, Brambani, et al., Proc. SPIE **1314**, 146 (1990). DOI: 10.1117/12.21976.
- [8] E. W. Taylor, V. R. Wilson, M. L. Vigil, et al., IEEE Photon. Technol. Letts. **1**(8), 248 (1989). DOI: 10.1109/68.36057.
- [9] L. D. Looney and P. B. Lyons, Proc. SPIE **1791**, 317 (1993). DOI: 10.1117/12.141175.
- [10] S. Girard, J. Keurinck, Y. Ouerdane, et al., IEEE Trans. Nucl. Sci. **51**(5), 2740 (2004). DOI: 10.1109/TNS.2004.835103.
- [11] А. Л. Томашук, П. Ф. Кашайкин, И. С. Азанова и др., Краткие сообщения по физике ФИАН **45**(12), 21 (2018). DOI: 10.3103/S1068335618120047.
- [12] A. L. Tomashuk, P. F. Kashaykin, I. S. Azanova, et al., IEEE Photon. Technol. Letts. **31**(17), 1413 (2019). DOI: 10.1109/LPT.2019.2929656.
- [13] P. F. Kashaykin, A. L. Tomashuk, I. S. Azanova, et al., J. Non-Cryst. Solids **508**, 26 (2019). DOI: 10.1016/j.jnoncrysol.2018.12.016.
- [14] D. L. Griscom, Appl. Phys. Letts. **71**(2), 175 (1997). DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.119493>.
- [15] A. L. Tomashuk, A. V. Filippov, P. F. Kashaykin, et al., J. Non-Cryst. Solids **566**, 120880 (2021). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2021.120880>.
- [16] В. В. Волошин, И. Л. Воробьев, Г. А. Иванов и др., Радиотехника и электроника **54**(7), 890 (2009). DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064226909070146>.
- [17] A. L. Tomashuk, P. F. Kashaykin, S. L. Semjonov, et al., J. Lightw. Technol. **38**(12), 5817 (2020). DOI: 10.1109/JLT.2020.3002651.

Поступила в редакцию 30 ноября 2021 г.

После доработки 14 декабря 2021 г.

Принята к публикации 20 декабря 2021 г.