

УДК 535.92

**РАДИАЦИОННО НАВЕДЕННОЕ ПОГЛОЩЕНИЕ
В СВЕТОВОДАХ С СЕРДЦЕВИНОЙ
ИЗ НЕЛЕГИРОВАННОГО КВАРЦЕВОГО СТЕКЛА
В БЛИЖНЕМ ИК-ДИАПАЗОНЕ: ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ
ВЫТЯЖКИ**

П. Ф. Кашайкин¹, А. Л. Томашук¹, М. Ю. Салганский^{2,1}, Н. Н. Вечканов²,
А. Н. Гурьянов², А. Ф. Косолапов, С. Л. Семенов¹

Из восьми аналогичных преформ волоконных световодов с сердцевинной из нелегированного кварцевого стекла и фторсиликатной светоотражающей оболочкой вытягиваются световоды при различных режимах вытяжки (температуре T , натяжении и скорости). Затем световоды подвергаются γ -облучению, и при дозе 2.5 кГр (7.4–7.6 Гр/с) измеряется радиационно наведенное поглощение (РНП) света на длине волны $\lambda = 1.55$ мкм. Установлено, что РНП резко увеличивается с увеличением T , которая, как оказалось, и является основным параметром вытяжки, определяющим радиационную стойкость световода. Установлено, что зависимость РНП от T^{-1} носит экспоненциальный характер.

Ключевые слова: волоконный световод из нелегированного кварцевого стекла, радиационно наведенное поглощение света, температура вытяжки волоконного световода.

Введение. Применение волоконных световодов (ВС) в условиях повышенного уровня радиации приводит к возникновению в их сетке стекла точечных дефектов (радиационных центров окраски, РЦО), поглощающих световой сигнал, распространяющийся по ВС. Это явление известно, как радиационно наведенное поглощение (РНП) света. Для применений ВС в радиационных полях (атомная энергетика, космос, военная техника)

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

² Институт химии высокочистых веществ им. Г.Г. Десятых РАН, 603951 Россия, Нижний Новгород, ул. Тропинина, 49.

эффект РНП должен быть минимизирован до уровня, который существенно не сказывался бы на функционировании волоконно-оптической системы: т.е. ВС должны быть радиационно стойкими.

Известно, что ВС с сердцевиной из нелегированного кварцевого стекла и фторсиликатной светоотражающей оболочкой являются одними из наиболее радиационно стойких типов ВС в ближнем ИК-диапазоне.

Основными РЦО, ограничивающими их радиационную стойкость, являются автолокализованные дырки на немостиковых p -орбиталях сетки стекла [1]. Их предшественниками могут быть деформации сетки стекла световода, которые вмораживаются в сетку в процессе вытяжки ВС из преформы из-за разности физико-химических свойств сердцевины и оболочки (КТР, температуры стеклования, вязкости), а также в силу закалочных условий при вытяжке (быстрое охлаждение ВС от температуры $T \sim 2000$ °С до комнатной).

В литературе приведены достаточно противоречивые данные о зависимости РНП ВС с нелегированной сердцевиной из кварцевого стекла от параметров вытяжки [2–4]. В работе [2] было показано, что основным параметром, влияющим на РНП, является натяжение при вытяжке. Однако, в работах [3, 4] не было установлено однозначной корреляции между условиями вытяжки и радиационной стойкостью ВС.

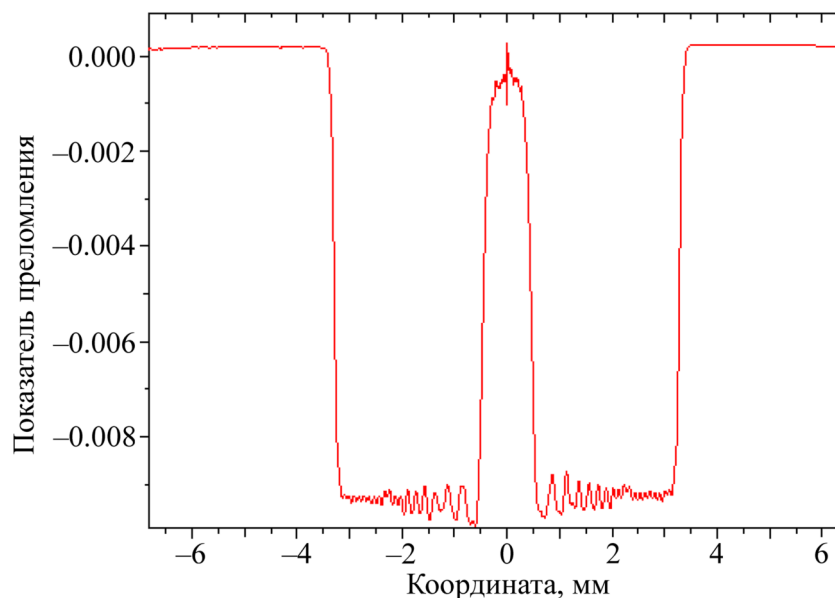


Рис. 1: Профиль показателя преломления преформы F1 [7].

Т а б л и ц а 1

Исследуемые ВС и основные параметры их вытяжки

Название Преформы	Номер режима	Температура, °С	Натяжение, г	Скорость, м/мин
F1	M1	1880	38	35
	M2	1900	26	33
	M3	1920	21	33
F2	M1	1840	43	36
	M2	1860	38	38
	M3	1890	28	38
F3	M1	1815	30	13
	M2		50	26
	M3		70	42
F4	M1	1805	19	10
	M2		27	14
	M3		50	30
F5	M1	1780	85	35
	M2	1800	30	20
F6	M1	1790	60	40
F7	M1	1790	51	37
F8	M1	1700	100	12

В предыдущих исследованиях [5, 6] путем оптимизации расходов реагентов в парогазовой смеси при синтезе сердцевин преформы в MCVD-процессе нам удалось добиться значительного снижения РНП в ВС с нелегированной сердцевиной из кварцевого стекла. Следующим шагом увеличения радиационной стойкости должна быть оптимизация условий самой вытяжки ВС.

Таким образом, целью данной работы было исследование зависимости РНП ВС с сердцевиной из нелегированного кварцевого стекла от условий вытяжки: температуры, натяжения и скорости – с целью максимального снижения РНП.

Эксперимент. Были изготовлены восемь аналогичных преформ с сердцевиной из нелегированного кварцевого стекла и фторсиликатной оболочкой (разница показателей преломления сердцевины и фторсиликатной оболочки $\Delta n \sim 0.01$). Профиль показателя преломления одной из преформ приведен на рис. 1. Из преформ были вытянуты

световоды с внешним диаметром 125 мкм при различных режимах вытяжки. Варьировались температура, скорость и натяжение (табл. 1). Изменение параметров вытяжки по длине ВС (изменение скорости и натяжения) в качестве примера показано для двух ВС на рис. 2. Для обозначения световода, вытянутого в определенном режиме, далее по тексту используется обозначение “FyMx”, где y – номер преформы, x – номер режима при вытяжке.

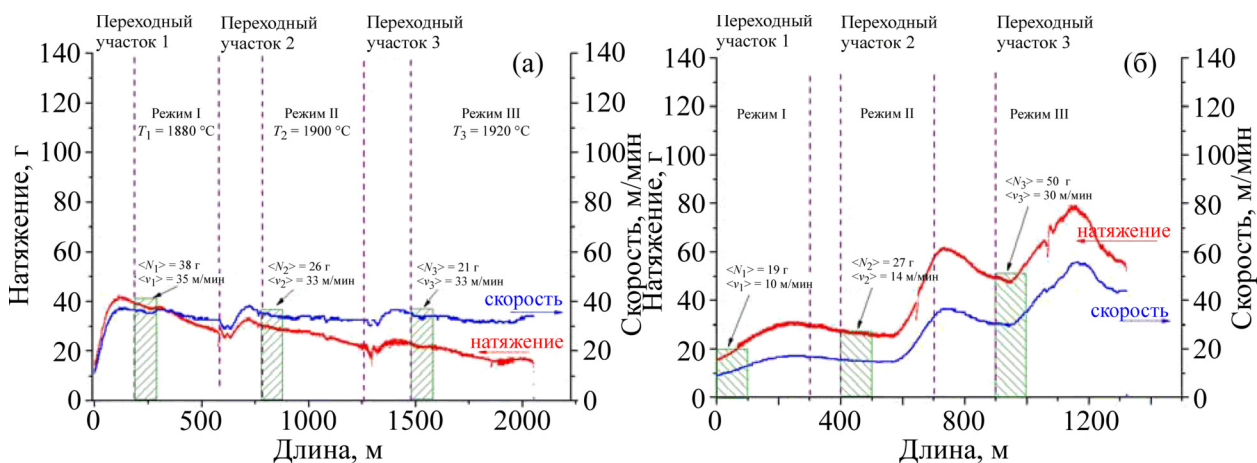


Рис. 2: Изменение параметров вытяжки по длине ВС, вытянутых из преформ (а) F1 и (б) F3 [7].

Все ВС были облучены в НИЦ “Курчатовский институт” на установке ГУТ-200М с активным источником ^{60}Co со средней энергией гамма-квантов 1.2 МэВ. В процессе (180 мин) γ -облучения происходила регистрация спектров РНП в спектральном диапазоне 900–1700 нм при помощи спектрометра на линейке диодов InGaAs NIR512 фирмы “Ocean Optics”. Максимальная поглощенная доза составила 82 кГр (SiO_2) при мощности дозы 7.6 Гр/с. Облучение проводилось при комнатной температуре.

Результаты и их обсуждение. На рис. 3 представлена зависимость РНП при поглощенной дозе 2.5 кГр и мощности дозы 7.4–7.6 Гр/с на длине волны $\lambda = 1550 \text{ нм}$ от обратной температуры (а) и от натяжения при вытяжке (б). При этой дозе, как оказалось, достигает максимума РНП, связанное с автолокализованными дырками. Видно, что зависимость РНП от обратной температуры на рис. 3(а) близка к экспоненциальной в температурном интервале 1780–1880 $^\circ\text{C}$, отклонение от которой можно связать с различными натяжением и скоростью, которые также влияют на РНП, однако в гораздо меньшей степени. При увеличении натяжения и скорости при фиксированной температуре (световоды F4Mx и F3Mx, рис. 3(б)) происходит увеличение РНП всего на 15–20%,

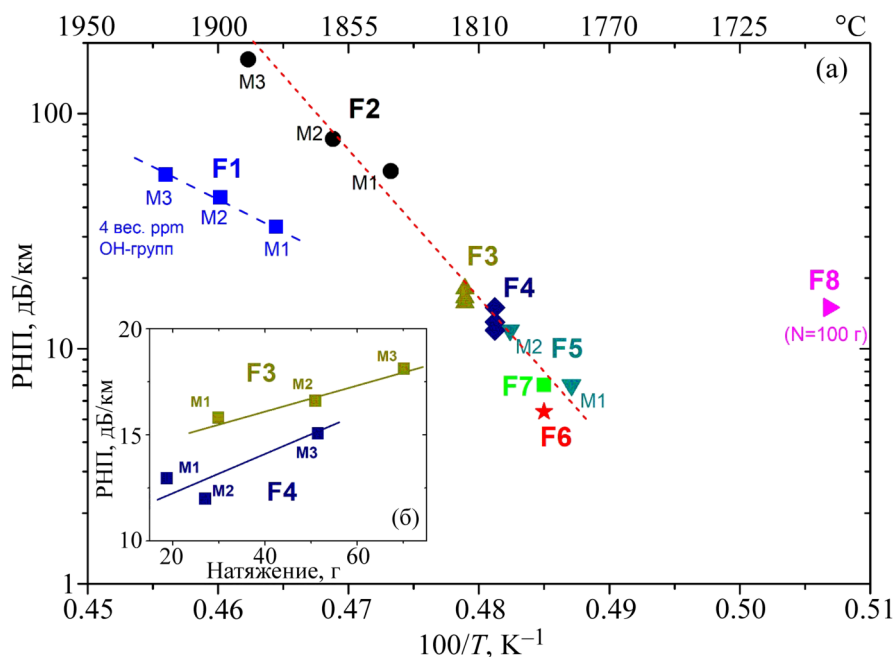


Рис. 3: Зависимость РНП при поглощенной дозе 2.5 кГр (мощности дозы 7.4–7.6 Гр/с) на длине волны $\lambda = 1550$ нм от обратной температуры (а) и от натяжения при вытяжке (б).

а уменьшение температуры вытяжки с 1890 до 1780 °С приводит к снижению РНП более чем на порядок величины. Дальнейшее понижение температуры до $T = 1700$ °С вызывает рост РНП, что, по-видимому, связано уже с большим натяжением – 100 г (табл. 1).

Понятен физический смысл резкой зависимости РНП от температуры: чем она больше, тем больше степень деформированности сетки расплавленного стекла, которая практически не меняется при быстром остывании ВС. Напомним, что именно деформации сетки стекла являются предшественниками автолокализованных дырок.

Отметим зависимость РНП от температуры при вытяжке для световода F1Mx, которая располагается ниже, чем для ВС F2Mx, несмотря на то, что температура вытяжки для F1M2 и F1M3 больше, чем для F2M3 (рис. 3(а)). Очевидно, что это связано с большим содержанием ОН-групп в ВС F1Mx (3–4 ppm), что, как известно, способствует подавлению поглощения автолокализованных дырок.

Выводы. Основным параметром вытяжки, влияющим на РНП в световодах с сердцевиной из нелегированного кварцевого стекла и фторсиликатной светоотражающей оболочкой является температура. Так, при уменьшении температуры печи на ~ 100 °С

происходит уменьшение РНП на длине волны $\lambda = 1.55$ мкм, определяющееся, в основном, автолокализованными дырками на немостикивых p -орбиталях атомов кислорода сетки, более чем на порядок величины. Натяжение и скорость также влияют на РНП, но в гораздо меньшей степени. Наличие даже малой добавки ОН-групп (порядка единиц вес. %) ослабляет зависимость РНП от температуры вытяжки, а уровень РНП при этом уменьшается.

Работа поддержана Министерством образования и науки Российской Федерации. Проект № RFMEFI60417X0183.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] D. L. Griscom, *J. Non. Cryst. Solids* **149**, 137 (1992).
- [2] K. Aikawa et al., US Patent 7440673 B2, 21.10.2008.
- [3] S. Girard et al., *J. Non. Cryst. Solids* **352**, 2637 (2006).
- [4] A. Alessi et al., *J. Lightwave Technol.* **30**, 1726 (2012).
- [5] A. L. Tomashuk et al., *J. Lightwave Technol.* **32**, 213 (2014).
- [6] P. F. Kashaykin et al., *J. Lightwave Technol.* **33**, 1788 (2015).
- [7] P. F. Kashaykin et al., *Proc. SPIE* **10681**, 1068110 (2018).

Поступила в редакцию 7 октября 2019 г.

После доработки 7 октября 2019 г.

Принята к публикации 14 ноября 2019 г.