

09.5

Фоточувствительность иттербиевых волоконных световодов с сердцевиной из кварцевого стекла с добавкой алюминия и фосфора

© А.А. Рыбалтовский, О.В. Бутов, Е.А. Савельев,
Ю.К. Чаморовский

Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова (ИРЭ) РАН,
Москва

E-mail: rybaltovsky@yandex.ru

Поступило в Редакцию 20 ноября 2015 г.

Обнаружен эффект фотоиндуцированного наведения показателя преломления в активных световодах с составом сердцевины $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{P}_2\text{O}_5/\text{Yb}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ при воздействии лазерного УФ-излучения с длиной волны 193 nm. Установлена ключевая роль водородной обработки активных световодов с целью радикального (почти на два порядка) повышения их фоточувствительности. Продемонстрирована возможность формирования внутриволоконных брэгговских решеток с коэффициентом отражения $> 99\%$, перспективных для использования в резонаторах волоконных лазеров в качестве зеркал-отражателей.

Волоконные световоды, активированные ионами иттербия (Yb^{3+}), широко применяются в настоящее время при изготовлении волоконных лазеров для диапазона длин волн 980–1100 nm. В качестве материала сердцевины активных световодов используется алюмо- или фосфосиликатное стекло. Добавки фосфора и алюминия в кварцевое стекло значительно улучшают люминесцентные свойства редкоземельных активаторов, препятствуя их кластеризации [1,2]. В том случае, когда

требуются высокие (1–2 mol.%) концентрации редкоземельных активаторов при минимальной степени кластеризации, хорошие результаты дает одновременное легирование диоксида кремния оксидами алюминия и фосфора ($\text{Al}_2\text{O}_3/\text{P}_2\text{O}_5/\text{Yb}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$) [3,4]. Ключевым элементом волоконного лазера являются внутриволоконные брэгговские решетки показателя преломления, выполняющие функцию зеркал-отражателей в резонаторе. Как правило, для изготовления (записи) брэгговских решеток используется лазерное излучение УФ-диапазона длин волн: 248, 244 или 193 nm [5]. При этом световод должен обладать достаточной фоточувствительностью. Однако имеющиеся в литературе данные [6] свидетельствуют о довольно слабой чувствительности активных световодов с составом сердцевины $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{P}_2\text{O}_5/\text{Yb}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ даже к коротковолновому лазерному излучению с длиной волны 193 nm. Повысить фоточувствительность и тем самым эффективность записи брэгговских решеток УФ-излучением позволяет добавление в состав стекла германия, но в этом случае в активных световодах начинает проявляться эффект фотопотемнения, приводящий к быстрой деградации выходных характеристик волоконного лазера в процессе его работы [7,8]. Недавние исследования световодов с составом сердцевины $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{P}_2\text{O}_5/\text{Yb}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ (не содержащего GeO_2) выявили их повышенную устойчивость к фотопотемнению [9]. Можно констатировать поэтому, что проблема фоточувствительности активных световодов, не содержащих германия в стекле сердцевины, остается достаточно актуальной.

В данной работе мы представляем результаты экспериментального исследования фоточувствительности специально разработанных высоколегированных иттербиевых световодов с сердцевиной из кварцевого стекла с добавкой алюминия и фосфора при записи в них брэгговских решеток излучением эксимерного ArF-лазера с длиной волны генерации 193 nm. Анализируется возможность создания на основе полученных световодов и записанных в них брэгговских решеток полнофункционального резонатора для волоконного лазера.

Одномодовый волоконный световод стандартного диаметра (125 μm) был вытянут для наших экспериментов из заготовки, синтезированной методом плазмохимического осаждения (SPCVD). В полученном световоде интенсивность основной полосы поглощения ионов иттербия с максимумом на длине волны 975 nm была равна 3.7 dB/mm. Данные о химическом составе стекла сердцевины, а также разнице показателей

Основные характеристики исследованных образцов

Химический состав стекла сердцевины	Разница ПП сердцевины и оболочки	Al ₂ O ₃ , mol. %	P ₂ O ₅ , mol. %	Yb ₂ O ₃ , mol. %
Al ₂ O ₃ /P ₂ O ₅ /Yb ₂ O ₃ /SiO ₂	0.013	10	6.2	1.3

преломления (ПП) между сердцевиной и оболочкой из нелегированного SiO₂ представлены в таблице.

Фоточувствительность световода оценивалась по отношению к облучению лазерным излучением с длиной волны 193 nm. В качестве источника такого излучения применялся эксимерный ArF-лазер модели Coherent COMPexPro. Облучение образцов световода проводилось лазерными импульсами длительностью 20 ns, следующими с частотой повторения 20 Hz, плотность энергии в импульсе составляла ~ 150 mJ/cm².

Критериями фоточувствительности служил наведенный показатель преломления, определяемый по спектру фотоиндуцированной брэгговской решетки с резонансной длиной волны ~ 1550 nm, а также путем регистрации изменения профиля показателя преломления на длине волны 654 nm, вызванного однородным лазерным облучением отрезка световода.

Запись внутриволоконных брэгговских решеток осуществлялась с использованием фазовой маски с периодом 1070 nm. Спектр пропускания световода при записи в нем брэгговской решетки регистрировался при помощи анализатора спектра Hewlett-Packard 86142A и суперлюминесцентного диода в качестве источника света.

Измерение профиля ПП проводилось как в облученных образцах световода, так и в необлученных при помощи оптического анализатора EXFONR-9200HR с разрешением по показателю преломления $5 \cdot 10^{-5}$. Подготовка облученных образцов заключалась в равномерной засветке пучком эксимерного лазера зачищенных участков световода длиной ~ 15 mm. Значения параметров лазерного пучка и время экспозиции были такими же, как и при записи брэгговских решеток. Для измерения профиля ПП подвергнутый облучению световод скалывался в центре облученной области.

1* Письма в ЖТФ, 2016, том 42, вып. 10

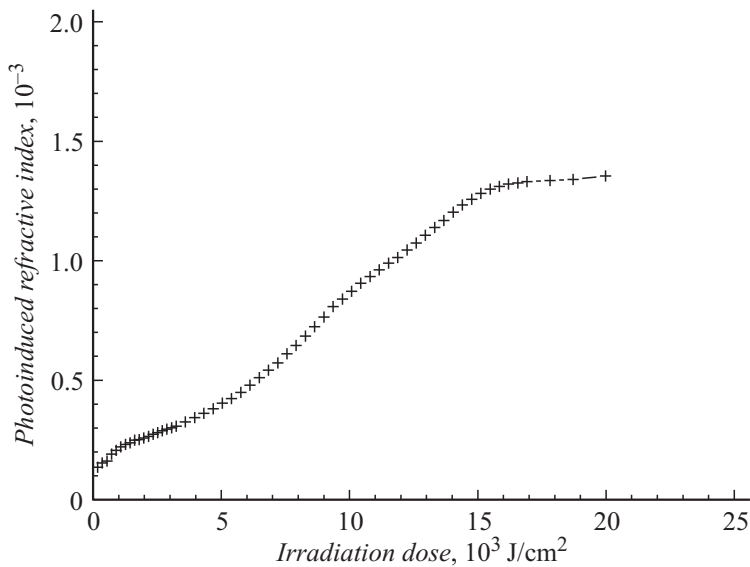


Рис. 1. Зависимость наведенного показателя преломления сердцевины световода от дозы УФ-облучения.

Отдельно исследовалось влияние растворенного в стекле молекулярного водорода на фоточувствительность. Для этого световод выдерживался в газостате в атмосфере H_2 при давлении 8 МПа и температуре $70^\circ C$ в течение 7 дней. При данных условиях обеспечивалось полное „насыщение“ сетки стекла образцов молекулами водорода. Облучение образцов, а также регистрация в них наведенного ПП проводились при комнатной температуре.

Эксперименты показали, что эффективная запись брэгговской решетки и соответственно высокая фоточувствительность возможны лишь в „насыщенных водородом“ образцах световода, в то время как без использования этой методики на световоде удалось записать решетку глубиной всего ~ 0.1 dB, что соответствует значению наведенного ПП примерно $5 \cdot 10^{-5}$. Несмотря на то что в не подвергавшемся водородной обработке образце появление брэгговской решетки с пиком отражения ~ 0.1 dB было зарегистрировано уже в первую минуту после

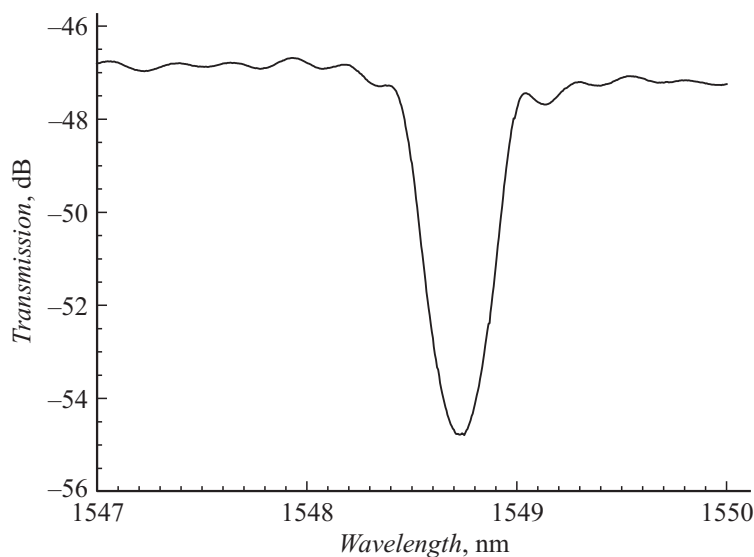


Рис. 2. Спектр пропускания брэгговской решетки, записанной в сердцевине световода при дозе УФ-облучения 12.6 kJ/cm^2 .

начала записи (т.е. при дозах облучения всего порядка 100 J/cm^2), при дальнейшей экспозиции роста коэффициента отражения в пике не происходило. Совсем иная динамика наведения ПП наблюдалась при записи на отрезке световода, выдержанном в атмосфере H_2 . Как видно из рис. 1, достигнутое значение наведенного показателя преломления составило $1.3 \cdot 10^{-3}$, что сопоставимо по величине с германосиликатными световодами, традиционно использующимися при записи брэгговских решеток для волоконных лазеров [10,11]. Форма кривой дозой зависимости на рис. 1 является „S-образной“, что косвенно указывает на двухэтапный механизм наведения ПП, ранее обнаруженный в „насыщенных водородом“ германо- и фосфоросиликатных световодах [12,13].

Спектр пропускания одной из брэгговских решеток, записанной на участке 3 mm „насыщенного“ H_2 световода при дозе УФ-облучения 12.6 kJ/cm^2 , показан на рис. 2. Сопоставив форму брэгговского пика с приведенными в [5] аналогичными спектрами, считаем, что полученные в данной работе решетки вполне удовлетворяют критериям

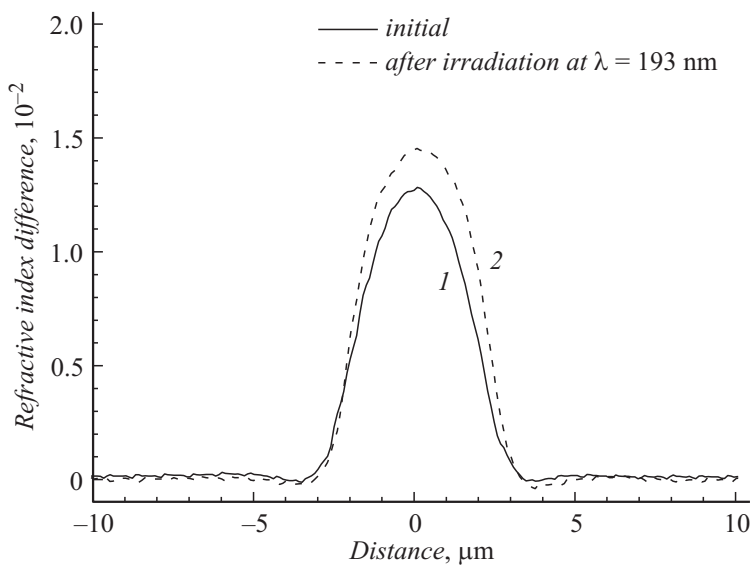


Рис. 3. Профили показателя преломления сердцевины световода до 1 и после 2 УФ-облучения.

использования в схемах волоконных лазеров. Достигнутое значение ПП на уровне $1.3 \cdot 10^{-3}$ соответствует коэффициенту отражения ($\sim 92\%$) трехмиллиметровой решетки, выполняющей функцию „глухого“ зеркала лазерного резонатора. С практической точки зрения важно отметить, что простое двукратное увеличение длины решетки с 3 до 6 mm позволит повысить ее коэффициент отражения до 99.9% при таком же значении наведенного ПП.

Известно, что величина наведенного ПП, вычисляемого из коэффициента отражения брэгговской решетки, в значительной степени зависит от контрастности и стабильности интерференционной картины на протяжении всего времени записи решетки. Поэтому интерес представляют альтернативные методики регистрации наведенного ПП. На рис. 3 приведены профили ПП сердцевины необлученного 1 и облученного дозой 20 kJ/cm^2 2 образца световода. С целью исключить искажения формы профиля ПП находящимся в сетке стекла молекуляр-

ным водородом измерения облученного образца были сделаны спустя 3 недели после процедуры УФ-облучения, поскольку за это время при комнатной температуре водород полностью выходит из световода. На рис. 3 видна разница между ПП 1 и 2 на уровне $\sim 1.7 \cdot 10^{-3}$, что является близким к значению наведенного ПП, вычисленному по интенсивности пика брэгговской решетки ($1.3 \cdot 10^{-3}$).

Согласно известному соотношению Крамерса–Кронига, увеличение ПП в длинноволновой части спектра может быть объяснено появлением дополнительных полос поглощения в УФ-части спектра. Ранее в работе [14] было установлено, что облучение на длине волны 193 nm образцов заготовок, легированных Yb_2O_3 , приводит к фотоиндуцированной трансформации части трехвалентных ионов иттербия Yb^{3+} в двухвалентные Yb^{2+} . Поскольку кванты излучения с длиной волны 193 nm имеют сравнительно высокую энергию 6.4 eV, то механизмом трансформации $\text{Yb}^{3+} \rightarrow \text{Yb}^{2+}$ является, по-видимому, прямое возбуждение УФ-квантами ионов Yb^{3+} в состояние с переносом заряда. Согласно [15], с поглощением ионов Yb^{2+} связано появление в спектре полос с максимумами на 3.1, 3.7, и 4.1 eV. Кроме того, следует отметить сильную зависимость динамики наведения ПП и концентрации ионов Yb^{2+} от присутствия молекул H_2 в облучаемом образце. Как было продемонстрировано ранее в работе [15], при одинаковых параметрах УФ-облучения интенсивность люминесценции Yb^{2+} оказывается на порядок выше в образцах, предварительно выдержанных в атмосфере водорода. Следовательно, есть основания полагать, что наблюдаемое нами изменение ПП сердцевины световода на величину $\sim 10^{-3}$ обусловлено по большей части модификацией сетки стекла ионами Yb^{2+} .

Таким образом, было продемонстрировано фотоиндуцированное наведение ПП в активных световодах с составом сердцевины $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{P}_2\text{O}_5/\text{Yb}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ при воздействии лазерного УФ-излучения с длиной волны 193 nm. Установлено, что выдерживание световодов в атмосфере водорода приводит к увеличению их фоточувствительности до уровня, достаточного для эффективной записи в них контрастных брэгговских решеток. Достигнутое значение наведенного показателя преломления $\sim 10^{-3}$ является достаточным для формирования на участке световода длиной несколько миллиметров глубоких решеток с коэффициентом отражения $> 99\%$, которые могут быть использованы в качестве эффективных зеркал-отражателей в волоконных лазерах.

Работа была выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты офи_м 14-29-08170 и офи_м 14-29-08195).

Авторы благодарят К.М. Голанта за помощь в изготовлении экспериментальных образцов, полезные обсуждения механизма наведения показателя преломления, а также за ряд ценных замечаний по тексту публикации.

Список литературы

- [1] *Auzel F., Goldner P.* // Opt. Mater. 2001. V. 16. P. 93.
- [2] *Lagsgaard J.* // Phys. Rev. B. 2002. V. 65. P. 174 114.
- [3] *Kholodkov A.V., Golant K.M.* // Tech. Phys. 2005. V. 50. N 6. P. 719.
- [4] *Kirchhof J., Under S., Schwuchow A. et al.* // J. Non-Cryst. Solids. 2006. V. 352. P. 2399.
- [5] *Hill K.O., Meltz G.* // J. Lightwave Technol. 1997. V. 15. N 8. P. 1263.
- [6] *Niay P., Douay M., Bernage P.* // Opt. Mater. 1999. V. 11. P. 115.
- [7] *Koponen J., Söderlund M.J., Tammela S.K.T. et al.* // SPIE Int. Soc. Opt. Eng. 2005. V. 5990. P. 599 008.
- [8] *Gebavi H., Robin T., Mechin D. et al.* // J. Optics. 2015. V. 17. P. 035 603.
- [9] *Likhachev M., Aleshkina S., Shubin A. et al.* // The European Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO) Conference Digest. Munich. Germany. 2011. P. CJ_P24.
- [10] *Курков А.С., Карпов В.И., Лантев А.Ю. и др.* // Квантовая электроника. 1999. Т. 27. № 3. С. 239.
- [11] *Mo S., Xu S., Huang X. et al.* // Opt. Express. 2013. V. 21. N 10. P. 12 419.
- [12] *Canning J.* // Opt. Fiber Technol. 2000. V. 6. P. 275.
- [13] *Ларионов Ю.В., Рыбалтовский А.А., Семенов С.Л. и др.* // Квантовая электроника. 2002. Т. 32. № 2. С. 124.
- [14] *Рыбалтовский А.А., Умников А.А., Бобков К.К. и др.* // Квантовая электроника. 2013. Т. 43. № 11. С. 1037.
- [15] *Бобков К.К., Рыбалтовский А.А., Вельмискин В.В. и др.* // Квантовая электроника. 2014. Т. 44. № 12. С. 1129.