

Радиационно-стойкий волоконный световод на основе кварцевого стекла, легированного эрбием

К.В.Зотов, М.Е.Лихачев, А.Л.Томашук, М.М.Бубнов, М.В.Яшков, А.Н.Гурьянов

Продемонстрирована возможность многократного увеличения срока службы эрбиевых световодов в условиях повышенного радиационного фона за счет насыщения сетки стекла световода молекулярным водородом. Обратная диффузия водорода из световода в процессе эксплуатации была практически устранена в результате нанесения на световод герметичного углеродного покрытия. Показано, что использование данной методики позволяет существенно замедлить деградацию генерационных свойств эрбиевого световода в условиях, характерных для космических применений.

Ключевые слова: эрбиевый волоконный лазер, молекулярный водород, радиационная стойкость.

1. Введение

Активные волоконные световоды на основе кварцевого стекла, легированного эрбием (эрбиевые световоды), нашли широкое применение в волоконных усилителях для систем оптической связи [1, 2], в волоконных лазерах [2] и суперлюминесцентных источниках для оптических датчиков [3], в том числе в волоконно-оптических гироскопах [3, 4].

В настоящее время изучается возможность использования эрбиевых световодов в системах оптической связи между спутниками и между спутниками и Землей [5] (на длине волны $\lambda = 1.55$ мкм в области генерации эрбиевых световодов имеется окно прозрачности атмосферы [6]) и в суперлюминесцентных источниках света в волоконно-оптических гироскопах на спутниках [7]. Возможность этих применений зависит от решения проблемы радиационной стойкости эрбиевых световодов. Хотя доза облучения, которую получают световоды в космосе, будет не столь велика (не более 2 кГр за время эксплуатации спутника в течение 10 лет [7]), для световодов, легированных редкоземельными элементами, в силу их крайне высокой радиационной чувствительности, ожидаются недопустимо высокие оптические радиационно-наведенные потери (РНП) [7–9]. При этом к существенному повышению радиационной чувствительности световода приводит легирование не только редкоземельным элементом, но и оксидом алюминия [9], который требуется для повышения растворимости редкоземельного элемента в кварцевом стекле с целью подавления его кластеризации. Низкая радиационная стойкость эрбиевых световодов ставит под вопрос возможность их применения в космосе.

Ранее нами был продемонстрирован способ существенного повышения радиационной стойкости световодов

с сердцевиной из нелегированного кварцевого стекла для применений в атомной энергетике при характерных дозах облучения $\sim 10^6$ Гр [10–14]. Данные световоды изготавливались с герметичным покрытием (алюминиевым или углеродным), а затем их стекло насыщалось газом молекулярного водорода при высоком давлении и температуре. Под действием ионизирующего излучения атомы водорода образуют химические связи на месте разорванных γ -излучением связей в сетке стекла, тем самым «залечивая» радиационные центры окраски и, соответственно, существенно снижая РНП. Следует также отметить, что при комнатной температуре H_2 практически не выходит из стекла световода с герметичным покрытием: его концентрация уменьшается за год не более чем на несколько процентов.

Цель настоящей работы состояла в исследовании возможности применения вышеописанного способа для повышения радиационной стойкости эрбиевого световода и оценки полученного выигрыша в радиационной стойкости.

2. Эксперимент

Для исследований был изготовлен одномодовый световод с высокой концентрацией эрбия (~ 1200 ppm) и молярной концентрацией оксида алюминия $\sim 6.5\%$ в сердцевине. Световод с сердцевиной такого состава имеет высокий коэффициент поглощения излучения накачки (13 дБ/м на длине волны 980 нм) и низкий уровень кластеризации, что позволяет создать волоконный лазер с высоким КПД на относительно коротком (метровом) отрезке световода. В процессе вытяжки на световод наносилось герметичное углеродное покрытие [14].

Схема эксперимента по измерению эффективности генерации световодов приведена на рис. 1. Резонатор волоконного лазера с одной стороны образован приваренной к активному световоду брэгговской волоконной решеткой показателя преломления с коэффициентом отражения R , близким к 100% на резонансной длине волны 1550 нм, с другой – сколом торца эрбиевого световода с 4% коэффициентом отражения. Для накачки использо-

К.В.Зотов, М.Е.Лихачев, А.Л.Томашук, М.М.Бубнов. Научный центр волоконной оптики РАН, Россия, 119333 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: tomashuk@fo.gpi.ru
М.В.Яшков, А.Н.Гурьянов. Институт химии высокочистых веществ РАН, Россия, 603950 Нижний Новгород, ул.Тропинина, 49

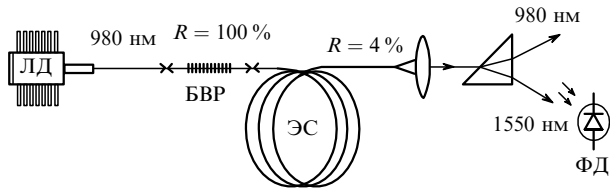


Рис.1. Схема экспериментальной установки для измерения эффективности генерации световода, легированного оксидом эрбия: ЛД – полупроводниковый лазер на длину волны 980 нм с волоконным выходом; БВР – брэгговская волоконная решетка; ЭС – эрбиевый световод; ФД – германиевый фотодиод.

вался одномодовый полупроводниковый лазер ($\lambda_p = 980$ нм) с волоконным выходом. Излучение накачки и сигнала ($\lambda_s = 1550$ нм) разделялось при помощи кварцевой призмы. Во всех экспериментах длина эрбиевого световода была одинаковой и составляла 120 см. Измерялась зависимость выходной мощности лазера от входной мощности накачки и определялась дифференциальная эффективность генерации.

Как известно, одним из негативных последствий насыщения эрбиевых световодов водородом является повышение их оптических потерь [15]. Для определения степени влияния данного фактора два отрезка исследуемого световода насыщались газом H_2 путем помещения их в водородную атмосферу при повышенной температуре. Один отрезок световода выдерживался в водороде при давлении газа 5 МПа, другой – 110 МПа. Время выдержки световодов было таким, чтобы при этих давлениях была достигнута максимально возможная концентрация H_2 в стекле световодов. Измерения показали, что дифференциальная эффективность генерации после насыщения световода водородом при давлении $P_{H_2} = 5$ МПа снижалась незначительно (с 43 % до 40 %), тогда как в световоде, насыщенном при $P_{H_2} = 110$ МПа, ее падение было существенным (в 2 раза). Поэтому в дальнейших экспериментах по изучению радиационной стойкости использовался лишь световод, насыщенный водородом при давлении 5 МПа.

Отрезки активных световодов – ненасыщенного водородом (Св) и насыщенного водородом при давлении 5 МПа (Св–Н), были подвергнуты γ -облучению от источника ^{60}Co при комнатной температуре до дозы 2.0 кГр при мощности облучения 0.028 Гр/с. Чтобы избежать заметной релаксации РНП в процессе измерений, спектры оптических потерь в этих световодах были измерены через день после завершения облучения.

Повторно спектры оптических потерь измерялись через 4 месяца после облучения, тогда же были измерены и генерационные свойства этих световодов.

3. Результаты и их обсуждения

На рис.2 приведены спектры оптических потерь отрезков эрбиевых световодов, Св и Св–Н, до и после облучения, а на рис.3 – РНП этих двух световодов, измеренные по разности спектров до и после облучения.

Как и следовало ожидать, в спектре оптических потерь световода Св–Н до облучения проявились характерные сливающиеся полосы поглощения молекулярного водорода [15] (рис.2). Однако это поглощение несущественно по сравнению с РНП. По амплитудам полос поглощения на длинах волн 1080 и 1240 нм можно оценить

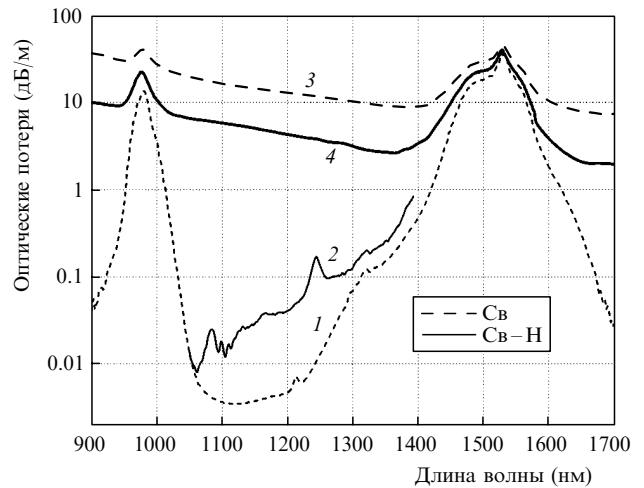


Рис.2. Оптические спектры потерь световодов Св и Св–Н до облучения (1, 2) и после него (3, 4) соответственно.

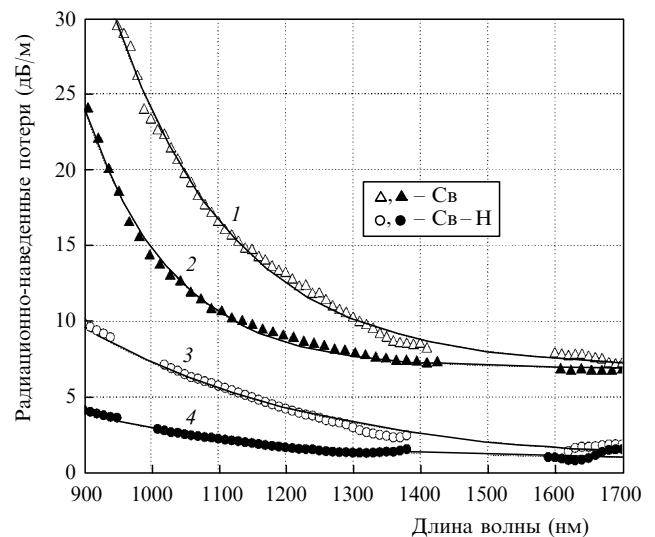


Рис.3. РНП для световодов Св (1, 2) и Св–Н (3, 4), измеренные через 1 день (1, 3) и через 4 месяца (2, 4) после облучения соответственно. Сплошными кривыми показана аппроксимация наведенных потерь экспоненциально спадающими функциями.

концентрацию H_2 в стекле световода Св–Н как $\sim 1 \times 10^{19}$ см $^{-3}$ [16]. Видно также, что насыщение стекла световода молекулярным водородом позволило в несколько раз уменьшить РНП (рис.2 и 3). Таким образом, как и в случае световода с сердцевиной из нелегированного кварцевого стекла, в эрбиевом световоде водород входит в сетку стекла и «залечивает» радиационные центры окраски.

Спустя 4 месяца после облучения было отмечено снижение РНП в обоих световодах (рис.3) вследствие термического распада радиационных центров окраски. При этом распад в световоде Св–Н проходил быстрее и потери в нем были в 5–6 раз меньше, чем в Св. Увеличение скорости распада в Св–Н может быть обусловлено дополнительной диффузией водорода из оболочки в сердцевину. Следует отметить, что РНП через 4 месяца после облучения более точно соответствуют РНП при нахождении световода в космических условиях, где мощность дозы многократно меньше, чем в нашем эксперименте. Интересно, что измерения, проведенные через 8 месяцев после облучения, уже не выявили дальнейшего уменьше-

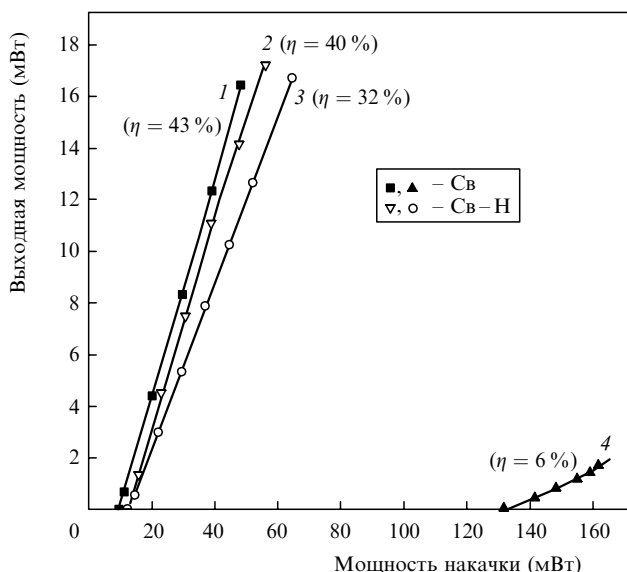


Рис.4. Зависимости выходной мощности генерации лазеров на основе световодов Св (1, 4) и Св-Н (2, 3) ($\lambda_s = 1530$ нм) от мощности накачки ($\lambda_p = 980$ нм) до облучения (1, 2) и через 4 месяца после него (4, 3) соответственно.

ния наведенных потерь. Это означает, что распад центров окраски практически прекратился, а уровень РНП стабилизировался.

Результаты измерений дифференциальной эффективности η генерации световодов, проведенных через 4 месяца после облучения, представлены на рис.4. При облучении дозой 2 кГр эффективность генерации η световода Св-Н уменьшилась с 40% до 32%, тогда как η световода Св снизилась почти в 5 раз, а порог генерации возрос примерно в 12 раз. Таким образом, световод, предварительно не насыщенный водородом, стал практически неработоспособным.

Некоторого продления срока службы эрбиевого световода в космических условиях можно достигнуть за счет накачки на $\lambda_p = 1480$ нм, где РНП заметно меньше, чем на $\lambda_p = 980$ нм (см. рис.2 и 3). Однако накачка на 1480 нм дает значительно меньший эффект, чем насыщение эрбиевого световода водородом.

Уменьшение эффективности генерации лазера, схема которого представлена на рис.1, можно оценить, подсчитав поглощенную в резонаторе мощность сигнала и накачки. При этом мы исходим из предположений, что при малой дозе облучения (и, следовательно, малых наведенных оптических потерях) выходная мощность и распределение сигнала и накачки вдоль резонатора меняются слабо, а кроме того, распределение мощности накачки по длине световода близко к экспоненциальному.

Результатирующее выражение для дифференциальной эффективности генерации лазера, полученное с учетом вышеперечисленных предположений, имеет следующий вид:

$$\eta = \eta_0(1 - C_p \alpha_{RIA_p})(1 - C_s \alpha_{RIA_s}), \tag{1}$$

где η_0 – дифференциальная эффективность генерации лазера, измеренная до облучения световода; α_{RIA_p} и α_{RIA_s} – наведенное после облучения поглощение на длине волны накачки и сигнала соответственно; C_s и C_p – константы, определяемые выражениями

$$C_s = \left[\frac{\ln 10}{5} \frac{L}{\ln(1/R)} \right], \tag{2}$$

$$C_p = \left\{ \frac{1}{\gamma \alpha_p} \left[1 - \exp \left(- \frac{\ln 10}{10} \gamma \alpha_p L \right) \right] \right\}. \tag{3}$$

Здесь L – длина резонатора лазера; $R = 4\%$ – коэффициент отражения мощности сигнала от перпендикулярного скола водокна; α_p – поглощение накачки при малом уровне сигнала в необлученном световоде; γ – экспериментально определяемый коэффициент, учитывающий снижение скорости поглощения накачки за счет просветления световода при мощной накачке.

При накачке на $\lambda = 980$ нм, оптимальной длине резонатора $L = 1.2$ м и $\gamma = 0.65$ были получены значения $C_s \approx 0.17$, $C_p \approx 0.1$. Поскольку поглощение накачки на 980 и 1480 нм примерно одинаковое (см. кривую 1 на рис.1), то при накачке на $\lambda_p = 1480$ нм можно использовать те же значения L и γ , а следовательно, и C_s , C_p , что были определены для накачки на $\lambda_p = 980$ нм. Почти в два раза большая чувствительность эффективности генерации к оптическим потерям на длине волны 1550 нм обусловлена тем, что в использованной схеме эксперимента излучение сигнала проходит в два раза больший путь, нежели излучение накачки.

В силу сделанных предположений, при высоком уровне наведенных потерь рассчитанная по соотношению (1) эффективность существенно отличается от экспериментально измеренной. Так, при оптических потерях, соответствующих кривой 4 на рис.2, расчет дает уменьшение η до 23%, тогда как реально измеренная эффективность составляет 32%. Тем не менее формула (1) позволяет приблизительно определить характерную дозу облучения, при которой эффективность генерации начинает снижаться.

Оценки показывают, что выходная мощность лазера на основе эрбиевого световода, насыщенного водородом, при накачке на 980 нм уменьшится на 10% при дозе облучения 0.4 кГр, что соответствует примерно двум годам службы такого световода в космосе. Еще раз подчеркнем, что данная оценка дает лишь характерную дозу и время, после которых эффективность лазерной генерации начинает снижаться, однако при в 5 раз большем (10 лет) времени службы световод все еще остается работоспособным (измеренная эффективность генерации снижается всего лишь с 41% до 32%). Для сравнения укажем, что в случае световода, предварительно не насыщенного водородом, при прочих аналогичных условиях эта доза составляет 63 Гр, что соответствует 4.5 месяцам работы световода в космосе.

Для определения срока службы световода при накачке на $\lambda_p = 1480$ нм необходимо ввести новые значения γ и α_p , а также другое значение оптимальной длины световода L . Но поскольку для исследованного в работе световода разность значений α_p при накачке на длинах волн 980 и 1480 нм невелика (около 10%), то в расчетах можно использовать прежние значения L и γ .

По нашим оценкам, при накачке на $\lambda_p = 1480$ нм уменьшение мощности волоконного лазера на 10% от начальной произойдет через 6.5 месяцев работы в космосе, что соответствует дозе облучения 107 Гр, т.е. по сравнению со случаем накачки на $\lambda_p = 980$ нм срок службы увеличится всего в 1.5 раза. Столь небольшое различие обусловлено большим вкладом в уменьшение эффективности генерации оптических потерь на длине вол-

Табл.1.

Световод	Насыщение водородом	Доза радиации, при которой η уменьшается на 10 % (в скобках указано оценочное время нахождения световода в космосе)	
		$\lambda_p = 980$ нм	$\lambda_p = 1480$ нм
Св	–	63 Гр (4.5 мес.)	107 Гр (6.5 мес.)
Св–Н	при $P = 5$ МПа	0.4 кГр (2 года)	0.7 кГр (3.5 года)

ны $\lambda_s = 1530$ нм. Предварительное насыщение световода водородом (как и в случае накачки на $\lambda_p = 980$ нм) увеличивает срок службы примерно в 6 раз – до 3.5 лет, что соответствует полученной дозе 0.7 кГр.

Результаты оценок дифференциальной эффективности генерации при накачке на $\lambda_p = 980$ и 1480 нм представлены в табл.1.

Расчеты и эксперименты показывают, что насыщение водородом световода с герметичным покрытием, препятствующим выходу H_2 из стекла, позволяет многократно продлить срок службы эрбиевого волоконного лазера в условиях космоса.

Величина продемонстрированного радиационного упрочнения эрбиевого световода не является, по-видимому, предельно возможной. Дополнительное увеличение радиационной стойкости можно получить за счет некоторого повышения концентрации H_2 , которое при этом не должно привести к сильному поглощению излучения молекулярным водородом. Представляет также интерес использование молекулярного дейтерия вместо водорода. Полосы поглощения D_2 смещены в длинноволновую область относительно полос H_2 , что может оказаться полезным.

4. Заключение

Показано, что насыщение эрбиевого световода водородом уменьшает радиационно-наведенное поглощение света в ближнем ИК диапазоне в несколько раз. Дифференциальная эффективность лазерной генерации после γ -облучения дозой до 2 кГр световода, насыщенного H_2 , уменьшается незначительно, тогда как световод без H_2 практически утрачивает генерационные свойства. Численные оценки показывают, что насыщение водородом позволяет продлить срок эксплуатации активного световода в космических условиях примерно в 6 раз.

Существенный выигрыш в радиационной стойкости, который продемонстрирован для эрбиевого волоконного световода, содержащего молекулярный водород в стекле и имеющего герметичное покрытие, указывает на перспективность использования таких световодов для космических применений.

Авторы благодарят С.Л.Семенова за вытяжку световода с углеродным покрытием, А.Ф.Косолапова и С.Н.Клямкина за насыщение стекла световодов молекулярным водородом, а также А.С.Куркова за помощь в анализе результатов экспериментов.

1. Desurvire E. *Erbium-doped Fiber Amplifiers, Principles and Applications* (New York: John Wiley and Sons, 1993).
2. Digonnet M.J.F. (Ed.). *Rare-Earth-Doped Fiber Laser and Amplifiers* (New York: Marcel Dekker, 2001).
3. Wysocki P.F., Digonnet M.J.F., Kim B.Y., Shaw H.J. *J. Lightwave Techn.*, **12** (3), 550 (1994).
4. Burns W.K., Chen C.L., Moeller R.P. *J. Lightwave Techn.*, **1** (1), 98 (1983).
5. Lambert S.G., Casey W.L. *Laser Communications in Space* (Norwood: Artech House, 1995).
6. *Справочник по лазерам*. Под ред. А.М.Прохорова (М.: Сов. радио, 1978, ч.1).
7. Williams G.M., Friebele E.J. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, **45** (3), 1531 (1998).
8. Rose T.S., Gunn D., Valley G.C. *J. Lightwave Techn.*, **19** (12), 1918 (2001).
9. Henschel H., Kohn O., Schmidt H.U., Kirchhof J., Unger S. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, **45** (3), 1552 (1998).
10. Томашук А.Л., Голант К.М., Дианов Е.М., Клямкин С.Н., Бубнов М.М., Семенов С.Л. Патент RU2222032. Приоритет от 29.06.2000.
11. Tomashuk A.L., Golant K.M., Dianov E.M., Medvedkov O.I., Plaksin O.A., Stepanov V.A., Stepanov P.A., Demenkov P.V., Chernov V.M., Klyamkin S.N. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, **47** (3), 693 (2000).
12. Tomashuk A.L., Bogatyrvov V.A., Dianov E.M., Golant K.M., Klyamkin S.N., Nikolin I.V., Zabezhaiov M.O. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **4547**, 69 (2002).
13. Brichard B., Tomashuk A.L., Bogatyrvov V.A., Fernandez A.F., Klyamkin S.N., Girard S., Berghmans F. *J. Non-Crystal. Sol.*, **353**, 466 (2007).
14. Bubnov M.M., Dianov E.M., Prokhorov A.M., Semjonov S.L., Shchegunyaev A.G., Kurkjian C.R. *Sov. J. Lightwave Commun.*, **2** (3), 245 (1992).
15. Marcerou J.F., Hervo J., Artigaud S., Fevrier H., Guitton P., Landais S. *Proc. ECOC'92* (Berlin, Germany, 1992, Vol. 1, Paper We P2.8, p. 497).
16. Stone J. *J. Lightwave Techn.*, **5** (5), 712 (1987).