

# Одночастотный волоконный лазер с резонатором, сформированным брэгговскими решетками, записанными в сердцевине активного композитного световода излучением K<sub>r</sub>F-лазера (248 нм)

О.Н.Егорова, О.И.Медведков, Е.С.Серегин, С.А.Васильев, С.Е.Сверчков, Б.И.Галаган, Б.И.Денкер, Г.Л.Даниелян, В.И.Пустовой, С.Л.Семенов

*Показана возможность создания одночастотного волоконного лазера с использованием световода нового типа, изготовленного методом спекания фосфатного стекла в трубке из кварцевого стекла (композитного световода). В световоде данного типа обнаружена фоточувствительность к лазерному излучению с длиной волны 248 нм. Резонатор волоконного лазера был изготовлен путем записи волоконных брэгговских решеток непосредственно в сердцевине композитного оптического волокна, активированного ионами эрбия. Получен устойчивый одночастотный линейно поляризованный режим генерации на длине волны 1559.5 нм с максимальной выходной мощностью ~3 мВт.*

**Ключевые слова:** волоконный одночастотный лазер, композитное оптическое волокно, фоточувствительность, волоконные брэгговские решетки.

## 1. Введение

Несмотря на то что волоконные одночастотные лазеры являются предметом исследований и разработок уже несколько десятилетий, интерес к этой теме не ослабевает [1, 2]. Значительные успехи в области создания одночастотных волоконных лазеров были достигнуты благодаря использованию световодов, целиком состоящих из фосфатного стекла [3], поскольку оно допускает введение редкоземельных ионов с высокой концентрацией. Высокие концентрации активных редкоземельных элементов позволяют получить высокий коэффициент усиления на единицу длины, что важно при создании одночастотных волоконных лазеров, для работы которых необходима малая длина резонатора.

В работах [4–7] была показана возможность получения высокой эффективности генерации при достаточно небольшой длине активного световода нового типа – композитного волоконного световода, изготовленного методом спекания фосфатного стекла в трубке из кварцевого стекла. Несмотря на то что в процессе вытяжки таких световодов происходит взаимная диффузия фосфатного и кварцевого стекол, из-за чего состав стекла сердцевины значительно изменяется, концентрации оксида фосфора и активных редкоземельных ионов в сердцевине все равно получаются намного больше, чем в световодах, обычно изготавливаемых методом осаждения кварцевого стекла из газовой фазы. Высокая концентрация активных

редкоземельных ионов в таких световодах делает возможным создание на их основе одночастотных волоконных лазеров. Благодаря оболочке из кварцевого стекла эти световоды предпочтительнее световодов, целиком состоящих из фосфатного стекла: они более устойчивы к воздействию внешней среды, их проще соединять со световодами из кварцевого стекла, а получаемые соединения надежны из-за отсутствия различий физико-химических свойств (в отличие от мест соединений световодов, сделанных из различных стекол).

В работе [8] нами была показана возможность изготовления одночастотного волоконного лазера, резонатор которого сформирован волоконными брэгговскими решетками, записанными непосредственно в сердцевине активного композитного световода излучением на длине волны 193 нм (ArF-лазер). Однако возникает вопрос: можно ли проводить запись брэгговских решеток при облучении на длине волны 248 нм (KrF-лазер)? Этот эксимерный лазер является самым удобным и поэтому фактически основным инструментом для записи брэгговских решеток в волоконных световодах. KrF-лазеры существенно надежнее, проще в эксплуатации, а их рабочая смесь имеет намного больший срок службы по сравнению с ArF-лазерами. В настоящей работе показано, что имеющаяся фоточувствительность композитного волоконного световода к излучению на длине волны 248 нм (KrF-лазер) позволяет формировать резонатор одночастотного волоконного лазера. При использовании композитного световода, активированного ионами эрбия, изготовлен одночастотный волоконный лазер, работающий на длине волны 1559.5 нм в устойчивом одночастотном линейно поляризованном режиме.

## 2. Световод

Исследуемый световод был изготовлен путем спекания фосфатного стекла в трубке из кварцевого стекла с

О.Н.Егорова, С.Е.Сверчков, Б.И.Галаган, Б.И.Денкер, Г.Л.Даниелян, В.И.Пустовой. Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, 119333 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: egorova@nsc.gpi.ru  
О.И.Медведков, С.А.Васильев, С.Л.Семенов. Научный центр волоконной оптики РАН, Россия, 119333 Москва, ул. Вавилова, 38  
Е.С.Серегин. ООО Инновационное предприятие «НЦВО-Фотоника», Россия, 117246 Москва, Научный пр., 20, корп. 3

Поступила в редакцию 15 октября 2019 г.

последующей вытяжкой оптического волокна [5, 8]. Для изготовления сердцевины использовалось стекло того же состава, что и в работах [5–7]. Данный состав содержал 65 мол. %  $P_2O_5$ , 7 мол. %  $Al_2O_3$ , 12 мол. %  $B_2O_3$ , 9 мол. %  $Li_2O$  и 7 мол. %  $RE_2O_3$  [9]. Концентрация ионов эрбия составляла  $1.0 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$  (1.1 мас. % или 0.39 мол. % оксида эрбия). В состав стекла также входил гадолиний, при этом суммарная концентрация редкоземельных ионов составляла около 7 мол. %. Для изготовления световода из объемного фосфатного стекла с помощью полого алмазного сверла высверливался цилиндр диаметром около 4 мм, затем цилиндр вставлялся в трубку из кварцевого стекла и осуществлялось спекание полученной сборки при температуре 2000 °С в печи установки для вытяжки волоконных световодов. После перетяжки полученной заготовки на стержни диаметром 1 мм и жакетирования дополнительной трубки из кварцевого стекла производилась вытяжка оптического волокна.

Диаметр сердцевины изготовленного световода, оцененный по фотографии торца световода, полученной с помощью электронного микроскопа, составил приблизительно 4.5 мкм. Диаметр оболочки из кварцевого стекла был равен 125 мкм.

Как отмечалось в наших предыдущих работах, при вытяжке световода с сердцевиной из фосфатного стекла и кварцевой оболочкой происходит значительная взаимная диффузия фосфатного и кварцевого стекол. Для определения степени взаимной диффузии в полученном световоде была проведена оценка концентрации оксида фосфора в сердцевине методом рентгеноспектрального микроанализа с помощью сканирующего электронного микроскопа

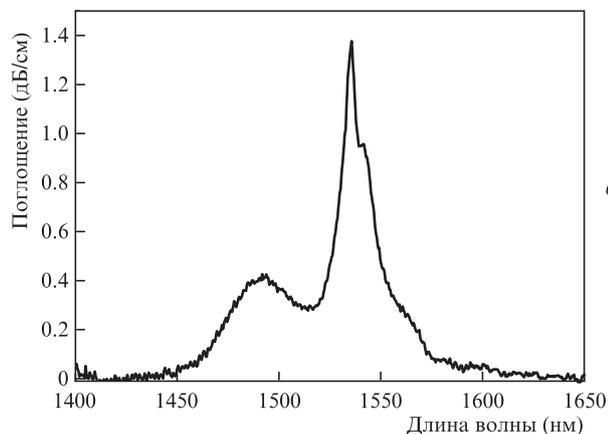
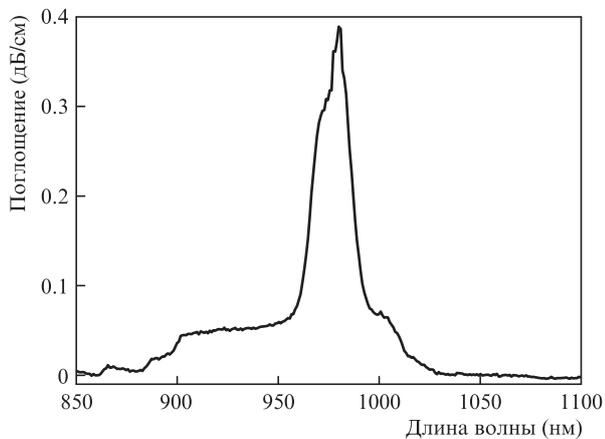


Рис.1. Спектры поглощения композитного световода в окрестности длины волны 0.98 (а) и 1.55 мкм (б).

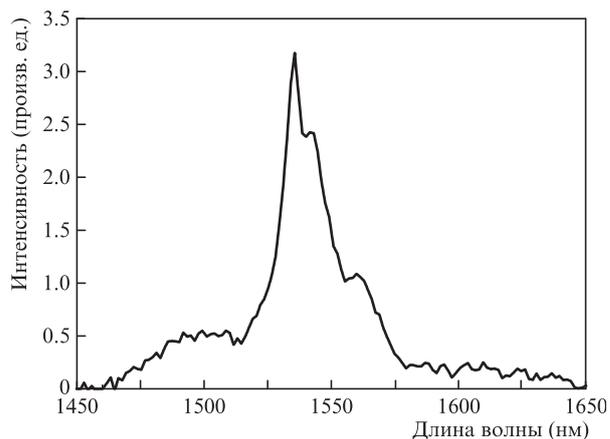


Рис.2. Спектр люминесценции композитного световода.

JSM-5910 LV (JEOL) и рентгеновского спектрометра INCA (Oxford Instruments). Пучок электронов направлялся в центр сердцевины световода, при этом энергия электронов подбиралась так, чтобы диаметр области генерации рентгеновского излучения составлял около 3.5 мкм и был меньше диаметра сердцевины. По проведенным оценкам концентрация оксида фосфора в сердцевине составила около 24 мол. %. Для оценки концентрации оксидов алюминия, лития, бора и гадолиния, входящих в состав исходного стекла, было принято, что их концентрация уменьшается пропорционально снижению концентрации оксида фосфора в сердцевине световода по сравнению с исходным стеклом.

Модовый состав полученного световода на длине волны в окрестности 1.55 мкм исследовался путем наблюдения изображения торца с помощью ИК камеры. При различных условиях возбуждения на входе исследуемого световода на выходном торце наблюдалось только распределение интенсивности, соответствующее фундаментальной моде сердцевины световода. Это свидетельствует о том, что изготовленный световод являлся одномодовым в окрестности длины волны 1.55 мкм. С помощью отрезка световода длиной 2 м методом эталонного изгиба была измерена длина волны отсечки первой высшей моды, составившая 1.4 мкм.

На рис.1 представлены спектры поглощения полученного световода в окрестности 980 и 1550 нм в режиме слабого сигнала. Максимальное поглощение на длине волны 980 нм равно приблизительно 0.4 дБ/см. На рис.2 показан спектр люминесценции, измеренный при возбуждении

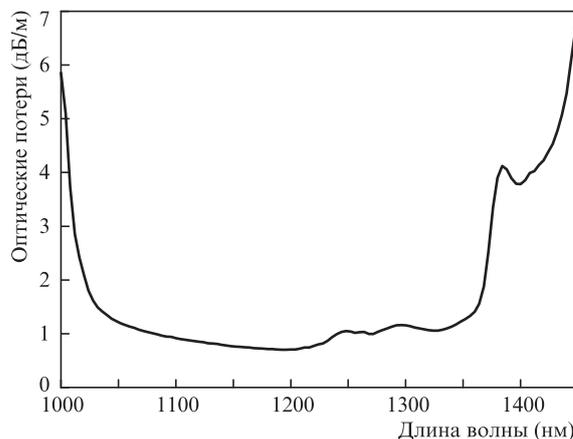


Рис.3. Спектр оптических потерь.

на длине волны 980 нм. Измеренное время жизни уровня ионов эрбия  ${}^4I_{13/2}$  составило 6.1 мс. Столь малое значение времени жизни по сравнению с характерным для световодов, изготовленных методом осаждения кварцевого стекла из газовой фазы, обусловлено, очевидно, значительным содержанием гидроксильных групп в исходном фосфатном стекле.

На рис.3 показан спектр оптических потерь вне зон поглощения ионов эрбия, измеренный методом укорочения длины волокна. Минимальное значение оптических потерь в этой области составляет 1 дБ/м и определяется в основном степенью загрязнения фосфатного стекла при варке [10].

### 3. Лазер

Для формирования резонатора лазера волоконные брэгговские решетки записывались непосредственно в активном композитном световоде. Запись решеток осуществлялась излучением эксимерного КгF-лазера (248 нм) CL-5000 (ОптоСистемы) через однородную фазовую маску с периодом  $\Lambda_m = 1072.03$  нм и длиной 50 мм. Для повышения фоточувствительности активный композитный световод был насыщен молекулярным водородом при температуре 100 °С и давлении 110 атм. Излучение КгF-лазера (длительность импульса 10 нс, энергия 24 мДж, частота следования 50 Гц) фокусировалось цилиндрической линзой на боковую поверхность световода через фазовую маску.

Вначале экспериментально исследовалась возможность записи брэгговских решеток непосредственно в сердцевине композитного световода. Для этого при описанных выше условиях записывалась пробная брэгговская решетка длиной 3.5 мм. В процессе записи измерялись спектры пропускания световода при различных дозах УФ облучения. Измерения проводились с помощью спектроанализатора ANDO 6317В с разрешением 0.02 нм при использовании тестирующего широкополосного люминесцентного источника. По полученной динамике изменения коэффициента отражения брэгговской решетки с помощью методики из работы [11] была рассчитана зависимость наведенного изменения показателя преломления от дозы УФ облучения (рис.4). Сравнение этой зависимости с аналогичными данными для стандартного телекоммуникационного световода SMF28e, исследованного при условиях, близких к условиям настоящего эксперимента [12], показало, что величина наведенного показателя преломления

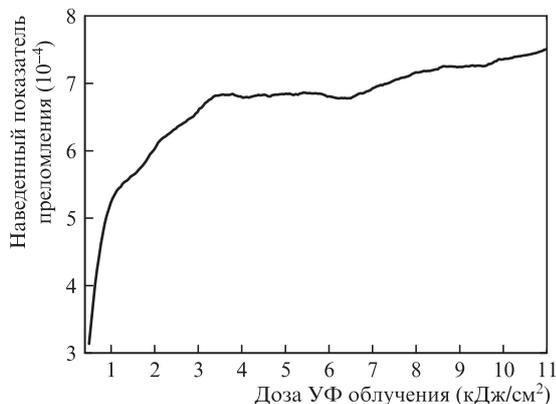


Рис.4. Зависимость наведенного показателя преломления в композитном волоконном световоде от дозы УФ облучения.

ломления сравнима для двух типов световодов при дозах УФ облучения менее 4 кДж/см<sup>2</sup>. При дозах УФ облучения свыше 4 кДж/см<sup>2</sup> в исследуемом композитном световоде скорость роста наведенного показателя преломления существенно замедляется, тогда как в световоде типа SMF28e этого не происходит. Тем не менее изменение показателя преломления на уровне  $(4-6) \times 10^{-4}$ , наведенное в сердцевине композитного световода, достаточно для создания резонатора одночастотного волоконного лазера.

Резонатор лазера был сформирован двумя одинаковыми волоконными брэгговскими решетками длиной 23 мм каждая. Между решетками находился участок необлученного активного световода длиной 4 мм. Запись резонатора осуществлялась сканированием пучка УФ лазера вдоль оси световода со скоростью 0.05 мм/с за два прохода. После каждого прохода измерялся спектр пропускания резонатора. Коэффициент отражения решеток после первого прохода составлял примерно 90%.

Конечный спектр пропускания полученного резонатора, состоящего из двух решеток, представлен на рис.5. Коэффициент отражения каждой решетки составляет около 98%, ширина спектра по полувысоте — 0.16 нм. Поскольку исследуемая пара решеток является интерферометром Фабри–Перо с высокой добротностью, в спектре присутствует узкий пик, соответствующий области пропускания интерферометра. Исходя из геометрических параметров резонатора и измеренного коэффициента отражения решеток, можно оценить спектральную ширину центральной области пропускания в спектре отражения интерферометра Фабри–Перо [11]. Согласно проведенным расчетам спектральная ширина пика пропускания по полувысоте  $\Delta\lambda$  (FWHM) составляет 0.003 нм. Полученное значение меньше максимального разрешения используемого спектрального прибора (0.01 нм), поэтому данный пик на рис.5 разрешить не удастся.

Исходя из параметров полученного резонатора, можно оценить разность длин волн соседних продольных мод резонатора [13]. При длине решеток 23 мм, расстоянии между решетками 4 мм и коэффициенте отражения решеток 98% расчетная разность длин волн между соседними продольными модами резонатора составляет 0.065 нм (8 ГГц). Следует отметить, что при численных оценках параметры решеток полагались одинаковыми. Однако вследствие изменений температуры в процессе записи решеток их реальные параметры могут различаться.

На рис.6 представлена схема установки для исследования характеристик полученного волоконного лазера.

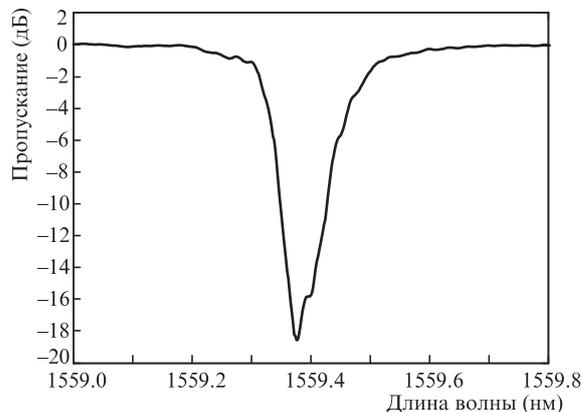


Рис.5. Спектр пропускания резонатора лазера, измеренный с разрешением 0.01 нм.

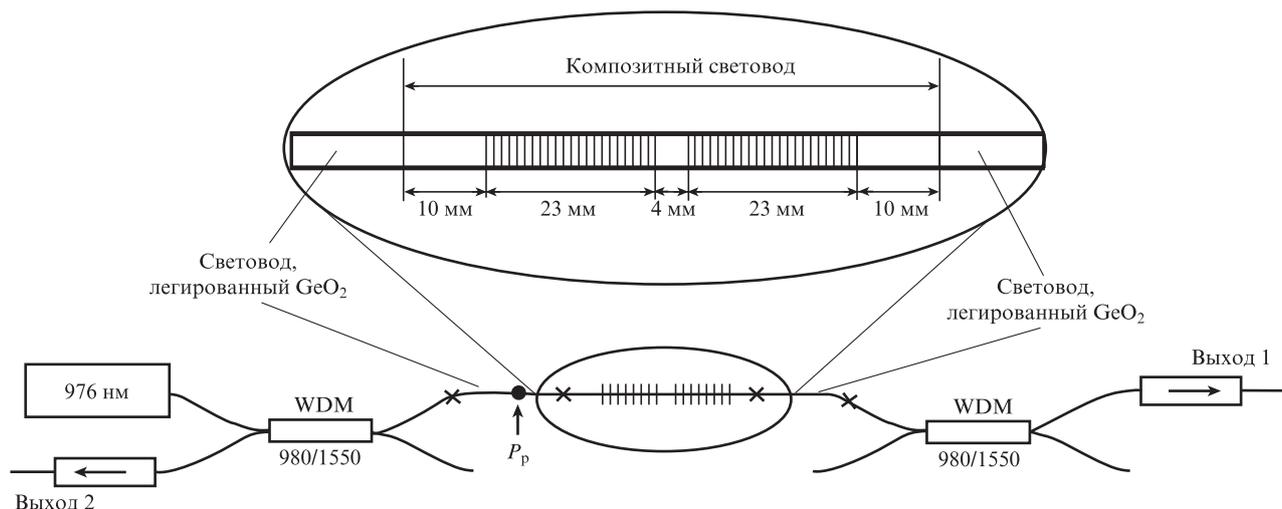


Рис.6. Схема установки для исследования характеристик волоконного лазера.

Источником излучения накачки служил полупроводниковый лазерный диод с длиной волны генерации 976 нм. Общая длина активного световода составляла примерно 70 мм: 50 мм приходилось на резонатор, и по 10 мм с каждой стороны резонатора были необходимы для соединения последнего с остальными частями схемы. Активный световод с двух сторон был приварен к специально изготовленному световоду, легированному оксидом германия. Диаметры полей мод германиевого и активного световодов практически совпадали и составляли на длине волны 1550 нм около 5 мкм.

Модовый состав полученного лазера, работающего в устойчивом одночастотном режиме, изучался с помощью конфокального сканирующего интерферометра Фабри–Перо с областью свободной дисперсии 750 МГц. Из-за наличия небольшого двулучепреломления в резонаторе, присущего активному световоду, лазер работал в режиме с двумя ортогональными поляризациями излучения (рис.7,а). Ортогональность поляризаций мод определялась с помощью контроллера поляризации, установленного на выходе схемы, и поляризатора, расположенного перед входом в сканирующий интерферометр Фабри – Перо. Изгибая активный световод в определенном направлении, удавалось получить устойчивый одночастотный режим с линейной поляризацией (рис.7,б). По всей видимости, изгиб оптического волокна приводил к увеличению двулучепреломления внутри резонатора и, соответственно, к увеличению разности частот ортогонально-поляризованных мод. Ширина линии генерации лазера, измеренная с помощью сканирующего интерферометра Фабри–Перо, была меньше аппаратной ширины интерферометра (11 МГц).

Исследование временных характеристик лазера с помощью фотоприемника с шириной полосы 2 ГГц и осциллографа (500 МГц) показало отсутствие импульсного режима. При мощности накачки в диапазоне 90–320 мВт (измеренной в точке  $P_p$  на рис.6) проводилось фурье-преобразование сигнала лазера. Частота пика релаксационных колебаний возрастала от 220 до 650 кГц при увеличении мощности накачки от 90 до 320 мВт. Других частотных компонент шума обнаружено не было.

Спектр излучения лазера, измеренный при мощностях накачки около 89, 183 и 320 мВт с разрешением 0.01 нм, приведен на рис.8. При наибольшей мощности длина

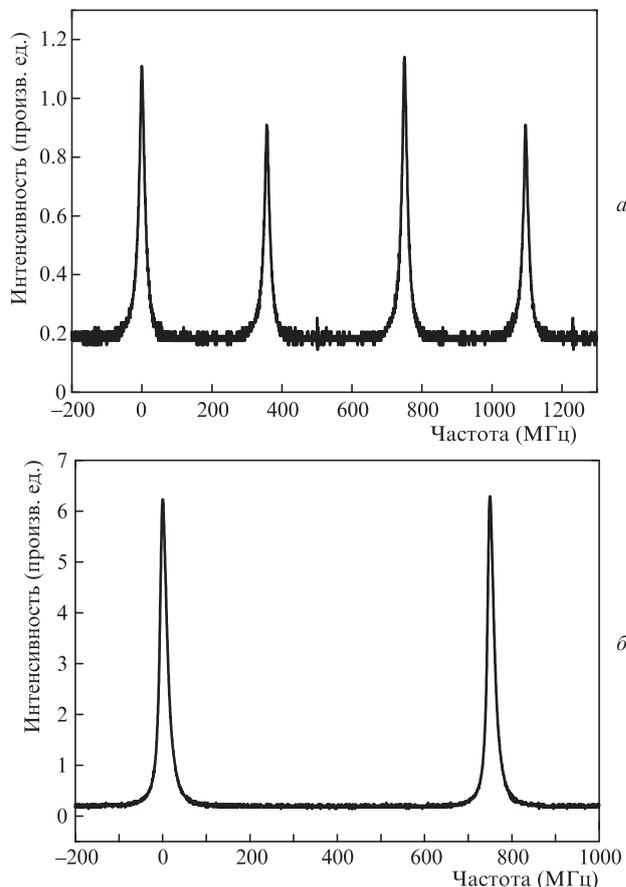


Рис.7. Моды лазера, зарегистрированные с помощью сканирующего интерферометра Фабри–Перо с областью свободной дисперсии 750 МГц, в случае двух поляризаций (а) и одной поляризации (б).

волны генерации составила 1559.5 нм. Изменение длины волны излучения лазера с ростом мощности накачки обусловлено нагревом брэгговских решеток.

На рис.9 представлены зависимости выходной мощности лазера с обеих сторон (выход 1 и выход 2, рис.6) от введенной мощности накачки, измеренные в линейно-поляризованном режиме генерации лазера (с изгибом). Порог генерации – около 70 мВт. Введенная мощность накачки измерялась в точке  $P_p$ . Непоглощенная мощность накачки на выходе 1 составляла примерно треть от

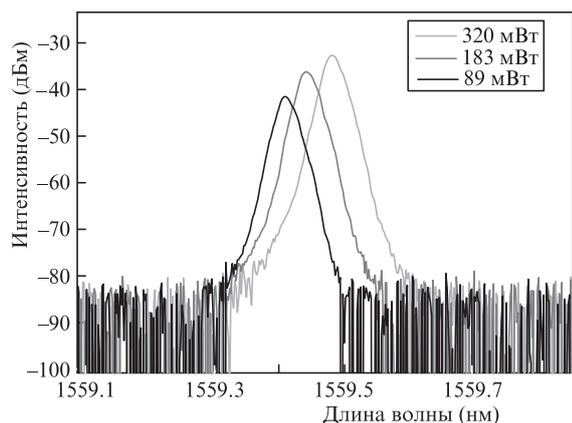


Рис.8. Спектры излучения лазера при различных мощностях накачки.

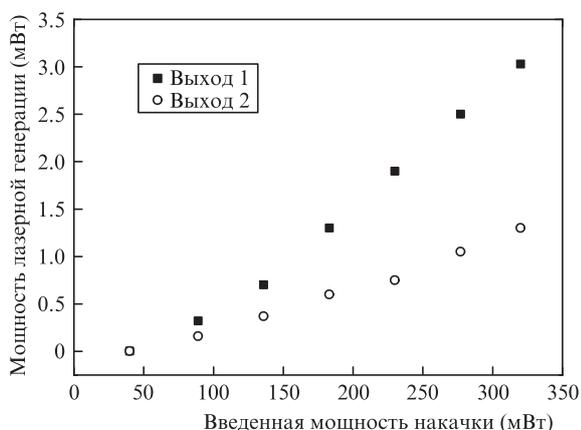


Рис.9. Зависимость выходной мощности лазера от введенной мощности накачки.

введенной, а эффективность лазерной генерации – 1.2%. Мощность лазерной генерации на выходе 2 была примерно вдвое меньше мощности на выходе 1. Это связано, очевидно, с различием коэффициентов отражения решеток, составляющих резонатор лазера, или с их небольшим рассогласованием по длине волны.

Фиксация изогнутого положения резонатора лазера осуществлялась креплением на лабораторном столе участков германиевого световода (см. рис.6) без использования каких-либо специальных приспособлений. Изменение положения активного волокна значительно влияло на выходную мощность и состояние поляризации лазерного излучения. Так, амплитуда колебаний выходной мощности при изменении пространственного положения резонатора волоконного лазера превышала 50%. Однако при определенном положении волокна удавалось получать генерацию лазера в линейно поляризованном режиме с достаточно стабильной во времени (в пределах 5%) выходной мощностью, что было достаточно для проведения измерений. При этом эффективность лазерной гене-

рации примерно соответствовала зависимости, представленной на рис.9.

#### 4. Заключение

Продемонстрирована возможность записи волоконных брэгговских решеток в композитном волоконном световоде, изготовленном методом спекания фосфатного стекла в трубке из кварцевого стекла, с помощью излучения K<sub>g</sub>F-лазера на длине волны 248 нм. Для этого разработан и изготовлен композитный световод, легированный ионами эрбия, одномодовый в окрестности длины волны 1550 нм. В насыщенных водородом образцах композитного световода обнаружена фоточувствительность к лазерному излучению с длиной волны 248 нм, сопоставимая с фоточувствительностью насыщенного водородом стандартного телекоммуникационного световода с сердцевиной из германосиликатного стекла. При осуществлении записи брэгговских решеток непосредственно в сердцевине активного композитного световода продемонстрировано действие одночастотного лазера. Изготовленный волоконный лазер генерировал излучение на длине волны 1559.5 нм в устойчивом одночастотном линейно поляризованном режиме.

Авторы выражают благодарность сотрудникам ООО Инновационное предприятие «НЦВО-Фотоника» за помощь в изготовлении волоконных брэгговских решеток.

1. Yang Z., Li C., Xu S., Yang C. *Single-Frequency Fiber Lasers* (Singapore: Springer, 2019).
2. Shi W., Fang Q., Zhu X., Norwood R.A., Peyghambarian N. *Appl. Opt.*, **53**, 6554 (2014).
3. Fu S., Shi W., Feng Y., Zhang L., Yang Z., Xu S., Zhu X., Norwood R.A., Peyghambarian N. *J. Opt. Soc. Am. B*, **34**, A49 (2017).
4. Martin R.A., Knight J.C. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **18**, 574 (2006).
5. Егорова О.Н., Галаган Б.И., Денкер Б.И., Сверчков С.Е., Семенов С.Л. *Квантовая электроника*, **46**, 1071 (2016) [*Quantum Electron.*, **46**, 1071 (2016)].
6. Egorova O.N., Semjonov S.L., Velmiskin V.V., Yatsenko Yu.P., Sverchkov S.E., Galagan B.I., Denker B.I., Dianov E.M. *Opt. Express*, **22**, 7632 (2014).
7. Egorova O.N., Semjonov S.L., Medvedkov O.I., Astapovich V.S., Okhrimchuk A.G., Galagan B.I., Denker B.I., Sverchkov S.E., Dianov E.M. *Opt. Lett.*, **40**, 3762 (2015).
8. Rybalovsky A.A., Egorova O.N., Zhuravlev S.G., Galagan B.I., Denker B.I., Sverchkov S.E., Semjonov S.L. *Opt. Lett.*, **44**, 3518 (2019).
9. Karlsson G., Laurell F., Tellefsen J., Denker B., Galagan B., Osiko V., Sverchkov S. *Appl. Phys. B*, **75**, 41 (2002).
10. Galagan B.I., Glushchenko I.N., Denker B.I., Kalachev Yu.L., Mikhailov V.A., Sverchkov S.E. *Glass Phys. Chem.*, **37**, 258 (2011).
11. Othonos A., Kalli K. *Fiber Bragg Gratings: Fundamentals and Applications in Telecommunications and Sensing* (Norwood, Mass.: Artech House, 1999).
12. Swart P.L., Shlyagin M.G., Chtcherbakov A.A., Spirin V.V. *Electron. Lett.*, **38**, 1508 (2002).
13. Barmenkov Y.O., Zalvidea D., Torres-Peiró S., Cruz J.L., Andrés M.V. *Opt. Express*, **14**, 6394 (2006).