

ЗАПИСЬ ВОЛОКОННЫХ РЕШЕТОК БРЭГГА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНТЕРФЕРОМЕТРА ТАЛЬБОТА И ЭКСИМЕРНОЙ KrF-ЛАЗЕРНОЙ СИСТЕМЫ

А. М. СТАМ, Р. Ф. ИДРИСОВ, А. И. ГРИБАЕВ, С. В. ВАРЖЕЛЬ,
К. А. КОННОВ, Ю. И. СЛОЖЕНИКИНА

*Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: vsv187@gmail.com*

Представлен лабораторный стенд для записи волоконных решеток Брэгга с использованием интерферометра Тальбота. В качестве источника УФ-излучения используется эксимерная KrF-лазерная система МОРА CL-7550 типа задающий генератор — усилитель, которая обеспечивает высокий уровень временной и пространственной когерентности. Решается задача контроля параметров лазерного излучения и оптимизации процесса записи волоконных решеток Брэгга с требуемыми характеристиками. Приведено описание лабораторного стенда, включающего эксимерную лазерную систему, оптическую систему транспортировки лазерного излучения, интерферометр Тальбота, системы контроля ширины линии лазерного излучения, распределения энергии в пучке, плотности энергии лазерных импульсов в области записи и положения оптического волокна. Представлены результаты записи решеток Брэгга типа I, индуцированных при различных условиях в режиме одноимпульсной и многоимпульсной экспозиции. Приведены зависимости спектральных характеристик решеток Брэгга от различных условий записи, а также методика для исследования относительной фоторефрактивности оптических волокон.

Ключевые слова: *волоконная брэгговская решетка, интерферометр Тальбота, эксимерная KrF-лазерная система, фазовая маска, когерентность*

Введение. Одним из наиболее перспективных направлений разработки измерительно-информационных комплексов является использование сенсоров на основе волоконных брэгговских решеток (ВБР) [1, 2]. В настоящее время решетки Брэгга широко применяются в волокнах и планарных волноводах для уплотнения каналов (технологии WDM) [3] и фильтрации оптического сигнала, а также в качестве зеркал резонаторов в волоконных и полупроводниковых лазерах [4], сглаживающих фильтров в оптических усилителях и для дисперсионной компенсации в магистральных каналах связи [5, 6]. Еще одно практическое применение ВБР — это использование в качестве чувствительных элементов в системах измерения параметров окружающей среды, например влажности, температуры, давления, химического состава [7—9].

Технология записи массивов ВБР требует создания схемы записи с возможностью быстрого перестроения периода решеток Брэгга. Среди способов формирования решеток Брэгга [10] можно выделить три основных метода, которые широко представлены в современной литературе: наиболее распространенный метод фазовой маски (ФМ) [11, 12], пошаговый метод [13, 14] и интерферометрический метод [15, 16], впервые представленный в 1989 г. [17]. Наиболее универсальным является метод записи ВБР с использованием интерферометра Тальбота и фазовой маски в качестве светоделителя [18]. Указанный метод, по сравнению с методом фазовой маски, позволяет осуществлять перестройку резонансной длины волны ВБР в широких диапазонах с использованием только одной ФМ. Отсутствие непосредственного контакта оптического волокна (ОВ) и ФМ снижает лучевую нагрузку на последней при ис-

пользовании цилиндрической линзы и позволяет производить запись ВБР непосредственно в процессе вытяжки волоконных световодов [19].

Источником УФ-излучения, широко применяемым для интерферометрического метода записи ВБР в одноимпульсном режиме, является эксимерный лазер [20]. Коммерческие эксимерные лазеры обладают низкой временной и пространственной когерентностью (порядка десятков микрометров), что исключает их использование в интерферометрических схемах записи ВБР [21]. Чтобы обеспечить возможность записи массивов ВБР в процессе вытяжки лазер должен обладать энергией в импульсе выше 100 мДж [22].

Лабораторный стенд для записи ВБР с использованием интерферометра Тальбота. Лабораторный стенд содержит эксимерную лазерную систему, оптическую систему транспортировки лазерного излучения, интерферометр Тальбота и системы контроля параметров лазерного излучения и положения оптического волокна [23].

Функциональная схема установки для записи ВБР представлена на рис. 1, где 1 — эксимерная лазерная система; 2 — зеркала с диэлектрическим покрытием; 3 — аттенюатор; 4 — затвор; 5 — сменная апертурная диафрагма; 6 — цилиндрическая линза; 7 — фазовая маска; 8 — пирометрический измеритель энергии; 9 — экран для нулевого порядка дифракции; 10 — зеркала на поворотных подвижках; 11 — интерферометр Тальбота на линейной подвижке; 12 — оптическое волокно; 13 — магнитные держатели; 14 — положительная линза; 15 — интерферометр Фабри — Перо; 16 — люминесцентная пластина; 17 — видеокамера; 18 — высокоскоростной фотоприемник; 19 — анализатор профиля пучка; 20 — юстировочная диафрагма; 21 — отрицательная линза.



Рис. 1

Для эффективного применения интерферометрического метода записи ВБР в качестве источника излучения УФ-диапазона использована эксимерная KrF-лазерная система генератор—усилитель с увеличенной временной когерентностью, что снижает требования к юстировке интерферометра и позволяет получить интерференционную картину с требуемым контрастом на поверхности ОВ. Данная система МОРА CL-7550 (поз. 1 на рис. 1) разработана в Центре физического приборостроения Института общей физики им. А. М. Прохорова Российской академии наук (Москва). Основные параметры лазерной системы представлены ниже.

Длина волны излучения, нм.....	248
Ширина спектра излучения, пм, менее.....	3
Изменение длины волны, пм.....	30
Номинальная стабилизированная энергия, мДж.....	250
Максимальная частота следования импульсов, Гц.....	50
Длительность лазерного импульса, нс.....	~20
Энергетическая стабильность, σ , %, менее.....	2
Размер пучка, мм ²	6×20
Угловая расходимость, мрад, менее.....	0,2
Пространственная когерентность, мм, более.....	5
Временная когерентность, мм, более.....	10
Временной джиттер, нс, менее.....	2

Оптическая система транспортировки лазерного излучения (на рис. 1 представлена упрощенная схема) состоит из набора высокоотражающих интерференционных зеркал 2 диаметром 50 мм для угла падения излучения 45° . Цилиндрическая линза 6 установлена на линейной подвижке, и ее перемещение позволяет изменять плотность энергии излучения в области записи ВБР. При использовании записи в прямом пучке цилиндрическая линза снимается.

Интерферометр Тальбота 11 состоит из фазовой маски 7 и двух высокоотражающих диэлектрических зеркал 10 диаметром ≈ 75 мм, адаптированных для углов падения, близких к 75° , используемой длины волны и поляризации лазерного излучения. Поворотные зеркала и ФМ располагаются на единой плите, установленной на линейной подвижке. Закрепленные в юстировочных узлах диэлектрические зеркала установлены на поворотных платформах, которые обеспечивают необходимую точность периода решетки в волокне. В данной установке используются моторизованные поворотные подвижки NR360S/M производства фирмы “Thorlabs”.

Фазовая маска с постоянным периодом 1000 нм закреплена в держателе на фиксированном расстоянии от центра зеркал (для других задач могут применяться чирпированные ФМ с периодами 700 нм и градиентами 1 и 1,5 нм/см). Падающее на ФМ лазерное излучение дифрагирует в 4 порядка, ± 1 -е порядки дифракции направляются на поворотные зеркала и, отражаясь от них, сводятся в плоскости волокна. Посредством наклона зеркал и перемещения плиты можно изменять период образующейся интерференционной картины в области записи, а следовательно, и период решетки показателя преломления, отражающей излучение на длине волны брэгговского резонанса. Таким образом могут быть записаны ВБР с длиной волны отражения в диапазоне 1050—1740 нм.

Использование зеркал диаметром 75 мм в интерферометре Тальбота позволяет записывать ВБР с максимальной длиной 14 мм. Для исключения негативного влияния воздействия нулевого порядка на контраст интерференционной картины в области записи используется экран 9, перекрывающий нулевой порядок дифракции.

Для обеспечения юстировки, настройки и стабильной работы установки в течение длительных интервалов времени в состав оптической схемы включены система оперативного контроля ширины линии лазерного излучения на базе эталона Фабри — Перо; система контроля распределения энергии в пучке; система контроля плотности энергии лазерных импульсов в области записи ВБР; система контроля положения оптического волокна относительно центра пучка лазера.

Система оперативного контроля ширины линии лазерного излучения позволяет осуществлять на экране ПК визуальный контроль стабильности положения интерференционных колец, полученных с использованием эталона Фабри — Перо (рис. 2, а).

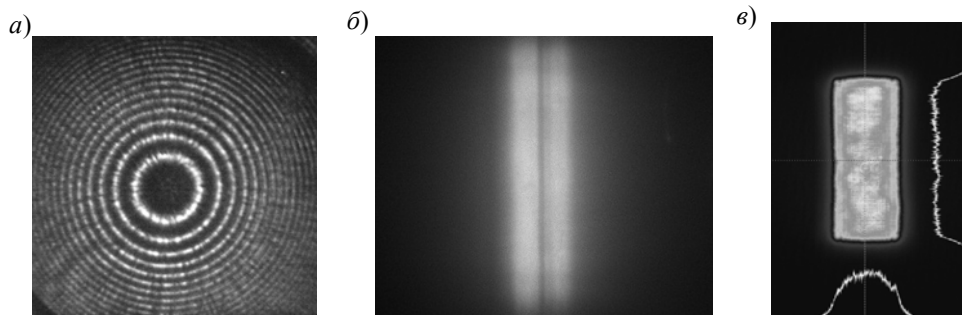


Рис. 2

На рис. 2, б показано положение ОВ относительно сфокусированного пучка эксимерного лазера, зарегистрированное с помощью созданной системы наблюдения, в которую входит люминесцентный экран 16, положительная линза 14 в качестве объектива и видеокамера 17 (см. рис. 1). Данная система используется также для контроля совмещения интерферирующих лазерных пучков в плоскости волокна.

Система контроля распределения энергии в пучке позволяет осуществлять на экране ПК визуальный контроль однородности лазерного излучения. На рис. 2, в представлено изображение пучка после прохождения диафрагмы $6 \times 14 \text{ мм}^2$, полученное с использованием анализатора профиля пучка 19 на основе видеокамеры SP 620U производства фирмы “Ophir Optronics”.

Помимо систем оперативного контроля в состав стенда включен моторизованный аттенюатор 3 производства фирмы “Coherent”, позволяющий обеспечивать плавную регулировку энергии лазерного излучения. Пропускание аттенюатора может варьироваться в диапазоне от 7 до 98 %.

Результаты исследований. Измерение параметров брэгговских решеток, в том числе в процессе записи, осуществлялось по схеме, представленной на рис. 3, с помощью оптического спектроанализатора Yokogawa AQ6370C с диапазоном измерений 600—1700 нм и разрешающей способностью 20 пм. В процессе измерений оптическое излучение широкополосного источника вводилось через Y-ответвитель в ОВ, в котором производилась запись ВБР, и контролировались следующие параметры: длина волны брэгговского резонанса $\lambda_{\text{бр}}$, ширина спектра отражения на полувысоте $\Delta\lambda$ и коэффициент отражения R .



Рис. 3

Расчет производился по средним значениям параметров трех ВБР типа I, записанных в изотропном ОВ (диаметр кварцевой оболочки 125 мкм) с повышенной фоторефрактивностью [10]. Для повышения фоторефрактивности волокна концентрация диоксида германия (GeO_2) в его сердцевине была увеличена до 12 %.

На рис. 4, а, б показаны зависимости коэффициента отражения от длины L ВБР, записанной в режимах одноимпульсной (а) и многоимпульсной экспозиции длительностью 30 с (б). Плотность энергии излучения (U) в области записи в обоих режимах составляла 130 мДж/см^2 , частота генерации (f) лазерных импульсов 10 Гц. На графиках видно, что при прочих одинаковых условиях записи эффективность отражения решетки Брэгга повышается с увеличением ее длины.

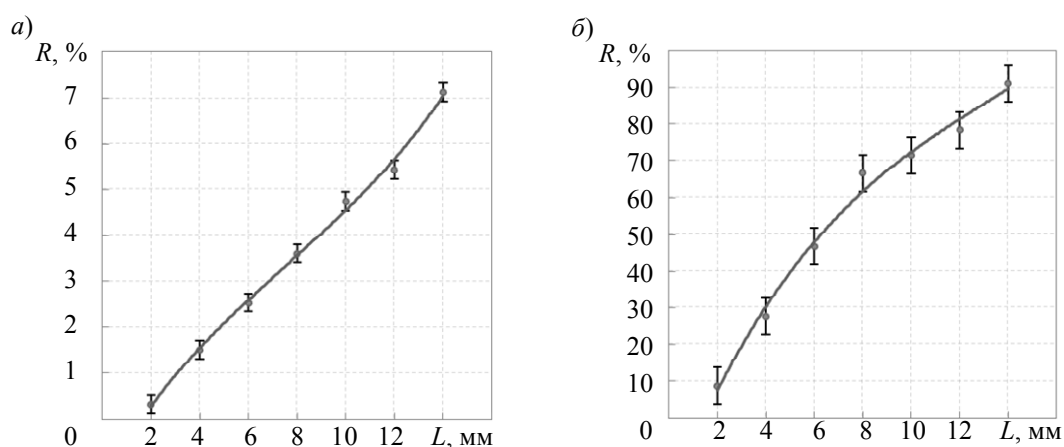


Рис. 4

Зависимость ширины спектра отражения ВБР на полувысоте от ее длины L приведена на рис. 5. Экспозиция осуществлялась при плотности энергии $U=300 \text{ мДж/см}^2$ и частоте

генерации $f=10$ Гц и прекращалась по достижении заданного коэффициента отражения ВБР ($R \sim 15\%$). На графике наблюдается уширение спектра отражения с уменьшением длины решетки Брэгга.

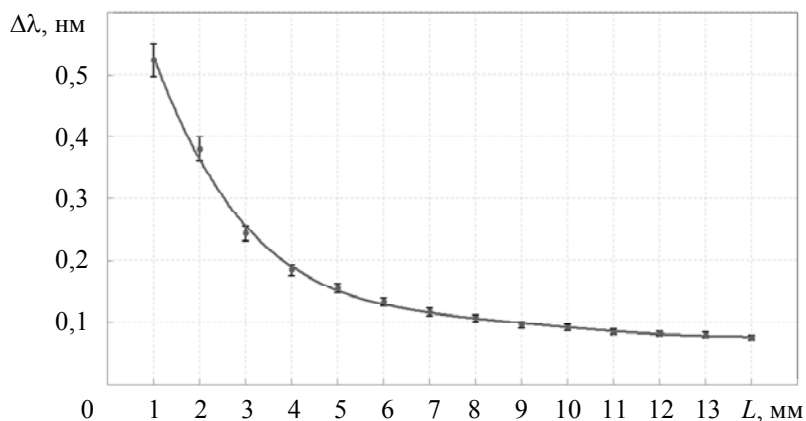


Рис. 5

Для сравнения приведены спектры отражения ВБР длиной 1 мм (рис. 6, а) и 14 мм (рис. 6, б), записанные в течение 30 с при $f=10$ Гц и $U=130$ мДж/см²; для короткой решетки $\Delta\lambda=0,55$ нм, а для длинной — 0,09 нм.

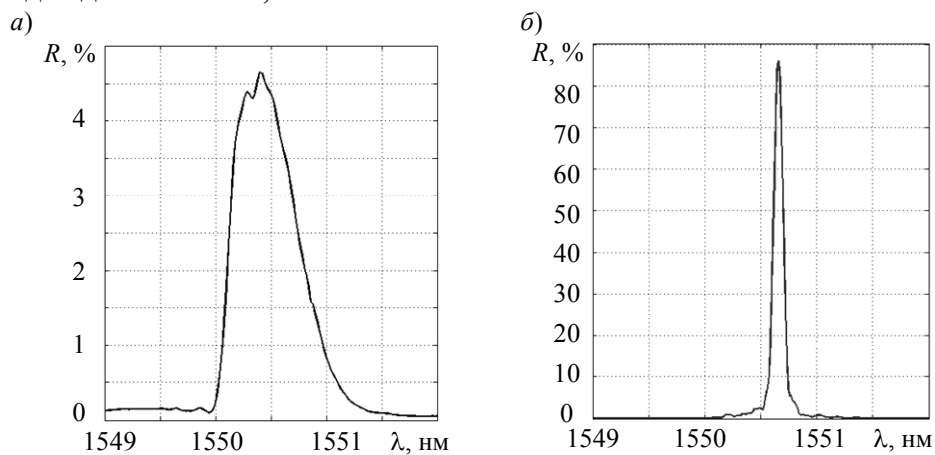


Рис. 6

На рис. 7 представлена зависимость коэффициента отражения ВБР длиной 5 мм от времени записи при $f=10$ Гц и различных значениях U в области записи. Анализ графика показывает, что повышение плотности энергии приводит к увеличению эффективности записи ВБР, также видно замедление роста коэффициента отражения решетки с увеличением времени экспозиции.

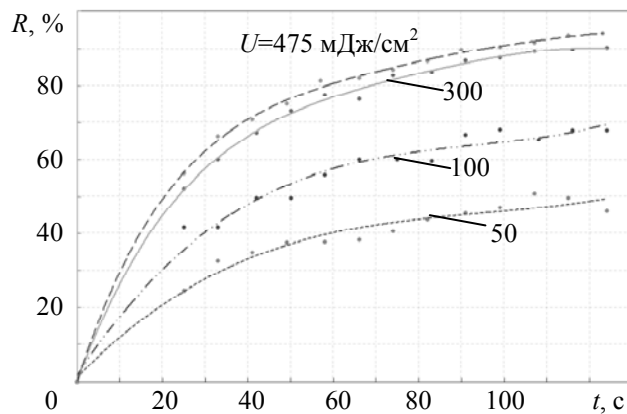


Рис. 7

Отработка технологии вытяжки волокон с высокой фоточувствительностью требует сравнительных исследований с целью оптимизации технологического процесса. Для этого

авторами данной статьи разработана методика исследования относительной фоторефрактивности оптических волокон, основанная на сравнении коэффициентов отражения ВБР, записанных в исследуемых оптических волокнах и в образцовом волокне при одинаковых условиях. Контролируемые параметры: плотность энергии в лазерном пучке, когерентность лазерного излучения, период интерференционной картины, положение ОВ в лазерном пучке, размер апертурной диафрагмы, режим записи.

Выбор условий для записи ВБР осуществляется в зависимости от предполагаемой области применения.

Заключение. Представлено описание созданного лабораторного стенда на основе интерферометра Тальбота с разделением пучка при помощи ФМ для записи брэгговских решеток в ОВ. Для эффективного применения интерферометрического метода записи ВБР в установке используется эксимерная КгF-лазерная система МОРА CL-7550 типа задающий генератор — усилитель, которая обеспечивает высокий уровень временной и пространственной когерентности излучения с длиной волны 248 нм. В ходе выполнения работы были решены следующие задачи:

— оптимизирована оптическая схема и установлены системы контроля лазерного излучения, работающие в режиме реального времени, что позволило обеспечить стабильную запись волоконных решеток Брэгга как в одноимпульсных, так и многоимпульсных режимах;

— получены результаты исследований эффективности записи ВБР и их спектральных характеристик при различных режимах;

— определен диапазон возможных резонансных длин волн брэгговских решеток, достигаемый при данной конфигурации схемы записи;

— разработана методика, позволяющая проводить сравнительные исследования относительной фоточувствительности образцов волоконных световодов и, таким образом, осуществлять отработку технологии вытяжки ОВ и находить пути к улучшению их характеристик.

Статья подготовлена по результатам работы, выполненной при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (уникальный идентификатор проекта: RFMEFI57815X0109, соглашение № 14.578.21.0109).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Shan-li W., Yong W., Man-li H., Jian-hong W., Cheng G., Hai-feng L.* A new style of FBG vibration sensor // *J. of Basic and Applied Physics*. 2013. Vol. 2, iss. 1. P. 20—23.
2. *Köppe E., Bartholmai M., Daum W., Gon X., Holmann D., Basedau F., Schukar V., Westphal A., Sahre M., Beck U.* New self-diagnostic fiber optical sensor technique for structural health monitoring // *Materials Today: Proc.* 3. 2016. P. 1009—1013.
3. *Liaw S.-K., Tsai P.-S., Wang H., Minh H. L., Ghassemlooy Z.* FBG-based reconfigurable bidirectional OXC for 8x10Gb/s DWDM transmission // *Opt. Communications*. 2016. N 358. P. 154—159.
4. *Fortin V., Maes F., Bernier M., Bah S. T., D'auteuil M., Vallée R.* Watt-level erbium-doped all-fiber laser at 3.44 μm // *Opt. Lett.* 2016. N 41(3). P. 559—562.
5. *Shanker R., Srivastava P., Bhattacharya M.* Performance analysis of 16-channel 80-Gbps optical fiber communication system // *Proc. Intern. Conf. on Computational Techniques in Information and Communication Technologies (ICCTICT)*. 2016.
6. *Spolitis S., Ivanovs G.* Extending the reach of DWDM-PON access network using chromatic dispersion compensation // *IEEE Swedish Comm. Technol. Workshop (Swe-CTW)*. 2011.
7. *Udd E.* Review of multi-parameter fiber grating sensors // *Proc. SPIE 6770, Fiber Optic Sensors and Applications*. 2007. Vol. 677002.
8. *Guan B., Tan Y., Tam H.* Dual polarization fiber grating laser hydrophone // *Opt. Express*. 2009. Vol. 17. N 22. P. 19544—19550.

9. Lawson N. J., Correia R., James S. W., Partridge M., Staines S. E., Gautrey J. E., Garry K. P., Holt J. C., Tatam R. P. Development and application of optical fibre strain and pressure sensors for in-flight measurements // *Meas. Sci. Technol.* 2016. N 27, 104001. P. 1—17.
10. Васильев С. А., Медведков О. И., Королев И. Г., Божков А. С., Курков А. С., Дианов Е. М. Волоконные решетки показателя преломления и их применение // *Квантовая электроника.* 2005. Т. 35, № 12. С. 1085—1103.
11. Hill K. O., Malo B., Bilodeau F., Johnson D. C., Albert J. Bragg gratings fabricated in monomode photosensitive optical fiber by UV exposure through a phase mask // *Appl. Phys. Lett.* 1993. Vol. 62, N 10. P. 1035—1037.
12. Varzhel' S. V., Kulikov A. V., Meshkovskii I. K., Strigalev V. E. Recording Bragg gratings in a birefringent optical fiber with a single 20-ns pulse of an excimer laser // *J. of Optical Technology.* 2012. Vol. 79, N 4. P. 257—259.
13. Lai Y., Zhou K., Sugden K., Bennon I. Point-by-point inscription of sub-micrometer period fiber Bragg gratings // *OSA/CLEO/QELS.* 2008. Paper CTuU2.
14. Arkhipov S. V., Grehn M., Varzhel S. V., Strigalev V. E., Griga N., Eichler H. J. Point-by-point inscription of fiber Bragg gratings into birefringent optical fiber through protective acrylate coating by Ti:Sa femtosecond laser // *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics.* 2015. Vol. 15, N 3. P. 373—377.
15. Bartelt H., Schuster K., Unger S., Chojetzki C., Rothhardt M., Latka I. Single-pulse fiber Bragg gratings and specific coatings for use at elevated temperatures // *Appl. Opt.* 2007. Vol. 46, N 17. P. 3417—3424.
16. Stam A. M., Idrisov R. F., Gribaev A. I., Varzhel' S. V., Munko A. S., Arkhipov S. V., Konnov K. A. Interferometric writing of fiber Bragg gratings in birefringent optical fiber with an elliptical stress cladding // *Materials of the XII Intern. Research and Practice Conf., Munich, 29—30 Dec., 2015.* P. 100—104.
17. Meltz G., Morey W. W., Glenn W. H. Formation of Bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method // *Opt. Lett.* 1989. Vol. 14, N 15. P. 823—825.
18. Bartelt H., Schuster K., Unger S., Chojetzki C., Rothhardt M., Latka I. Single-pulse fiber Bragg gratings and specific coatings for use at elevated temperatures // *Appl. Opt.* 2007. Vol. 46, N 17. P. 3417—3424.
19. Chojetzki C., Rothhardt M., Ommer J., Unger S., Schuster K., Mueller H.-R. High-reflectivity draw-tower fiber Bragg gratings—arrays and single gratings of type II // *Opt. Eng. Lett.* 2005. Vol. 44, N 6. P. 060503—1.
20. Askins C. G., Puttnam M. A., Williams G. M., Friebele E. J. Stepped-wavelength optical-fiber Bragg grating arrays fabricated in line on a draw tower // *Opt. Lett.* 1994. Vol. 19, N 2. P. 147—149.
21. Mayer E.E., Gillett D.A., Govorkov S. Fiber Bragg grating writing by interferometric or phase-mask methods using high-power excimer lasers // *Fiber and Integrated Optics.* 1999. Vol. 18. P. 189—198.
22. Rothhardt M., Chojetzki C., Mueller H. R. High mechanical strength single-pulse draw tower gratings // *Proc. of SPIE.* 2004. N 5579. P. 127—135.
23. Gribaev A. I., Pavlishin I. V., Stam A.M., Idrisov R. F., Varzhel S. V., Konnov K. A. Laboratory setup for fiber Bragg gratings inscription based on Talbot interferometer // *Optical and Quantum Electronics.* 2016. Vol. 48, N 12. P. 540.

Сведения об авторах

- | | |
|------------------------------------|--|
| Арсений Михайлович Стам | — аспирант; Университет ИТМО, кафедра световодной фотоники;
E-mail: stam@niuitmo.ru |
| Равиль Фиркатович Идрисов | — аспирант; Университет ИТМО, кафедра световодной фотоники;
E-mail: r.idrisov@aol.com |
| Алексей Иванович Грибаев | — аспирант; Университет ИТМО, кафедра световодной фотоники;
E-mail: a.gribaev@gmail.com |
| Сергей Владимирович Варжель | — канд. физ.-мат. наук, доцент; Университет ИТМО, кафедра световодной фотоники; E-mail: vsv187@gmail.com |
| Кирилл Александрович Коннов | — аспирант; Университет ИТМО, кафедра световодной фотоники;
E-mail: kirill-konnov@rambler.ru |
| Юлия Игоревна Сложеникина | — студентка; Университет ИТМО, кафедра световодной фотоники;
E-mail: yuliaslozhenikina@gmail.com |

Рекомендована кафедрой
световодной фотоники

Поступила в редакцию
27.01.17 г.

Ссылка для цитирования: *Стам А. М., Идрисов Р. Ф., Грибаев А. И., Варжель С. В., Коннов К. А., Слозhenикина Ю. И.* Запись волоконных решеток Брэгга с использованием интерферометра Тальбота и эксимерной KrF-лазерной системы // Изв. вузов. Приборостроение. 2017. Т. 60, № 5. С. 466—473.

FIBER BRAGG GRATINGS INSCRIPTION USING TALBOT INTERFEROMETER AND KrF EXCIMER LASER SYSTEM

**A. M. Stam, R. F. Idrisov, A. I. Gribaev, S. V. Varzhel,
K. A. Konnov, Yu. I. Slozhenikina**

*ITMO University, 197101, St. Petersburg, Russia
E-mail: vsv187@gmail.com*

An experimental setup for the fiber Bragg gratings inscription using Talbot interferometer is described. A KrF excimer laser system CL-7550 of the type “Master Oscillator – Power Amplifier” by Optosystems Ltd., Russia, with enhanced spatial and temporal coherence is applied as the UV radiation source in the experimental setup, which includes laser beam transportation optical system and Talbot interferometer. To ensure the effective recording, the laboratory setup also includes spectral width control system based on Fabry-Perot interferometer, laser beam energy distribution control system, monitoring system of laser pulse energy density on the optical fiber, and control system of optical fiber to the laser beam relative position: spectral width control system, based on Fabry-Perot interferometer; laser beam energy distribution control system; monitoring system of laser pulse energy density on the optical fiber; and control system of optical fiber to the laser beam relative position. Results of type I fiber Bragg gratings inscription in single-pulse and multi-pulse modes are presented. Dependence of spectral characteristics of fiber Bragg gratings on various recording conditions are analyzed. A method for experimental investigation of optical fiber relative photo-refractivity is described.

Keywords: fiber Bragg grating, Talbot interferometer, KrF excimer laser system, phase mask, coherence

Data on authors

- | | |
|------------------------------|--|
| Arseny M. Stam | — Post-Graduate Student; ITMO University, Department of Light-Guided Photonics; E-mail: stam@niuitmo.ru |
| Ravil F. Idrisov | — Post-Graduate Student; ITMO University, Department of Light-Guided Photonics; E-mail: r.idrisov@aol.com |
| Alexey I. Gribaev | — Post-Graduate Student; ITMO University, Department of Light-Guided Photonics; E-mail: a.gribaev@gmail.com |
| Sergey V. Varzhel | — PhD, Associate Professor; ITMO University, Department of Light-Guided Photonics; E-mail: vsv187@gmail.com |
| Kirill A. Konnov | — Post-Graduate Student; ITMO University, Department of Light-Guided Photonics; E-mail: kirill-konnov@rambler.ru |
| Yulia I. Slozhenikina | — Student; ITMO University, Department of Light-Guided Photonics; E-mail: yuliaslozhenikina@gmail.com |

For citation: *Stam A. M., Idrisov R. F., Gribaev A. I., Varzhel S. V., Konnov K. A., Slozhenikina Yu. I.* Fiber Bragg gratings inscription using Talbot interferometer and KrF excimer laser system // Journal of Instrument Engineering. 2017. Vol. 60, N 5. P. 466—473 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2017-60-5-466-473