

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ЗАПИСИ РЕШЁТОК БРЭГГА С ПЕРЕМЕННЫМ ПЕРИОДОМ В ОПТИЧЕСКОМ ВОЛОКНЕ

© 2015 г. В. Н. Васильев, доктор техн. наук; А. О. Вознесенская, канд. техн. наук;  
Г. Э. Романова, канд. техн. наук

Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург

E-mail: voznesenskaya@mail.ifmo.ru

Рассмотрена схема записи решёток Брэгга с переменным периодом в оптических волокнах, основанная на использовании модифицированного интерферометра Тальбота с цилиндрическими линзами. Выполнен анализ влияния параметров установки, в том числе цилиндрических линз, на характеристики решёток.

*Ключевые слова:* волоконные решётки Брэгга, чирпинг, проектирование оптических систем.

Коды OCIS: 050.1590, 060.3735, 220.4830

Поступила в редакцию 28.11.2014

### Введение

В настоящее время волоконные решётки Брэгга (ВРБ) широко используются в устройствах оптического уплотнения и оптической фильтрации сигналов в качестве зеркал резонаторов волоконных и полупроводниковых лазеров, сглаживающих фильтров в оптических усилителях, для компенсации дисперсии в передающих сетях. Другой областью применения ВРБ являются различные измерительные устройства, такие как датчики, регистрирующие изменения состояния окружающей среды (температуры, давления, деформаций и др.) [1, 2].

Современные технологии записи при использовании излучения ультрафиолетового (УФ) лазера [3–6] позволяют получать ВРБ, имеющие отражательную способность в пределах 0,1–99,9% при спектральной ширине полосы 0,05–10 нм [1, 2]. Для компенсации дисперсии оптических волокон (ОВ) решётки Брэгга, работающие в спектральном диапазоне шириной более 0,5 нм, должны иметь переменный период. ВРБ с переменным периодом модуляции называются чирпированными [1], само изменение периода записанной в волокне решётки на единицу длины принято называть чирпингом. Существуют различные типы чирпинга – симметричный, монотонно возрастаю-

щий (убывающий), нерегулярный. Изменение периода ВРБ может быть линейным, квадратичным или подчиняться более сложной зависимости. Как показано в работе [1], для компенсации дисперсии ОВ чирпинг должен принимать значения порядка десятков нанометров.

Для изготовления чирпированных ВРБ используются различные установки на основе интерферометра Тальбота – с цилиндрическими линзами (ЦЛ), расположенными позади фазовой маски [7, 8], со сферическими линзами и наклоном оптического волокна [9], с системами ЦЛ [10]. Также чирпированные ВРБ получают путём изменения состояния окружающей среды, например, изменения температуры [11], изгибов ОВ [12] и др. Получение чирпированных ВРБ с использованием ЦЛ отличается простотой и технологичностью.

Исследованию способов и технологических приёмов записи чирпированных ВРБ посвящено множество публикаций. Тем не менее, в литературных источниках не обнаружено рекомендаций относительно выбора геометрических и оптических параметров схем для получения определенного чирпинга ВРБ.

Целью настоящей работы являлось исследование закономерности чирпинга при использовании в схеме записи ВРБ различных ЦЛ. В работе также рассмотрены особенности моде-

лирования интерференционной установки для записи chirпированных ВРБ с использованием программного обеспечения Zemax.

### Моделирование интерферометра Тальбота

Для записи решёток может применяться интерферометр Тальбота, включающий фазовую маску и два зеркала. После прохождения фазовой маски в результате дифракции образуются два пучка, идущие симметрично в разных плечах интерферометра (рис. 1а). В области суперпозиции этих пучков формируется интерференционная картина, записываемая на оптическом волокне.

Период интерференционной картины (период ВРБ) может быть определён из соотношения [6]

$$\Lambda = \lambda_{\text{laser}} / 2\sin(\theta/2 + 2\delta), \quad (1)$$

где  $\lambda_{\text{laser}}$  – длина волны лазерного излучения,  $\delta$  – угол наклона зеркал,  $\theta/2$  – угол отклонения лучей для  $\pm 1$  порядков дифракции после прохождения фазовой маски.

Угол  $(\theta/2 + 2\delta)$  также определяет длину волны ВРБ  $\lambda_{\text{Bragg}}$  [7]

$$\sin(\theta/2 + 2\delta) = \frac{n_{\text{eff}}\lambda_{\text{laser}}}{\lambda_{\text{Bragg}}}, \quad (2)$$

где  $n_{\text{eff}}$  – эффективный показатель преломления направляемой моды.

При компьютерном моделировании для анализа chirпинга достаточно рассмотреть результат интерференции пучков, формируемых двумя отдельными источниками конечных размеров, в заданной конфигурации схемы.

Моделирование выполнено с использованием пакета программ Zemax в режиме непосредственной трассировки лучей [13]. В связи с тем, что генерирование лучей происходит случайным образом в пределах излучающей площадки источника, а, кроме того, распределение интенсивности рассматривается на некотором дискретном приёмнике, состоящем из массива элементов, возникает погрешность расчёта, обычно называемая шумом [14]. Важной задачей работы является определение числа лучей, необходимого и достаточного для обеспечения точности результатов трассировки.

При использовании 32-разрядной операционной системы Zemax позволяет установить не более 5000 пикселей на один детектор (в 64-разрядной версии – максимум 5500). Данное ограничение является основным при моделировании, поскольку для того чтобы разрешить период ВРБ, равный 1 мкм, размер элемента детектора должен быть равен 0,5 мкм. Таким образом, критический, максимально допустимый размер детектора  $D = 5000 \times 0,5 = 2500$  мкм. В случае необходимости проведения анализа в области, имеющей большие размеры, необходимо использовать несколько детекторов. Для более детального изучения структуры картины

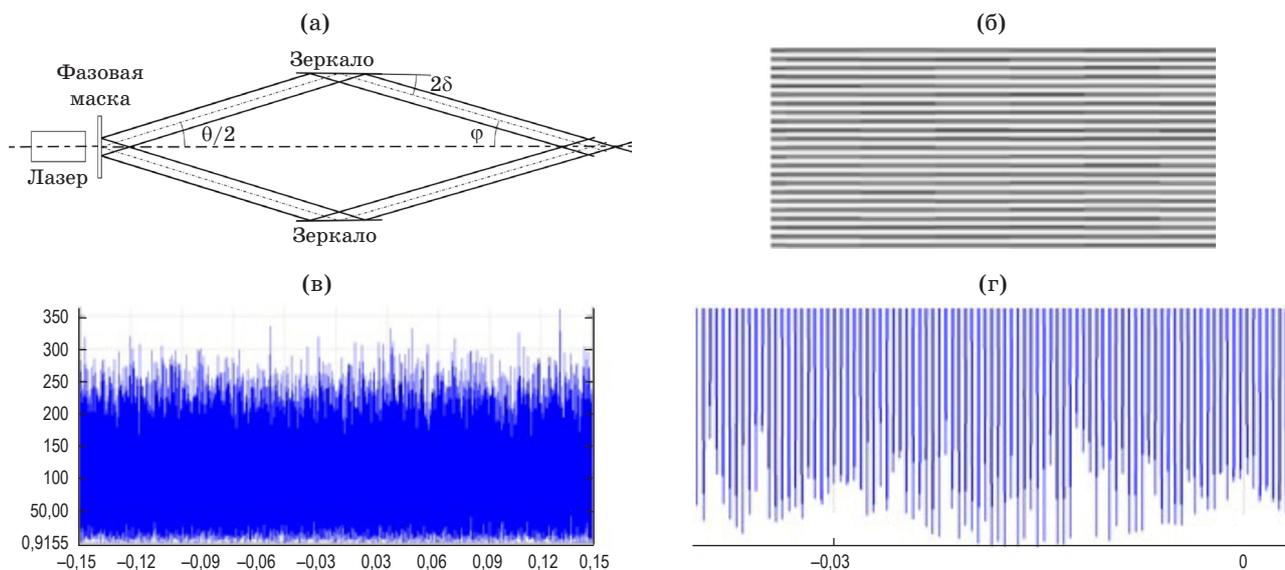


Рис. 1. Моделирование интерферометра Тальбота. Схема модели (а), вид интерференционной картины на детекторе (б), распределение облучённости вдоль направления Y в интерференционной картине (в), распределение облучённости вдоль направления Y в интерференционной картине (увеличенный масштаб) (г).

в области интерференции необходимо уменьшить размер элемента используемого детектора, т.е. при фиксированном количестве элементов фактически уменьшить размер детектора.

Согласно работе [14] сигнал на детекторе может быть получен из соотношения

$$S = N_{\text{rays}} / N_{\text{pix}}, \quad (3)$$

где  $N_{\text{rays}}$  – общее число лучей,  $N_{\text{pix}}$  – общее число пикселей на детекторе

$$N_{\text{pix}} = n_x n_y, \quad (4)$$

где  $n_x, n_y$  – число пикселей в направлении  $x$  и  $y$  соответственно.

Погрешность результатов трассировки лучей (шум) можно определить из выражения [14]

$$N = \sqrt{N_{\text{rays}} / N_{\text{pix}}}. \quad (5)$$

Тогда соотношение сигнал–шум

$$S / N = \sqrt{N_{\text{rays}} / N_{\text{pix}}}. \quad (6)$$

Известно, что для получения приемлемой точности соотношение сигнал–шум должно быть не менее 10. Если использовать приёмник с параметрами  $n_x = 200$  и  $n_y = 5000$ , то общее число элементов приёмника  $N_{\text{pix}} = 200 \times 5000 = 10^6$ , тогда для обеспечения достаточной точности расчётов необходимо выполнить трассировку для  $N_{\text{rays}} = 10^8$  лучей.

Для проверки точности расчётов первоначально рассматривается интерферометрическая установка без дополнительных оптических элементов. На рис. 16 приведён вид результирующей интерференционной картины, полученной при углах наклона пучков  $\pm\theta/2 = \pm 13,546^\circ$ , что соответствует фазовой маске с периодом 1,07 мкм. На рис. 1в с целью демонстрации мелкой структуры полос представлен фрагмент

интерференционной картины в увеличенном масштабе.

Анализ схемы проводился для длин волн 1300 и 1550 нм. В табл. 1 приведены результаты расчётов параметров ВРБ как теоретические, так и с использованием построенной модели. Отклонения между результатами моделирования и теоретического расчёта по формулам (1) и (2) составили не более 10%, что подтверждает адекватность компьютерной модели.

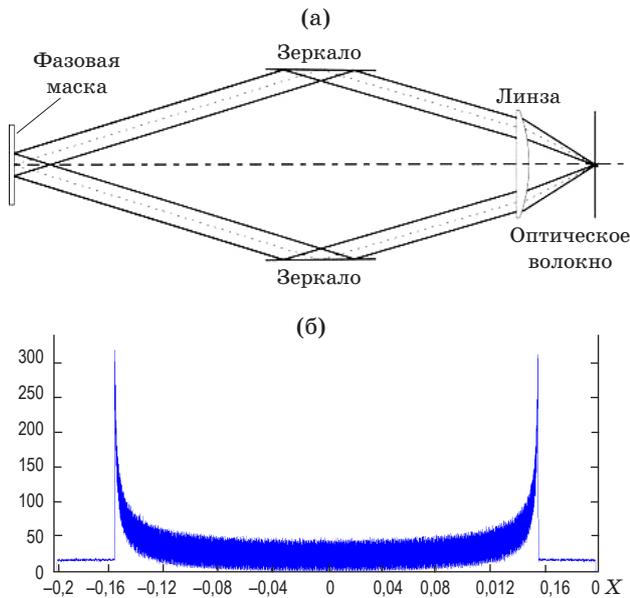
С целью определения закономерности чирпинга и нахождения оптимальной геометрии оптической системы для записи ВРБ проведено моделирование интерферометра Тальбота с различными ЦЛ, имеющими фокусные расстояния  $f' = 50, 70, 500$  мм и охватывающими зону обоих рабочих пучков, либо расположенными только в одном плече интерферометра, а также в комбинации с отрицательными ЦЛ. Чирпинг определялся линейной интерполяцией вдоль ОВ длиной 1 мм.

На рис. 2а приведён первый вариант использования ЦЛ для записи чирпированных ВРБ: ЦЛ расположена на оси интерферометра таким образом, что через неё проходят оба дифрагировавших на фазовой маске пучка. В зависимости от фокусного расстояния ЦЛ чирпинг ВРБ может изменяться от нуля до 20 нм/мм. При этом наблюдается симметричный чирпинг (рис. 2б). Такая схема записи ВРБ обеспечивает малую область записи, которая может быть увеличена при использовании длиннофокусной ЦЛ, но при этом чирпинг не превышает значения 5 нм/мм.

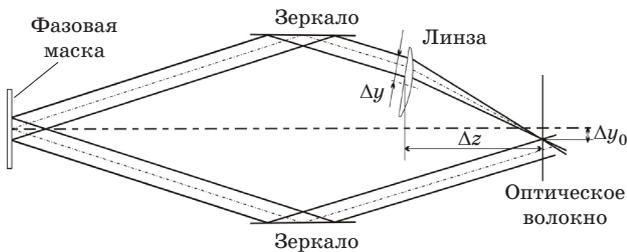
Во втором варианте схемы записи ВРБ ЦЛ расположена в одном из плеч интерферометра (рис. 3). Благодаря ЦЛ возникает оптическая

**Таблица 1.** Результаты расчётов параметров ВРБ

$\lambda_{\text{laser}}, \text{ нм}$	$\Lambda_{\text{Bragg}}, \text{ нм}$	$\delta, \text{ град}$	$\Lambda, \text{ нм}$		Число периодов ВРБ на 1 мм		Откл., %	$z_D, \text{ мм}$
			расчёт	модель	расчёт	модель		
248	1300	2,217	445	405	2246	2467	8,9	223
	1550	0,728	531	480	1884	2066	8,9	244
262	1300	2,742	445	400	2246	2500	10,0	218
	1550	1,162	531	476	1884	2100	10,0	237
633	1300	18,413	445	411	2246	2433	7,6	154
	1550	13,553	531	484	1884	2067	8,9	165



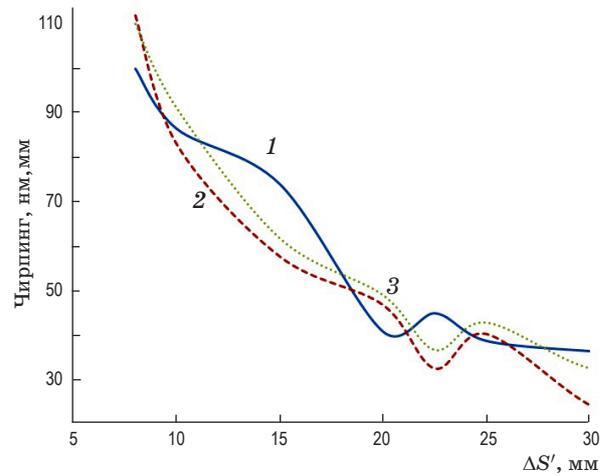
**Рис. 2.** Моделирование интерферометра Тальбота с ЦЛ, расположенной в обоих его пучках. Схема модели (а), распределение излучения в интерференционной картине вдоль ОВ (б).



**Рис. 3.** Моделирование интерферометра Тальбота с цилиндрической линзой, расположенной в одном из его плеч.

разность хода лучей, вследствие чего происходит изменение периодов интерференционной картины. В такой схеме записи ВРБ детектор (ОВ) должен находиться вблизи задней фокальной плоскости ЦЛ. В противном случае, при расфокусировке системы (увеличении расстояния  $\Delta S'$  между задней фокальной плоскостью ЦЛ и детектором) наблюдается снижение чирпинга (рис. 4).

Смещение ЦЛ в поперечном направлении также является эффективным способом влияния на чирпинг, поэтому для дальнейшего анализа он определялся в плоскости детектора (ОВ) – области интерференции, смещённой от оптической оси на  $\Delta y_D$  при поперечных перемещениях ЦЛ  $\Delta y$ . При этом проводился поиск максимального значения чирпинга для заданного положения линзы.



**Рис. 4.** График зависимости чирпинга от расфокусировки.  $f' = 50$  (1), 70 (2), 100 мм (3).

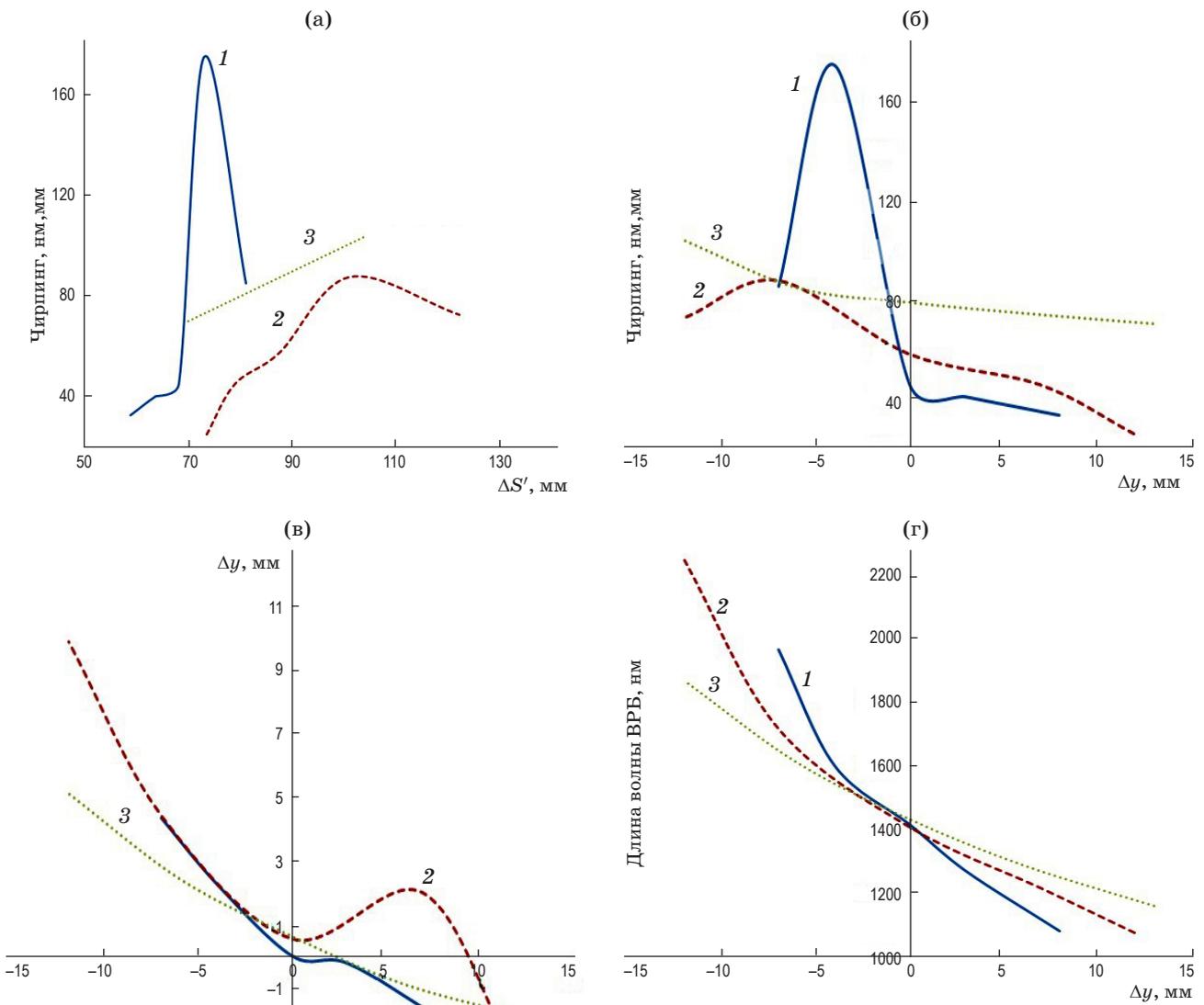
Зависимости чирпинга, полученные для различных ЦЛ при их перемещениях на  $\Delta z$  и  $\Delta y$ , приведены на рис. 5. У ЦЛ с фокусными расстояниями  $f' = 50, 70, 100$  мм получено изменение периода ВРБ от нуля до 170 нм/мм. При этом, чем меньше фокусное расстояние у ЦЛ, тем выше чирпинг, в то время как длиннофокусная ЦЛ ( $f' = 500$  мм) обеспечивает очень слабый чирпинг – менее 5 нм/мм.

Следует отметить, что помимо чирпинга, согласно выражениям (1) и (2), использование ЦЛ вызывает сдвиг рабочих длин волн ВРБ (рис. 5г). При этом вблизи положения  $\Delta y = 0$  не происходит сдвига длины волны ВРБ. Кроме того, именно в таком положении наблюдается максимальный чирпинг. Тем не менее, для некоторых задач возможность сдвигать рабочую длину волны при поперечном перемещении ЦЛ может быть полезной.

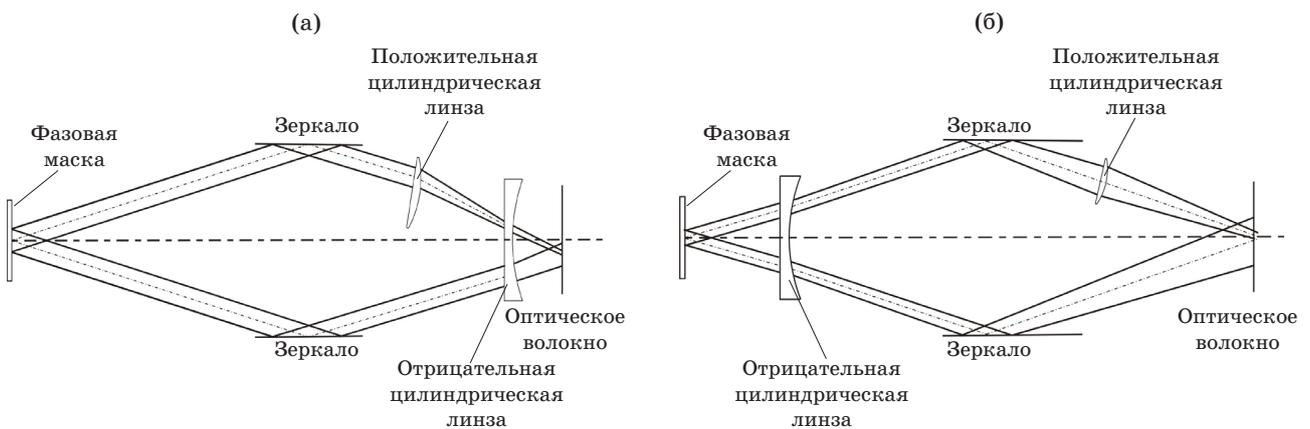
С целью расширения области интерференции и, соответственно, увеличения зоны записи

**Таблица 2.** Размеры области интерференции для различных схем записи ВРБ

Схема	Чирпинг, нм/мм	Размер области интерференции, мм
без рассеивающей линзы	40	0,9
с рассеивающей линзой вблизи оптического волокна	20	1,2
с рассеивающей линзой вблизи фазовой маски	14	3,3



**Рис. 5.** Чирпинг при перемещениях цилиндрической линзы. Продольные перемещения ЦЛ  $\Delta z$  (а), поперечные перемещения ЦЛ  $\Delta y$  (б), зависимость смещения области интерференции  $\Delta y_D$  при поперечных перемещениях ЦЛ  $\Delta y$  (в), сдвиг длины волны ВРБ при поперечных смещениях ЦЛ  $\Delta y$  (г).  $f' = 50$  (1), 70 (2), 100 мм (3).



**Рис. 6.** Интерферометр Тальбота с двумя цилиндрическими линзами. Рассеивающая ЦЛ установлена вблизи ОВ (а), рассеивающая ЦЛ установлена вблизи фазовой маски (б).

ВРБ, в схеме интерферометра Тальбота с ЦЛ в одном из плеч можно использовать дополнительную отрицательную ЦЛ (рис. 6), что позволяет расширить область записи ВРБ, но снижает чирпинг (табл. 2).

### Заключение

В работе исследованы оптические схемы записи чирпированных волоконных решёток Брэгга на основе интерферометра Тальбота с цилиндрическими линзами. Определены геометрические параметры схем записи волоконных решёток Брэгга, работающих на длинах волн 1300 и 1550 нм. Моделирование показало, что применение короткофокусных цилиндрических линз ( $f' < 100$  мм) позволяет полу-

чать чирпинг от нуля до нескольких сотен нанометров, в то время как длиннофокусные цилиндрические линзы обеспечивают слабый чирпинг. Показано, что ЦЛ, установленная в обоих плечах интерферометра, создаёт небольшой чирпинг и формирует малую область интерференции. Для расширения области записи волоконной решётки Брэгга можно использовать вторую отрицательную цилиндрическую линзу.

Результаты работы могут использоваться для выбора оптимальной конфигурации интерферометрической схемы записи волоконных решёток Брэгга с учётом заданных оптических и геометрических параметров системы, а также при настройке и юстировке экспериментальных установок для записи дифракционных решёток.

\* \* \* \* \*

### ЛИТЕРАТУРА

1. *Kashyap R.* Fiber Bragg gratings. San Diego, CA: Academic Press, 2009. 632 p.
2. *Vasil'ev S.A., Medvedkov O.I., Korolev I.G., Bozhkov A.S., Kurkov A.S., Dianov E.M.* Fiber gratings and their applications // *Quant. Electron.* 2005. V. 35. № 12. P. 1085–1103.
3. *Варжель С.В., Куликов А.В., Мешковский И.К., Стригалева В.Е.* Запись брэгговских решёток в двулучепреломляющем оптическом волокне одиночным 20-нс импульсом эксимерного лазера // *Оптический журнал.* 2012. Т. 79. № 4. С. 85–89.
4. *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. V. 62. P. 1035–1038.
5. *Dyer P.E., Farley R.J. and Giedl R.* Analysis of grating formation with excimer laser irradiated phase masks // *Opt. Commun.* 1995. V. 115. P. 327–334.
6. *Chuan Li, Zhang Yi-Mo, Tian Xue-Fei, Xiong Bing-Heng.* Study of wedge-adjusted Talbot interferometer for writing fiber gratings with variable inscribed Bragg wavelengths // *Opt. Eng.* 2003. V. 42. № 12. P. 3452–3455.
7. *Becker M., Bergmann J., Brückner S., Franke M., Lindner E., Rothhardt M.W., Bartelt H.* Fiber Bragg grating inscription combining DUV sub-picosecond laser pulses and two-beam interferometry // *Opt. Exp.* 2008. V. 16. № 23. P. 19169–19178.
8. *Wang Y., Grant J., Sharma A., Myers G.* Modified Talbot interferometer for fabrication of fiber-optic grating filter over a wide range of Bragg wavelength and bandwidth using a single phase mask // *J. Lightwave Technology.* 2001. V. 19. № 10. P. 1569–1573.
9. *Painchaud Y., Chandonnet A., and Lauzon J.* Chirped fiber gratings produced by tilting the fiber // *Electron. Lett.* 1995. V. 31. P. 171–172.
10. *Farries M.C., Sugden K., Reid D.C.J., Bennion I., Molony A., Goodwin M.J.* Very broad reflection bandwidth (44 nm) chirped fiber gratings and narrow band pass filters produced by the use of an amplitude mask // *Electron. Lett.* 1994. V. 30. № 11. P. 891–892.
11. *Lauzon J., Thibault S., Martin J., Ouellette F.* Implementation and characterization of fiber Bragg gratings linearly chirped by a temperature gradient // *Opt. Lett.* 1994. V. 19. № 23. P. 2027–2029.
12. *Zhang Q., Brown D.A., Reinhart L.J., Morse T.F.* Linearly and nonlinearly chirped Bragg gratings fabricated on curved fibers // *Opt. Lett.* 1995. V. 20. № 10. P. 1122–1124.
13. Zemax. Optical design program. User's guide. 18 March, 2014. 879 p.
14. *Nicholson M.* How to produce photo-realistic output images [электронный ресурс] // Zemax official website. URL: <http://www.zemax.com/support/knowledgebase/how-to-produce-photo-realistic-output-images>