

## 47. Отражательные голографические решётки Брэгга в оптическом волокне для датчиков малых вибраций и перемещений

В. М. Петров<sup>1</sup>, С. Н. Жуков<sup>2</sup>, Р. А. Кабиев<sup>1, 2</sup>

<sup>1</sup> Национальный исследовательский университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Дармштадтский технический университет, Дармштадт, Германия

Приводятся результаты теоретических и экспериментальных исследований отражательных решёток Брэгга, созданных в одномодовых оптических волокнах. Исследуется два типа решёток: «обычных», и решёток, имеющих фазовый сдвиг между частями решётки. Исследуется зависимость коэффициента отражения таких решёток от длины волны падающего света. Экспериментально продемонстрирована возможность использования решёток с фазовым сдвигом для создания датчиков малых периодических механических перемещений, способных измерять амплитуду колебаний до долей нанометров.

*Ключевые слова:* Отражательные голограммы Брэгга, Оптическое волокно, Датчики малых перемещений.

*Цитирование:* Петров, В. М. Отражательные голографические решётки Брэгга в оптическом волокне для датчиков малых вибраций и перемещений / В. М. Петров, С. Н. Жуков, Р. А. Кабиев // HOLOEXPO 2020 : XVII международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2020. — С. 301–309.

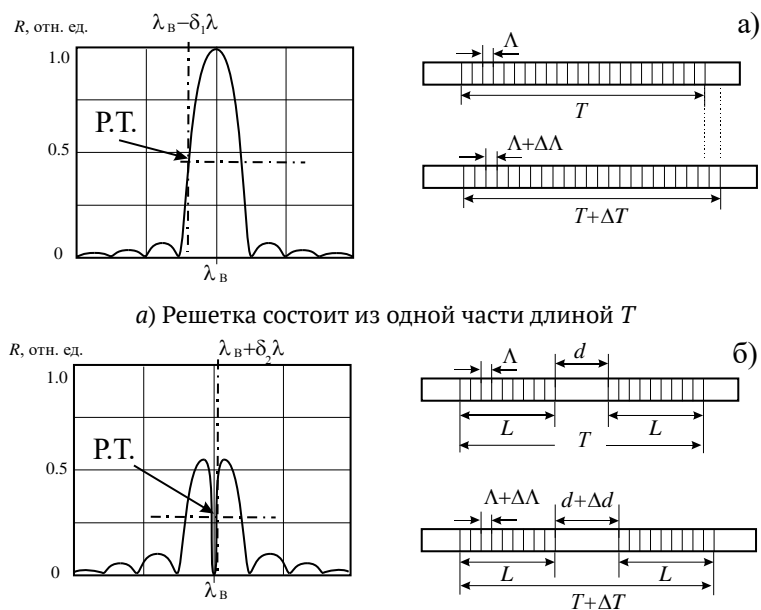
### Введение

Обычное оптическое волокно, изготовленное из плавленого кварца, обладает определённой эластичностью. Это позволяет создавать различные волоконно-оптические устройства, работа которых основана на механическом растяжении волокна, т. е. изменении его длины. Изменение длины волокна под действием различных внешних факторов используется для создания широкого круга датчиков давления, температуры, малых перемещений [1, 2].

Особое место здесь занимают устройства, объединяющие в себе оптическое волокно и отражательные решётки Брэгга. Их высокая спектральная селективность позволяет создавать высококачественные волоконно-оптические фильтры. Возможность растяжения волокна позволяет производить перестройку фильтра по длине волны, что открывает широкие функциональные возможности для их применения.

Создание разности фаз между частями одной отражательной решётки позволяет изменять профиль её отклика, т. е. позволяет изменять форму зависимости коэффициента отражения решётки от длины волны падающего на неё света  $R(\lambda)$ .

Пожалуй, впервые, идея использовать такие решётки для создания управляемых оптических демультимплексоров была предложена в [1]. Позднее эффективность использования отражательных решёток с фазовым сдвигом была продемонстрирована для измерения локальных давлений [2], для управления шириной полосы генерации волоконных лазеров [3], для



**Рис. 1.** Зависимость коэффициента отражения решётки Брэгга от длины волны. Общая длина решётки в обоих случаях одинакова и равна  $T$ . Положение рабочей точки Р. Т. по оси  $x$  соответствует  $\lambda = \lambda_B - \delta_1 \lambda$  (а) и  $\lambda = \lambda_B + \delta_2 \lambda$  (б).

управления формы отклика оптических фильтров [4, 5], для создания сверх-узкополосных оптических фильтров [6, 7].

Хорошо известно условие дифракции Брэгга на периодической фазовой решётке в отражательной геометрии [8]

$$\lambda_B = 2n\Lambda, \quad (1)$$

где  $\lambda_B$  — длина волны Брэгга,  $n$  — средний показатель преломления вещества, в котором создана решётка, и  $\Lambda$  — пространственный период решётки. Изменение  $\lambda_B$  может происходить за счёт изменения периода решётки  $\Lambda$ , например, при механическом изменении длины (растяжении) решётки (рисунок 1а). В линейном случае, когда можно пренебречь изменением показателя преломления за счёт эласто-оптического эффекта, малые изменения длины решётки  $T + \Delta T$  приводят к соответствующим линейным изменениям периода  $\Lambda + \Delta\Lambda$ , что в свою очередь приводит к изменению длины волны Брэгга решётки  $\lambda_B + \Delta\lambda$ . Используя лазер, длина волны которого настроена на длину волны рабочей точки (Р. Т.), находящейся на линейном участке склона зависимости  $R(\lambda)$  можно определить величину абсолютного изменения длины решётки  $T + \Delta T$  по изменению величины отражаемой мощности падающего излучения решёткой. Этот принцип лежит в основе использования волоконных решёток Брэгга в качестве датчиков малых перемещений [1].

В рамках данной работы мы продемонстрируем возможность использования в качестве датчика линейный перемещений отражательную решётку Брэгга, состоящую из двух отдельных, последовательно расположенных частей. В этом случае возникает дополнительная степень свободы — разница фаз между частями решётки  $\Delta\phi$  (рисунок 1б). Для случая  $\Delta\phi = \pi$ , при

этом, в зависимости  $R(\lambda)$  появляется узкий минимум на длине волны Брэгга (рисунок 1б). Можно видеть, что угол наклона касательной к функции  $R(\lambda)$  в окрестности Р. Т. этом случае заметно превышает угол наклона в окрестности Р. Т. для «обычной» решётки, показанной на рисунке 1а. Таким образом, выбрав Р. Т. на одном из внутренних склонов, можно существенно улучшить способность датчика измерять малые линейные перемещения.

Целью данной работы является проведение исследования зависимости коэффициента отражения от длины волны как обычных отражательных решёток Брэгга, так и решёток, состоящих из двух частей и с разностью фаз между ними. Рассматриваются решётки, записанные в стандартном одномодовом оптическом волокне, и исследуется влияние малого механического растяжения на форму и положение отклика решётки относительно шкалы длин волн.

### 1. Теоретическая модель

В современной литературе имеются различные подходы к вычислению отклика последовательно расположенных двух или более отражательных решёток, имеющих фазовый сдвиг между собой. Для получения аналитического решения может быть использована теория связанных волн Когельника [8]. Несмотря на то, что изначально такой подход был использован для исследования дифракционных процессов в трёхмерных, т. е. «объёмных» решётках, как показывает практика, этот подход даёт хорошее согласие между теорией и экспериментом и для случая решётки, созданной в одномодовом симметричном волноводе.

Подробное описание процедуры вычисления общего случая передаточной функции отражательной решётки Брэгга, состоящей из нескольких частей разной длины можно найти в [5, 6, 9].

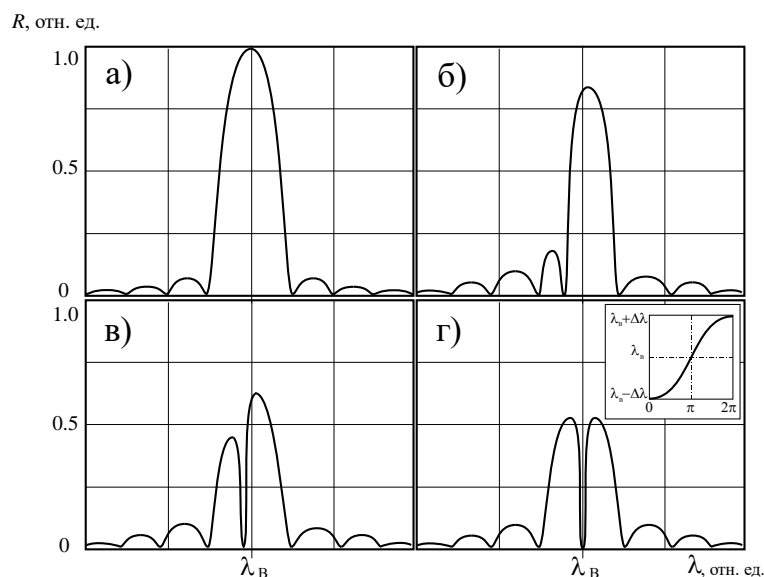
Применим полученные результаты для случая, когда фазовая отражательная решётка Брэгга состоит из двух частей одинаковой длины  $L$ , и она имеет следующее распределение показателя преломления  $n(z)$  вдоль направления распространения считывающего света (рисунок 1б):

$$n(z) = \begin{cases} n + n_1 \cos(K_g + \phi_1), & 0 \leq z \leq L. \\ n + n_1 \cos(K_g + \phi_2), & L + d \leq z \leq T. \end{cases} \quad (2)$$

Здесь  $d$  — расстояние между частями решётки,  $T$  — общая длина решётки,  $K_g = 2\pi/\lambda$  — волновой вектор решётки,  $\Lambda$  — период решетки,  $n_1$  — амплитуда фазовой отражательной решётки в обеих частях.

Тогда для этого случая можно показать, что выражение для коэффициента отражения решётки  $R$  имеет вид

$$R(\lambda) = \frac{\left| \sqrt{1-x^2} \operatorname{ctg} \varphi \operatorname{sh}(\gamma d \sqrt{1-x^2}) - 2x \operatorname{sh}^2\left(\frac{\gamma d}{2} \sqrt{1-x^2}\right) \right|^2}{\left| i + \operatorname{ch}(\gamma d \sqrt{1-x^2}) \left[ (1-x^2) \operatorname{ctg} \varphi - ix^2 \right] + x \sqrt{1-x^2} \operatorname{sh}(\gamma d \sqrt{1-x^2}) (i \cot \varphi - 1) \right|^2} \quad (2)$$



**Рис. 2.** Зависимость коэффициента отражения решётки от длины волны для различных значений  $\Delta\varphi$ . Вычисления производились по формуле (2):  $\Delta\varphi = 0$  (а),  $\Delta\varphi = \pi/3$  (б),  $\Delta\varphi = 2\pi/3$  (в),  $\Delta\varphi = \pi$  (г). На фрагменте г показана зависимость положения центрального минимума от  $\Delta\varphi$ .

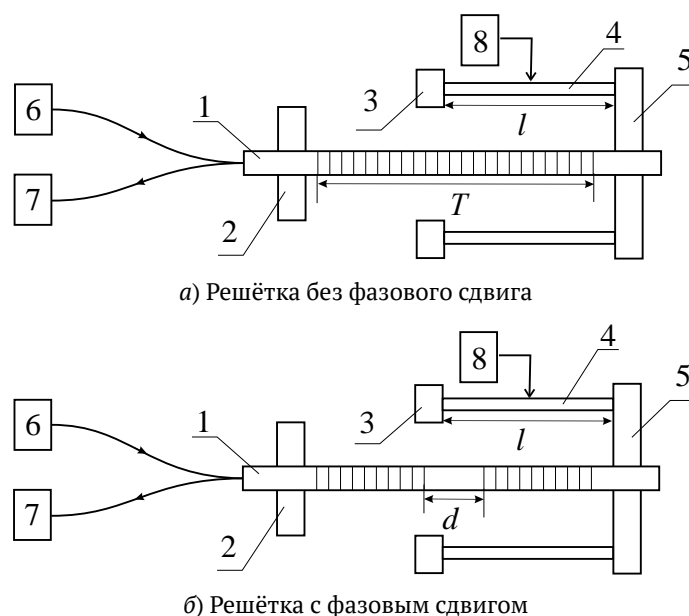
Здесь  $x = 2n/n_1 (\Lambda\lambda/\lambda)$ ,  $\gamma = \pi n_1/\lambda$ .

На рисунках 2а–2г представлены теоретические зависимости  $R(\lambda)$  для случаев  $\Delta\varphi = 0$ ,  $\Delta\varphi = \pi/3$ ,  $\Delta\varphi = 2\pi/3$ , и  $\Delta\varphi = \pi$ . Из представленных зависимостей отчётливо прослеживается формирование минимума слева от центрального максимума и его смещение к центру по мере увеличения разницы фаз между секциями. При величине разности фаз  $\Delta\varphi = \pi$  между секциями, положение минимума точно соответствует длине волны Брэгга  $\lambda_B$ . Здесь же отметим, что для случая  $\Delta\varphi = 0$ , спектральный отклик по форме совпадает со спектральным откликом «обычной» отражательной решётки Брэгга.

## 2. Эксперимент

Схема экспериментальной установки для исследования зависимости коэффициента отражения решётки от длины волны приведена на рисунке 3. Были исследованы два типа решеток: решётка без сдвига фаз (рисунок 3а), и решётка со сдвигом фаз между двумя частями (рисунок 3б). Решётки записывались в пропускающей геометрии при помощи импульсного лазера на длине волны  $\lambda = 320$  нм. Для записи решётки без фазового сдвига волокно освещалась интерференционной картиной, длина освещаемой части волокна составляла  $T = 30$  мм, и в волокне записывалась решётка такой же длины. Для записи решётки, состоящей из двух частей с фазовым сдвигом между ними, в волокне сначала записывалась решётка длиной  $L = 15$  мм, затем волокно сдвигалось на расстояние  $d$ , кратное целому числу длин полуволен  $\lambda_B$ .

В наших экспериментах расстояние  $d$  находилось в интервале 3–5 мкм. Таким образом, в экспериментах, соответствующих случаю, изображённому на рисунке 2б, записывалась решётка, состоящая из двух частей, разность фаз между которыми в исходном состоянии уже составляла  $\Delta\varphi = 0$ .



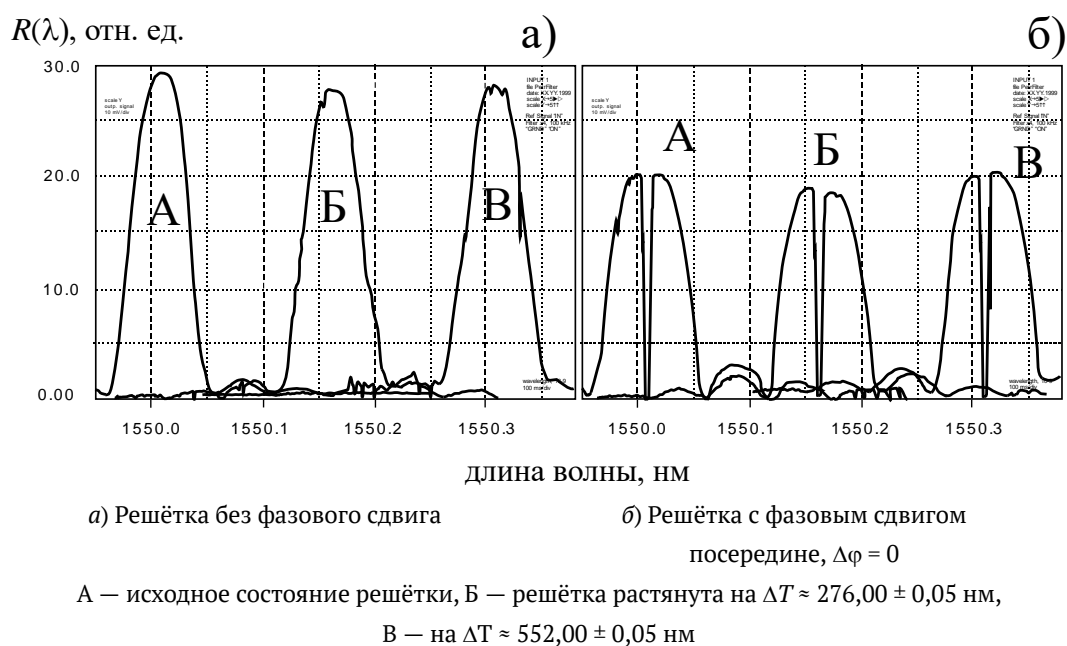
1 — волокно, 2 — неподвижная муфта, 3 — опора пьезопреобразователя, 4 — пьезопреобразователь, 5 — подвижная муфта, 6 — перестраиваемый лазер, 7 — фотоприёмник и осциллограф, 8 — источник пилообразного напряжения

**Рис. 3.** Схема экспериментальной установки для исследования зависимости коэффициента отражения решётки от длины волны

Особое внимание было уделено системе крепления волокна и его растяжения. На рисунке 3. показано поперечное сечение устройства крепления волокна. Главная задача системы крепления — обеспечить одинаковые условия растяжения двух образцов волокна. Для создания механического растяжения использовался цилиндрический пьезопреобразователь 4. К пьезопреобразователю прикладывалось управляющее напряжение пилообразной формы, что вызывало его линейное увеличение, и, следовательно, увеличение длины решётки  $T$ . Муфта 2 обеспечивала неподвижную фиксацию одного конца волокна, другой конец волокна фиксировался муфтой 5 (рисунок 3а).

Сам пьезопреобразователь был откалиброван по хорошо опробованной методике двухволнового взаимодействия, использованной, например, при абсолютных измерениях давления света и взаимодействия Казимира [10]. Отметим, что данная методика позволяет производить калибровку пьезопреобразователей, т. е. получать зависимость абсолютного удлинения от приложенного напряжения, с точностью до долей нанометра. Использование одного и того же пьезопреобразователя в обоих экспериментах, а также наличие его абсолютной калибровки позволяет нам говорить о высокой надежности абсолютных величин полученных результатов.

Измерения производились при помощи высокоточного перестраиваемого по длине волны лазера Agilent 6. Согласно техническому описанию данного лазера, точность установки длины волны составляет  $\pm 0,005$  нм. Регистрация сигнала производилась при помощи фото-



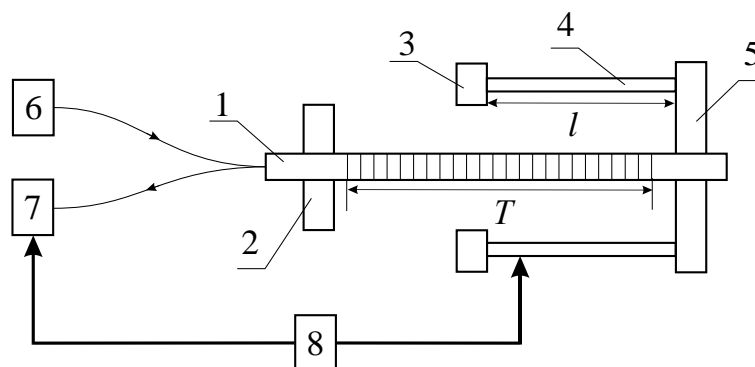
**Рис. 4.** Зависимости коэффициента отражения от длины волны  $R(\lambda)$  отражательной решётки Брэгга

приёмника и запоминающего осциллографа 7. Развёртка осциллографа была синхронизирована со скоростью сканирования лазера по длине волны, что позволяло получать на экране осциллографа зависимости  $R(\lambda)$ .

На рисунке 4а показаны примеры экспериментально измеренных зависимостей  $R(\lambda)$  для решётки без фазового сдвига, т. е. случай на рисунке 3а. График А соответствует исходному, не растянутому состоянию решётки. Измеренная длина волны Брэгга в этом случае  $\lambda_B \approx 1550,015 \pm 0,005$  нм. На графике Б показана зависимость  $R(\lambda)$  для решётки, растянутой, относительно начального состояния, на  $\Delta T \approx 276,00 \pm 0,05$  нм. Измеренная длина волны Брэгга в этом случае составила  $\lambda_B \approx 1550,165 \pm 0,005$  нм. На графике «В» показана зависимость  $R(\lambda)$  для решётки, растянутой, относительно начального состояния, на  $\Delta T \approx 552,00 \pm 0,05$  нм. Измеренная длина волны Брэгга в этом случае составила  $\lambda_B \approx 1550,315 \pm 0,005$  нм. Дифракционная эффективность решётки составила примерно 15%. В данных экспериментах величина дифракционной эффективности, форма отклика и спектральная селективность решётки практически не изменялись.

Дополнительные исследования показали, что при заданной длине растягиваемой решётки  $T = 30$  мм, её растяжение на величину до 700 нм обеспечивает линейную зависимость  $\Delta\lambda_B(\Delta T)$ . Дальнейшее растяжение волокна приводит к заметному изменению формы отклика решётки и нарушению линейной связи между растяжением волокна и изменением длины волны Брэгга решётки. Этот случай в рамках данной работы не рассматривается.

На рисунке 4б показаны аналогичные зависимости  $R(\lambda)$  для образца решётки с фазовым сдвигом  $\Delta\varphi = \pi$  (рисунке 2б). Можно видеть, что в этом случае зависимость  $R(\lambda)$  имеет харак-



1 – волокно, 2 – неподвижная муфта, 3 – опора пьезопреобразователя, 4 – пьезопреобразователь, 5 – подвижная муфта, 6 – перестраиваемый лазер, 7 – фотоприёмник и синхронный фазовый детектор, 8 – источник периодического напряжения

**Рис. 5.** Схема экспериментальной установки для исследования датчика малых периодических перемещений

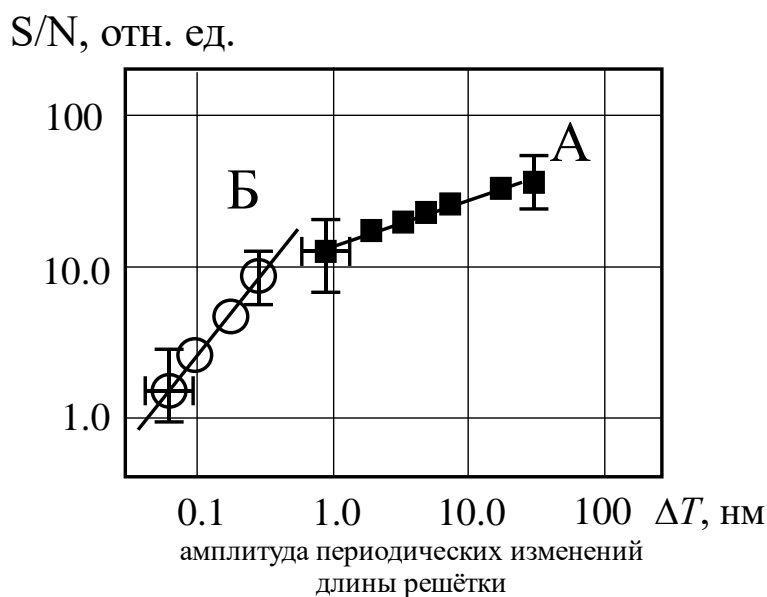
терный узкий минимум на длине волны Брэгга. По мере растяжения волокна происходит изменение периода решётки, что приводит к увеличению длины волны Брэгга, и, соответственно, к сдвигу центрального минимума.

На рисунке 5 показана схема установки для исследования датчика малых периодических перемещений на основе оптического волокна с отражательной решёткой Брэгга как без фазового сдвига, так и с фазовым сдвигом.

Элементы установки 1–6 полностью совпадают с элементами установки, показанными на рисунке 3. Отличие состоит в элементах 7 и 8. В данном эксперименте использовались фотоприёмник, подключённый к синхронному фазовому детектору серии Sr 810 DSR – Lock-in Amplifier 7, а в качестве элемента 8 – использовался источник электрического напряжения, имеющего вид  $U = U_0 + U_m \cos \Omega t$ . Постоянное смещение  $U_0$  позволяло создавать постоянное растяжение волокна, соответствующее состоянию Б (рисунке 4). Переменная величина напряжения  $U_m$  создавала периодическое изменение длины решётки  $T = T + \Delta T \cos \Omega t$ . Здесь  $\Delta T$  – малое периодическое изменение длины решётки, которое необходимо измерить. Гармонический синхросигнал на частоте  $\Omega/2\pi$  с 8 поступал на 7, что позволяло обеспечивать синхронное детектирование измеряемой амплитуды сигнала. Рабочая частота  $\Omega/2\pi$  была выбрана равной 87,14 Гц исходя из наибольшего отношения сигнал-шум при выполняемых измерениях. Измерения проводились в полосе частот 0,3 Гц.

Длина волны лазера в этих экспериментах была фиксированной, и устанавливалась таким образом, чтобы Р. Т. находилась примерно на середине склона зависимости  $R(\lambda)$  (рисунк 1).

Измерения производились следующим образом. При периодическом изменении длины решетки относительно среднего значения, соответствующего состояниям Б на рисунке 4, происходило периодическое изменение отражённой мощности падающего на решётку света. Данные периодические изменения регистрировались фотоприёмником, а затем изменения тока фотоприёмника регистрировались при помощи синхронного фазового детектора.



А — решётка без фазового сдвига, Б — решётка с фазовым сдвигом.

**Рис. 6.** Зависимость отношения сигнал-шум на выходе датчика периодических перемещений от амплитуды перемещений. Сплошные линии — результат вычисления по формуле 2 касательной в Р. Т.

На рисунке 6 показаны амплитуды выходного электрического сигнала в зависимости от изменения длины решётки — зависимость А, когда используется решётка без фазового сдвига, и рабочей точкой в случае, как показано на рисунке 1а, и зависимость Б — для решётки с фазовым сдвигом, и рабочей точкой, как показано на рисунке 1б.

### Заключение

Чувствительность любого датчика определяется углом наклона касательной, проведённой к рабочей точке. Как следует из представленных нами теоретических и экспериментальных результатов, при использовании отражательной решётки Брэгга с фазовым сдвигом посередине, можно получить чувствительность такого датчика в 6–10 раз лучшую, чем при использовании обычной решётки Брэгга.

Экспериментально продемонстрированная в данной работе чувствительность датчика малых периодических перемещений составила: для «обычной» отражательной решётки Брэгга — примерно 0,8 нм, для отражательной решётки с фазовым сдвигом — примерно 0,06 нм при измерениях на гармоническом сигнале в полосе частот 0,3 Гц.

Угол наклона касательной в случае «обычной», т. е. без фазового сдвига отражательной решётки Брэгга определяется её спектральной селективностью  $\Delta\lambda$ , которая, в свою очередь, определяется толщиной решётки  $T$ . Однако, используя решётку той же толщины  $T$ , но со сдвигом фаз между её половинами, можно всегда получить чувствительность датчика лучшую, чем для «обычной» решётки.

В предельном случае чувствительность такого датчика будет определяться длиной когерентности используемого лазера.



### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] **Kashiyap, R.** Fiber Bragg Gratings / R. Kashiyap. — USA : Academic Press, 1999. — 459 p.
- [2] **Torres, P.** Spectral response of locally pressed fiber Bragg grating / P. Torres, L. C. G. Valente // Optics Communications. — 2002. — Vol. 208. — P. 285–291.
- [3] **Agrawal, G. P.** Phase-Shifted Fiber Bragg Gratings and their Application for Wavelength Demultiplexing / G. P. Agrawal, S. Radic // IEEE Photonics Technology Letters. — 1994. — Vol. 6. — №3. — P. 995–997.
- [4] **Sun, J.** Fabrication of  $\pi$  phase-shifted grating and its application in narrow linewidth 1.5  $\mu\text{m}$  Er-doped fiber lasers / J. Sun, Z. Wang, M. Wang, et al. // Optics Communications. — 2018. — Vol. 407. — P. 345–348.
- [5] **Petrov, V. M.** Control of optical transfer function by phase-shift keying of a holographic Bragg grating / V. M. Petrov, S. Lichtenberg, J. Petter, et al. // Optics Communications. — 2004. — Vol. 229. — P. 131–139.
- [6] **Heinisch, C.** Phase-Shift Keying of an Optical Bragg Cell Filter / C. Heinisch, S. Lichtenberg, V. M. Petrov, et al. // Optics Communications. — 2005. — Vol. 253. — P. 320–331.
- [7] **Lumineau, J.** Phase-shifted volume Bragg gratings in photo-thermo-refractive glass / J. Lumineau, V. Smirnov, L. Glebov // Proc. of SPIE. — 2008. — Vol. 6890. — P. 68900A.
- [8] **Kogelnik, H.** Coupled wave theory for thick hologram gratings / H. Kogelnik // Bell System Technical Journal. — 1969. — Vol. 48. — P. 2909–2947.
- [9] **Petrov, V. M.** A dynamic narrow-band tunable optical filter / V. M. Petrov, C. Karaboue, J. Petter, et al. // Applied Physics B. — 2003. — Vol. 76. — №1. — P. 41–44.
- [10] **Петров, В. М.** Интерференция и дифракция для информационной фотоники / В. М. Петров, А. В. Шамрай. — С.-Петербург : Лань, 2019. — 460 с.