

## ВОЛОКОННАЯ ОПТИКА

# Узкополосный волоконный отражатель на основе отражательного интерферометра с волоконной брэгговской решеткой

В.С.Терентьев, А.А.Власов, С.Р.Абдуллина, В.А.Симонов, М.И.Скворцов, С.А.Бабин

*Впервые продемонстрирован метод узкополосной фильтрации излучения в отраженном свете на основе отражательного интерферометра с волоконной брэгговской решеткой в качестве заднего зеркала. Отражательный интерферометр выполнен в одномодовом волокне типа SMF-28e, его переднее зеркало, в структуре которого содержится тонкая металлическая пленка, обладает асимметрией по коэффициентам отражения с разных сторон. Ширина полосы отражения экспериментального образца составляет 0.5 нм (62 МГц) на длине волны 1556 нм (добротность  $3 \times 10^6$ ), максимальный коэффициент отражения равен 0.21, контраст –  $10^2$ . Использование узкополосной ВБР вместо тонкопленочных широкополосных зеркал позволяет значительно увеличить спектральную селекцию за счет удлинения базы интерферометра.*

**Ключевые слова:** волоконная оптика, многолучевая интерференция, отражательный интерферометр, тонкая металлическая пленка, диэлектрическое интерференционное покрытие, волоконная брэгговская решетка.

## 1. Введение

Узкополосные волоконные спектральные фильтры применяются в спектроскопии, для селекции лазерного излучения, в сенсорных системах. Существуют различные методы фильтрации излучения, наиболее распространенными из них являются методы фильтрации в проходящем свете, когда свет проходит через фильтр (интерферометр Фабри–Перо [1], резонатор с распределенной обратной связью [2], кольцевые резонаторы, резонаторы шепчущих мод [3, 4] и др.). Эти методы неприменимы для задач, решение которых требует узкополосной фильтрации излучения в отраженном свете (например, для одночастотной селекции длины волны волноводных лазеров или лазерных диодов с линейным резонатором). В качестве отражательных фильтров могут применяться волоконные брэгговские решетки (ВБР), в том числе длинные ВБР, записанные с помощью аргонового лазера [5], и сверхдлинные ВБР, сформированные методом фемтосекундной модификации [6], а также волоконные и интегрально-оптические многорезонаторные системы [7]. Перечисленные методы имеют определенные недостатки. Это, например, сравнительно широкая спектральная полоса селекции (более 100 нм для обычных ВБР) или относительно сложная технология и повышенная чувствительность параметров фильтров к вибрациям и температурным флуктуациям из-за большой длины кварцевых резонаторов. Для задач одночастотной селекции излучения в лазерах желательно

иметь отражательный фильтр со спектрально-узким пиком отражения во всей области усиления активной среды. При этом данный пик может быть не единичным, но он должен значительно превышать другие пики по амплитуде, что особенно важно для сред с широким спектральным диапазоном усиления, например на основе ионов  $\text{Er}^{3+}$  и  $\text{Yb}^{3+}$  или полупроводниковых оптических усилителей. Применение отражательного волоконного интерферометра с широкополосными диэлектрическими зеркалами для одночастотной селекции излучения [8] показало, что множественные спектральные порядки интерференции в отражении могут играть паразитную роль, в частности снижать отношение сигнал/шум, а также потенциально создавать условия для многоволновой генерации.

Целью настоящей работы является демонстрация метода получения спектрально-узкого пика отражения для узкополосной фильтрации света или внутривибрационной одночастотной селекции излучения лазеров с волоконными/волноводными резонаторами с помощью отражательного интерферометра [9] на основе зеркала с металлической пленкой и ВБР. Особенности данного метода заключаются в использовании подобного резонатору Фабри–Перо волоконного резонатора, образованного изготовленным по тонкопленочной технологии асимметричным по коэффициентам отражения зеркалом, а также ВБР, записанной УФ излучением лазера через фазовую маску. Его преимущества состоят в относительной простоте и доступности технологии, обеспечивающей достаточно высокую добротность (более  $10^6$ ) отражательного фильтра, габариты которого ( $\varnothing 3 \times 50$  мм) облегчают температурную и вибрационную стабилизацию его параметров.

## 2. Отражательный интерферометр с ВБР

На рис. 1,а представлена схема фильтра в виде отражательного интерферометра на базе ВБР. Он состоит из двух одномодовых оптических волокон, расположенных в волоконных втулках длиной до 15 мм (с металлическим

В.С.Терентьев, А.А.Власов, С.Р.Абдуллина, В.А.Симонов. Институт автоматизации и электрометрии СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 1; e-mail: terentyev@iae.nsk.su  
М.И.Скворцов, С.А.Бабин. Институт автоматизации и электрометрии СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 1; Новосибирский государственный университет, Россия, 630090 Новосибирск, ул. Пирогова, 1

Поступила в редакцию 9 апреля 2018 г., после доработки – 16 мая 2018 г.

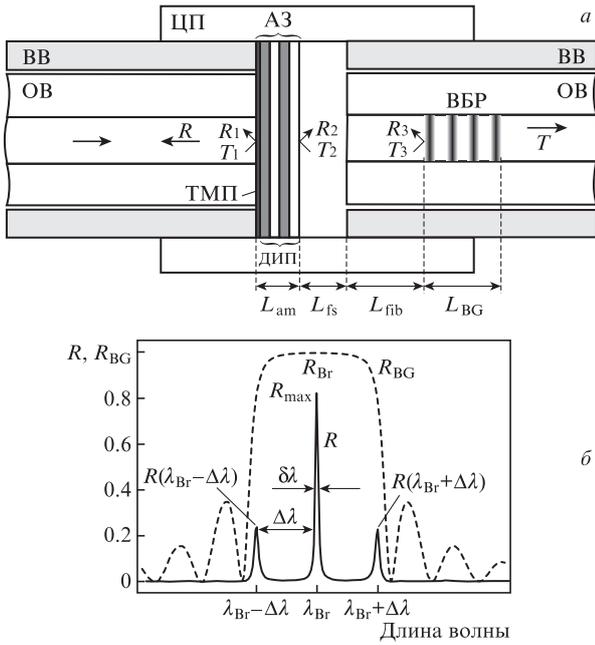


Рис.1. Отражательный узкополосный светофильтр – схема резонатора (а) и спектры отражения фильтра (R) и ВБР (R<sub>ВГ</sub>) (б): ОВ – одномодовое оптическое волокно; ВВ – волоконная втулка; ЦП – цилиндрическая пружина; ТМП – тонкая металлическая пленка; ДИП – диэлектрическое интерференционное покрытие; АЗ – асимметричное по коэффициентам отражения зеркало; R<sub>1,2,3</sub>, T<sub>1,3</sub> – коэффициенты отражения и пропускания зеркал; L<sub>ам</sub>, L<sub>fs</sub>, L<sub>fib</sub> и L<sub>BG</sub> – длины соответствующих участков базы; R<sub>max</sub> – максимальный коэффициент отражения; δλ – ширина на полувысоте; Δλ – область свободной дисперсии фильтра; R<sub>Вр</sub> – коэффициент отражения ВБР на брэгговской длине волны λ<sub>Вр</sub>.

фланцем), центрированных с помощью цилиндрической пружины с внешним диаметром 3.2 мм. На торец левого оптического волокна (ОВ) нанесено асимметричное по коэффициентам отражения зеркало (далее асимметричное зеркало, АЗ), состоящее из тонкой металлической пленки и диэлектрического интерференционного покрытия. Асимметричное зеркало может иметь очень низкий коэффициент отражения со стороны источника света и высокий коэффициент отражения с обратной стороны:  $0 \leftarrow R_1 \ll R_2 < 1$  (при этом  $R_2$  может быть близким к единице). Такая резкая асимметрия обусловлена наличием тонкой металлической (никелевой) пленки толщиной  $h \approx 10$  нм, которая создает существенные (~30%) потери для бегущей волны света в результате омического поглощения. Для стоячей волны вносимые такой пленкой потери будут зависеть от ее положения: в узле стоячей волны, где амплитуда поля минимальна, потери в пленке значительно (в  $\sim (\lambda/h)^2$  раз) снижаются ( $\lambda$  – длина световой волны в вакууме). Свойства оптимизированной структуры асимметричного зеркала ( $R_1 \rightarrow 0$ ) таковы, что оптические толщины слоев диэлектрического интерференционного покрытия должны быть не кратны четверти длины волны, причем толщина первого слоя отличается от нее значительно, а отличие последующих слоев может достигать до 10% [10]. Потерями на рассеяние (дифракционную расходимость) при распространении основной моды волокна через АЗ можно пренебречь, т. к. геометрическая толщина зеркала для примерно десяти слоев из диэлектриков TiO<sub>2</sub>, SiO<sub>2</sub> пренебрежимо мала ( $L_{ам} < 1.5\lambda$ ). Пропускание асимметричного зеркала является взаимным ( $T_1 \equiv T_2$ ), причем при  $R_1 \rightarrow 0$  пропускание  $T_1 \rightarrow (1 - R_2)/2$  [10]. В правом волокне

на расстоянии L<sub>fib</sub> от торца сформирована ВБР с коэффициентом отражения R<sub>3</sub>, при этом отражение на границе торец–воздух не учитывается. Амплитудные коэффициенты отражения (r) и пропускания (t) такого интерферометра в приближении плоских волн описываются формулами [11]

$$r = r_1 + \frac{t_1 t_2 r_3 \exp(-i2\psi)}{1 - r_2 r_3 \exp(-i2\psi)}, \quad (1)$$

$$t = \frac{t_1 t_3 \exp(-i\psi)}{1 - r_2 r_3 \exp(-i2\psi)}, \quad (2)$$

где амплитудные коэффициенты зеркал  $r_j = \sqrt{R_j} \exp(i\psi_j)$  и  $t_j = \sqrt{T_j} \exp(i\Phi_j)$  ( $j = 1, 2$  для разных сторон АЗ,  $j = 3$  для ВБР) выражаются через энергетические коэффициенты отражения (R<sub>j</sub>) и пропускания (T<sub>j</sub>) и их фазы  $\psi_j$ ,  $\Phi_j$ ;  $\psi = 2\pi L/\lambda$ ;  $L = L_{fs} + n(L_{fib} + L_{eff})$  – полная оптическая длина базы; L<sub>fs</sub> – длина воздушного промежутка; L<sub>fib</sub> – длина свободного участка волокна до ВБР; L<sub>eff</sub> – эффективная длина ВБР [12]; n – эффективный коэффициент преломления основной моды волоконной части базы интерферометра;  $R = |r|^2$ ;  $T = |t|^2$ .

Из (1) видно, что коэффициент отражения R определяется интерференцией двух пучков – «нулевого» (с амплитудой r<sub>1</sub>), отраженного от АЗ, и выходящего из резонатора пучка, образованного в результате многолучевой интерференции. Коэффициент пропускания T (2) определяется только одним проходящим пучком. При двухлучевой интерференции в отражении форма спектра отражения изменится и картина станет асимметричной, если изменять фазы амплитудных коэффициентов АЗ, что возможно для зеркал с потерями. Например, при комбинации фаз  $\theta = \psi_1 + \psi_2 - 2\Phi_1 \neq m\pi$  ( $m$  – целое) будут сформированы несимметричные пики в отражении [9, 13], тогда как полностью симметричные пики получаются при  $\theta = m\pi$  или в случае  $R_1 = 0$  (для зеркала без потерь при  $\theta = (2m + 1)\pi$ ).

Детальный расчет параметров асимметричного зеркала сравнительно сложен, он учитывает параметры пленки и согласованного диэлектрического покрытия, однако можно с достаточно хорошей точностью описать параметры интерферометра для рассматриваемого АЗ при его энергетических коэффициентах  $R_1 = 0$  и  $T_1 = (1 - R_2)/2$ ; тогда выражение (1) с точностью до постоянного коэффициента будет эквивалентно выражению (2) [14]. Для данного случая при  $\psi = (\psi_2 + \psi_3)/2 - \pi m$  коэффициент отражения будет максимальным:

$$R_{max} = \frac{(1 - R_2)^2 R_3}{4(1 - \sqrt{R_2 R_3})^2}. \quad (3)$$

Из (3) следует, что при  $R_3 = 1$  коэффициент  $R_{max} = (1 + \sqrt{R_2})^2/4$ . На практике достаточно трудно выполнить условие  $R_1 = 0$ , поэтому в реальных интерферометрах всегда будет вклад нулевого пучка в асимметрию формы спектра [9]. При  $R_1 \rightarrow 0$  резкость полос интерферометра

$$F = \frac{\pi^4 \sqrt{R_2 R_3}}{1 - \sqrt{R_2 R_3}}. \quad (4)$$

Длина заднего зеркала резонатора (ВБР) L<sub>BG</sub> при заданной вариации коэффициента преломления сердцевинки влияет на ширину спектра и коэффициент отражения R<sub>BG</sub>(λ), а также на максимум R<sub>Вр</sub> = R<sub>BG</sub>(λ<sub>Вр</sub>) на брэггов-

ской длине волны  $\lambda_{Br}$  (рис. 1, б). При подстановке  $R_3 = R_{BG}$  в (1) и фазовом согласовании длины воздушного промежутка  $L_{fs}$ , в спектре отражения интерферометра можно получить один центральный высокий пик  $R_{max}$  на длине волны  $\lambda_{Br}$  и два побочных меньших пика на длинах волн  $\lambda_{Br} \pm \Delta\lambda$  (рис. 1, б). Степень фильтрации излучения  $\delta\lambda$  (спектральную ширину пика на полувысоте) можно определить, зная резкость полос  $F$  и допустимую область свободной дисперсии  $\Delta\lambda$  (т.е. такую оптическую длину базы интерферометра  $L \approx \lambda_{Br}^2/(2\Delta\lambda)$ , при которой величина побочных пиков много меньше центрального):

$$\delta\lambda = \Delta\lambda/F. \quad (5)$$

Таким образом, для повышения степени фильтрации требуются как можно большая резкость полос  $F$  (реально получить  $F = 10^2 - 10^3$ ), максимально высокий коэффициент отражения ВБР ( $R_{Br} \rightarrow 1$ ) и как можно меньшая область  $\Delta\lambda$ . Последняя определяется спектральной шириной ВБР, в том числе формой ее спектра, а также условиями применения данного фильтра, т.е. условиями на допустимое соотношение между максимумами центрального и соседних пиков:  $R(\lambda_{Br} \pm \Delta\lambda)/R_{max} \ll 1$ . Добротность  $Q$  резонатора данного интерферометра практически эквивалентна его разрешающей способности:  $Q = \omega_0/\delta\omega \approx \lambda_0/\delta\lambda$ ,  $\delta\lambda \ll \lambda_0$  ( $\lambda_0$  – длина волны максимума пика отражения).

В формулах (3) и (4) явно не учитываются потери света при его распространении по базе интерферометра, тем не менее эти потери можно включать в  $R_2$  и/или в  $R_3$ . На рис. 2 представлены изолинии максимальных коэффициентов отражений по формуле (3) и резкости полос (4) в зависимости от  $R_2$  и  $R_3$ . Наибольшие значения  $R_{max}$  достигаются только при оптически плотном заднем зеркале ( $R_3 \rightarrow 1$ ), при этом важно, чтобы выполнялось условие  $R_2 < R_3$ , иначе в соответствии с (3) уменьшается  $R_{max}$ . На практике реально получить  $R_2 = 0.95$  и  $R_3 = 0.988$ , при которых  $R_{max} \approx 0.65$  и  $F \approx 100$  (точка I). Если взять отношение  $R(\lambda_{Br} \pm \Delta\lambda)/R_{max} < 10^{-1}$ , то из рис. 2 видно, что необходимо иметь  $R_3 < 0.85$  (точка II), а при  $R_3 = 0.5$  это соотношение будет меньше  $10^{-2}$ . Если  $\Delta\lambda$  – полуширина спектра отражения ВБР, то  $\delta\lambda$  будет на два порядка меньше спектральной ширины ВБР.

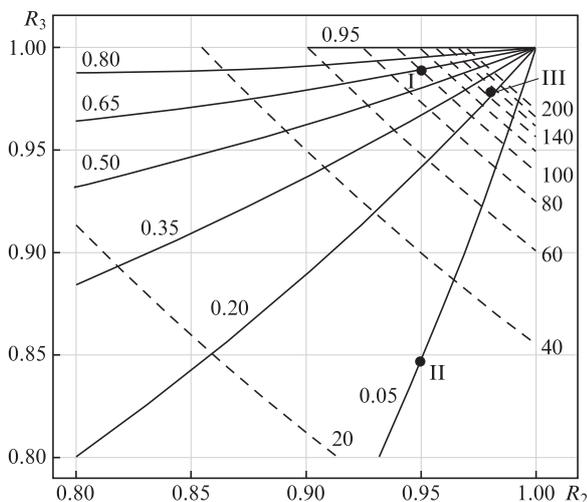


Рис. 2. Изолинии максимального коэффициента отражения  $R_{max}$  (сплошные линии) и резкости полос  $F$  (штриховые линии) фильтра в зависимости от  $R_2$  и  $R_3$ ; точки I, II – расчетные, точка III – экспериментальная.

### 3. Изготовление составных частей интерферометра

Асимметричное зеркало изготавливалось методом, аналогичным описанному в [8, 9]. Основой АЗ служил отполированный торец ОВ типа SMF-28е, вклеенного в волоконную втулку. Тонкая металлическая пленка никеля наносилась на торец методом вакуумного магнетронного распыления в атмосфере аргона ( $10^{-3}$  мм рт. ст.), поверх нее тем же методом в смеси аргона ( $2.5 \times 10^{-3}$  мм рт. ст.) и кислорода ( $10^{-3}$  мм. рт. ст.) наносились поочередно слои  $TiO_2$  и  $SiO_2$  с титановой и кремниевой мишеней соответственно. Параметры пленки являются определяющими и должны удовлетворять критерию согласования:  $n = (1 - R_{Ni} - T_{Ni})/T_{Ni}$ , где  $R_{Ni}$  и  $T_{Ni}$  – коэффициенты отражения и пропускания пленки никеля с волоконной стороны ( $R_{Ni} \approx 0.14$ ). Нанесение диэлектриков на пленку контролировалось на длине волны 1550 нм по изменению во времени коэффициента отражения  $R_1$  в процессе роста диэлектрической пленки, начиная со слоя  $TiO_2$ ; смена диэлектриков происходила в точках экстремумов отражения  $R_1$  [9, 10]. В результате интерференции света, отраженного от пленки и диэлектрического покрытия, в пленке возрастают омические потери света. Таким образом, можно постепенно уменьшить  $R_1$  вплоть до нуля (либо до пренебрежимо малых значений), а отражение с обратной стороны зеркала  $R_2$  приблизить к единице за счет оптического уплотнения диэлектрического многослойного покрытия. На пленку было нанесено 9 диэлектрических слоев, что обеспечило  $R_1 \approx 2 \times 10^{-3}$ .

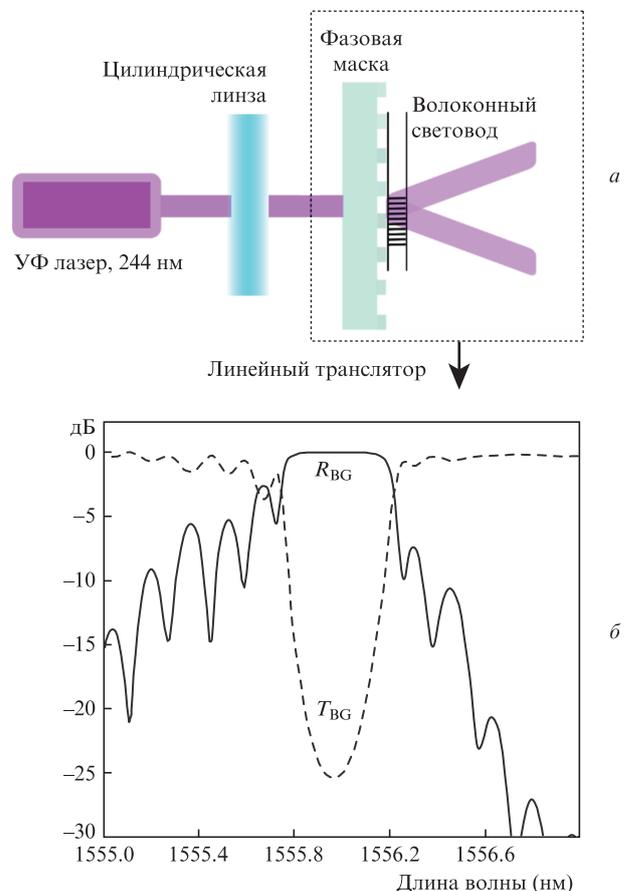


Рис. 3. Формирование ВБР: схема записи (а) и спектры его отражения ( $R_{BG}$ ) и пропускания ( $T_{BG}$ ) (б).

Заднее зеркало (ВБР) было сформировано в сердцевине того же ОВ. Схема экспериментальной установки для записи ВБР представлена на рис.3,а. В процессе записи решетки моторизированный линейный транслятор с закрепленными на нем фазовой маской и волоконным световодом перемещался поперек пучка излучения УФ лазера ( $\lambda \approx 244$  нм), см., напр., [15]. Излучение лазера с гауссовым распределением интенсивности (диаметр пучка 1.2 мм) фокусировалось цилиндрической линзой в сердцевину световода. Решетка имела однородный профиль показателя преломления почти на всем протяжении, т. к. волоконный световод равномерно перемещался через область перекрытия (интерференции) дифрагирующих пучков, за исключением краев, где имела переходная область длиной 0.6 мм.

Для формирования базы резонатора волокно скалывалось на расстоянии 1.5 см от края изготовленной ВБР и термически клеивалось канадским бальзамом в волоконную втулку. Затем торец втулки полировался перпендикулярно оси ОВ (финишная полировальная пленка имела размер зерна 0.02 мкм). Спектр отражения и пропускания ВБР изменился несущественно по сравнению с его спектром до вклейки волокна во втулку. Канадский бальзам наносился только на участок  $L_{\text{фи}}$  волокна базы, чтобы избежать искажения спектра от возможного деформационного воздействия на волокно застывших частиц бальзама. На рис.3,б представлены спектры отражения и пропускания ВБР, измеренные с помощью оптического спектроанализатора Yokogawa AQ6370. Центральная длина волны решетки составляла 1555.7 нм (спектральное разрешение 20 пм). Ширина спектра на полувысоте ( $-3$  дБ) равнялась 235 пм (260 пм между первыми минимумами), глубина провала в спектре пропускания достигала  $-25.5$  дБ ( $2.8 \times 10^{-3}$ ). Вычисление параметров данной ВБР по формулам из [12, 16] в приближении однородной решетки дало  $L_{\text{eff}} = 1.33$  мм при  $L_{\text{ВГ}} = 9.7$  мм.

#### 4. Измерительная установка

Схема экспериментальной установки по измерению характеристик интерферометра представлена на рис.4. Источником света служил суперлюминесцентный диод (СЛД) с центральной длиной волны 1530 нм, спектральной шириной на полувысоте 45 нм и мощностью 20 мВт. За СЛД располагался оптический изолятор ОИ. Волоконный циркулятор ВЦ направлял излучение из входного порта в сред-

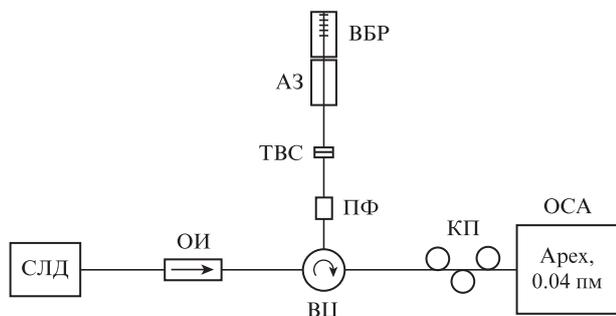


Рис.4. Схема измерительного стенда:

СЛД – суперлюминесцентный диод; ОИ – оптический изолятор; ВЦ – циркулятор; ПФ – перестраиваемый фильтр; ТВС – торцевое волоконное соединение типа FC/PC; АЗ – асимметричное зеркало; КП – контроллер поляризации; ОСА – оптический спектроанализатор Арех AP2050A.

ний. Для предотвращения деградации асимметричного зеркала из-за высокой интенсивности света использовался механически перестраиваемый фильтр (ПФ) Фабри–Перо со спектральной шириной 1 нм, который настраивался на центральную длину волны ВБР. За фильтром находилось торцевое волоконное соединение типа FC/PC (ТВС) и далее – отражательный интерферометр (АЗ и ВБР). Полная световая мощность, падающая на АЗ, измерялась после ПФ при разомкнутом ТВС и составляла 120 мкВт. Отраженный свет направлялся циркулятором в выходной порт через контроллер поляризации (КП) на оптический спектроанализатор Арех 2050А (разрешающая способность 0.04 пм).

#### 5. Результаты экспериментов

На рис.5,а показан спектр отражения ВБР ( $R_{\text{ВГ}}$ ) в узком спектральном интервале ( $\pm 200$  пм) относительно максимума одного из пиков отражения интерферометра  $R$ .

Спектр ВБР измерялся при стыковке втулок ВБР и ТВС, при этом, по-видимому, ВБР была деформирована из-за искривления волокна и ее спектр сместился на несколько десятков пикометров в сторону больших длин волн. Этим можно объяснить несовпадение положения пиков отражения интерферометра и ВБР. Максимальный коэффициент отражения интерферометра  $R_{\text{max}}$  определялся по отношению максимума интенсивности пика  $P_0$  к интенсивности отражения ВБР  $R_{\text{ВГ}}$  на длине волны максимума пика и составил 0.21 ( $-6.8$  дБ) (результат будет аналогичным, если определять  $R_{\text{max}}$  по отношению к среднему уровню фона, величина которого должна быть на уровне  $R_1 \approx 2 \times 10^{-3}$ ).

В спектре отражения интерферометра  $R$  есть четыре различных пика:  $P_{-2}, P_{-1}, P_0$  и  $P_1$ . Два высоких центральных пика ( $P_{-1}, P_0$ ) имеют примерно одинаковую интенсивность в максимуме, спектральное расстояние между

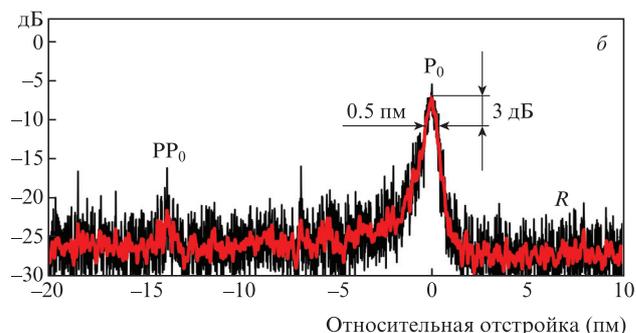
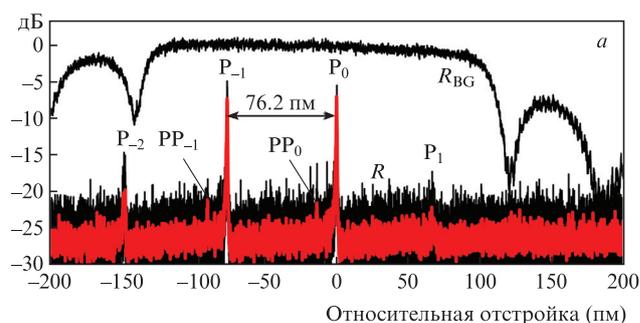


Рис.5. Спектры отражения отражательного интерферометра (а), а также пика  $P_0$  ( $\lambda = 1556.116$  нм) в малом интервале длин волн (б). Серая линия – гауссово сглаживание;  $P_i$  – пики отражения фильтра;  $PP_i$  – поляризацонные пики ( $i = -2, -1, 0, 1$ ).

ними  $\Delta\lambda = 76.2$  пм, что соответствует длинам  $L_{fs} \approx 5$  мкм и  $L_{fib} \approx 9.4$  мм (при  $L_{eff} = 1.33$  мм). Более подробно пик  $P_0$  показан на рис.5,б. Его ширина  $\delta\lambda$  по уровню  $-3$  дБ составила 0.5 пм ( $\sim 62$  МГц,  $Q \approx 3 \times 10^6$ ), что соответствует  $F \approx 150$  (точка III на рис.2). Второй высокий пик  $P_{-1}$  имеет полуширину около 0.6 пм. Параметры данного интерферометра сравнимы по порядку величины с параметрами узкополосного отражателя на основе кольцевого резонатора мод шепчущей галереи [17], отражение в котором порождается рассеянием на неоднородностях стенок резонатора [18]. Формы профилей обоих пиков асимметричны. Кроме того, высокие пики  $P_{-1}$  и  $P_0$  имеют еще и два побочных, расположенных рядом с ними, поляризационных пика ( $PP_{-1}$ ,  $PP_0$ ), которые можно подавить с помощью контроллера поляризации (по-видимому, их возникновение связано с внутренней поляризационной зависимостью оптического спектроанализатора, а не с двулучепреломлением в структуре интерферометра). Еще два боковых пика ( $P_{-2}$ ,  $P_1$ ) имеют гораздо меньшую интенсивность и большую спектральную ширину, что объясняется снижением  $R_{BG}$  на краях полосы отражения. В связи с малым уровнем интенсивности света представленные на рис.5 спектры сильно зашумлены, поэтому проводилось гауссово сглаживание ( $\sigma = 5$ ) исходных данных. Контраст интерферометра, определяемый отношением максимального коэффициента отражения к минимуму, составляет, как видно из рис.5, около 20 дБ (возможно, он ограничен чувствительностью ОСА), при этом разность интенсивностей в максимумах пиков  $P_0$  и  $P_{-2}$  равна примерно 13 дБ.

Уменьшая длину волоконного участка базы  $L_{fib}$ , можно добиться того, что в пределах полосы отражения ВБР останется только один пик, при этом логично предположить, что его ширина увеличится до  $\sim 1$  пм. Однако если уменьшить ширину спектра отражения ВБР до 50 пм и сохранить при этом близкое к единице значение  $R_{BG}$ , что вполне достижимо для УФ метода записи, то длину базы и степень фильтрации интерферометра можно увеличить. Также можно увеличить и добротность резонатора за счет повышения коэффициентов отражения зеркал. Оценки показывают, что с использованием вышеописанного метода можно получить фильтрацию на уровне 0.1 пм (12 МГц на  $\lambda = 1550$  нм) за счет уменьшения спектральной ширины ВБР в 3–4 раза и повышения резкости полос в 2–3 раза. Следует отметить, что в предложенной нами схеме нетрудно изменять длину волны селекции путем замены правой втулки с ВБР (см. рис.1,а) на другую для получения фильтрации в заданной точке спектрального диапазона (в пределах рабочей области АЗ). С помощью пьезокерамического преобразователя можно прецизионно перестраивать длину  $L_{fs}$ , чтобы плавно сканировать длину волны максимума отражения интерферометра в пределах его области свободной дисперсии.

Рассмотренный метод применим для всей оптической области спектра, в которой смогут работать составные элементы интерферометра, и он может сочетаться с другими типами одномодовых волокон, например с двулучепреломляющими (типа «Panda»). Учитывая лучевую стойкость материала световода, данный вариант фильтра можно использовать для лазерной селекции мод и получения мощностей генерации до 10 мВт в одномодовом волокне на длине волны 1550 нм. При использовании дифракционной структуры вместо тонкой металлической пленки на зеркале можно, как показано ранее [19], реализо-

вать максимальную лучевую стойкость интерферометра, обеспечивая работу при мощностях более 100 мВт.

## 6. Заключение

Рассмотрен метод фильтрации излучения в отраженном свете с помощью волоконного отражательного интерферометра на основе асимметричного по коэффициентам отражения переднего зеркала и волоконной брэгговской решетки в качестве заднего зеркала. Приведены формулы для расчета параметров интерферометра (резкости полос и максимального коэффициента отражения). Описан метод изготовления и измерены характеристики экспериментального образца. Спектральная ширина полосы отражения составила 0.5 пм (62 МГц, добротность  $Q \approx 3 \times 10^6$ ) на длине волны 1556 нм при максимальном коэффициенте отражения 0.21 и контрасте  $10^2$ . Проведенные исследования дают основание для изготовления данным методом узкополосных волоконных отражательных фильтров со степенью селекции вплоть до 0.1 пм на длине волны 1550 нм.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 14-22-00118). Экспериментальные исследования выполнены на оборудовании Центра коллективного пользования «Спектроскопия и оптика» в Институте автоматики и электрометрии СО РАН, а также на оборудовании Лаборатории волоконных лазеров Физического факультета Новосибирского государственного университета.

Выражаем признательность И.Д. Ватнику за помощь в проведении экспериментов.

- Gallegos-Arellano E., Vargas-Rodriguez E., Guzman-Chavez A.D., Cano-Contreras M., Cruz J.L., Raja-Ibrahim R.K. *Las. Phys. Lett.*, **13**, 065102 (2016).
- DiLazaro T., Nehmetallah G. *Opt. Express*, **26**, 2891 (2018).
- Scheuer J., Sumetsky M. *Las. Photon. Rev.*, **5** (4), 465 (2011).
- Collodo M., Sedlmeir F., Sprenger B., Svitlov S., Wang L., Schwefel H. *Opt. Express*, **22**, 19277 (2014).
- Kawasaki B.S., Hill K.O., Johnson D.C., Fujii Y. *Opt. Lett.*, **3**, 66 (1978).
- Dostovalov A.V., Wolf A.A., Parygin A.V., Zyubin V.E., Babin S.A. *Opt. Express*, **24**, 16232 (2016).
- Chung Y., Kim D., Dagli N. *J. Lightwave Technol.*, **24**, 1865 (2006).
- Terentyev V.S., Simonov V.A., Babin S.A. *Las. Phys. Lett.*, **14**, 25103 (2017).
- Terentyev V.S., Simonov V.A., Babin S.A. *Opt. Express*, **24**, 4512 (2016).
- Каменев Н.Н., Троицкий Ю.В. *Оптика и спектроскопия*, **54**, 725 (1983).
- Троицкий Ю.В. *Многолучевые интерферометры отраженного света* (Новосибирск: Наука, 1985).
- Barmenkov Y.O., Zalvidea D., Torres-Peiró S., Cruz J.L., Andrés M.V. *Opt. Express*, **14**, 6394 (2006).
- Chen L., Han Y., Liu Q., Liu Y.-G., Zhang W., Chou K.C. *Opt. Lett.*, **43**, 1662 (2018).
- Кольченко А.П., Терентьев В.С., Трошин Б.И. *Оптика и спектроскопия*, **101**, 674 (2006).
- Абдуллина С.Р., Немов И.Н., Бабин С.А. *Квантовая электроника*, **42**, 794 (2012) [*Quantum Electron.*, **42**, 794 (2012)].
- Васильев С.А., Медведков О.И., Королев И.Г., Божков А.С., Курков А.С., Дианов Е.М. *Квантовая электроника*, **35**, 1085 (2005) [*Quantum Electron.*, **35**, 1085 (2005)].
- Rivera-Pérez E., Díez A., Andrés M.V., Cruz J.L., Rodríguez-Cobos A. *Opt. Lett.*, **38**, 1636 (2013).
- Gorodetsky M.L., Pryamikov A.D., Ilchenko V.S. *J. Opt. Soc. Am. B*, **17**, 1051 (2000).
- Терентьев В.С., Симонов В.А. *Квантовая электроника*, **47**, 971 (2017) [*Quantum Electron.*, **47**, 971 (2017)].