

Чувствительный элемент датчика изгиба на многосердцевинном световоде с внутриволоконными интерферометрами Фабри–Перо

О.Н.Егорова, С.Г.Журавлев, В.И.Пустовой, С.Л.Семёнов

Предложен новый тип чувствительного элемента датчика направления и величины изгиба, основанный на внутриволоконных интерферометрах Фабри–Перо в сердцевинах многосердцевинного оптического волокна. Измеренная чувствительность к величине радиуса изгиба составила 81 нм/м^{-1} . Установлено, что эта чувствительность может быть увеличена за счет использования световодов, образующих предложенный чувствительный элемент, с разными диаметрами.

Ключевые слова: интерферометр Фабри–Перо, датчик изгиба, многосердцевинное оптическое волокно.

В последнее время активно разрабатываются датчики направления и величины изгиба, основанные на записи волоконных брэгговских решеток в сердцевинах многосердцевинного оптического волокна [1–4]. Такие датчики могут использоваться для мониторинга состояния объектов, в робототехнике и в авиационной [5]. Несомненное расположение некоторых сердцевин в многосердцевинном оптическом волокне приводит к тому, что напряжения, возникающие при изгибе световода, по-разному воздействуют на волоконные брэгговские решетки, записанные в разных сердцевинах. Это, в свою очередь, приводит к различным сдвигам спектров отражения решеток, что позволяет определить направление и радиус изгиба световода.

Альтернативой волоконным брэгговским решеткам как чувствительным элементам датчиков в ряде случаев могут служить интерферометры Фабри–Перо, созданные непосредственно в сердцевинах оптического волокна [6–9]. Для получения таких элементов может быть использована относительно простая технология [9], не требующая применения такого сложного оборудования и источников лазерного излучения, которые необходимы для создания волоконных брэгговских решеток. Кроме того, устройства на основе интерферометров Фабри–Перо потенциально обладают высокой температурной стойкостью [10], что представляет интерес и для их использования в условиях повышенной температуры, например для авиадвигателей.

В настоящей работе впервые описан чувствительный элемент датчика направления и величины изгиба, выполненный на базе интерферометров Фабри–Перо в каждой из сердцевин многосердцевинного оптического волокна. Для создания датчика применялась технология, основанная на травлении торца световода с последующим соеди-

нением его в процессе сварки в электрическом разряде с торцом другого световода. Различие механических напряжений в сердцевинах при изгибе многосердцевинного световода вызывает различное изменение длины интерферометров Фабри–Перо в боковых сердцевинах, зависящее от направления и радиуса изгиба световода. По изменению спектров отражения интерферометров в разных сердцевинах при изгибе многосердцевинного оптического волокна определена чувствительность к величине радиуса изгиба.

На рис.1 изображен отрезок многосердцевинного световода, изогнутого в плоскости рисунка с радиусом изгиба R . В каждой сердцевине световода расположен интерферометр Фабри–Перо, исходная длина каждого интерферометра в неизогнутом световоде – L_0 . Сердцевина С1 расположена в центре поперечного сечения световода, ее ось совпадает с осью световода. Оси, проходящие через центры двух боковых сердцевин – С2 и С3, расположены в плоскости рис.1. Поскольку ось центральной сердцевины совпадает с нейтральной линией световода, которая не подвержена растяжению или сжатию при изгибе, длина L_1 интерферометра ФП1 в центральной сердцевине не изменится в результате изгиба световода и будет соответствовать ее значению в неизогнутом световоде L_0 . Сердцевина С2 будет подвержена растяжению при изгибе световода, а сердцевина С3 – сжатию. Из рис.1 следует,

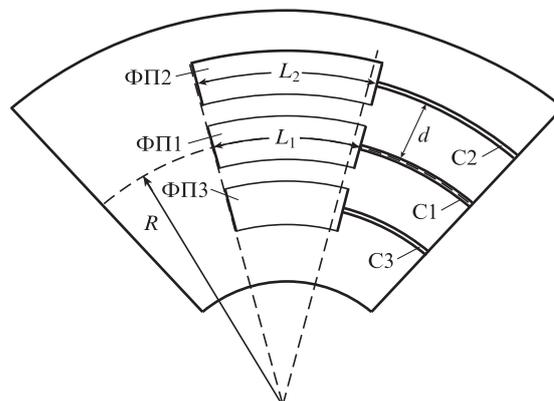


Рис.1. Многосердцевинный световод с интерферометрами Фабри–Перо.

О.Н.Егорова, В.И.Пустовой. Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: egorova@nsc.gpi.ru

С.Г.Журавлев, С.Л.Семёнов. Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Научный центр волоконной оптики им. Е.М.Дианова, Россия, 119333 Москва, ул. Вавилова, 38

что удлинение интерферометра в боковой сердцевине С2 относительно центральной

$$\Delta L = L_2 - L_1 = \frac{d}{R} L_0, \quad (1)$$

где d – расстояние между центрами сердцевин в поперечном сечении световода; L_2 – длина интерферометра в сердцевине С2.

Поскольку коэффициент отражения на границе стекло–газ мал (порядка 4%), интерферометры могут быть описаны с помощью двухлучевой модели:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \varphi,$$

где I_1 и I_2 – интенсивности волн, отраженных от двух зеркал интерферометра Фабри–Перо; $\varphi = 4\pi n L_{\text{int}}/\lambda$ – разность фаз этих волн; $n \approx 1$ – показатель преломления газовой среды внутри полости интерферометра; L_{int} – длина интерферометра. Из условия максимума в спектре отражения интерферометра Фабри–Перо $\varphi = 2\pi m$, где m – целое число, следует, что

$$\frac{\Delta L_{\text{int}}}{L_{\text{int}}} = \frac{\Delta \lambda}{\lambda}, \quad (2)$$

где ΔL_{int} – увеличение длины интерферометра; $\Delta \lambda$ – сдвиг длины волны, соответствующей одному из максимумов в спектре отражения, за счет увеличения длины интерферометра. Из выражений (1) и (2) получаем $\Delta \lambda = (d/R)\lambda$.

Таким образом, чувствительность интерферометра Фабри–Перо к изгибу в боковой сердцевине С2 составляет $\Delta \lambda/(1/R) = d\lambda$. В сердцевине С3, подверженной сжатию при изгибе, эта величина также составит $d\lambda$, во всех остальных сердцевинах она будет иметь промежуточные значения, зависящие от угла ориентации поперечного сечения световода относительно направления изгиба. Следовательно, по величине $\Delta \lambda$ в различных сердцевинах может быть определено направление изгиба световода.

Для создания чувствительного элемента датчика было выбрано семисердцевинное волокно, изготовленное методом сверления, описанным, например, в [11]. Фотография торца семисердцевинного (сердцевины А, В, С, D, Е, F, G) волоконного световода приведена на рис.2. Сердцевин световода имеют одинаковые параметры и расположены гексагонально. Расстояние между центрами соседних сердцевин составляет 40.5 мкм, диаметр сердцевин – около 5.3 мкм, разность показателей преломления сердцевин и оболочки – 0.015. Длина волны от-

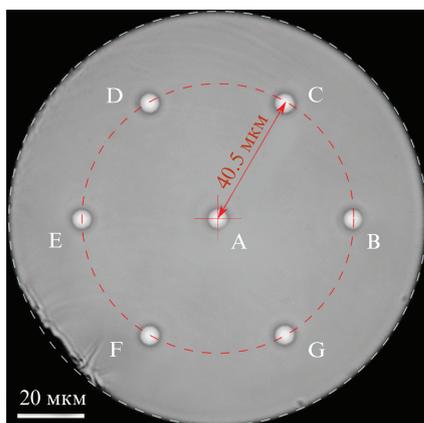


Рис.2. Фотография торца многосердцевинного световода.

сечки первой высшей моды каждой из сердцевин находится в диапазоне 1.45–1.47 мкм, диаметр распределения поля моды каждой из сердцевин на длине волны 1550 нм равен 5.7 мкм, диаметр оболочки из кварцевого стекла – 125 мкм.

Для ввода и вывода излучения из каждой сердцевини многосердцевинного оптического волокна в односердцевинные волокна было изготовлено устройство ввода-вывода [12, 11], позволяющее обеспечить достаточную механическую надежность, малые оптические потери и имеющее малый размер. Изготовленное устройство ввода-вывода обеспечивало коэффициент обратного отражения менее –40 дБ и величину вносимых оптических потерь менее 2 дБ. Достигнутые значения оптических потерь и коэффициента отражения были достаточны для проведения экспериментов по созданию чувствительного элемента датчика изгиба.

Внутриволоконные интерферометры Фабри–Перо были изготовлены с использованием метода, известного для односердцевинных световодов и описанного, например, в [9]. Данный метод основан на том, что скорость травления легированного кварцевого стекла превышает скорость травления нелегированного. Поэтому при травлении торца световода в том месте, где находятся сердцевини из легированного кварцевого стекла, образуются углубления. При сварке в электрическом разряде торца многосердцевинного световода после травления с торцом световода, который не был подвергнут травлению, углубления или лунки на торце многосердцевинного световода преобразуются в микрополости, которые являются интерферометрами Фабри–Перо.

Внешний вид полученных таким образом интерферометров Фабри–Перо в семисердцевинном световоде демонстрирует рис.3. На рис.3,а показаны интерферометры Фабри–Перо, созданные с помощью травления многосердцевинного световода в плавиковой кислоте в течение 8 мин. В результате травления диаметр многосердцевинного световода уменьшился от 125 до 109 мкм. Односердцевинный световод с исходным диаметром 125 мкм также был подвергнут травлению, для того чтобы его диаметр совпадал с диаметром многосердцевинного волокна. На рис.3,б показаны интерферометры, полученные травлением только многосердцевинного световода в течение 5 мин. Видно, что внешние диаметры световодов различны. Исходный диаметр многосердцевинного световода составлял 125 мкм, в результате травления в плавиковой кислоте он уменьшился до 113 мкм. Многосердцевинный световод был присоединен путем сварки к односердцевинному волокну диаметром 125 мкм. Для создания интерферометров Фабри–Перо использовался сварочный аппарат Fujikura FCM 80 S.

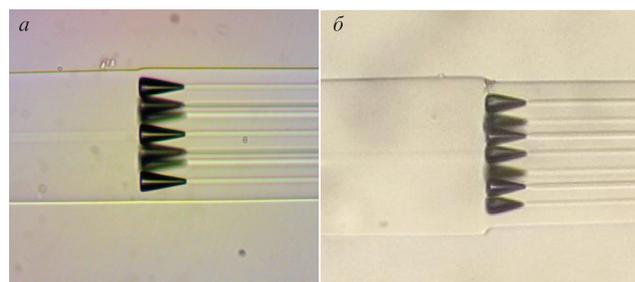


Рис.3. Внешний вид интерферометров Фабри–Перо в элементе с одинаковыми (а) и различными (б) диаметрами световодов.

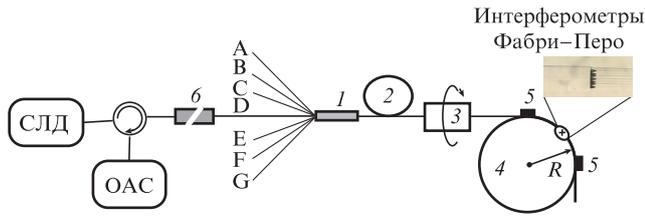


Рис.4. Схема установки.

Спектр отражения микроразветвлений (интерферометров Фабри-Перо) исследовался в схеме, приведенной на рис.4. Источником излучения служил полупроводниковый суперлюминесцентный диод (СЛД) Superlum SLD-76-MP с центром в окрестности длины волны 1550 нм и шириной спектра 50 нм (по уровню 3 дБ), регистрация отраженного сигнала проводилась оптическим анализатором спектров ANDO AQ6317B (ОАС). Сигнал от источника подавался на вход волоконно-оптического циркулятора, затем поочередно направлялся в каждую отдельную сердцевину многосердцевидного световода 2 с использованием устройства ввода-вывода 1. Переключение между сердцевинами осуществлялось с помощью волоконно-оптического разъема 6.

Для определения чувствительности полученных интерферометров к величине радиуса изгиба проводилось измерение спектров отражения интерферометра в каждой сердцевине при различных диаметрах изгиба волоконного световода. Для этого участок световода с интерферометрами располагался на цилиндрической поверхности специально изготовленной подставки 4 в канавке. Глубина канавки составляла около 500 мкм. Для полного прилегания к цилиндрической поверхности участки световода в канавках фиксировались зажимами 5 до и после интерферометров, как это показано на рис.4. Для изменения ориентации поперечного сечения относительно направления изгиба световод вращался с помощью вращательной подвижки 3. При этом он мог свободно вращаться в канавках. При каждом положении подвижки проводилась регистрация спектров отражения интерферометров Фабри-Перо в каждой из сердцевины с разрешением 0.5 нм.

В процессе измерений определялся сдвиг одного из максимумов спектра отражения каждого интерферометра при различных радиусах изгиба световода и различной ориентации поперечного сечения относительно направления изгиба. На рис.5,а показан спектр отражения интерферометра в одной из сердцевины многосердцевидного волокна в линейном масштабе. При нахождении

максимума спектра отражения спектр суперлюминесцентного источника учитывался по формуле

$$I_i = I_i^{\text{FP}} \frac{I_{\text{max}}^{\text{SLD}}}{I_i^{\text{SLD}}},$$

где I_i – интенсивность на длине волны λ_i ; I_i^{FP} – интенсивность на длине волны λ_i в измеренном спектре отражения интерферометра; $I_{\text{max}}^{\text{SLD}}$ и I_i^{SLD} – максимальная интенсивность и интенсивность на длине волны λ_i в спектре суперлюминесцентного диода. Спектр отражения интерферометра с учетом спектра суперлюминесцентного источника приведен на рис.5,б. Положение максимума спектра определялось с помощью алгоритма центра масс [13, 14] (center of the gravity (COG) algorithm): длина волны λ_m , соответствующая одному из максимумов спектра отражения, вычислялась по формуле

$$\lambda_m = \frac{\sum_1^k I_i \lambda_i}{\sum_1^k I_i},$$

где k – число точек, на которые разбит интервал спектра. Начальная и конечная длины волн λ_1 и λ_k соответствуют интенсивности, близкой к минимальной (рис.5,б).

Сначала проводились измерения спектров отражения интерферометров в неизогнутом световоде. По разности длин волн λ_1 и λ_2 соседних максимумов в полученных спектрах отражения определялись длины L интерферометров Фабри-Перо в различных сердцевинах: $L = \lambda_1 \lambda_2 \times [2n(\lambda_1 - \lambda_2)]^{-1}$, где $n \approx 1$. Рассчитанные по периоду спектра отраженного сигнала длины интерферометров в различных сердцевинах составили от 38 до 40.5 мкм в элементе с одинаковыми диаметрами световодов (рис.3,а) и от 29 до 32.5 мкм в элементе с различными диаметрами световодов (рис.3,б).

На рис.6 представлены измеренные значения сдвига длины волны одного из максимумов в спектрах отражения каждого интерферометра относительно ее значения в неизогнутом световоде при различных направлениях изгиба. По оси абсцисс отложен угол между некоторой начальной и текущей ориентацией поперечного сечения световода относительно направления изгиба. Измерения проведены для элемента с одинаковыми диаметрами световодов при радиусах их изгиба 20 и 6 см. Положение максимума спектра отражения интерферометра в центральной сердцевине А не изменяется, а положения максимумов спектров отражения интерферометров в боковых сердцевинах В–Г имеют синусоидальную зависимость от угла.

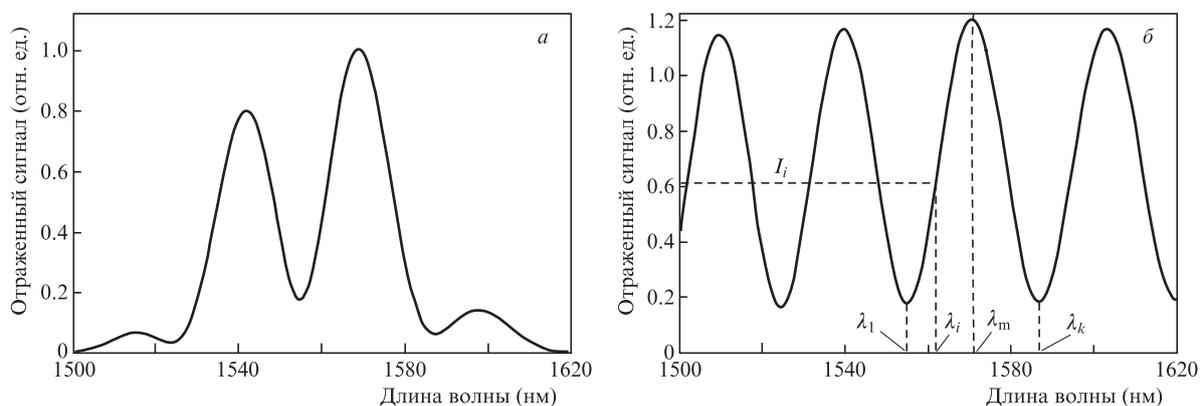


Рис.5. Спектр отражения одного из интерферометров Фабри-Перо (а) и спектр отражения с учетом исходного спектра источника СЛД (б).

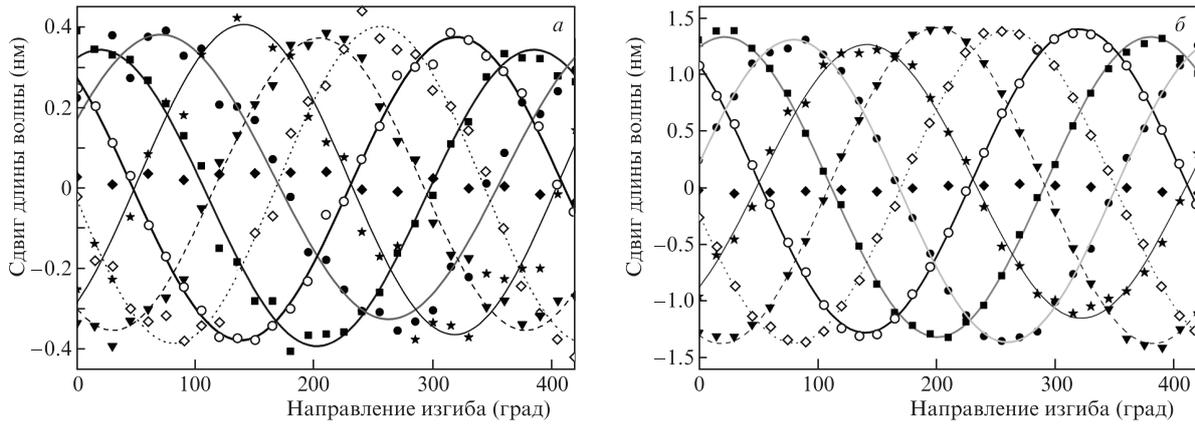


Рис.6. Сдвиг длины волны одного из максимумов в спектрах отражения каждого интерферометра в элементе с одинаковыми диаметрами световодов (рис.3,а) относительно ее значения в неизогнутом световоде при радиусах изгиба световода 20 (а) и 6 см (б) для сердцевин А (◆), В (■), С (●), D (★), E (▼), F (◇) и G (○).

На рис.7,а представлены зависимости сдвига длины волны одного из максимумов в спектре отражения интерферометров в различных сердцевинах от кривизны изгиба $1/R$ световода при фиксированном угле ориентации поперечного сечения относительно направления изгиба для элемента с одинаковыми диаметрами световодов. Измерения проведены для значений кривизны $0-20 \text{ м}^{-1}$. Наибольший сдвиг максимума спектра отражения наблюдается для боковых сердцевин E и B. Наклон линейной аппроксимации зависимости для сердцевин B составляет -82 пм/м^{-1} ($R^2 = 0.995$), а для сердцевин E он равен 81 пм/м^{-1} ($R^2 = 0.996$). На рис.7,б аналогичные зависимости представлены для элемента с различными диаметрами световодов. Наибольший сдвиг длины волны максимума в спектре отражения также наблюдается для боковых сердцевин B и E. Наклон линейной аппроксимации зависимости для сердцевин B составляет -97 пм/м^{-1} ($R^2 = 0.992$), а для сердцевин E он равен 100 пм/м^{-1} ($R^2 = 0.993$).

Таким образом, уменьшение диаметра многосердцевинного световода по сравнению с односердцевинным приводит к увеличению чувствительности к радиусу изгиба световода. Это можно объяснить следующим образом. Проведем два нормальных сечения – ab и a_1b_1 вблизи места изменения диаметров световодов, причем так, что вырезанный элемент будет иметь малую длину (рис.8). Момент упругих сил, действующих на один из торцов

вырезанного элемента со стороны световода, расположенного слева от сечения ab , должен быть уравновешен моментом упругих сил, действующих на противоположный торец элемента со стороны световода, расположенного справа от сечения a_1b_1 . Момент упругих сил M вычисляется по формуле [15]

$$M = \frac{E}{R} \int_S \xi^2 dS, \quad (3)$$

где E – модуль Юнга; ξ – координата точки в поперечном сечении световода; S – площадь его поперечного сечения. Интеграл в (3) определяется формой и размером поперечного сечения световодов (для круглого поперечного сечения он равен $1/(4\pi r^4)$, где r – радиус поперечного сечения световода). Поскольку радиус световода в сечении ab (рис.8) больше радиуса в сечении a_1b_1 , то для компенсации момента упругих сил необходимо, чтобы вблизи места изменения диаметров световодов меньшего диаметра изгибался с меньшим радиусом изгиба R_1 , чем световод большего диаметра. При этом радиус изгиба световода большего диаметра вблизи места соединения световодов может увеличиться по сравнению с радиусом цилиндрической поверхности R_0 , на которую помещен световод. Описанное явление приводит к возрастанию чувствительности за счет того, что радиус изгиба световода с меньшим диаметром, в котором расположены интерфе-

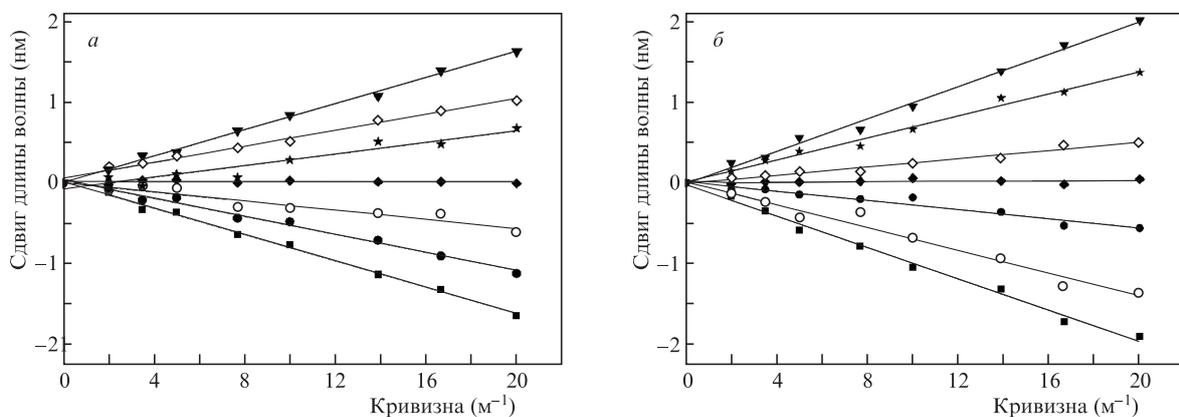


Рис.7. Зависимости сдвига длины волны одного из максимумов в спектре отражения интерферометров от кривизны изгиба $1/R$ в случае фиксированного угла ориентации поперечного сечения световода относительно направления изгиба при одинаковых (рис.3,а) (а) и различных (рис.3,б) диаметрах световодов (б) для сердцевин А (◆), В (■), С (●), D (★), E (▼), F (◇) и G (○).

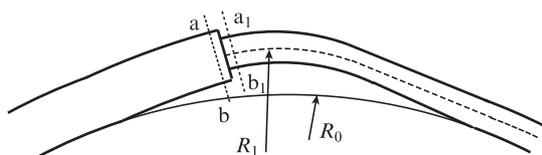


Рис.8. Изгиб места соединения двух световодов различного диаметра.

рометры Фабри–Перо, вблизи места изменения диаметров световодов меньше, чем измеряемый радиус изгиба.

Наличие интерферометров Фабри–Перо также изменяет форму поперечного сечения световода меньшего диаметра вблизи места соединения световодов. В результате этого интеграл в формуле (3) будет уменьшаться, также приводя к локальному увеличению радиуса изгиба многосердцевинного световода вблизи места соединения. Этим объясняется отличие измеренной чувствительности в случае световодов одинакового поперечного сечения от расчетной, которая при расстоянии между центрами соседних сердцевин 40.5 мкм составляет около 63 пм/м^{-1} на длине волны 1550 нм.

Поскольку спектр отражения интерферометра Фабри–Перо имеет достаточно широкие максимумы, погрешность измерений смещения длины волны будет больше, чем в случае волоконных брэгговских решеток, что приведет к неприемлемо высокой погрешности измерений при больших радиусах изгиба. Для повышения точности измерений с помощью интерферометра Фабри–Перо необходимо использование других алгоритмов обработки сигнала, основанных, например, на фурье-преобразовании [16]. В работе [17] показано, что минимальная расчетная ошибка измерения длины интерферометра при этом может составлять 0.065 нм, а полученная экспериментально равна 0.18 нм. Радиус изгиба, соответствующий изменению длины интерферометра на 0.18 нм, при расстоянии между центрами сердцевин 40 мкм и длине интерферометра 40 мкм составляет около 9 м. Для повышения точности длина интерферометра и расстояние между сердцевинами могут быть увеличены: при расстоянии между центрами сердцевин 100 мкм и длине интерферометра 100 мкм радиус изгиба, соответствующий изменению базы интерферометра на 0.18 нм, будет равен примерно 55 м.

Ограничения по минимальному допустимому радиусу изгиба датчика могут возникать из-за возможного механического разрушения световода в месте сварки. При сварке требуется соблюдение определенных правил, а именно: удаление защитного покрытия без повреждения стеклянной поверхности волокна (химическое растворение полимера), фиксация концов световода в сварочном аппарате в местах с защитным покрытием, а также исключение механических контактов с участком волокна, где покрытие удалено. В данном случае прочность сварного соединения будет находиться в диапазоне 2.1–2.8 Па [18], что соответствует относительному удлинению световода на 3%–4%. Такое удлинение при изгибе на определенных участках поверхности световода может возникать при таком же отношении радиуса световода к радиусу его изгиба. При диаметре световода 100 мкм допустимый радиус кратковременного (~ 1 с) изгиба световода в месте сварки составляет 1.25–1.7 мм. Если предполагается долговременный изгиб, то желательно втроекратно уменьшить допустимую нагрузку [19] и, соответ-

ственно, втроекратно, т.е. до 3.75–5 мм, увеличить допустимый минимальный радиус изгиба. Даже в этом случае ограничения по прочности места сварки не являются существенными для большинства применений.

Таким образом, предложен и экспериментально реализован чувствительный элемент датчика направления и кривизны изгиба, основанный на внутриволоконных интерферометрах Фабри–Перо в многосердцевинном оптическом волокне. Различие в изменении длин интерферометров Фабри–Перо при изгибе световода, возникающее за счет различия механических напряжений в сердцевинах многосердцевинного оптического волокна, позволяет определить направление и радиус изгиба. Внутриволоконные интерферометры были созданы путем соединения в процессе сварки торца многосердцевинного оптического волокна, предварительно подвергнутого травлению в плавиковой кислоте, с торцом другого световода. При этом полости в области сердцевин формировались за счет различия скоростей травления легированного стекла сердцевины и нелегированного стекла оболочки световода. Измеренная чувствительность датчика к радиусу изгиба составила 81 пм/м^{-1} . Также было обнаружено, что если диаметр световода, присоединенного к многосердцевинному волокну, превышает диаметр многосердцевинного световода, то наблюдается увеличение чувствительности в результате локального увеличения радиуса изгиба многосердцевинного световода вблизи места соединения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки в форме гранта № 075-15-2020-912 на создание и развитие научного центра мирового уровня «Центр фотоники».

- Gander M.J., MacPherson W.N., McBride R., Jones J.D.C., Zhang L., Bennion I., et al. *Electron. Lett.*, **36**, 120 (2000).
- Bronnikov K., Wolf A., Yakushin S., Dostovalov A., Egorova O., Zhuravlev S., Semjonov S., et al. *Opt. Express*, **27**, 38421 (2019).
- Butov O.V., Bazakutsa A.P., Chamorovskiy Yu.K., Fedorov A.N., Shevtsov I.A. *Sensors*, **19**, 4228 (2019).
- Westbrook S., Kremp T., Feder K.S., Ko W., Monberg E.M., Wu H., Simoff D.A., et al. *J. Lightwave Technol.*, **35**, 1248 (2017).
- Amanzadeh M., Aminossadati S.M., Kizil M.S., Rakić A.D. *Measurement*, **128**, 119 (2018).
- Cibula E., Donlagic D. *Opt. Express*, **15**, 8719 (2007).
- Rao Y.J., Deng M., Duan D.W., et al. *Opt. Express*, **15**, 14123 (2007).
- Villatoro J., Finazzi V., Coviello G., Pruneri V. *Opt. Lett.*, **34**, 2441 (2009).
- Machavaram V.R., Badcock R.A., Fernando G.F. *Sens. Actuators A*, **138**, 248 (2007).
- <https://technicasa.com/fabry-perot-sensors-filters/tfp10-micro-fabry-perot-strain-sensor-to-700c/>.
- Егорова О.Н., Астапович М.С., Белкин М.Е., Семёнов С.Л. *Квантовая электроника*, **46**, 1134 (2016) [*Quantum Electron.*, **46**, 1134 (2016)].
- Li B., Feng Z., Tang M., Xu Z., Fu S., Wu Q., Deng L., Tong W., Liu S., Shum P.P. *Opt. Express*, **23**, 10997 (2015).
- Villatoro J., Antonio-Lopez E., Schulzgen A., Amezcua-Correa R. *Opt. Lett.*, **42**, 2022 (2017).
- Ezbiri A., Kanellopoulos S.E., Handerek V.A. *Opt. Commun.*, **150**, 43 (1998).
- Сивухин Д.В. *Механика: учебное пособие для вузов* (М.: Наука, 1989, с. 576).
- Egorov S.A., Mamaev A.N., Likhachiev I.G. *Proc. SPIE*, **2594**, 193 (1995).
- Miridonov S.V., Shlyagin M.G., Khomenko A.V., Spirin V.V. *Proc. SPIE*, **4777**, 136 (2002).
- Krause J.T., Kurkjian C.R., Paek U.C. *Electron. Lett.*, **17**, 232 (1981).
- Bogatyrev V.A., Bubnov M.M., Dianov E.M., Romyantsev S.D., Semjonov S.L. *Opt. Eng.*, **30** (6), 690 (1991).