

# Интерферометр Фабри–Перо, сформированный в сердцевине композитного волоконного световода с высоким содержанием оксида фосфора

О.Н.Егорова, С.А.Васильев, И.Г.Лихачев, С.Е.Сверчков,  
Б.И.Галаган, Б.И.Денкер, С.Л.Семенов, В.И.Пустовой

*Представлен новый метод изготовления интерферометра Фабри–Перо в виде микрополости в сердцевине волоконно-световода. Метод основан на использовании процесса сварки в электрическом разряде обычного оптического волокна и специального композитного волокна с сердцевиной с высоким содержанием оксида фосфора. Показана возможность использования полученного интерферометра в качестве чувствительного элемента датчика деформации, обладающего высокой температурной стабильностью.*

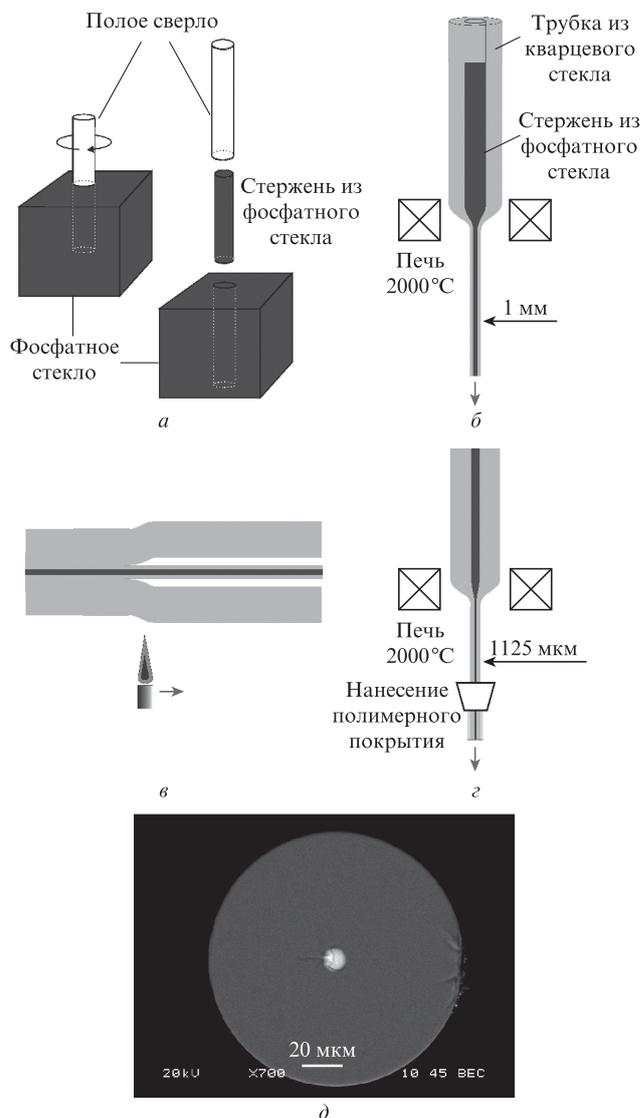
**Ключевые слова:** интерферометр Фабри–Перо, датчик деформации, композитное оптическое волокно.

## 1. Введение

Среди большого разнообразия предложенных конструкций датчиков на основе интерферометров Фабри–Перо (ИФП) большой интерес вызывают конструкции, интегрированные непосредственно в структуру волоконного световода в виде полости внутри оптического волокна. Такие структуры являются достаточно простыми, компактными и при использовании оптического волокна для передачи сигнала могут быть расположены вдали от регистрирующего оборудования. В настоящее время известны различные способы создания микрополостей в сердцевине оптического волокна: путем микрообработки волоконного световода фемтосекундными лазерными импульсами [1, 2], за счет использования отверстий внутри микроструктурированных дырчатых световодов [3–6], с помощью сварки обычных оптических волокон [7–9] и волокна с высоким содержанием оксида алюминия в сердцевине [10].

## 2. Формирование микрополостей (ИФП)

В настоящей работе представлен новый метод формирования микрополости в сердцевине волоконного световода, представляющей собой интерферометр Фабри–Перо, а также показана возможность использования полученного интерферометра в качестве чувствительного элемента датчика деформации. Метод формирования ИФП, описанный в настоящей работе, основан на процессе сварки в электрическом разряде обычного оптического волокна и специального композитного волокна с оболочкой из кварцевого стекла и сердцевиной с высо-



О.Н.Егорова, И.Г.Лихачев, С.Е.Сверчков, Б.И.Галаган, Б.И.Денкер, В.И.Пустовой. Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119333 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: egorova@nsc.gpi.ru С.А.Васильев, С.Л.Семенов. Научный центр волоконной оптики РАН, Россия, 119333 Москва, ул. Вавилова, 38

Поступила в редакцию 13 сентября 2019 г., после доработки – 15 октября 2019 г.

Рис.1. Схема изготовления композитного световода (a–г) и фотография торца полученного световода (д).

ким содержанием оксида фосфора. Специальное композитное волокно было изготовлено методом спекания фосфатного стекла в трубке из кварцевого стекла (рис.1). Материалом сердцевины служило фосфатное стекло [11], содержащее 65 мол.%  $P_2O_5$ , 7 мол.%  $Al_2O_3$ , 12 мол.%  $B_2O_3$ , 9 мол.%  $Li_2O$  и 7 мол.%  $RE_2O_3$ . В объемном фосфатном стекле с помощью полого цилиндрического алмазного сверла высверливался цилиндр (рис.1,*а*), который затем вставлялся в трубку из кварцевого стекла (рис.1,*б*). Далее полученная сборочная заготовка консолидировалась в печи при температуре  $\sim 2000^\circ C$  и перетягивалась в стержни диаметром  $\sim 1$  мм (рис.1,*б*). Для обеспечения необходимого соотношения диаметров сердцевины и оболочки полученные стержни, помещенные внутрь дополнительной трубки из кварцевого стекла, подвергались жакетированию на стеклодувном станке, оснащенный горелкой (рис.1,*в*). Затем из полученной заготовки вытягивался волоконный световод (рис.1,*з*).

Фотография торца полученного световода приведена на рис.1,*д*. Диаметр сердцевины световода составлял  $\sim 10$  мкм, диаметр оболочки из кварцевого стекла – 125 мкм. В процессе вытяжки световода происходила взаимная диффузия фосфатного и кварцевого стекол, приводящая к снижению концентрации оксида фосфора в стекле сердцевины, которая составила  $\sim 35$  мол.%. Измерения проводились методом рентгеноспектрального микроанализа с помощью сканирующего электронного микроскопа JSM-5910 LV (JEOL) и рентгеновского спектрометра INCA (Oxford Instruments). Полученный уровень концентрации был выше, чем при использовании обычных методов изготовления световодов путем осаждения стекла из газовой фазы. Высокая концентрации оксида фосфора обусловила существенное различие физико-химических свойств стекол сердцевины и оболочки, в частности более низкую температуру образования летучих компонентов и более высо-

кий коэффициент теплового расширения (КТР) сердцевины.

Интерферометр Фабри–Перо в виде микрополости в сердцевине световода был получен путем сварки в электрическом разряде изготовленного композитного световода и обычного телекоммуникационного оптического волокна SMF-28. На рис.2,*а* представлена фотография микрополости 1, полученной на сварочном аппарате Fujikura FSM80 при мощности дуги 50 ед. (производитель сварочного аппарата предоставляет только относительные значения) и длительности разряда 300 мс (композитное оптическое волокно расположено справа от места соединения световодов).

Механизм образования микрополости заключается, по-видимому, в следующем. В самом начале процесса сварки при включении электрической дуги с поверхности торца композитного световода происходит испарение стекла сердцевины, поскольку оно имеет более низкую температуру образования летучих компонентов, чем не легированное стекло оболочки. В результате в области сердцевины на поверхности торца световода образуется углубление. Кроме того, формирование углубления на поверхности торца световода в области сердцевины может быть обусловлено релаксацией механических напряжений (возникающих при вытягивании световода за счет большого различия КТР стекол сердцевины и оболочки композитного световода) при нагреве торца световода в начале сварки. Образовавшееся углубление преобразуется в микрополость при сплавлении торцов световодов в процессе сварки.

На рис.2,*б* и *в* представлены фотографии микрополостей 2 и 3, полученных дополнительным прогревом исходной микрополости 1 дуговым разрядом длительностью 600 и 2300 мс соответственно. Видно, что под действием давления паров испаряемого стекла объем микро-

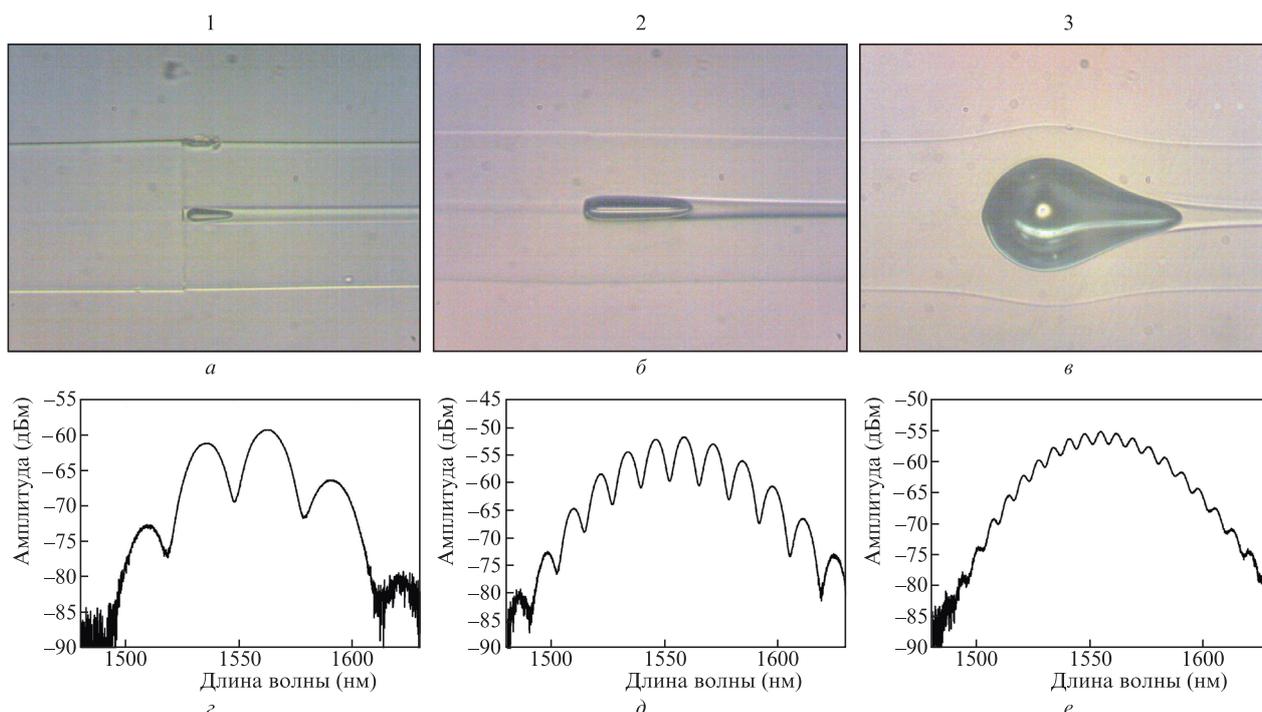


Рис.2. Фотографии микрополостей в сердцевине световода: исходной полости при длительности дугового разряда 300 мс (*а*) и полостей, полученных из исходной после дополнительного прогрева дуговым разрядом длительностью 600 (*б*) и 2300 мс (*в*), а также спектры отражения интерферометров 1 (*з*), 2 (*д*) и 3 (*е*).

полости увеличивается в продольном направлении вдоль легкоплавкой сердцевинки, а при более длительном нагреве и в поперечном направлении за счет расширения более тугоплавкой оболочки из кварцевого стекла.

### 3. Исследование характеристик ИФП. Обсуждение результатов

Схема исследования спектров отражения микрополостей (интерферометров Фабри–Перо) показана на рис.3. В качестве источника излучения использовался полупроводниковый суперлюминесцентный диод (СЛД) Superlum SLD-76-МР с шириной спектра излучения 50 нм (по уровню 3 дБ) с центром вблизи  $\lambda = 1550$  нм. Отраженный сигнал регистрировался с помощью оптического анализатора спектров ANDO AQ6317В (ОАС). Излучение СЛД подавалось на вход волоконно-оптического циркулятора, а затем поступало в стандартное одномодовое оптическое волокно, в месте соединения которого с композитным оптическим волокном находился ИФП, образованный двумя границами газ–стекло, как показано на вставке к рис.3. Отраженное от ИФП излучение (сигнал) с помощью циркулятора подавалось на вход ОАС. На рис.2,з–е представлены спектры отражения интерферометров 1, 2 и 3.

Поскольку коэффициент отражения на границе стекло–газ мал ( $\sim 4\%$ ), полученные интерферометры могут быть описаны с помощью двухлучевой модели. Тогда интенсивность отраженного сигнала представляет собой осциллирующую функцию с длиной волны  $\lambda$ :

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

где  $I_1$  и  $I_2$  – интенсивности волн, отраженных от двух зеркал ИФП (см. рис.3);  $\varphi = 4\pi nL/\lambda$  – разность фаз этих волн;  $n \approx 1$  – показатель преломления газовой среды внутри полости интерферометра;  $L$  – длина интерферометра. Отметим, что уменьшение интенсивности отраженного сигнала на краях спектров отражения на рис.2,з–е обусловлено формой спектра СЛД. При математической обработке полученных экспериментальных результатов, приведенных ниже, проводилась нормировка отраженного сигнала на спектр источника.

Длина ИФП может быть рассчитана по разности длин волн соседних минимумов (максимумов) в спектре отражения:

$$L = \lambda_1 \lambda_2 / 2n(\lambda_1 - \lambda_2),$$

где  $\lambda_1, \lambda_2$  – длины волн соседних минимумов. Рассчитанные по периоду спектра отраженного сигнала длины интерфе-

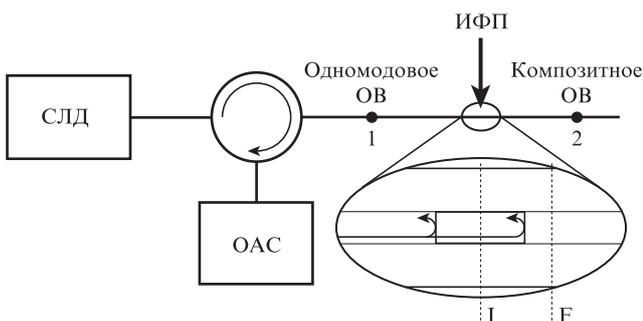


Рис.3. Схема регистрации спектров отражения. На вставке – схематичное изображение интерферометра.

рометров 1, 2 и 3 (см. рис.2,з–е) составили 40, 93 и 172 мкм соответственно. Амплитуда модуляции отраженного сигнала уменьшалась при увеличении длины интерферометра. Это связано с увеличением оптических потерь в интерферометре при увеличении его длины, обусловленных расходимостью пучка [12].

Отметим, что процесс формирования микрополостей имеет хорошую воспроизводимость. Так, при одинаковых параметрах электрической дуги вариации длины микрополости не превышали 5%.

Для изготовленных ИФП исследовалось влияние относительного удлинения световода, а также температуры на спектр отражения. К участку световода с интерферометром в точках 1 и 2, находящимся друг от друга на расстоянии нескольких десятков сантиметров (см. рис.3), прикладывалось растягивающее усилие, которое обеспечивало относительное удлинение оптического волокна. Для участка световода с интерферометром, имеющим, например, цилиндрическую поверхность боковых стенок, как изображено на вставке к рис.3, приложенная сила  $F$  в соответствии с законом Гука определяет, во-первых, относительное удлинение интерферометра  $\Delta L_1/L_1 = F/(ES_1)$  ( $S_1$  – площадь поперечного сечения боковых стенок интерферометра из кварцевого стекла в плоскости I,  $E$  – модуль Юнга кварцевого стекла,  $L_1$  – длина интерферометра,  $\Delta L_1$  – увеличение длины интерферометра), а во-вторых, относительное удлинение оптического волокна вне интерферометра  $\Delta L_F/L_F = F/(ES_F)$  ( $S_F$  – площадь поперечного сечения оптического волокна в плоскости F,  $L_F$  – длина световода между точками 1 и 2 за вычетом длины интерферометра,  $\Delta L_F$  – увеличение длины световода на этом участке). Модуль Юнга полагается одинаковым для стекол сердцевинки и оболочки световода. Поскольку  $L_1 \ll L_F$ , а  $S_F$  и  $S_1$  сравнимы по величине, то относительное удлинение всего участка волокна между точками 1 и 2

$$\frac{\Delta L_{12}}{L_{12}} = \frac{\Delta L_1 + \Delta L_F}{L_{12}} = \frac{F}{EL_{12}} \left( \frac{L_1}{S_1} + \frac{L_F}{S_F} \right) \approx \frac{\Delta L_F}{L_F},$$

а следовательно,

$$\frac{\Delta L_1}{L_1} = \frac{\Delta L_{12}}{L_{12}} \frac{S_F}{S_1}.$$

Таким образом, относительное удлинение ИФП линейно связано с приложенной силой  $F$  (или с относительным удлинением всего оптического волокна между точками 1 и 2).

Используя условие минимума в спектре отражения интерферометра  $\varphi = 4\pi nL_1/\lambda = \pi(2m + 1)$ , где  $m$  – целое число, можно прийти к следующему соотношению для сдвига  $\Delta\lambda$  положения минимума в результате изменения длины ИФП:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{\Delta L_1}{L_1}. \quad (1)$$

Таким образом, отношение  $\Delta\lambda/\lambda$  линейно зависит от относительного удлинения интерферометра, которое, в свою очередь, линейно связано с приложенной силой  $F$  и относительным удлинением самого световода.

На рис.4,а представлены спектры отражения интерферометра 1 при увеличении  $\Delta L_{12}/L_{12}$  от 0 до 2160 мкм/м. Зависимости сдвигов длины волны минимума сигнала  $\Delta\lambda$

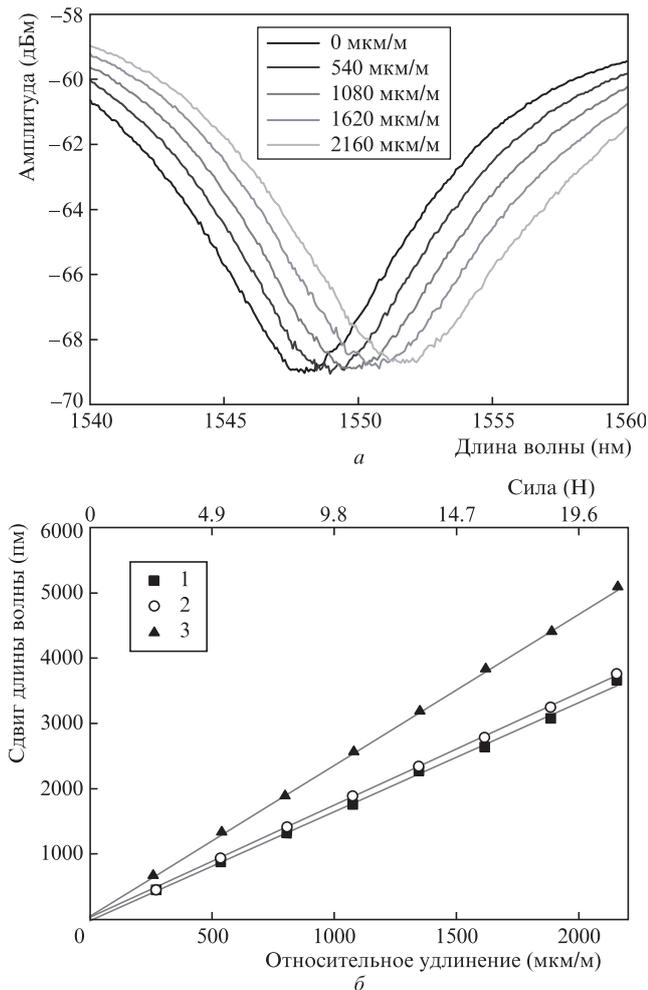


Рис.4. Спектры отражения ИФП 1 при различных относительных удлинениях волоконного световода  $\Delta L_{12}/L_{12}$  (а) и зависимости сдвигов длины волны  $\Delta\lambda$  одного из минимумов (вблизи  $\lambda = 1550$  нм) в спектрах отражения ИФП 1, 2 и 3 от относительного удлинения волоконного световода  $\Delta L_{12}/L_{12}$  и приложенной силы  $F$  (б).

в окрестности  $\lambda = 1550$  нм в спектрах отражения интерферометров 1, 2 и 3 от относительного удлинения волоконного световода, а также от приложенной механической нагрузки приведены на рис.4,б. Чувствительность к механической деформации ИФП 1 и 2 составляет  $\sim 1.7$  пм  $\cdot$  мкм $^{-1}$   $\cdot$  м, а ИФП 3 –  $2.3$  пм  $\cdot$  мкм $^{-1}$   $\cdot$  м (в англоязычной литературе мкм/м соответствует единице измерения относительного удлинения  $\mu\epsilon$ ). Полученное значение чувствительности сопоставимо, например, с результатами работ [3, 4]. Отметим, что для волоконных брэгговских решеток, которые активно используются в качестве чувствительных элементов датчиков деформации, эта величина для  $\lambda \approx 1.55$  мкм составляет  $\sim 1.1$  пм  $\cdot$  мкм $^{-1}$   $\cdot$  м [13].

Чувствительность ИФП 3 при приложении продольной механической нагрузки немного превышает чувствительность ИФП 1 и 2. Как видно из рис.2, диаметр поперечного сечения микрополости 3 превышает диаметр поперечного сечения полостей 1 и 2, а в продольном сечении микрополость 3 имеет характерную форму раздутого пузыря с изогнутыми границами боковых стенок. В соответствии с законом Гука к увеличению относительного удлинения могло бы привести уменьшение площади поперечного сечения боковых стенок. Однако анализ изображения, представленного на рис.2,а–в, не свидетель-

ствует о таком уменьшении. Дополнительное увеличение чувствительности микрополости 3 связано скорее всего с изменением формы сечения микрополости в продольном направлении при действии растягивающего усилия.

Для исследования температурной чувствительности интерферометров они помещались в трубчатую печь, где осуществлялся их нагрев от комнатной температуры  $25^\circ\text{C}$  до температуры  $500^\circ\text{C}$  с шагом  $50^\circ\text{C}$ . Полученные экспериментальные данные для минимумов в спектрах отражения, ближайших к  $\lambda = 1550$  нм, а также результаты их аппроксимации линейной зависимостью представлены на рис.5. Отметим, что температурная чувствительность  $\Delta\lambda/\Delta T$  исследованных образцов достаточно мала и составляет для ИФП 1 и 3 всего  $1.1$  пм/ $^\circ\text{C}$ , а для ИФП 2 –  $0.9$  пм/ $^\circ\text{C}$ . Полученные данные хорошо согласуются с результатами других работ [3–8]. Величина  $\Delta\lambda/(\lambda\Delta T) = \Delta L_l/(L_l\Delta T)$  (см. (1)) для длины волны  $1550$  нм, на которой проводились измерения, составила около  $6.5 \times 10^{-7} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ , что близко к значению КТР кварцевого стекла марки КИ в температурном диапазоне  $50\text{--}500^\circ\text{C}$  согласно работе [14],  $(4.17\text{--}5.92) \times 10^{-7} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ . Следовательно, температурная чувствительность изготовленных интерферометров в основном определяется КТР боковых стенок микрополостей из нелегированного кварцевого стекла. Столь низкая температурная чувствительность ИФП, обусловленная малым КТР кварцевого стекла, выгодно отличает его от волоконных брэгговских решеток, у которых эта величина на порядок больше [13], и позволяет для ряда задач не прибегать к дополнительной температурной компенсации показаний датчика.

Нагрев ИФП до температуры  $500\text{--}600^\circ\text{C}$  являлся обратимым, т.е. при снижении температуры после нагрева положения минимумов и максимумов спектра отражения возвращались к значениям, соответствующим исходной температуре. Однако при нагреве до температуры  $700^\circ\text{C}$  наблюдалось необратимое увеличение базы интерферометра. Это необратимое изменение может быть использовано для прецизионного выбора рабочей точки интерферометра в случае узкополосного излучения.

Таким образом, нами предложен новый способ создания интерферометра Фабри–Перо, интегрированного непосредственно в структуру волоконного световода. Метод основан на сплавлении в электрическом разряде одно-

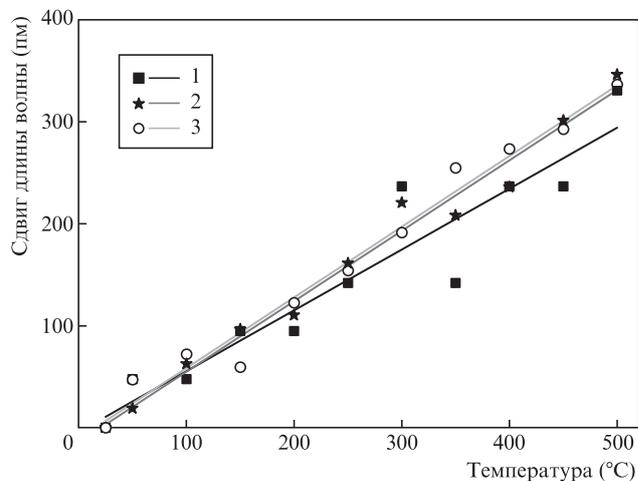


Рис.5. Зависимости длины волны минимума в окрестности  $\lambda = 1550$  нм в спектрах отражения интерферометров 1, 2 и 3 при их нагреве от комнатной температуры до  $500^\circ\text{C}$ .

модового световода на основе кварцевого стекла и композитного световода, полученного спеканием фосфатного стекла в трубке из кварцевого стекла. Показана возможность использования полученного интерферометра в качестве чувствительного элемента датчика деформации. Низкая, по сравнению с волоконными брэгговскими решетками, температурная чувствительность делает описанный тип чувствительных элементов датчиков деформации перспективными для практических применений.

1. Rao Y.J., Deng M., Duan D.W., Yang X.C., Zhu T., Cheng G.H. *Opt. Express*, **15**, 14123 (2007).
2. Wei T., Han Y.K., Tsai H.L., Xiao H. *Opt. Lett.*, **33**, 536 (2008).
3. Li E., Peng G.-D., Ding X. *Appl. Phys. Lett.*, **92**, 101117 (2008).
4. Villatoro J., Finazzi V., Coviello G., Pruneri V. *Opt. Lett.*, **34**, 2441 (2009).
5. Ferreira M.S., Bierlich J., Kobelke J., Schuster K., Santos J.L., Frazão O. *Opt. Express*, **20**, 21946 (2012).
6. Favero F.C., Araujo L., Bouwmans G., Finazzi V., Villatoro J., Pruneri V. *Opt. Express*, **20**, 7112 (2012).
7. Liu S., Wang Y., Liao C., Wang G., Li Z., Wang Q., Zhou J., Yang K., Zhong X., Zhao J., Tang J. *Opt. Lett.*, **39**, 2121 (2014).
8. Duan D.W., Rao Y., Hou Y.-S., Zhu T. *Appl. Opt.*, **51**, 1033 (2012).
9. Machavaram V.R., Badcock R.A., Fernando G.F. *Sensors and Actuators A*, **138**, 248 (2007).
10. Ma Z., Pang F., Liu H., Chen Z., Wang T. *Proc. Conf. on Optical Fiber Sensors* (Lausanne, 2018, WF48).
11. Karlsson G., Laurell F., Tellefsen J., Denker B., Galagan B., Osiko V., Sverchkov S. *Appl. Phys. B*, **75**, 41 (2002).
12. Cibula E., Donlagic D. *Opt. Express*, **15**, 8719 (2007).
13. Kersey A.D., Davis M.A., Patrick H.J., LeBlanc M., Koo K.P., Askins C.G., Friebel E.J. *IEEE J. Lightwave Technol.*, **15**, 1442 (1997).
14. Лео В.К., Мазурин О.В. *Свойства кварцевого стекла* (Л.: Наука, 1985, с. 166).