

УДК 621.3.049.76

## ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ АБСОЛЮТНЫХ РАССТОЯНИЙ И ПЕРЕМЕЩЕНИЙ С НАНОМЕТРОВЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ

© 2013 г. В. Т. Потапов, М. Н. Жамалетдинов, Н. М. Жамалетдинов,  
А. М. Мамедов, Т. В. Потапов

*Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН  
Россия, 141190, Фрязино Московской обл., пл. имени академика Б.А. Введенского, 1*

*E-mail: v\_potapov38@mail.ru*

Поступила в редакцию 08.08.2012 г.

Описано волоконно-оптическое устройство измерения малых абсолютных расстояний – базы интерферометров Фабри–Перо, образованных торцом волокна и отражающей поверхностью в пределах от 30 до 250 мкм с разрешением не хуже 50 нм. В основе функционирования устройства лежит спектральный метод волоконно-оптической низкокогерентной интерферометрии.

DOI: 10.7868/S0032816213040277

Задачи измерения абсолютных расстояний и перемещений волоконно-оптическими методами представляют значительный интерес для создания миниатюрных датчиков различных физических величин (таких, как давление, температура, деформации и т.д.), которые могут конвертироваться в перемещения. В настоящее время известно большое число работ по созданию волоконно-оптических датчиков физических величин на основе интерферометров Фабри–Перо (и.Ф.П.), образуемых с помощью оптических волокон, база которых (расстояние между отражателями) изменяется под влиянием внешних воздействий [1–5]. При этом для измерений базы и.Ф.П. применяются различные оптические и волоконно-оптические методы измерений абсолютных расстояний и перемещений.

Одним из перспективных и практичных решений этой проблемы являются методы низкокогерентной волоконно-оптической интерферометрии, в которых применяются низкокогерентные источники излучения (суперлюминесцентные светодиоды) с длиной когерентности, не превышающей 20–30 мкм [2, 5]. Главными достоинствами этих методов являются высокая точность измерений, которая практически не зависит от флуктуаций оптической мощности в линии, дистанционность измерений и возможность создания миниатюрных чувствительных элементов волоконно-оптических датчиков.

Методы волоконно-оптической низкокогерентной интерферометрии основаны на измерении автокорреляционной функции зондирующего излучения после его взаимодействия с образцом (или чувствительным элементом, выполненным в виде

и.Ф.П.). Автокорреляционная функция может быть измерена либо с помощью опорного интерферометра с модулируемой разностью плеч (оптического коррелометра [2, 5]), либо спектральным методом [6, 7], который заключается в измерении спектра мощности излучения на выходе образца с последующей математической обработкой результатов.

Несмотря на то, что спектральный метод дает меньшую точность измерений по сравнению с оптическим коррелометром, он может быть с успехом использован для решения целого ряда задач. Однако до сих пор остаются не выясненными пределы точности измерений расстояний, достигаемые этим методом. В данной работе описывается волоконно-оптическое устройство, позволяющее измерять расстояние между торцом оптического волокна и отражающей поверхностью с погрешностью не более  $\pm 50$  нм в пределах от 30 до 250 мкм.

Схема установки, реализующей спектральный метод волоконно-оптической низкокогерентной интерферометрии, приведена на рис. 1. Она состоит из источника излучения, волоконно-оптической линии с разветвителем и спектрометра, содержащего отражательную дифракционную решетку (эшелет), объектив и п.з.с.-матрицу. Излучение широкополосного суперлюминесцентного светодиода SLD471 в диапазоне длин волн  $\Delta\lambda = 920\text{--}960$  нм с центром на длине волны  $\lambda_0 \approx 940$  нм по оптическому волокну попадает на и.Ф.П., сформированный на торце волокна. Отраженный от и.Ф.П. сигнал через разветвитель подается на вход спектрометра. Спектрометр выполнен по автоколлимационной схеме, свет проходит через

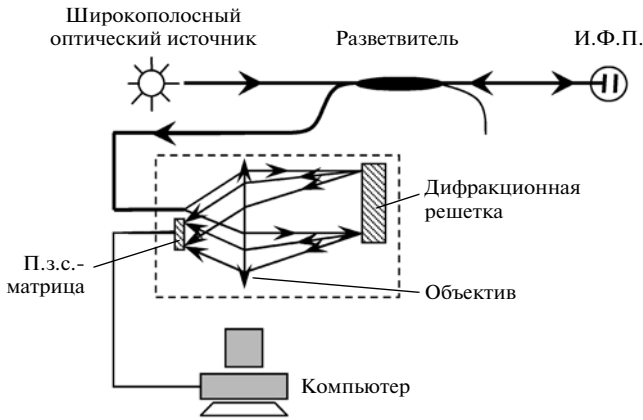


Рис. 1. Схема установки для измерения базы интерферометра Фабри–Перо и перемещений.

объектив дважды – туда и обратно, при этом отраженный от решетки спектр излучения 1-го порядка регистрируется п.з.с.-матрицей с числом пикселей  $640 \times 512$ . Фокусное расстояние объектива составляет 50 мм, светосила 2.8, диаметр абберационного пятна  $\approx 20$  мкм. Дифракционная решетка представляет собой реплику на стекле, покрытую металлом. Размеры решетки  $40 \times 40$  мм, 600 штрихов/мм. Эффективность решетки в 1-м порядке дифракции составляет  $\approx 70\%$ .

Известно [1, 2], что спектр SLD имеет гауссово распределение, в данном случае с центром на  $\lambda_0 = 940$  нм. Поэтому интенсивность отраженного сигнала будет описываться произведением функций отражения интерферометра Фабри–Перо и гауссовой функции источника, т.е. имеет вид:

$$I(\lambda) \sim I_0 \exp\left[-\frac{(\lambda - \lambda_0)^2}{2\Delta\lambda^2}\right] \left(1 - V \cos\frac{4\pi nd}{\lambda}\right), \quad (1)$$

где  $I_0$  – мощность излучения на входе волоконно-оптического тракта;  $V$  – константа, характеризующая видность интерференции и зависящая от величины потерь излучения и эффективности связи между и.ф.п. и оптическим волокном;  $\lambda_0$  и  $\Delta\lambda$  – соответственно центральная длина волны и ширина спектра излучения SLD;  $n$  – коэффициент преломления среды (для воздуха  $n = 1$ ).

На рис. 2 в качестве иллюстрации приведен спектр отраженного сигнала от и.ф.п., образованного торцами двух оптических волокон, расположенных на расстоянии  $d$ , равном  $\approx 100$  мкм, зарегистрированный п.з.с.-матрицей.

Как видно из формулы (1), максимумы в спектре отражения при фиксированном значении  $d$  находятся один от другого на расстояниях, определяемых из условий разности фаз:

$$\varphi_m - \varphi_{m-1} = \frac{4\pi nd}{\lambda_m} - \frac{4\pi nd}{\lambda_{m-1}} = 2\pi. \quad (2)$$

Отсюда выражение для базы и.ф.п.  $d$  имеет вид:

Амплитуда, отн. ед.

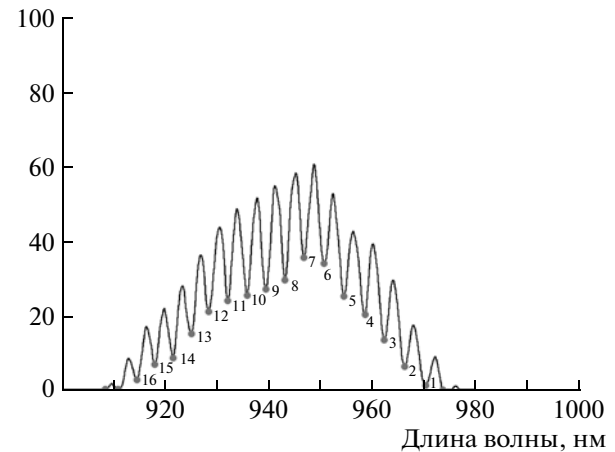


Рис. 2. Спектр интерферометра Фабри–Перо.

$$d = \frac{\lambda_m \lambda_{m+1}}{2(\lambda_{m+1} - \lambda_m)n} \approx \frac{\lambda^2}{2\Delta\lambda'} \quad \text{при } n = 1, \quad (3)$$

где  $\Delta\lambda' = \lambda_{m+1} - \lambda_m$  – расстояние между соседними максимумами.

Таким образом, для вычисления  $d$  необходимо определить длины волн, на которых располагаются максимумы (или минимумы) спектра отражения и.ф.п. Точность измерения  $d$  и чувствительность метода в этом случае будут определяться точностью измерения  $\lambda_m$ , т.е. спектральными характеристиками прибора, в том числе характеристиками п.з.с.-матрицы и отношением сигнал/шум.

Очевидно, что существуют ограничения для значений  $d$ , при которых спектральные характеристики прибора не будут влиять на точность измерений  $d$ . С одной стороны, спектральное разрешение дифракционной решетки прибора  $\Delta\lambda_p$  в целом должно, по крайней мере, на порядок превышать область свободной дисперсии и.ф.п.  $\Delta\lambda_{\text{и.ф.п.}} = \lambda^2/2d$ , т.е. должно выполняться условие:  $\Delta\lambda_p \ll \Delta\lambda_{\text{и.ф.п.}}$ , где  $\Delta\lambda_p = 0.2$  нм – спектральное разрешение решетки (600 штрихов/мм). Отсюда получаем, что  $d$  должно быть много меньше 4400 мкм. Таким образом, верхний предел измеряемых значений баз и.ф.п. определяется значением  $d \approx 440$  нм. С другой стороны, так как вычисление  $d$  с приемлемой точностью возможно только при достаточном числе максимумов, по крайней мере не менее двух, на спектральной кривой, то это накладывает предел на минимальные значения измеряемых  $d$ . В нашем случае оно составило примерно 20 мкм, при котором число максимумов на кривой было не менее четырех. Таким образом, можно утверждать, что в пределах 20–440 мкм характеристики прибора не будут влиять на точность измерения.

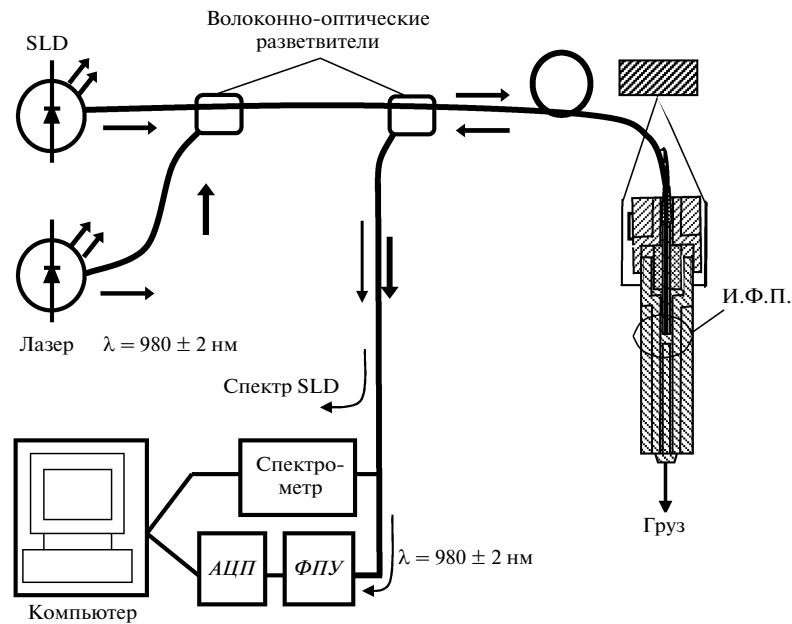


Рис. 3. Схема экспериментальной установки для тестирования датчика перемещений. ФПУ – фотоприемное устройство; АЦП – аналого-цифровой преобразователь.

Следует отметить, что верхний предел зависит от потерь в и.Ф.П. вследствие расходимости пучка излучения, поэтому он может быть ниже значения 440 мкм. В этих пределах основными факторами, ограничивающими точность измерения  $d$ , будут характеристики п.з.с.-матрицы, а именно, ее разрешающая способность и так называемый геометрический шум, возникающий вследствие различия геометрических размеров чувствительных элементов (пикселей) матрицы, различий в их чувствительности и величине темнового тока [8], а также неточностей в юстировке п.з.с.-матрицы относительно дифракционной решетки. Эти факторы влияют на точность измерения  $\lambda_m$  и  $d$ , и поэтому необходимо проводить дополнительную калибровку п.з.с.-матрицы.

Опишем порядок вычисления  $d$  из спектральной кривой. При измерении базы и.Ф.П.  $d$  сигнал на выходе п.з.с.-матрицы (512 точек по числу рабочих пикселей, а также столбцов матрицы), пропорциональный  $I(\lambda)$  (формула (1)), путем преобразования масштаба оси абсцисс преобразуется в периодический, представляющий собой синусоиду (косинусоиду):  $I(\nu) = I(\lambda^{-1})$ , где  $\nu = \lambda^{-1}$  – волновое число. Преобразованный сигнал умножается на весовую функцию, имеющую максимум в центре и плавно спадающую к краям. Затем путем дискретного преобразования Фурье находится положение максимума спектра, вырезается его часть вблизи максимума и путем обратного дискретного преобразования Фурье восстанавливается профильтрованный сигнал.

Таким образом осуществляется фильтрация сигнала для того, чтобы более точно извлечь информацию о положениях максимумов на кривой. Далее, с помощью алгоритма поиска максимумов находятся последовательно расположенные максимумы на спектральной кривой, и по ним вычисляется значение  $d$ .

Как отмечалось выше, для снижения влияния геометрических шумов п.з.с.-матрицы на точность измерений  $\lambda_m$  необходимо установить степень соответствия каждого пиксела матрицы заданной длине волны  $\lambda_m$ , т.е. провести калибровку п.з.с.-матрицы. С этой целью зарегистрированная спектральная кривая сравнивалась с аналогичной кривой, полученной одновременно с помощью оптического спектроанализатора ANDO AQ-6315C со спектральным разрешением  $\Delta\lambda = 0.05$  нм.

Сравнение полученных таким образом кривых и последующая обработка результатов позволили, в первом приближении, частично скомпенсировать влияние искажений оптической схемы (геометрических шумов), что обеспечило возможность измерять значения баз и.Ф.П. с погрешностью не более  $\pm 50$  нм. Для экспериментального подтверждения погрешности измерений расстояний, перемещений и порога чувствительности устройства была создана экспериментальная установка, схема которой приведена на рис. 3.

В волоконный тракт измерительной системы включались полупроводниковый лазер с длиной волны  $\lambda = 980 \pm 2$  нм и дополнительное фотоприемное устройство (ФПУ). Интерферометр Фаб-

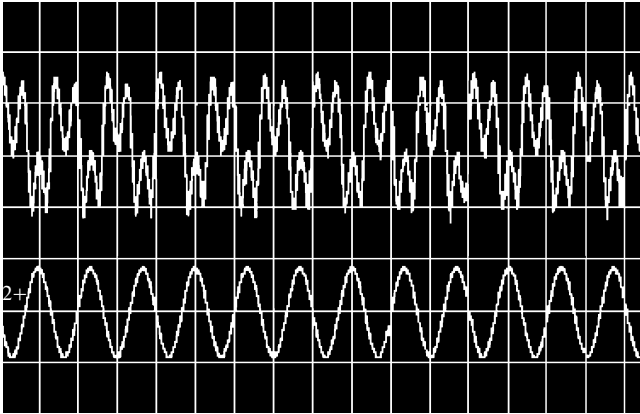


Рис. 4. Осциллограммы напряжения 17.2 В на частоте 70 Гц, подаваемого на контакты биморфной мембраны (внизу), и сигнала с фотоприемника при подаче на него лазерного излучения.

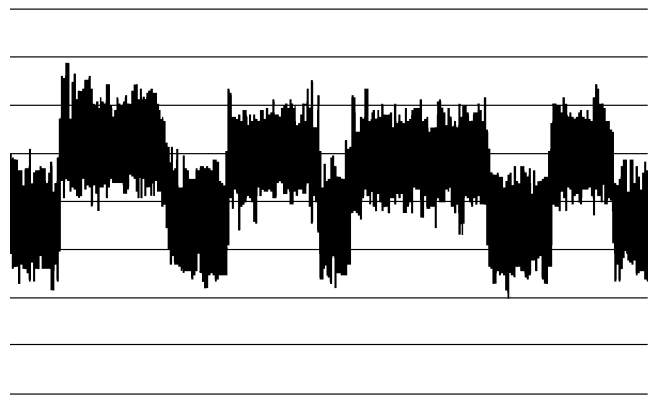


Рис. 5. Отклик устройства на изменение базы и.Ф.П. при скачкообразном включении и выключении напряжения 0.5 В, подаваемого на контакты биморфной мембраны.

ри—Перо формировался двумя способами: либо в латунной трубке с гнездом для подключения волокна с помощью волоконно-оптического разъема (при этом отражателями и.Ф.П. являлись торец оптического волокна с одной стороны и торец латунного стержня, закрепленного в трубке с другой стороны), либо и.Ф.П. образовывался торцом оптического волокна с одной стороны и миниатюрным зеркалом, располагаемым в центре биморфной пьезокерамической мембраны.

Для фиксированной длины  $\lambda$  зависимость интенсивности света на выходе и.Ф.П. от базы  $d$  имеет вид косинусоиды, а положения максимумов (или минимумов) косинусоиды фиксируются с точностью  $\pm 2$  нм (ширина линии лазера). Зарегистрировав таким образом кривую зависимости положения максимумов от растяжения трубки, мы можем использовать ее в качестве опорной с фиксированным положением точек и относительно нее определить погрешность нашего устройства.

Эксперимент проводился на латунной трубке, внутри которой размещался и.Ф.П., образованный торцом оптического волокна, заключенного в разъем, и торцом латунного стержня. Корпус трубки и стержень изготавливались из одного и того же материала с целью компенсации температурных влияний на величину базы и.Ф.П.

На начальном этапе эксперимента с помощью данного устройства (спектрометра) устанавливалось и фиксировалось некоторое значение базы и.Ф.П. в пределах 30–80 мкм, например  $49000 \pm 50$  нм. Затем, плавно растягивая трубку путем увеличения нагрузки, добивались максимального значения сигнала на фотоприемнике на длине волны лазера 980 нм, и эта точка фиксировалась с точностью  $\pm 2$  нм. Зарегистрировав эту кривую, мы могли использовать ее в качестве опорной с фиксированным положением точек и относительно нее определить погрешность нашего устройства.

После этого одновременно проводились измерения базы и.Ф.П. двумя методами при плавном растяжении трубки (увеличением нагрузки) в пределах упругих деформаций, обеспечивающих удлинение от 30 до 300 мкм. Результаты этих измерений показали, что среднеквадратичное отклонение значений баз и.Ф.П., полученных методом волоконно-оптической низкокогерентной интерферометрии, от данных, полученных с помощью лазера, не превышало  $\pm 50$  нм.

Пороговая чувствительность определялась стандартным методом по изменениям сигнала, регистрируемого от и.Ф.П., образованного подвижным зеркалом мембраны и торцом волокна, на выходе прибора на ширину собственной шумовой дорожки. Предварительно была проведена калибровка мембраны, определена зависимость ее смещения от прилагаемого напряжения. Резонансная частота конструкции (зеркало на мембране) составляла 1290 Гц, на частотах от 0 до 300 Гц амплитудно-частотная характеристика была постоянной, что позволило калибровать мембрану на переменном напряжении.

Такая калибровка проводилась путем измерения индекса модуляции излучения лазера на длине волны 980 нм при подаче на мембрану переменного напряжения с частотой 70 Гц. При индексе модуляции, равном  $\pi$ , что соответствует смещению мембраны на  $\lambda/2 \cong 490$  нм, напряжение на мембране составляло 17.2 В (рис. 4).

На рис. 5 показано изменение шумовой дорожки на выходе спектрометра при подаче на мембрану постоянного напряжения 0.5 В. Из этого рисунка видно, что пороговая чувствительность прибора составляла  $\cong 14$  нм.

Таким образом, на основании приведенных результатов можно сделать вывод о том, что погрешность измерений расстояний исследуемого

устройства составляет не более  $\pm 50$  нм в диапазоне измеряемых расстояний 30–250 мкм при пороговой чувствительности  $\approx 14$  нм.

На основе представленных метода и устройства могут быть созданы волоконно-оптические датчики физических величин (конвертируемых в перемещение) с миниатюрными чувствительными элементами, формируемыми на торцах оптических волокон, обладающими динамическим диапазоном более чем  $10^3$ . Устройство может также найти применение для дистанционных измерений малых расстояний и перемещений в труднодоступных местах, юстировки начальных положений (рабочей точки) баз интерферометра Фабри–Перо, измерения коэффициентов преломления и толщин диэлектрических покрытий и пленок, в том числе, в процессе их роста и т.п.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Bing Yu, Dae Woong Kim, Jiang Deng et al.* // *Appl. Optics*. 2003. V. 42. № 16. P. 3241.
2. *Rao Y.J., Jackson D.* // *Meas. Sci. Technol.* 1996. № 7. P. 981.
3. *Ниева П.* // *Датчики и системы*. 2008. № 5. С. 38.
4. *Oh Ki D., Ranade J., Arya V. et al.* // *SPIE*. 1998. V. 3538. P. 136.
5. *Иванов В.В., Маркелов В.А., Новиков М.А., Уставщиков С.С.* // *Письма в ЖТФ*. 2004. Т. 30. Вып. 9. С. 82.
6. *Taplin S., Podoleanu A.Gh., Webb D.J., Jackson D.A.* // *Electron. Lett.* 1993. V. 29. P. 893.
7. *Podoleanu A.Gh., Taplin S., Webb D.J., Jackson D.A.* // *Rev. Sci. Instrum.* 1993. V. 64. № 10. P. 3028-9.
8. *Якущенко Ю.Г.* Теория и расчет оптоэлектронных приборов. М.: Машиностроение, 1989. С. 140–141.