

07; 12

© 1992

ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ ДАТЧИКИ  
СО СПЕКТРАЛЬНЫМ КОДИРОВАНИЕМ НА ОСНОВЕ  
ИНТЕРФЕРОМЕТРА ФАБРИ-ПЕРОС.А. Егоров, Ю.А. Ершов,  
И.Г. Лихачев, А.Н. Мамаев

В последние годы наблюдается все возрастающий интерес к волоконно-оптическим датчикам (ВОД), применение которых для ряда приложений является безальтернативным. Интерферометрические ВОД обеспечивают высокую чувствительность, однако в них используются одномодовые световоды с сохранением поляризации, требуются стабилизированные источники излучения с узкой спектральной линией и сложные методики обработки результатов измерений. ВОД со спектральным кодированием, в которых воздействие измеряемого параметра преобразует спектральное распределение излучения в волоконно-оптическом тракте, избавлены от вышеназванных недостатков, а также не требуют опорных сигналов и перекалибровки в процессе эксплуатации [1].

Использование интерферометра Фабри-Перо (ИФП) в качестве оптического преобразователя, осуществляющего спектральную модуляцию, позволяет получить сочетание высокой чувствительности, свойственной интерферометрическим приборам, с точностью и надежностью спектрального кодирования. Воздействие внешнего параметра изменяет базу ИФП – расстояние между зеркалами и, соответственно, спектральное положение его пиков пропускания (отражения). Значение параметра, подлежащего измерению, определяется путем регистрации и соответствующей обработки спектральной функции пропускания или отражения ИФП. При таком подходе используются многомодовые световоды в качестве передающей линии и источники света с широким спектром излучения, а паразитные флуктуации световой мощности не оказывают влияния на работу ВОД.

Ранее сообщалось о ВОД давления [2] и температуры [3], построенных на этом принципе, однако их диапазон измерений ограничивался пределами одного свободного спектрального интервала ИФП. Это сужает динамический диапазон приборов, кроме того, может привести к ошибке, если изменение длины интерферометра составит более  $\lambda/2$ , где  $\lambda$  – длина волны используемого излучения. В настоящей работе предлагается регистрировать одновременно несколько резонансов отражения ИФП и определять номер  $N$  интерференционного порядка каждого минимума в спектральной функции отражения интерферометра.

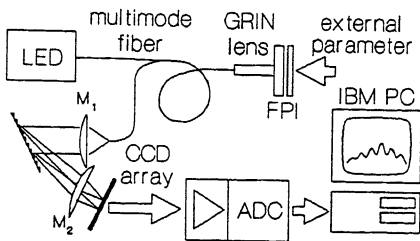


Рис. 1. Схема экспериментальной установки. LED – СИД, multimode fiber – многомодовое волокно, GRIN lens – градиентная линза, external parameter – внешнее воздействие, CCD array – ПЗС фотоприемник, ADC – аналого-цифровой преобразователь.

Схема экспериментальной установки изображена на рис. 1. Свет от источника излучения – GaAlAs светоизлучающего диода (СИД) с шириной спектра (по полувысоте)  $\Delta\lambda \sim 30$  нм и центральной длиной волны  $\lambda_0 = 0.82$  мкм подводился к микрооптическому интерферометру Фабри-Перо, работавшему в режиме отражения. Коэффициенты отражения диэлектрических зеркал, его образующих, были одинаковы и равнялись 50%. Одно из зеркал укреплялось на микротрансляторе, обеспечивавшем изменение базы ИФП. Для увеличения контрастности интерференционной картины и возможности изменения базы ИФП в широких пределах использовалась градиентная микролинза, формировавшая входной/выходной световой пучок. Регистрация спектральной функции отражения ИФП производилась с помощью спектрометра, состоявшего из дифракционной решетки и ПЗС линейки из 1024 чувствительных элементов в качестве фотоприемника. Линзы  $M_1$  и  $M_2$  имели фокусные расстояния 2.5 и 7 см соответственно. Сигнал с ПЗС линейки усиливался и с помощью аналого-цифрового преобразователя (АЦП) вводился для обработки в персональный компьютер IBM PC. Линейная дисперсия спектрометра равнялась 0.1 нм/элемент, а база ИФП варьировалась от 20 до 70 мкм. Абсолютное разрушение спектрометра ограничивалось размерами световодной жилы многомодового волокна и было невелико ( $\sim 1$  нм), однако его было достаточно для регистрации функции отражения ИФП и измерения ее смещения в спектральной области.

На рис. 2 показаны спектральное распределение излучения на выходе из волоконно-оптического тракта и экспериментальная функция отражения ИФП, полученная после нормирования исходного сигнала на спектр СИДа. Значение круговой оптической частоты  $\omega_n$  положения интерференционного минимума с номером  $N$  определяется линейным соотношением:  $\omega_n = (\pi c / L) \cdot N + (c / 2L) \cdot \varphi$ , где  $c$  – скорость света,  $L$  – длина базы ИФП, а  $\varphi$  – сдвиг спектрального резонанса, связанный с изменением фазы волны при отражении от зеркал и дифракции излучения в резонаторе. При

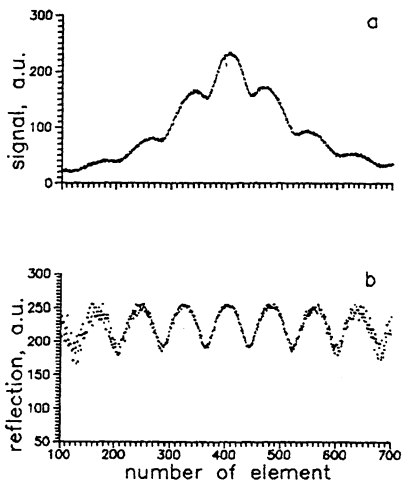


Рис. 2. Спектральное распределение излучения на выходе из волоконно-оптического тракта (а) и экспериментальная функция отражения ИФП, полученная после нормирования исходного сигнала на спектр СИДа (б). По горизонтальной оси отложен номер чувствительного элемента ПЗС фотоприемника, а по вертикальной — интенсивность сигнала в относительных единицах.

использовании градиентной линзы для формирования светового пучка в интерферометре вклад в  $\Phi$  от дифракции мал и его можно не рассматривать. По нескольким соседним минимумам могут быть определены коэффициент  $\pi c / L$  и, соответственно, база интерферометра  $L$ . Если погрешность измерения  $L$  при этом не превышает  $\lambda / 2$ , то номер  $N$  интерференционного порядка, соответствующий излучению частоты  $\omega_n$ , может быть вычислен однозначно.

На рис. 3 показана среднеквадратичная погрешность  $\delta_L$  при таком измерении  $L$  от 20 до 70 мкм. Каждая точка на графике получалась по 10 экспериментальным реализациям, а изменение длины интерферометра независимо контролировалось по методике подсчета интерференционных полос. Форма функции отклика ИФП вблизи минимумов отражения аппроксимировалась квадратичной параболой. Видно, что величина  $\delta_L$  остается заметно меньшей  $\lambda / 2$  во всем диапазоне, что позволяет достоверно определять номер требуемого порядка ИФП. Далее длина интерферометра вычислялась по положению конкретного минимума в границах одного свободного спектрального интервала ИФП от выделенной частоты  $\omega_{n0}$  вблизи максимума спектрального распределения источника:

$$L = \frac{c \cdot (2N + \varphi)}{2\omega_{n0}} \cdot \left( 1 - \frac{\omega_n - \omega_{n0}}{\omega_{n0}} \right).$$

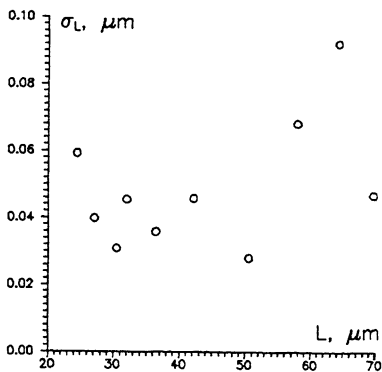


Рис. 3. Среднеквадратичная ошибка измерения длины ИФП по нескольким соседним минимумам его спектральной функции отражения.

Значение  $\omega_{n0}$  (и соответственно величина  $L_{n0}$  в виде целого числа полуволин  $L_{n0} = c \cdot (2N + \varphi) / \omega_{n0}$ ) определяется при начальной калибровке. Точность измерения  $L$  зависит от линейной дисперсии спектрометра, контрастности интерференционной картины, числа задействованных элементов и отношения сигнал/шум в ПЗС фотоприемнике. В нашем случае абсолютная погрешность измерения  $L$  определялась шумами аналоговой части обрабатывающей электроники и составила  $\pm 1$  нм. Данная величина не является пределом и при необходимости может быть уменьшена за счет оптимизации оптической схемы и блока электронной обработки датчика. Отметим также, что простота алгоритма обработки допускает использование малогабаритных специализированных цифровых вычислительных устройств (однокристалльная ЭВМ) вместо компьютера.

На основании предложенных методик были разработаны и исследованы ВОД микроперемещений, давления и температуры. Диапазон и точность преобразования каждого физического параметра зависят от конструкции чувствительного элемента. Эксперименты показали, что динамический диапазон таких приборов может достигать 50 дБ, а общий принцип спектрального кодирования допускает объединение ВОД различных физических параметров в единую волоконно-оптическую измерительную систему.

#### С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] D a k i n J., C u l s h a w B. Optical Fiber Sensors: Systems and Application. Artech House, Boston and London, 1989. V. 2. 789 p.
- [2] S i x t P., F a l c o L., D i e r a n e r P., L e h m a n n H.W. // SPIE Proc. 1988. V. 1011. P. 218-225.
- [3] J a m e s K.A., Q u i c k W.H. 3rd Int. Conf. on Opt. Fiber Sensors. Feb. 13-14, 1985. San Diego, California. P. 144-145.

Поступило в Редакцию  
26 октября 1992 г.