

07;12
©1994

ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКИЙ ДАТЧИК С ЧУВСТВИТЕЛЬНЫМ ЭЛЕМЕНТОМ НА ОСНОВЕ ДВУЛУЧЕПРЕЛОМЛЯЮЩЕГО ВОЛОКНА И СПЕКТРАЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛА

С.А.Егоров, А.Н.Мамаев, А.С.Полянцев

Интерферометрические волоконно-оптические датчики (ВОД) на волокнах, сохраняющих поляризацию, являются перспективными приборами для многих областей использования, в первую очередь для интеллектуальных материалов и структур (SMART STRUCTURES). В таких датчиках две собственные моды двулучепреломляющего волокна (соответствующие двум ортогональным поляризациям) выполняют роль плечей двухлучевого интерферометра с оптической разностью хода (ОРХ), зависящей от внешнего воздействия. Традиционный способ измерения ОРХ в интерферометрических ВОД основан на использовании высококогерентных лазеров со стабилизированной частотой излучения и сложных аналоговых электронных схем [1]. Типичными проблемами в подобных датчиках являются также дрейф рабочей точки и необходимость перекалибровки в процессе эксплуатации [2]. Кроме того, при монотонно изменяющемся внешнем воздействии выходной сигнал меняется периодически (диапазон однозначных измерений ОРХ не превышает

$\lambda/2$). Другой метод обработки — интерферометрия в белом свете — обеспечивает высокую точность и практически неограниченный диапазон измерений. Однако при этом используется опорный интерферометр с механическим прецизионным изменением ОРХ [3] или специально сконструированная линия задержки [2], что не всегда приемлемо на практике.

Альтернативный способ обработки сигналов, основанный на прямой регистрации выходного спектра чувствительного интерферометра, позволяет преодолеть эти проблемы и обеспечивает сочетание высокой чувствительности, присущей интерферометрическим приборам, с надежностью и точностью спектрального кодирования [4]. Спектральная функция пропускания интерферометра состоит из периодически расположенных минимумов и максимумов, расстояние между которыми и их положение определяются ОРХ интерферометра. Внешнее воздействие изменяет разность хода лучей и соответственно спектр пропускания интерферометра, который затем регистрируется и обрабатывается. Данный метод дает возможность измерять абсолютное значение ОРХ и, следовательно, внешних физических параметров, воздействующих на интерферометр. Ранее были продемонстрированы ВОД микроперемещения, давления и силы с чувствительным элементом на основе микрооптического объемного отражающего интерферометра Фабри-Перо [4,5]. В настоящем сообщении представлены экспериментальные результаты исследований интерферометрических ВОД напряжения, температуры и места воздействия на волокнах с сохранением поляризации.

Схема экспериментальной установки показана на рис. 1. Излучение GaAlAs суперлюминесцентного светоизлучающего диода (СИД) с максимумом на длине волны $\lambda = 0.85$ мкм и шириной спектра $\Delta\lambda \sim 30$ нм вводилось в волокно, сохраняющее поляризацию. На входе и выходе волокна находились поляризаторы, ось которых составляла 45° относительно осей волокна. Амплитуды волн излучения, распространяющихся в ортогональных модах, были равны. Использовались два типа волокон: PANDA с длиной биений $L_b = 6$ мм, и с эллиптической сердцевинной $L_b = 10$ мм для длины волны $\lambda = 0.85$ мкм. Регистрация спектра сигнала на выходе производилась с помощью микрооптического дифракционного спектрометра, содержащего 1024-элементную ПЗС линейку фотоприемников. Сигнал с ПЗС линейки усиливался и после 8-разрядного аналого-цифрового преобразователя обрабатывался компьютером.

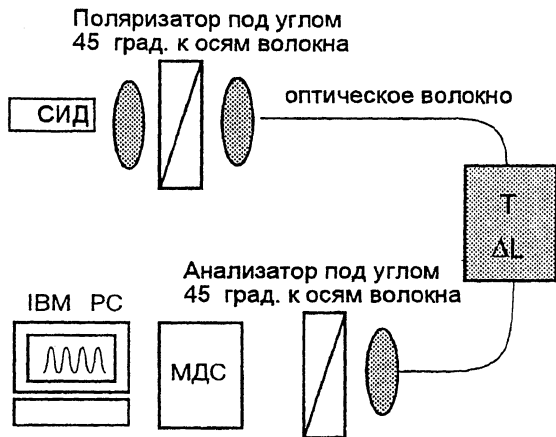


Рис. 1. Схема экспериментальной установки. Оптическое волокно — волокно, сохраняющее поляризацию, T и ΔL — внешнее воздействие на волокно (нагревание и растяжение), МДС — микрооптический дифракционный спектрометр.

Методика определения ОРХ лучей интерферометра подробно описана в работе [4]. Отметим лишь необходимость учета, в нашем случае — диспергирующих свойств волокон. При однозначном определении порядка интерференции абсолютное значение ОРХ и, следовательно, параметра внешнего воздействия на волокно может быть определено с высокой точностью. Полный диапазон измерения ОРХ ограничен дисперсией, разрешением спектрометра и шириной спектра излучения. Практически он находится в пределах от десятков до сотен мкм. Поэтому длина волокна в чувствительном элементе, зависящая от полного диапазона измерения ОРХ и длины биений волокна L_b , может меняться от нескольких сантиметров до нескольких метров. Точность измерения ОРХ определяется главным образом отношением сигнал-шум и контрастностью интерференционной картины.

Абсолютная погрешность измерения ОРХ интерферометра на произвольном двулучепреломляющем волокне составляла менее 1 нм при использовании простейшей теплоизоляции экспериментальной установки. Она определяется шумами аналоговой части обрабатывающей электроники и соответствует приведенной в работе [4]. При отсутствии теплоизоляции неконтролируемые изменения температуры приводят к флуктуациям ОРХ с дисперсией ~ 6 нм.

Экспериментальные результаты применения методики для измерения температуры и растяжения приведены на рис. 2. В первом случае часть волокна длиной L_s по-

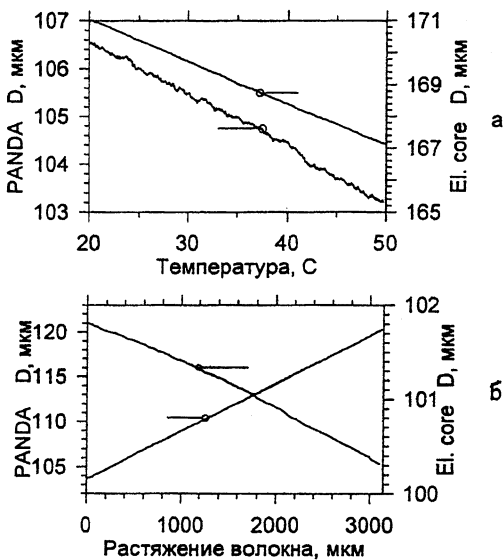


Рис. 2. Изменение ОРХ D интерферометра на двулучепреломляющем волокне при *a* — нагревании (параметры волокна PANDA: полная длина $L = 75$, $L_s = 16$ см; параметры волокна с эллиптической сердцевинной (el. core) $L = 201$, $L_s = 150$ см); *b* — растяжении (параметры волокна PANDA — $L = 73$, $L_s = 23$ см; параметры волокна с эллиптической сердцевинной (el. core) $L = 120$, $L_s = 30$ см).

мещалась в нагреваемую (охлаждаемую) водяную колбу. Точность измерения температуры определялась возникновением дополнительных шумов при неравномерном нагреве двулучепреломляющих волокон (градиенте температуры). Большой температурный градиент при выходе волокна из жидкости приводил к большим ошибкам, особенно для волокна типа PANDA, нагреваемый участок которого был относительно короток. Во втором случае часть волокна длиной L_s подвергалась растяжению. При этом точность также определяется флуктуациями температуры волокна. При больших деформациях на концах растягиваемого участка возникают большие напряжения. Это приводит к снижению контрастности интерференционной картины за счет паразитного перемешивания излучения ортогональных мод и также увеличивает ошибку. Следует отметить, что при использовании в качестве подводящего волокна с вырожденными поперечными модами (т. е. без сохранения поляризации) колебания температуры в нем перестанут влиять на точность измерения растяжения и уменьшится ошибка измерения температуры, вызванная прохождением границы воздух-вода. Чувствительность датчика температуры

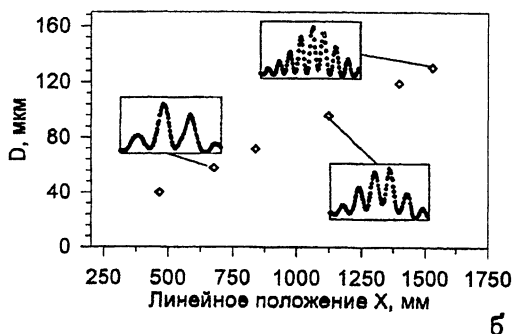
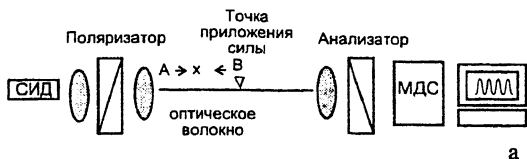


Рис. 3. а — Оптическая схема датчика, регистрирующего место воздействия на волокно. Оптическое волокно — двулучепреломляющее волокно с эллиптической сердцевиной, МДС — микрооптический дифракционный спектрометр. Оптическая ось поляризатора составляет угол в 45° с оптическими осями волокна, а ось анализатора параллельна одной из осей волокна. б — зависимость ОРХ D от расстояния между точкой воздействия и входным торцом волокна X (линейным положением). На вставках показаны спектры пропускания интерферометра при различных значениях X .

пропорциональна L_s , а растяжение не зависит от нее. Измеренные коэффициенты $(\Delta D/\Delta TL)_{\text{PANDA}} = 0.71 \text{ мкм}/^\circ\text{Км}$, $(\Delta D/\Delta TL)_{\text{эл.серд.}} = 0.09 \text{ мкм}/^\circ\text{Км}$ и $(\Delta D/\Delta L)_{\text{PANDA}} = 5.5 \cdot 10^{-3} \text{ мкм}/\text{мкм}$, $(\Delta D/\Delta L)_{\text{эл.серд.}} = 5 \cdot 10^{-4} \text{ мкм}/\text{мкм}$ находятся в хорошем соответствии с ранее полученными [6,7].

Представленный метод обработки сигнала может быть с успехом использован для датчика, регистрирующего место воздействия на волокно. Его оптическая схема, подобная описанной в [8], показана на рис. 3, а. Интерферометр образуется между точкой воздействия на волокно и входным (выходным) торцом волокна. Определив ОРХ по методу, описанному в работе [4], вычисляем физический размер интерферометра $X = L_b D/\lambda$, что определяет расстояние от входного торца волокна до места воздействия на него. Экспериментально полученная зависимость ОРХ от X приведена на рис. 3, б. Следует отметить возможность создания единой измерительной системы из датчиков различных

физических величин, построенной на общем принципе спектрального кодирования.

В работе описано применение новой методики спектральной обработки выходного сигнала в интерференционных датчиках с чувствительными элементами на основе двулучепреломляющего волокна для измерения различных внешних параметров (температуры, напряжения, места воздействия). Метод позволяет проводить абсолютные измерения оптической разности хода лучей в таких интерферометрах с точностью, лучшей 1 нм, и, следовательно, предложенные датчики позволяют проводить измерения температуры с точностью до 10^{-3} °С и растяжения оптического волокна с точностью до 0.3 мкм.

Список литературы

- [1] Jackson D.A. // J. Phys. E.: Sci. Instrum. 1985. V. 18. N 12. P. 981-1001.
- [2] Dakin J. Culshaw "Optical Fiber Sensors: Systems and Application". V. 2. Boston and London, 1989. 789 p.
- [3] Горшков Б.Г., Переушин Ю.В. // Радиотехника. 1988. В. 8. С. 31-33.
- [4] Егоров С.А., Ершов Ю.А., Лихачев И.Г., Мамаев А.Н. // Письма в ЖТФ. 1992. Т. 18. В. 22. С. 18-21.
- [5] Egorov S.A., Ershov Yu.A., Likhachiev I.G., Mamaev A.N. // SPIE Proc. 1993. V. 1972. P. 362-369.
- [6] Rashleigh S.C., Marrone M.J. // IEEE J. Quantum Electron. 1982. V. QE-18. N 10. P. 1515-1523.
- [7] Zang F., Lit J.W.Y. // Applied Optics. 1993. V. 32. N 13. P. 2213-2218.
- [8] Meggit B.T., Chen S., Palmer A.W., Grattan K.T.Y., Pinnock R.A. // Proc. of 9th Int. Conf. on Opt. Fiber. Sensor. Firenze, Italy. P. 369-372.

Научно-производственное
объединение "Свет"
Москва

Поступило в Редакцию
19 июня 1994 г.