

## ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКАЯ КВАЗИРАСПРЕДЕЛЕННАЯ СИСТЕМА ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ

Представлена новая структура квазираспределенного волоконно-оптического датчика температуры. Принцип действия основан на регистрации частоты рециркуляции одиночных импульсов с их периодической регенерацией на различных длинах волн. Чувствительными элементами являются секции оптического волокна с металлическим покрытием, разделенные спектрально-селективными отражающими элементами.

Мониторинг состояния сложных инженерных сооружений и промышленных систем является неотъемлемой частью их повседневной эксплуатации. Для осуществления подобного контроля требуются датчики и измерительные системы различных физических величин, таких как температура, механические деформации, давление и т.д.

В последние годы в связи с конструктивной сложностью информационно-измерительных систем на основе традиционных электронных измерительных технологий, а также из-за существенного влияния на погрешность их измерений различных дестабилизирующих факторов проявляется значительный интерес к использованию волоконно-оптических датчиков (ВОД). Кроме таких основных достоинств этих датчиков, как способность работать при воздействии интенсивных электрических и магнитных полей, стойкость к агрессивным средам, пожаро- и взрывобезопасность, не менее важным преимуществом является возможность создания на их основе распределенных (квазираспределенных) измерительных систем. Это значит, что один и тот же волоконно-оптический датчик может использоваться для выполнения измерений в большом количестве точек пространства. Полученные данные при этом передаются в виде пространственного распределения соответствующей измеряемой величины. В связи с этим весьма перспективным является применение таких датчиков в нефтяной, химической промышленности, в электроэнергетике, для контроля состояния турбин, котлов, дамб, мостов, плотин.

Высокая чувствительность частоты рециркуляции в замкнутой оптоэлектронной системе к малым внешним воздействиям на волоконный световод позволяет реализовать новый принцип частотного представления информации. При этом повышение точности измерений достигается за счет идентификации измеряемых физических величин по частоте рециркуляции одиночного оптического импульса с его периодическим восстановлением по амплитуде, форме и длительности на каждом цикле циркуляции. Поскольку для предлагаемого метода измерений не требуется информация о фазе и поляризации оптической волны, в схеме ВОД могут быть использованы многомодовые инжекционные лазеры (ИЛ) и волоконные световоды (ВС), что значительно упростит стыковку между оптическими элементами. Известно, что применение многомодового ИЛ в силу малой когерентности позволяет уменьшить уровень шумов, обусловленных попаданием отраженного излучения в активную область лазера.

Для одновременного измерения температуры в нескольких требуемых точках контролируемого объекта нами разработана структура квазираспределенного волоконно-оптического датчика температуры (ВОДТ) со спектральным разделением каналов. Принцип измерений основан на том, что воздействие температуры приводит к изменению длины и показателя преломления волокна, в результате чего изменяется частота рециркуляции. Сущность функционирования волоконно-оптического датчика заключается в организации рециркуляции одиночных оптических импульсов с периодической регенерацией одновременно на нескольких длинах волн.

Чувствительный элемент волоконно-оптического датчика представляет собой отрезки кварцевых многомодовых волоконных световодов. Принцип измерения осно-

ван на том, что воздействие температуры приводит к изменению оптической длины волокна за счет изменения геометрической длины и показателя преломления волоконного световода. Это служит причиной изменения времени распространения оптического импульса по волоконному световоду, т.е. изменяется частота рециркуляции. Данное изменение регистрируется достаточно просто и с высокой точностью. На каждом цикле рециркуляции осуществляется так называемая  $2R$ -регенерация, т.е. происходит восстановление информационного импульса по форме, амплитуде и длительности, что позволяет поддерживать процесс рециркуляции неограниченно долго. Информационным параметром является временное положение циркулирующего импульса. При этом длина волны излучения каждого лазера соответствует спектральной полосе отражения определенного дихроичного зеркала.

Использование дихроичных зеркал в качестве спектрально-селективных отражающих элементов имеет следующие преимущества:

- поскольку излучение в дихроичных зеркалах практически не поглощается, они могут работать при больших плотностях световой энергии;
- возможность работать при достаточно высоких температурах окружающей среды (до  $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) без расплавления и деформации;
- благодаря своей конструкции, они обладают значительным временем эксплуатации без ухудшения спектрально-селективных свойств;
- из-за того, что дихроичные зеркала имеют широкую спектральную полосу отражения, нет необходимости использовать специальные меры по стабилизации спектральных характеристик полупроводниковых лазеров.

Анализ современного состояния технологий показал, что коммерчески доступные дихроичные зеркала при нормальном падении излучения в интересующей нас области ближнего ИК-диапазона обладают шириной спектра отражения  $\pm 40\text{--}50\text{ нм}$ , коэффициент отражения при этом составляет  $93\text{--}99\%$ , коэффициент пропускания  $85\text{--}90\%$ .

В качестве мультиплексора предлагается использовать волоконные сплавные разветвители с сильно выраженными спектральными характеристиками. Преимуществами данных устройств по сравнению с аналогичными на интерференционных фильтрах являются цельноволокonnая оптическая схема, отсутствие юстируемых и склеиваемых узлов, относительная простота изготовления. Сплавные разветвители типа  $2\times 2$  получают с помощью вытягивания и сплавления в зоне нагрева двух кварцевых световодов. В результате формируется рабочая область разветвителя–ограниченная с двух сторон плавными коническими переходами общая суженная зона. Рабочая область разветвителя защищается кварцевым и/или металлическим корпусом. При растяжении и сплавлении световодов можно наблюдать процесс периодической перекачки оптической мощности излучения из одного выходного порта в другой. Спектральные свойства разветвителя становятся значительно более выраженными–коэффициенты ответвления представляют собой осциллирующие функции длины волны излучения. Механизм возникновения спектральных осцилляций и их период определяется связью распространяющихся и взаимодействующих мод в рабочей области разветвителя.

Коммутатор цифровых сигналов представляет собой мультиплексор, который является комбинационным устройством с  $m$  информационными,  $n$  управляющими входами и одним выходом. Функционально мультиплексор состоит из  $m$  элементов конъюнкции, выходы которых объединены дизъюнктивно с помощью элемента ИЛИ с  $m$  входами. На одни входы всех элементов конъюнкции подаются информационные сигналы, а другие входы этих элементов соединены с соответствующими выходами дешифратора с  $n$  входами.

Рост температуры световода  $\Delta\theta$  приводит к увеличению его геометрической длины  $L$  (продольная деформация), изменению показателя преломления  $n$  и, соответственно, к изменению частоты рециркуляции. Одновременно с продольной деформаци-

ей ВС происходит изменение его диаметра (уменьшение при растяжении и увеличение при сжатии), т. е. возникает поперечная деформация. Этим объясняется эффект фотоупругости, который также приводит к изменению показателя преломления. В итоге появляется дополнительная задержка  $\Delta T$  во времени распространения сигнала. В датчиках температуры, как правило, используются волоконные световоды с металлическим покрытием, нанесенным методом намораживания. Это, во-первых, повышает чувствительность датчика, во-вторых, металлическое покрытие толщиной 15–20 мкм обеспечивает полную нечувствительность датчика к давлению.

Погрешность измерений ВОДТ рециркуляционного типа определяется условием, что дополнительное приращение (уменьшение) времени задержки циркулирующего импульса под воздействием температуры должно превышать максимальную величину нестабильности частоты рециркуляции  $\chi_{\max}$ , обусловленную внешними и внутренними дестабилизирующими факторами. Проведенные оценки показали, что для  $L > 100$  м,  $\chi_{\max} < 3 \cdot 10^{-6}$  при условии, что температурному воздействию подвергается до 90 % волоконной секции, погрешность измерений не превышает 0,2 °С.

Исследования показали, что для того чтобы не было ложного срабатывания и датчик устойчиво работал, минимальный уровень сигнала на входе компаратора должен быть не менее 4 мВ. Порог срабатывания компаратора соответствует половине амплитуды входного сигнала, что обеспечивает наибольшую стабильность частоты рециркуляции. При этом уровень составляющих излучения, связанные с рэлеевским рассеянием, спонтанным рассеянием Мандельштама-Бриллюэна и комбинационным Рамановским рассеянием, является существенно меньше информационных сигналов. Компоненты схемы имели параметры: мощность излучения InGaAsP/InP инжекционного лазера 5 мВт (типа NEC NX8562), спектральная чувствительность InGaAs-ЛФД 8,8–9,4 А/Вт для полосы 1 ГГц (типа NEC NR4210 и EG&G Optoelectronics C30645E), величина нагрузочного сопротивления фотоприемника  $R_n = 50$  Ом, потери на каждом дихроичном зеркале 1,6 дБ (при прохождении излучения в двух направлениях) и суммарные потери на мультиплексоре, демультиплексоре, направленном ответвителе и всех соединениях 9 дБ. Поскольку для длин волн в окрестности 1,55 мкм увеличение общих потерь в световоде с металлическим покрытием в основном связано с микроизгибными потерями, увеличение которых наблюдается при росте температуры до +250 °С, длина волоконно-оптического измерительного преобразователя не превышает несколько километров. Максимальная измеряемая температура ограничивается динамической прочностью волокна, сроком эксплуатации датчика и может достигать +400 °С.

The new structure of the quasi-distributed fiber-optic temperature sensor is presented. The action principle is based on registration recirculating frequency of single pulses with their periodic regeneration on various wavelengths. Sensitive elements are sections of an optical fiber with the metal covering, divided spectral-selective reflecting elements.

*Ксенофонтов М.А.*, зав. лабораторией НИИПФП им. А.Н.Севченко БГУ, д.ф.-м.н., доцент, Минск, Беларусь, e-mail: lab\_doзатор@mail.ru.

*Поляков А.В.*, доцент кафедры физики и аэрокосмических технологий БГУ, к.ф.-м.н., Минск, Беларусь, e-mail: polyakov@bsu.by.