

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ В УГОЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Лимаренко Р.А., Савчук А.В., Спорик В.В. (Международный центр «Институт прикладной оптики» НАН Украины), Яценко И.А. (ДЧСТБ)

Розглянуті переваги застосування дистанційних, пожежо- та вибухово-безпечних волоконно-оптичних датчиків для вимірювання параметрів технологічних процесів у вугільній промисловості. Приведені критерії оцінки можливості та доцільності використання волоконно-оптичних датчиків для створення мультиплексорних систем моніторингу доквілля на основі датчиків вібрації, тиску, температури та концентрації метану.

PERSPECTIVE APPLICATIONS OF OPTICAL FIBRE SENSOR IN THE COAL INDUSTRY

Limarenko R.A., Savchuk A.V., Sporik V.V., Yashenko I.A.

Advantages of application remote, fibre- and explosion-proof optical fibre sensors for measurement of parameters of technological processes in the coal industry are considered. Criteria of an estimation of an opportunity and expediency of use of optical fibre gauges for creation multiplexing systems of environment monitoring are resulted on the basis of sensor of vibrations, pressure, temperature and concentration of methane.

Введение

Благодаря своим высоким эксплуатационным характеристикам волоконно-оптические датчики (ВОД) находят все больше применений в промышленности в силу своих преимуществ перед традиционными датчиками. На основе таких датчиков созданы системы наблюдения в толках электростанций, устройства для измерения температуры проводов ЛЭП, оптические трансформаторы напряжения, работающие на эффекте Поккельса, оптические трансформаторы тока на эффекте Фарадея. В металлургии, химической и нефтедобывающей промышленности датчики часто используются в неблагоприятных условиях: повышенные температуры, агрессивные среды, сильные электрические и магнитные поля, взрывоопасная атмосфера. Именно здесь ВОД с их бесконтактностью и дистанционностью измерений, а также стойкостью к окружающей среде имеют особое преимущество.

Основными критериями и исходными данными для оценки возможности и целесообразности использования ВОД в промышленных технологических процессах могут быть: выбор принципа работы ВОД, возможность построения на основе выбранного типа ВОД системы мониторинга и построения адекватной математической модели для оценки достоверности и точности измерений. Рассмотрение этих вопросов позволит разработать

рекомендации относительно потенциального применения ВОД в технологических процессах в угольной промышленности.

Классификация ВОД

ВОД являются одним из видов оптических датчиков, на которых базируются оптические системы сбора информации о параметрах технических систем или состояния окружающей среды. С их помощью можно определить наличие объекта в поле зрения, расстояние до него, угловое положение, светимость, а также оптические потери, показатель преломления среды, давление и расход газов и жидкостей, механическую деформацию, линейную и угловую скорость, напряженность электрического и магнитного полей, напряжение и силу электрического тока, температуру, дозу ионизирующего и ядерного излучения, химический состав и концентрацию веществ, биологическую активность и др.

Принцип действия ВОД состоит в том, что под влиянием внешних факторов происходит изменение параметров световой волны, проходящей по чувствительному элементу, - амплитуды, фазы, частоты или поляризации. Таким чувствительным элементом служит либо сам волоконный световод (ВС), либо разрыв в нём. В последнем случае ВС является передающим трактом. Датчики можно разделить на две группы: с внутренней и внешней модуляцией. Также кроме чувствительного элемента ВОД должен содержать источник излучения, фотоприемник, схемы обработки и регистрации сигнала.

В зависимости от модулируемого параметра световой волны различают амплитудные датчики (модуляция интенсивности), фазовые (модуляция фазы, состояния поляризации) и частотные (модуляция оптической частоты).

Наибольшее распространение получили амплитудные датчики. Как правило, это локальные датчики, в которых чувствительный элемент (измерительный преобразователь) занимает небольшое пространство. Отметим также, что реализация амплитудных датчиков в основном возможна на многомодовом ВС в некогерентном излучении, что понижает их стоимость по сравнению с другими типами датчиков.

В амплитудных датчиках с внешней модуляцией интенсивность светового потока изменяется из-за: изменения ширины зазора между ВС и зеркалом или между входным и выходным ВС; частичное рассогласование сопряжения входного и выходного ВС при закреплении одного из них на вибрирующей или перемещаемой поверхности, или при отражении входного пучка вибрирующим зеркалом; частичного перекрытия этого зазора движущимися шторками, дифракционными решетками, перемычками и т.п.; изменения оптических свойств среды, заполняющей зазор, вследствие изменений концентрации, температуры и т.п.

Амплитудные оптические и ВОД в силу своей простоты и подготовленности элементной базы вполне доступны для промышленного производства и внедрения.

Хотя амплитудные датчики на основе модуляции излучения переменным коэффициентом поглощения среды отличаются простотой конструкции, в которой отсутствуют механически перемещающиеся части, их область ограничена измерением температуры, дозы радиации, напряженности электрического поля. Ограничения вызваны отсутствием материалов, эффективно изменяющих своё поглощение при других физических воздействиях.

ВОД отражательно-пропускательного типа используют для измерений перемещения, усилия, давления и воздействий приводимых к ним. Они обладают хорошей линейностью, могут использовать многомодовые ВС, что значительно уменьшает потери при стыковке. Основной недостаток – наличие механической системы, требующей точной юстировки, т.к. перемещение может составлять несколько микрон и менее.

ВОД на основе нарушения полного внутреннего отражения обладают высокой чувствительностью, позволяют использовать однократное отражение, что уменьшает габариты устройства. Недостаток – наличие механической системы. Область применения – измерение давления, перемещения, усилия.

ВОД на основе управляемой связи ВС обладают высокой чувствительностью, хорошими массогабаритными показателями. Основное достоинство – отсутствие механической системы. Недостаток – очень сложная технология их изготовления.

Общим недостатком всех схем амплитудных ВОД является зависимость выходного сигнала от мощности источника излучения. Поэтому в состав таких датчиков должны входить стабилизаторы мощности оптического излучения, основанные на обратной связи по оптическому излучению, что повышает термостабильность ВОД более чем на порядок. Классификация амплитудных ВОД приведена в таблице 1.

Мультиплексорные системы ВОД и мониторинг окружающей среды на их основе

Амплитудные ВОД также могут быть использованы в мультиплексорных системах, которые представляют собой совокупность локальных датчиков, объединенных общим ВС с возможностью адресации к каждому из них. Такие системы позволяют объединять большое количество датчиков, измеряющих параметры на отдаленных объектах. Кроме этого мультиплексирование позволяет повысить эффективность использования систем обработки сигналов, уменьшить количество источников и приемников излучения, длину соединительных оптических кабелей и этим самым уменьшить стоимость системы мониторинга на основе ВС. Зондирующий оптический импульс (или непрерывный модулированный луч) проходит через все соединенные параллельно или последовательно локальные ВОД, а на выходе системы выполняется демультиплексирование (временное, частотное, спектральное, по длине когерентности) с последующим детектированием сигнала от выбранного конкретного датчика. Наиболее просто

Таблица 1. Классификация волоконно-оптических амплитудных датчиков и примеры их применения.

Измеряемая физическая величина	Используемое физическое явление	Детектируемая величина	Параметры и особенности измерений
Электрическое напряжение, напряженность электрического поля	Эффект Поккельса	Составляющая поляризации	1... 1000В; 0,1... 1000 В/см
Сила электрического тока, напряженность магнитного поля	Эффект Фарадея	Угол поляризации	Точность $\pm 1\%$ при 20...85°C
Температура	Изменение поглощения полупроводников	Интенсивность пропускаемого света	-10...+300°C (точность $\pm 1^\circ\text{C}$)
Температура	Изменение постоянной люминесценции	Интенсивность пропускаемого света	0...70°C (точность $\pm 0,04^\circ\text{C}$)
Температура	Прерывание оптического пути	Интенсивность пропускаемого света	Режим "вкл/выкл"
Гидроакустическое давление	Полное отражение	Интенсивность пропускаемого света	Чувствительность... 10 мПа
Ускорение	Фотоупругость	Интенсивность пропускаемого света	Чувствительность около 1 мг
Концентрация газа	Поглощение	Интенсивность пропускаемого света	Дистанционное наблюдение на расстоянии до 20 км
Звуковое давление в атмосфере	Многокомпонентная интерференция	Интенсивность отраженного света	Чувствительность, характерная для конденсаторного микрофона

реализовать мультиплексирование амплитудных датчиков. Для систем, работающих на пропускание, возможно использование временного мультиплексирования, в котором датчики включаются параллельно или последовательно и сигнал считывается зондирующими импульсами. Протяженность

этих импульсов и их частота повторения подбираются таким образом, чтобы каждому зондирующему импульсу соответствовала последовательность из неперекрывающихся импульсов. Адресация к каждому датчику осуществляется путем выборки его выходного сигнала из серии импульсов с последующим детектированием. Более энергетически выгодной является система со спектральным мультиплексированием, в которой каждый датчик работает на своей оптической частоте (длине волны) поскольку все излучение от источника направляется на соответствующий датчик. Однако для системы ВОД основанной на измерительной линии поглощения, такая система сложна для реализации в силу необходимости использования спектральных мульти-демультиплексоров и использования индивидуальных линий поглощения для каждого датчика.

Таким образом, мультиплексирование позволяет:

- повысить эффективность использование систем обработки сигналов
 - сократить количество источников и приемников излучения
 - уменьшить длину соединительных оптических кабелей
- и тем самым удешевить систему мониторинга на основе оптических волокон.

Существующая элементная база (оптические модуляторы, лазеры, светодиоды, фильтры, специализированные световоды) позволяют создавать мультиплексорные волоконно-оптические системы с параметрами (количество датчиков, их пороговая чувствительность, перекрестные шумы), достаточными для практического использования.

Математическое моделирование первичных измерительных преобразователей (датчиков) физических величин, в частности амплитудных ВОД, открывает широкие возможности использования методов автоматизированного проектирования для дальнейшего улучшения их метрологических и конструктивных характеристик. При детальном математическом моделировании измерительных схем необходимо построить адекватные математические модели контуров измерения и преобразования. Предпочтение при создании таких моделей отдается аналитическим методам, которые позволяют получить полную физическую модель оцениваемого параметра, наиболее пригодную для анализа и оценки точности первичной цепи измерительного преобразования и обеспечения достоверности измерений.

Таким образом, можно сформулировать основные критерии и исходные данные для оценки возможности и перспективности использования ВОД в промышленных технологических процессах:

- принцип работы первичного преобразователя и датчика
- возможность построения на основе выбранного типа датчика системы мониторинга
- построение адекватной математической модели для оценки достоверности и точности измерений.

Экспериментальные образцы разработанных ВОД температуры и давления

На рис. 1 представлены экспериментальные макеты амплитудных волоконно-оптических датчиков давления и температуры. Разработанные и изготовленные в ИПО НАНУ волоконно-оптические преобразователи давления и температуры уже на стадии лабораторного образца имеют существенно лучшие технические и эксплуатационные характеристики, чем серийно выпускаемые аналогичные по назначению приборы «Сапфир-300» и дифманометр ДМ-3583М.

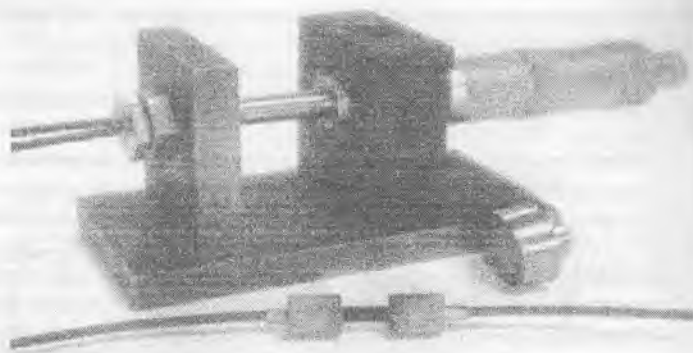


Рис.1. Экспериментальные макеты амплитудных волоконно-оптических датчиков давления и температуры.

Волоконно-оптические спектральные анализаторы концентрации метана

Создание новых типов устройств для определения концентрации метана и других взрывоопасных газообразных веществ является актуальной задачей, в связи с необходимостью точного контроля уровней загазованности метаном шахт и других промышленных предприятий. Существующий класс устройств по точности, пожаро- и взрывобезопасности, себестоимости и возможности их приобретения и обслуживания в Украине не позволяет оптимально решить эту проблему.

Предлагаемый комплекс на основе ВОД предназначен для определения концентрации газообразных химических веществ путем измерения величины поглощения светового луча на длинах волн соответствующих линиям поглощения исследуемого газа. Предварительные исследования показали высокую эффективность приборов с использованием волоконно-оптических элементов. Согласно закону Бугера-Ламберта излучение, прошедшее путь l в некоторой среде с коэффициентом поглощения χ , ослабляется в $\exp(\chi l)$ раз. Поэтому управление излучением в оптическом канале, связывающем источник и приемник излучения, может осуществляться за счет непосредственного воздействия на коэффициент поглощения вещества.

Регистрация изменений поглощательной способности вещества применяется для анализа состава газовых потоков. Специальная кювета обеспечивает большую длину пути прохождения светового пучка в газовой среде, что позволяет обнаружить достаточно слабые линии поглощения и по ним идентифицировать газовую смесь. Для измерения коэффициента поглощения χ может использоваться источник, излучение которого вводится с помощью волоконных световодов в многопроходную кювету, расположенную в отдаленной точке измерения. Абсорбционный метод основан на строгой зависимости длины волны поглощения от состава газовой смеси.

Используя источник излучения с перестраиваемой длиной волны, можно измерять спектральную зависимость абсорбции газовой смеси и создавать датчики концентрации химических веществ и датчики концентрации газа.

Свет, излучаемый лазером или светодиодом, поступает в сосуд с измеряемым газом через многомодовое оптическое волокно (рис. 2). Из проходящих через газ световых волн будут поглощаться только те, которые входят в спектр поглощения этого газа. Таким образом, подавая (также с помощью многомодового оптического волокна) выходящий из сосуда с газом свет на световой детектор, можно определить род газа и измерять его концентрацию.

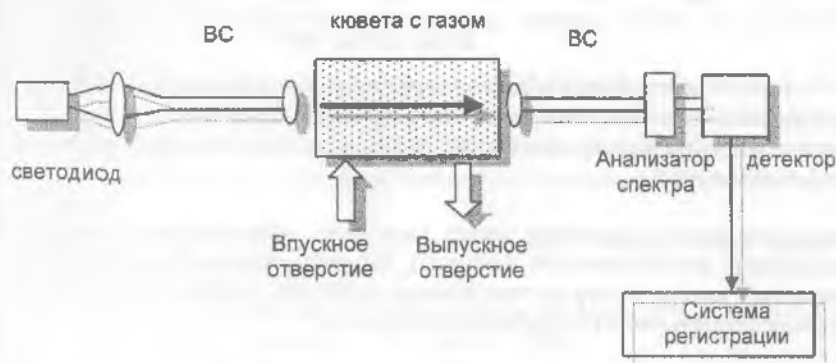


Рис.2. Принципиальная схема ВОД измерения концентрации газа.

Рабочие спектральные области светоизлучающих приборов на основе AlGaAs, InGaAsP и светоприемных приборов на основе Si, Ge, а также спектр молекулярного поглощения для основных видов газов (рис. 3) позволяют создавать системы наблюдения за концентрацией CH_4 на расстоянии до десятков километров. Подобные газовые датчики можно использовать для дистанционного наблюдения за степенью загрязнения атмосферы (газами N_2O , NH_3 , CH_4 и др.) и за концентрацией горючих газов (C_2H_2 , C_2H_4 и др.). Для повышения точности измерений также можно применять

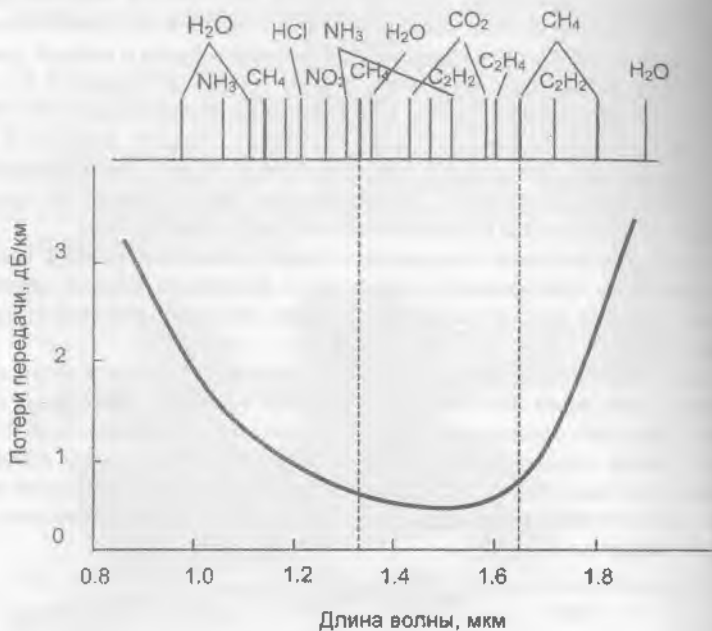


Рис.3. Спектральные области, перекрываемые различными полупроводниковыми светонизлучающими и светоприемными приборами, характеристика поглощения кварцевого оптического волокна и спектр поглощения для основных газов.

различные методы (например, метод двух волн, многослойные интерференционные диэлектрические фильтры). Из этого вытекает возможность разработки нового класса дистанционных приборов, которые могут найти широкое применение в угледобывающей отрасли.

Выводы

Таким образом важной задачей является разработка и изготовление дистанционных, пожаро- и взрывобезопасных датчиков (измерительных преобразователей) контроля и измерения температуры, давления, перемещений, вибраций, концентрации метана и параметров газовых смесей в технологических процессах в угольной промышленности. Наиболее перспективными являются измерители состояния и свойств веществ, в которых используются волоконно-оптические датчики. Это позволяет изготавливать приборы на основе ВОД, которые имеют следующие преимущества:

- абсолютная пожаро- и взрывобезопасность;
- высокая чувствительность;

- высокий уровень защиты от действия электромагнитных полей;
- компактность и малая энергоемкость;
- многофункциональность использования по сравнению с аналогичными по назначению приборами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Прикладная оптика, под ред. Н.П.Заказнова, М.: Машиностроение, 1988.
2. Вейнберг В.Б., Саттаров Д.К. „Оптика световодов” М.: Машиностроение, 1977.
3. Окоси Т. и др., Волоконно-оптические датчики, Л.: Энергоатомиздат, 1991.
4. Афанасьев В.А. Оптические измерения, М.: Высшая школа, 1981.
5. H.J.M. Kreuwel, "Planar Waveguide Sensors for the Chemical Domain," Ph.D. Thesis, University of Twente, the Netherlands, 1990.
6. Jorgenson, "Surface Plasmon Resonance as an Optical Probe of the Metal/Dielectric Interface," M.S. Thesis, University of Washington, 1991.
7. Lambeck, "Integrated opto-chemical sensors," Sensors and Actuators 88:103-116, 1992.
8. Lambeck, "Chemo-optical micro-sensing systems," SPIE 1511:100-113, 1991.
9. Villuendas et al., "Optical Fibre Device for Chemical Sensing Based on Surface Plasmon Excitation," Sensors and Actuators A21-A23:1142-1145, 1990.
10. Tarassenko et al., "Review of Optical Sensors for Biomedical Applications," Colloquium on Electrochemical Sensors for Biomedical Applications, Apr. 1986.
11. Garces et al., "Four-Layer Chemical Fibre Optic Plasmon-Based Sensor," Sensors and Actuators B7:771-774, 1992.
12. Culshaw, "Fibre Optic Sensors and Systems at the University of Strathclyde," Fiber Optic and Laser Sensors VII 1169:2-9, 1989.
13. Matsubara et al., "Optical Chemical Sensor Based on Surface Plasmon Measurement," Applied Optics 27:160-1163, 1988.
14. Dakin and Culshaw, Optical Fiber Sensors: Principles and Components, Artech House, Boston and London, 1988, pp. 1, 180, 190-208.
15. Norris, "Current Status and Prospects for the Use of Optical Fibres in Chemical Analysis," Analyst 114:1359-1372, Nov. 1989.
16. Gambling et al "Curvature & Microbending Loss In Single-Mode Fibers" Optical & Quatum Elect. 11 (1979)
17. Gialloresi et. al "Optical-Fiber Sensors Challenge the Competition" IEEE Spectrum, Sep. 1986 (44-49).

18. Hariharan, P. "Appendix I: Heterodyne Interferometry" Basics of Interferometry, Academic Press, 1992.
19. Croucher, J.A., L. Gomez-Rojas, S. Kanellopoulos, V.A. Handerek. "High Sensitivity Pressure Measurements Using Side-Hole Fibre" 12th International Conference on Optical Fiber Sensors, 1997 Technical Digest Series, Vol. 16 Oct.28-31, 1997, Williamsburg, Virginia.
20. Красюк Б.А. и др. Световые датчики. – М.: Машиностроение. 1990.
21. Казанганов А.Н. и др. Волоконная оптика в измерительной и вычислительной технике. – Алма-Ата: Наука Каз. ССР, 1989.
22. Бусурин В.И., Носов Ю.Р. Волоконно-оптические датчики: физические основы, вопросы расчета и применения. – М.: Энергоиздат, 1990.
23. Засовин Э.А., Милинкис Б.М. Волоконно-оптические измерительные преобразователи. – Севастополь, 1990.
24. Евтихийев Н.Н., Засовин Э.А., Мирвицкий Д.И. Волоконная и интегральная оптика в информационных системах. – М.: МИРЭА, 1987.
25. Измерительная техника. – М.: Издательство стандартов, 1992.