

МЕТОДЫ И ТЕХНИКА ИЗМЕРЕНИЙ

УДК 291.33.39; 681.586.33-181.48

Метод измерения точки росы, основанный на эффекте изменения коэффициента отражения от скола волокна

С.М.Кострицкий, А.А.Дикевич, Ю.Н.Коркишко, В.А.Фёдоров

Московский государственный институт электронной техники
(технический университет),

ООО НПК «Оптолинк»

Разработан и исследован гигрометр точки росы, основанный на эффекте изменения коэффициента отражения от скола волокна. Предложена и подтверждена экспериментально модель функционирования детектора образования конденсата. Проведены экспериментальные измерения точки инея воздуха с заданными влагосодержаниями.

Гигрометрия – самое первое направление газового анализа. Основная задача гигрометрии – определение влагосодержания исследуемого газа. В настоящее время особенно остро стоит задача определения концентрации воды в чистых и особо чистых технологических газах, а также в природном газе при его транспортировке. Среди известных методов измерения влажности – кулонометрический, сорбционный, конденсационный [1]. Последний представляется наиболее перспективным с точки зрения точности, надежности и стабильности, уступая другим по ценовым характеристикам. Конденсационный метод заключается в измерении температуры, до которой необходимо охладить прилегающий к охлаждаемой поверхности слой влажного газа, для того чтобы довести его до состояния насыщения при рабочем давлении [2]. Преимущество классического метода измерения точки росы состоит в том, что точность измерения определяется практически только точностью задания и измерения температуры, что выгодно отличает такие датчики от сорбционных в заданном диапазоне температур. Высокую точность измерения температуры позволяет обеспечить калиброванный в данном диапазоне термопреобразователь сопротивления.

В качестве детектора образования конденсата в конденсационных гигрометрах обычно используют охлаждаемое зеркало, имеющее размеры порядка 1 см². Значительно уменьшить размеры измерительной камеры, уменьшить поверхность конденсации (снизить влияние температурного градиента) и упростить конструкцию гигрометра можно, применяя в качестве чувствительного элемента одномодовое оптическое волокно [3]. Кроме того, это позволит вынести источник излучения и фотоприемник за пределы зоны измерения [4]. Наиболее простой вариант исполнения такого прибора – гигрометр на эффекте изменения коэффициента отражения от границы раздела волокно–газ при образовании на сколе волокна пленки конденсата.

Методика эксперимента. Разрабатываемый гигрометр точки росы основан на изменении мощности сигнала, обратноотраженного от скола оптического волокна. При работе использовались стандартное изотропное оптическое волокно производства ООО НПК «Оптолинк», волоконный разветвитель 2×2, источник света – суперлюминесцентный диод (СЛД) с центральной длиной волны 1550 нм, стыкованный таким же оптическим волокном, и измеритель мощности RIFOC 575L с потенциальным выходом (ФП). Схема экспериментального стенда представлена на рис.1.

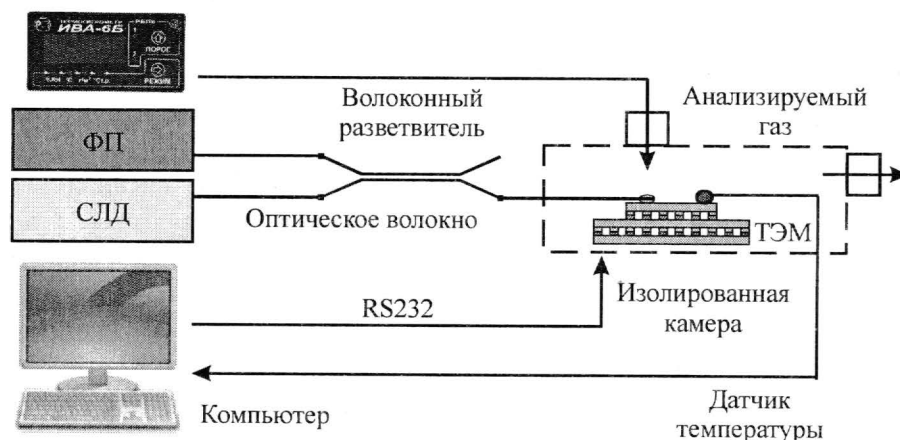


Рис.1. Схема экспериментального стенда

Если оптическое волокно, в котором распространяется оптическое излучение, сколоть под прямым углом, то основная часть излучения будет выходить из волокна, но порядка 3,5% излучения (в случае воздуха) будет отражаться от скола обратно. Отраженную мощность можно измерить, поставив в оптическую схему до скола волокна разветвитель. При образовании на торце волокна пленки конденсата происходит изменение показателя преломления в приповерхностной области, вследствие чего изменяется мощность отраженного сигнала (рис.2).

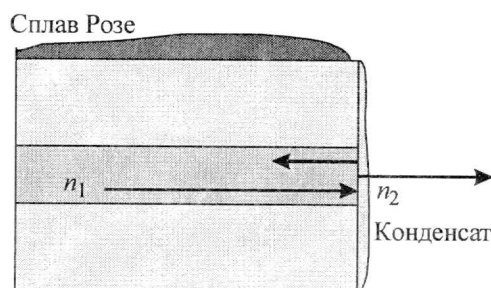


Рис.2. Волоконно-оптический детектор образования конденсата

Испытание любых датчиков точки росы не представляется возможным без использования специального оборудования – генератора газа с заданным влажностным содержанием. Все экспериментальные исследования проводились при помощи поверочного генератора влажного газа, позволяющего задавать концентрацию в пределах от 0 °С т.р. до – 30 °С т.и. с расходом 1 л/мин на выходе. Принцип действия генератора основан на контролируемом разделении потоков «сухого» газа (в нашем случае магистрального сжатого воздуха) и «влажного» газа, прошедшего через термостатированный насытитель. Затем потоки соединяются, а точка росы газовой смеси контролируется термогигрометром ИВА-6Б производства ООО НПК «Микрофор» (г. Зеленоград) [5].

Газ подавался в специальную изолированную камеру (в нее не попадал воздух из внешней среды), в которой на основание блока воздушного охлаждения был припаян двухкаскадный термоэлектрический модуль (ТЭМ). На его холодной стороне посредством теплопроводного эпоксидного состава закреплен платиновый термометр сопротив-

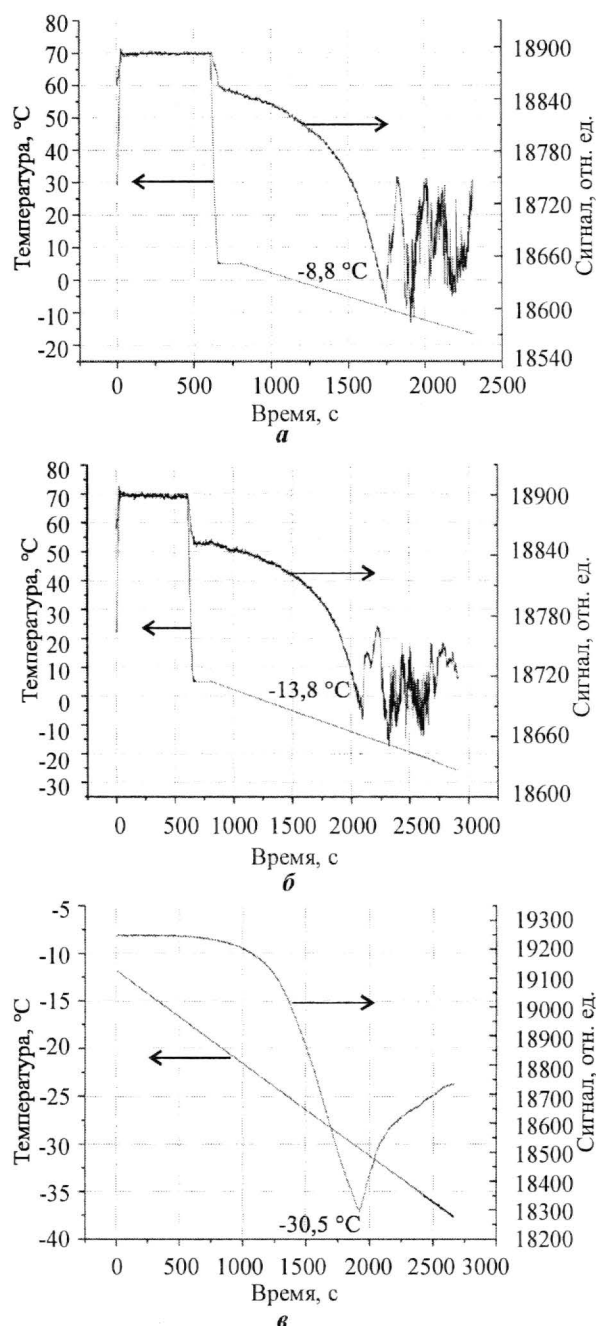


Рис.3. Зависимости отраженного сигнала и температуры скола волокна от времени при подаче в камеру воздуха с точками инея: $-8,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ (а); $-13,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ (б); $-30,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (в)

образом, наиболее сухому газу соответствует наименьшее значение точки инея. На рис.3 приведены зависимости отраженного сигнала и температуры скола волокна от времени при подаче в камеру влажного воздуха с различным влагосодержанием, характеризуемым тремя значениями точки инея: $-8,8\text{ }^{\circ}\text{C}$; $-13,9\text{ }^{\circ}\text{C}$; $-30,3\text{ }^{\circ}\text{C}$. Наблюдается хорошее соответствие температуры характерного излома ($-8,8\text{ }^{\circ}\text{C}$; $-13,8\text{ }^{\circ}\text{C}$; $-30,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ соответственно) на температурной зависимости мощности отраженного сигнала и точки инея, задаваемой генератором влажного газа.

ления и припаян чувствительный конец волокна. Для обеспечения требуемого теплового контакта между волокном и термоэлектрическим модулем конец волокна был припаян к рабочей поверхности модуля сплавом Розе. Анализируемый газ подавался с уровня крышки камеры.

Эксперимент. Экспериментальные измерения показали, что температурная зависимость мощности сигнала, отраженного от охлаждаемого скола волокна, имеет характерный перегиб, а температура, при которой он происходит, коррелирует со значением точки инея воздуха, подаваемого в камеру. Для проведения количественных измерений наблюдаемых изменений уровня отраженного сигнала при изменениях влажности газа и температуры скола волокна были определены абсолютные значения оптической мощности как СЛД (185 мкВт), так и выхода оптического разветвителя (9566 нВт), направляющего излучение СЛД на охлаждаемый скол волокна в рабочей части детектора.

Перед каждой фазой эксперимента чувствительную часть нагревали до $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ для испарения остатков влаги из чувствительной области. Затем проводилось медленное охлаждение детектора конденсата со скоростью $1\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{мин}$. При этом контролировался отраженный от скола волокна сигнал.

Проведена серия экспериментов с использованием воздуха с различным влагосодержанием, которое точно задавалось генератором влажного газа. Влагосодержание может характеризоваться значением точки инея – максимальной температуры прилегающего к охлаждаемой поверхности слоя газа, при которой на этой поверхности начинает образовываться пленка инея. Таким

Обсуждение результатов. Так как используемое волокно является одномодовым в диапазоне рассматриваемых длин волн, падение света на границу раздела можно считать нормальным, а значит для определения коэффициента отражения можно воспользоваться формулой Френеля:

$$R = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2,$$

где R – коэффициент отражения; n_1 и n_2 – показатели преломления сред.

С целью проверки этой модели были проведены измерения мощности сигналов, отраженных от сколотого конца волокна (см. рис.2), при погружении волокна в жидкости с различными показателями преломления (таблица). Сравнение экспериментальных данных с расчетными значениями показало их удовлетворительное совпадение. При проведении расчетов полагалось, что n_1 – показатель преломления кварца, n_2 – показатель преломления или воздуха, или одной из трех использованных жидкостей.

Результаты проверки модели функционирования детектора

Среда	Показатель преломления	Коэффициент отражения (расчет)	Отраженная мощность, нВт	
			Расчет	Эксперимент
Кварц	1,46	–	–	–
Воздух	1	0,035	334,8	334,8
Деионизованная вода	1,33	$2,5 \cdot 10^{-3}$	23,9	24,5
Этиловый спирт	1,36	$1,26 \cdot 10^{-3}$	12,1	9,8
3-хлорэтилен	1,48	$4,6 \cdot 10^{-5}$	0,4	1,1

С учетом неидеальности прямого угла скола получено хорошее соответствие экспериментальных и расчетных данных. Для 3-хлорэтилена несоответствие вызвано ограничением минимальной измеряемой мощности прибора 1 нВт и, соответственно, большой погрешностью измерений вблизи этого значения. Результаты эксперимента показывают, что выбранная модель функционирования детектора образования конденсата соответствует действительности.

При измерении точки росы газа с заданным влагосодержанием до момента образования конденсата наблюдалось плавное уменьшение оптического сигнала. Оно вызвано температурной зависимостью показателя преломления кварца, а также механическими напряжениями из-за разницы температурных коэффициентов линейного расширения сплава Розе, которым волокно припаяно к ТЭМ. В момент, когда толщина пленки конденсата достигает порядка длины волны излучения, сигнал начинает расти, а далее изменяется по синусоидальному закону. Это вызвано тем, что часть света, вышедшая из волокна, отражается от границы раздела конденсат–воздух и возвращается обратно в волокно. Таким образом, пленка конденсата образует интерферометр Фабри–Перо, поэтому при изменении температуры и толщины пленки происходят периодические колебания сигнала.

Максимальная погрешность измерения сорбционно-емкостного преобразователя относительной влажности ДВ2ТСМ в диапазоне от 0 до 10% составляет $\pm 0,095$ показания прибора, для точки инея $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ – $\pm 0,8\text{ }^{\circ}\text{C}$. Погрешность термопреобразователя со-

противления составляет $\pm 0,1$ °С. Результаты измерений согласуются с данными измерительного оборудования в пределах погрешностей.

Созданный и испытанный гигрометр точки росы работает в диапазоне от 0 до, по крайней мере, -30 °С т.и. Дальнейшая работа будет вестись в направлении увеличения диапазона в область более сухих газов, так как для основных областей применения (калибровки сорбционно-емкостных преобразователей, измерения влагосодержания особо чистых технологических газов и т.д.) требуется обеспечение диапазона измерений до -60 °С т.и. и ниже.

Литература

1. Берлинер М.А. Измерения влажности. – М.: Энергия, 1971. – 400 с.
2. Соков И.А. Основные понятия и термины в гигрометрии // М.: – 1986, 52 с. – (Сер. Метрологическое обеспечение измерений; Вып. 5/ ВНИИКИ).
3. Lopez-Higuera J.M. Handbook of optical fibre sensing technology N.Y.: John Wiley & sons, Ltd. – 2002. – 795 с.
4. Деревягин А.М., Селезнев С.В., Степанов А.Р., Агальцов А.Г., Анализатор точки росы по влаге и углеводородам «КОНГ-Прима-4». Особенности промышленной эксплуатации и возможности // Газовая промышленность. – 2002. – № 12. – С. 57–59.
5. Дикевич А.Я., Копейкин А.Н., Щербаков Р.Ю., Заикин В.А. Автоматизированные генераторы влажного газа // Тез. докл. конф. – 2006. – Режим доступа: http://www.microfor.ru/public/tezis_generator.htm.

Статья поступила
5 февраля 2008 г.

Кострицкий Сергей Михайлович – доктор физико-математических наук, профессор кафедры материалов и процессов твердотельной электроники (МПТЭ) МИЭТ, начальник отдела новых разработок ООО НПК «Оптолинк». *Область научных интересов:* физика фоторефрактивных материалов и сегнетоэлектриков, интегральная и волоконная оптика.

Дикевич Алексей Александрович – аспирант кафедры МПТЭ МИЭТ. *Область научных интересов:* датчики влажности, волоконно- и интегрально-оптические датчики.

Коркишко Юрий Николаевич – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой МПТЭ МИЭТ, генеральный директор ООО НПК «Оптолинк». *Область научных интересов:* физика и химия полупроводников, сегнетоэлектриков и диэлектриков, интегральная оптика, кристаллография.

Фёдоров Вячеслав Александрович – доктор физико-математических наук, профессор кафедры МПТЭ МИЭТ, технический директор ООО НПК «Оптолинк». *Область научных интересов:* физика и химия полупроводников, сегнетоэлектриков и диэлектриков, интегральная оптика, кристаллография.