

А. С. АНТОНОВ, Г. Г. ИШАНИН

**ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЙ ГАЗОАНАЛИЗАТОР
ДЛЯ КОНТРОЛЯ ДИОКСИДА АЗОТА**

Рассматривается оптико-электронный газоанализатор для измерения концентрации диоксида азота в автомобильных выбросах, принцип действия которого основан на методе оптической адсорбционной спектроскопии. Приведены технические характеристики источника и приемников оптического излучения разрабатываемого газоанализатора; представлена его оптическая схема и описаны преимущества данной схемы по сравнению с классической.

Ключевые слова: газоанализатор, излучающий диод, фотодиод, метод оптической адсорбционной спектроскопии.

Современные газоанализаторы, используемые для измерения концентрации диоксида азота (NO_2) в составе выхлопных газов автотранспортных средств, имеют ряд недостатков, в частности:

— газоанализаторы, принцип действия которых основан на методе хемиллюминесцентной реакции оксида азота с озоном, должны иметь в своем составе генератор озона и конвертер, обеспечивающий нагрев газа (до $350\text{ }^\circ\text{C}$) для перехода двуокиси азота в оксид азота, — это влечет за собой увеличение погрешности измерения, а также времени измерения и энергопотребления [1];

— газоанализаторы, принцип действия которых основан на использовании электрохимических сенсоров, имеют низкую селективность и требуют периодической корректировки показаний по мере расхода ресурса сенсора (средний срок службы сенсора не более трех лет) [2].

Перечисленные факторы позволяют сделать вывод о необходимости разработки оптико-электронного газоанализатора, обладающего высокой селективностью, быстродействием, низким энергопотреблением, увеличенным ресурсом работы и относительно невысокой стоимостью.

В настоящей статье описывается разрабатываемый газоанализатор диоксида азота, теоретически отвечающий данным требованиям. Принцип его действия основан на методе оптической адсорбционной спектроскопии, который используется для определения изменения интенсивности зондирующего излучения, прошедшего через поглощающую газовую среду. Газовая среда выполняет функцию фильтра, поглощающего излучение источника с определенной длиной волны. Зависимости спектрального показателя поглощения σ различных газов от длины волны λ приведены на рис. 1.

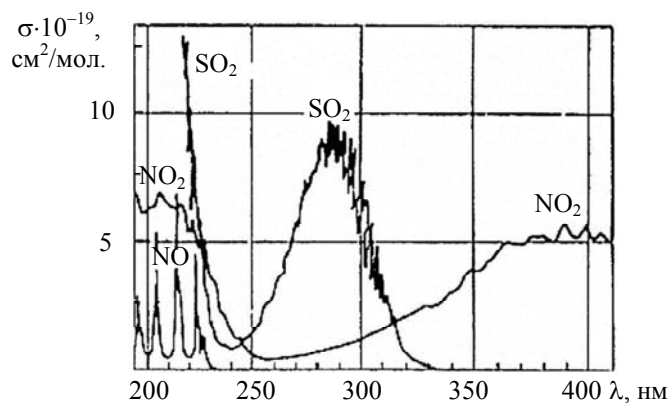


Рис. 1

Анализ рис. 1 показывает, что на длинах волн 350—450 нм наблюдается поглощение излучения только диоксидом азота. На данном участке спектра максимальное поглощение достигается при $\lambda=385$ нм, что следует учитывать при подборе источника излучения.

Метод определения коэффициента пропускания газа основан на законе Бугера — Ламберта — Бера:

$$\tau = \Phi_{\tau} / \Phi_0 = \exp(-\sigma[C]l), \quad (1)$$

где Φ_0 и Φ_{τ} — поток излучения на входе и выходе оптической кюветы, в которой находится поглощающая среда (диоксид азота); l — длина оптического пути поглощения, см; $[C]$ — концентрация диоксида азота в газовой смеси, мол./см³.

В целях корректности последующего изложения приведем оптическую схему классического газоанализатора (рис. 2).

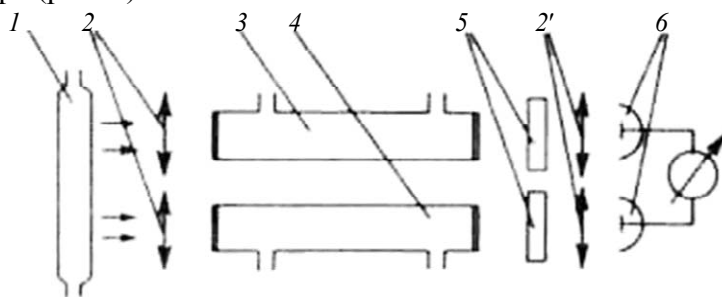


Рис. 2

Зондирующее излучение газоразрядного или теплового источника 1 формируется оптической системой 2 в параллельный пучок, который проходит через рабочую 3 и опорную 4 кюветы. Далее излучение проходит через фильтры 5 и фокусируется оптической системой 2' на фотоэлементах 6 или фотоэлектронных умножителях [2].

Рассмотрим теперь оптическую схему разрабатываемого газоанализатора диоксида азота (рис. 3).

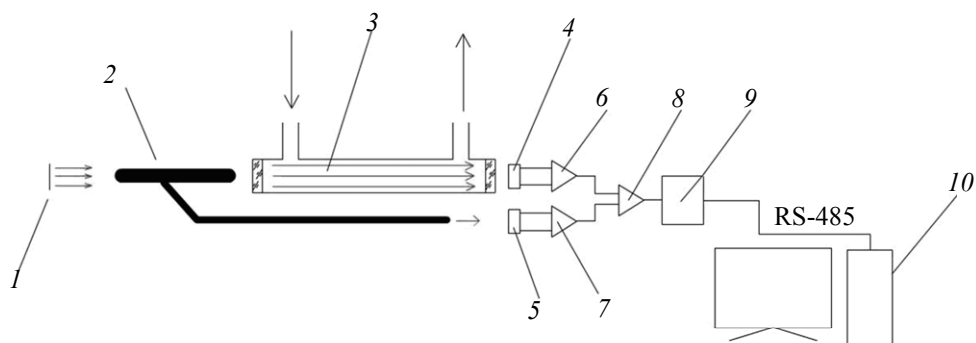


Рис. 3

Газоанализатор функционирует по следующему принципу. Исследуемый газ, после прохождения системы пробоподготовки, где происходит удаление влаги и мелкодисперсных частиц, поступает в кювету 3. Излучение от источника 1 проходит через волоконно-оптический разветвитель 2, разделяющий излучение на два потока: первый поток проходит через кювету 3 и попадает на основной приемник оптического излучения 4, второй поток направляется непосредственно на опорный приемник 5. Сигналы основного и опорного приемников поступают на усилители 6 и 7 соответственно, откуда попадают на компаратор 8 (AD8476). Далее сигнал передается на контроллер с АЦП 9, связанный с компьютером 10 при помощи интерфейса RS-485.

В качестве источника применяется излучающий диод (L390-5-15), выбранный в соответствии с максимальным значением спектрального показателя поглощения диоксида азота; длина волны источника 390 ± 2 нм, максимальный поток излучения 9 мВт. Поток модулируется напряжением с частотой в 1000 Гц.

В качестве приемника оптического излучения (ПОИ) выбран фотодиод (PD-440-0/1.4), работающий в диапазоне длин волн 190—570 нм, в диодном режиме, с установленным сопротивлением 50 Ом. Для исключения дрейфа излучения источника применяется второй, аналогичный, приемник оптического излучения (опорный приемник). Зависимость спектральной чувствительности фотодиода (S_λ) от длины волны показана на рис. 4.

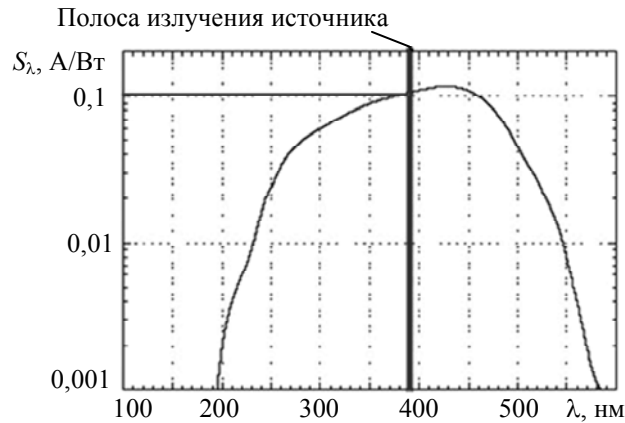


Рис. 4

Диапазон измерения концентрации NO_2 при контроле автотранспортных выбросов составляет от 0 до 5000 ppm. В экспериментальной модели газоанализатора использовалась кювета длиной 15 см. Чтобы проверить, подходит ли данная длина кюветы для измерения малых концентраций NO_2 , воспользуемся выражением (1). Подставив минимальное значение концентрации NO_2 $C=1$ ppm ($4,7 \cdot 10^{+12}$ мол./см³) в формулу (1), при $\sigma=6 \cdot 10^{-19}$ см²/мол. (согласно рис. 1), определим коэффициент пропускания диоксида азота при длине кюветы 15 см:

$$\tau_{\text{NO}_2} = \Phi_\tau / \Phi_0 = \exp(-\sigma[C]l) = \exp(-(6 \cdot 10^{-19}) \cdot 4,7 \cdot 10^{+12} \cdot 15) = 0,9, \quad (2)$$

отсюда коэффициент поглощения диоксида азота $\alpha = 0,1$.

Из выражения (2) следует, что газоанализатор при данной длине кюветы способен анализировать минимальную концентрацию NO_2 .

Подставим значение концентрации газа $C=5000$ ppm ($2,3 \cdot 10^{+16}$ мол./см³) в формулу (1) для проверки динамического диапазона газоанализатора:

$$\tau_{\text{NO}_2} = \Phi_\tau / \Phi_0 = \exp(-\sigma[C]l) = \exp(-(6 \cdot 10^{-19}) \cdot 2,3 \cdot 10^{+16} \cdot 15) = 0,17, \quad (3)$$

тогда коэффициент поглощения $\alpha = 0,83$.

Фототок приемника оптического излучения определяется выражением [3]

$$I_\Phi = \Phi_0 \tau_{o.c} S_\lambda \tau_{\text{NO}_2},$$

где $\tau_{o.c}$ — коэффициент пропускания оптической системы.

Тогда при коэффициенте поглощения $\alpha = 0,1$ ($\tau_{\text{NO}_2} = 0,9$) фототок ПОИ

$$I_\Phi = 0,009 \cdot 0,8 \cdot 0,1 \cdot 0,9 = 0,000648 \text{ А},$$

а при коэффициенте поглощения $\alpha = 0,83$ ($\tau_{\text{NO}_2} = 0,17$) —

$$I_\Phi = 0,009 \cdot 0,8 \cdot 0,1 \cdot 0,17 = 0,0001224 \text{ А}.$$

Таким образом, согласно расчетам длина кюветы полностью удовлетворяет поставленной задаче, так как порог чувствительности выбранного приемника излучения составляет $1,0 \cdot 10^{-12}$ Вт/(Гц^{1/2}·см).

В процессе функционирования газоанализатора интенсивность излучения источника постепенно изменяется, что приводит к недостоверности результатов измерений. Для компенсации дрейфа излучения источника в газоанализаторе применяется схема вычитания, собранная на быстродействующих, малощумящих дифференциальных усилителях 6, 7 и компараторе 8 (см. рис. 3).

Итак, благодаря применению узкополосного источника излучения для выделения требуемой области спектра излучения исключается необходимость применения фильтров или монохроматора. С помощью внедрения волоконно-оптического разветвителя можно излучение источника направлять непосредственно на опорный приемник без применения опорной кюветы. Основной и опорный приемники оптического излучения расположены рядом, в одном блоке, что исключает температурный дрейф одного приемника относительно другого. Весь тракт распространения автомобильных выбросов в газоанализатор надежно защищен от фона, что позволяет не ставить узкополосные фильтры. В связи с использованием излучающего диода вместо газоразрядного источника излучения предложенный оптико-электронный газоанализатор обладает малым энергопотреблением.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агафонов И. Л., Аманназаров А., Бескова Г. С. Методы анализа неорганических газов / Под ред. В. М. Немца. СПб: Химия, 1993. 560 с.
2. Алов Н. В. и др. Аналитическая химия и физико-химические методы анализа / Под ред. А. А. Ищенко. СПб: Академия, 2010. Т. 2. 416 с.
3. Ишанин Г. Г., Козлов В. В. Источники оптического излучения. СПб: Политехника, 2009. 415с.

Сведения об авторах

- Александр Сергеевич Антонов** — аспирант; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптико-электронных приборов и систем;
E-mail: antsasha@mail.ru
- Геннадий Григорьевич Ишанин** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптико-электронных приборов и систем;
E-mail: Ishanin@mail.ru

Рекомендована кафедрой
оптико-электронных приборов и систем

Поступила в редакцию
02.10.13 г.