

КОРРЕЛЯЦИОННЫЕ ГАЗОАНАЛИТИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА НЕПРЕРЫВНОГО КОНТРОЛЯ НА ОСНОВЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ИСТОЧНИКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ

В. Вуйцик¹, В. А. Фираго², М. М. Кугейко², И. С. Манак²

¹ Технический университет, г. Люблин, Польша;

² Белгосуниверситет, г. Minsk

Освоение производства компактных полупроводниковых излучателей (лазеров и светодиодов), работающих в инфракрасной области без криогенного охлаждения позволяет существенно уменьшить потребляемую газоанализаторами мощность, упростить измерительную схему и снизить их стоимость. Например, применение инжекционного полупроводникового лазера и модифицированного корреляционного метода [1] для непрерывного контроля влажности агрессивных аэродисперсных сред позволяет создать простой недорогой датчик с малым энергопотреблением, обладающий метрологической надежностью при эксплуатации в производственных условиях.

При определении концентрации ряда газов (CO , CO_2 , углеводородов и т. д.), которые имеют интенсивные линии поглощения в средней ИК-области спектра, где пока отсутствуют лазерные диоды, не требующие криогенного охлаждения, перспективно использование неохлаждаемых ИК-светодиодов, работающих в спектральной области до 5,1 мкм. Светодиоды по сравнению с лазерами имеют широкий спектр излучения. Поэтому для повышения селективности контроля необходимо применение корреляционных методов контроля, основанных на уникальности полос поглощения каждой компоненты. Хотя полосы поглощения разных газов контролируемой среды могут перекрываться, практически отсутствует их взаимная корреляция, что позволяет в десятки раз повысить селективность анализа. Существенным достоинством корреляционных методов является возможность использования более широких, по сравнению с дифференциальными способами, спектральных интервалов регистрации излучения, что увеличивает отношение сигнал/шум и позволяет применять как неохлаждаемые приемники излучения с невысокой пороговой

чувствительностью, так и светодиоды, которые имеют малую интенсивность, особенно на длинах волн более 4 мкм.

В целом аналитические методы корреляционной спектроскопии можно разделить на дисперсионные и недисперсионные.

К дисперсионным относятся методы, в которых обязательным является спектральное разложение излучения используемого источника. Они требуют использования спектрометров, в которых вместо одной щели применяется их набор, называемый поглощающей маской, пропускающей излучение лишь в линиях поглощения контролируемого газа. Маска совершает небольшие колебания вдоль спектра около центра линий с частотой несколько десятков герц и при наличии в спектре входящего излучения провалов, обусловленных линиями поглощения исследуемого газа, на выходе фотоприемника формируется модулированный по амплитуде сигнал. Основными недостатками корреляционных масочных приборов является их сложность, поскольку они требуют спектрометра высокого разрешения, и малая светосила.

Недисперсионные методы не требуют спектрального разложения используемого излучения. Необходимое ослабление излучения на длинах волн, коррелирующих с линиями поглощения анализируемого газообразного вещества, достигается путем пропускания зондирующего светового потока через кювету (обычно называемую корреляционной), которая заполнена таким же анализируемым газом. Попеременное пропускание излучения через корреляционную кювету и нейтральный ослабитель позволяет промодулировать только те спектральные составляющие, которые совпадают с линиями поглощения контролируемого газа. Поскольку функции диспергирующего элемента и маски выполняет корреляционная кювета с фиксированным количеством того же газа, который подлежит контролю, то недисперсионные корреляционные газоанализаторы обладают более простой оптической схемой по сравнению с дисперсионными.

Можно предложить несколько оптических схем недисперсионных корреляционных газоанализаторов. Рассмотрим, каким образом обеспечивается метрологическая надежность схемы,

которая не требует применения вращающихся механических узлов. При использовании этой схемы о поглощающей массе газа на контролируемом участке судят по разности потоков излучения от двух светодиодов, попадающих на фотоприемник. Излучение первого светодиода проходит через коллимирующую линзу, корреляционную кювету, полупрозрачное зеркало, расположенное под углом 45° градусов к оптической оси системы, контролируемую среду, оптический фильтр и собирается приемной линзой на чувствительной площадке фотоприемника. Излучение второго светодиода после прохождения нейтральной кюветы поворачивается полупрозрачным зеркалом под углом 90° и далее идет по тому же пути, что и излучение первого светодиода. Найдем оценочное выражение для определения парциального давления контролируемого газа при измерениях. Потоки от светодиодов, прошедшие через кюветы, можно записать в следующем виде:

$$\begin{aligned}\Phi_{k_1}(\lambda) &= \Phi_1(\lambda) \cdot \tau_{k_1}(\lambda) \cdot \exp[-k(\lambda)P_{k_1}l_1], \\ \Phi_{k_2}(\lambda) &= \Phi_2(\lambda) \cdot \tau_{k_2}(\lambda) \cdot \exp[-k(\lambda)P_{k_2}l_2],\end{aligned}\tag{1}$$

где $\Phi_1(\lambda)$ и $\Phi_2(\lambda)$ - потоки излучения от светодиодов; τ_{k_1} , τ_{k_2} - коэффициенты пропускания окон кювет; $k(\lambda)$ - нормированный коэффициент поглощения контролируемого газа; $P_{k_1}l_1$, $P_{k_2}l_2$ - произведения парциального давления газов в кюветах на их длины.

При дальнейшем прохождении оптических потоков через полупрозрачное зеркало, первое защитное стекло, анализируемую среду, второе защитное стекло получаем:

$$\begin{aligned}\Phi_{0k_1}(\lambda) &= \tau_{31}(\lambda)\tau_{0k}(\lambda) \cdot \Phi_{k_1}(\lambda) \cdot \exp\{-[k(\lambda)P_{cp} + k_{cp}(\lambda)P]l_{cp}\}, \\ \Phi_{0k_2}(\lambda) &= \tau_{32}(\lambda)\tau_{0k}(\lambda) \cdot \Phi_{k_2}(\lambda) \cdot \exp\{-[k(\lambda)P_{cp} + k_{cp}(\lambda)P]l_{cp}\},\end{aligned}\tag{2}$$

где $\tau_{31}(\lambda)$, $\tau_{32}(\lambda)$ - относительные потери потоков от первого и второго светодиодов при прохождении полупрозрачного зеркала; $\tau_{0k}(\lambda)$ - суммарный коэффициент пропускания защитных стекол; P_{cp} - парциальное давление контролируемого газа; $k_{cp}(\lambda)P$ - произведение коэффициента поглощения аэродисперсной среды на ее парциальное давление при отсутствии контролируемого газа; l_{cp} - длина контролируемой трассы.

Интегральные потоки u_1 и u_2 от каждого излучателя, попадающие на фотоприемник, рассчитываются с помощью выражений:

$$\begin{aligned} u_1 &= A_1 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_{\phi}(\lambda) \cdot \Phi_{k1} \cdot \exp[-k(\lambda)(P_{k1}l_{k1} + P_{cp}l_{cp}) - k_{cp}(\lambda)Pl_{cp}]d\lambda, \\ u_2 &= A_2 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_{\phi}(\lambda) \cdot \Phi_{k2} \cdot \exp[-k(\lambda)(P_{k2}l_{k2} + P_{cp}l_{cp}) - k_{cp}(\lambda)Pl_{cp}]d\lambda, \end{aligned} \quad (3)$$

где $A_1 = \tau_{k1}\tau_{31}\tau_{0k}$; $A_2 = \tau_{k2}\tau_{32}\tau_{0k}$; $\tau_{\phi}(\lambda)$ – коэффициент пропускания фильтра.

Для упрощения дальнейших расчетов положим, что регулировкой тока инжекции можно добиться равенства коэффициентов

$$A_1 = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_1(\lambda)d\lambda = A_2 = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_2(\lambda)d\lambda = A, \quad (4)$$

что легко достигается для идентичных излучателей, поскольку поведение $\Phi_1(\lambda)$, $\Phi_2(\lambda)$ в рабочем диапазоне $\lambda_1 - \lambda_2$ монотонное и примерно одинаковое.

С целью исключения влияния диссипативных потерь найдем разность и сумму потоков, а потом получим их отношение:

$$\frac{u_1 - u_2}{u_1 + u_2} = \frac{B - \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_{\phi}(\lambda) \cdot \tau_{cp}(\lambda) \exp[-k(\lambda)(P_{k2}l_2 + P_{cp}l_{cp})]d\lambda}{B + \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_{\phi}(\lambda) \cdot \tau_{cp}(\lambda) \exp[-k(\lambda)(P_{k2}l_2 + P_{cp}l_{cp})]d\lambda}, \quad (5)$$

где $\tau_{cp}(\lambda) = \exp[-k_{cp}(\lambda)Pl_{cp}]$, а $B = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_{\phi}(\lambda) \cdot \tau_{cp}(\lambda) \exp[-k(\lambda)P_{k1}l_1]d\lambda$.

После дальнейших преобразований можно получить зависимость определяемого парциального давления от основных параметров

$$P_{\text{ср}} = \frac{1}{l_{\text{ср}}} \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_{\text{ф}}(\lambda) \cdot \tau_{\text{ср}}(\lambda) \exp[-k_{\text{ср}}(\lambda) P_{k_2} l_2] d\lambda - \frac{u_2}{u_1} B}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_{\text{ф}}(\lambda) \cdot \tau_{\text{ср}}(\lambda) k(\lambda) d\lambda}. \quad (6)$$

Определяемое парциальное давление будет слабо зависеть от $\tau_{\text{ср}}(\lambda)$, поскольку этот коэффициент содержится во всех членах знаменателя и числителя. Полностью исключается влияние вариаций параметров приемного тракта (загрязнений оптических поверхностей, нестабильности крутизны преобразования и т. д.) на погрешности измерений, так как перечисленные величины сокращаются при вычислении отношения регистрируемых потоков u_2/u_1 .

Таким образом, применение полупроводниковых излучателей позволяет придать конструкциям создаваемых газоаналитических средств свойство портативности, а корреляционных методов – максимально устранить влияние на результаты измерений вариаций аппаратурных параметров и неконтролируемых изменений среды.

1. Кугейко М. М., Фираго В. А. // ЖПС. 2001. Т. 68, № 4. С. 520–525.