

ны на платформах 7 и с помощью гальвопривода под действием управляющего сигнала перемещают выходной луч лазера по роговице по требуемой траектории.

Предложенное устройство работает следующим образом.

После расчета режимов операции информация с компьютера 4 поступает в контроллер 5, который в требуемой последовательности формирует управляющие сигналы для оптической формирующей системы 3 и блока управления режимами лазера 2. Излучение с лазера 1 через формирующую систему 3 поступает на гальвозеркала 6.

В ходе операции в соответствии с алгоритмом обработки роговицы контроллер 5 изменяет режимы работы лазера 1 и формирующей оптической системы 3. С компьютера 4 данные переносятся в блок управления лазером 2, с которого информация поступает на информационный вход эксимерного лазера 1, и вход гальвопривода 8.

В процессе операции поворот гальванометра вызывает перемещение платформ 7 по установленным направляющим и, соответственно, поворот гальвозеркал 6. За счет этого угол падения лазерного луча уменьшается, приближаясь к требуемому текущему значению. После того, как платформа 7 займет заданное положение, излучение лазера 1 через формирующую систему 3 и гальвозеркала 6 поступает на роговицу глаза. При этом операция выполняется без остановок.

Таким образом, повышение качества проведения операции по коррекции зрения достигается за счет изменения угла падения лазерного луча на роговицу при удалении от центра зоны абляции к периферии при одновременном изменении режима работы лазера непосредственно в процессе операции.

Использование предложенного устройства позволяет улучшить качество коррекции без ограничения на применение современных алгоритмов проведения рефракционных операций, сократить время операции, а также исключить негативное влияние человеческого фактора в процессе переноса данных между составляющими эксимер-лазерной установки.

#### Литература

1. Bower K.S. Laser refractive surgery. [www.uptodate.com](http://www.uptodate.com).
2. Чупров А.Д., Дурягина М.Н. Анализ эффективности методов хирургической коррекции миопии высокой степени // Современные технологии в медицине. – 2010. – Вып. 4. – С. 61–64.
3. Sekundo W., Gertner J., Bertelmann T., Solomatin I. One-year refractive results, contrast sensitivity, high-order aberrations and complications after myopic small-incision lenticule extraction (ReLEx SMILE) // Graefe's Archive for Clinical and Experimental Ophthalmology. – 2014. – Vol. 252. – Iss. 5. – P. 837–843. – DOI:10.1007/s00417-014-2608-4.

УДК 621.375.826

### МЕТОД ОПТИКОВОЛОКОННОЙ ДИАГНОСТИКИ ФРАКЦИОННОГО СОСТАВА РЕСПИРАБЕЛЬНЫХ ЧАСТИЦ АТМОСФЕРЫ С БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Иванов В.И., Иванов Н.И.

*НИИ ядерных проблем БГУ, Минск, Республика Беларусь*

Загрязнение приземного слоя атмосферы взвешенными частицами (аэрозолями) различной природы ухудшает экологическую обстановку и отрицательно влияет на здоровье людей. Особую опасность представляет загрязнение атмосферы мелкодисперсными твердыми частицами (респираторными фракциями) с размерами менее 1,0; 2,5 и 10 мкм –  $PM_{1,0}$ ,  $PM_{2,5}$ ,  $PM_{10}$  (от английского термина Particulate Matter). Согласно данным исследований [1, 2], повышенное содержание в воздухе респираторных фракций является одним из факторов риска развития респираторных, сердечно-сосудистых и онкологических заболеваний.

Определение массовых концентраций таких частиц с разделением на респираторные фракции лидарными методами представляет собой сложную методологическую проблему, связанную с решением обратных задач в условиях недостаточности априорных сведений о объекте исследо-

вания, в особенности, для таких неустойчивых образований, как городской аэрозоль. Для решения данной проблемы используется многоканальное лазерное зондирование, комбинация механизмов упругого и комбинационного рассеяния с регистрацией спектрально-временной структуры сигналов обратного рассеяния, применение различных регуляризирующих и регрессионных алгоритмов по восстановлению микрофизических параметров аэрозоля [3, 4].

В качестве альтернативного подхода нами предложен метод оптиковолоконной диагностики респираторных частиц с беспилотных летательных аппаратов (БЛА) малого класса. Метод позволяет осуществлять оперативную малокапитальную диагностику как массовых, так и счетных концентраций твердых частиц в приземных слоях атмосферы с разделением на респираторные фракции. Данный метод особенно актуален

в связи с развитием беспилотной авиации в Республике Беларусь.

Реализация метода осуществляется оптиковолоконными детекторами (ОВД), например, рассмотренных в [5]. Световые сигналы  $U_i(\tau)$  регистрируются от одиночных частиц, находящихся в непосредственной близости к приемно-излучающей апертуре  $A_d$  ОВД.

Частицы освещаются низкокогерентным излучением лазерных диодов мощностью 1–5 мВт. При этом плоскость апертуры одиночного сенсора или матрицы ОВД располагают перпендикулярно вектору скорости полета БЛА.

Регистрируемые сигналы от одиночных частиц представляют собой импульсные сигналы. В общем виде длительность  $\tau_i$  светового импульса  $U_i(\tau)$  от одиночной частицы на выходе ОВД определяется соотношением

$$\tau_i = \tau_{f.i+} + \tau_{f.i-} + \tau_{p.i} = 2\tau_{f.i} + \tau_{p.i}, \quad (1)$$

где  $\tau_{f.i+}$ ,  $\tau_{f.i-}$  – длительности переднего и заднего фронтов импульса, обусловленных временами вхождения в зону апертуры  $A_d$  и выхода из зоны  $A_d$  частицы, соответственно;  $\tau_{p.i}$  – время нахождения всей частицы в зоне апертуры  $A_d$

$$\tau_{f.i} = \tau_{f.i+} = \tau_{f.i-} = A_d / \vec{W}_p, \quad (2)$$

$$\tau_{p.i} = (D_{p.i} - A_d) / \vec{W}_p, \quad (3)$$

$$\tau_i = 2A_d / \vec{W}_{p.i} + (D_{p.i} - A_d) / \vec{W}_p, \quad (4)$$

где  $D_{p.i}$  – линейный размер частицы в направлении вектора скорости направления полета БЛА;  $\vec{W}_p$  – воздушная скорость полета БЛА;  $A_d$  – диаметр апертуры ОВД,  $A_d \leq D_{p.i.min}$ .

Как следует из (4) точность знания воздушной скорости БЛА  $\vec{W}_p$  имеет важное значение для последующей процедуры определения размеров частиц  $D_{p.i}$ . При этом точность непосредственного определения воздушной скорости БЛА с использованием измерителей воздушной скорости (трубки Пито и т. п.) является недостаточной для реализации высокой точности определения размеров и разделения частиц на респираторные фракции.

В этой связи оценка длительности информационных импульсов  $U_i(\tau)$  осуществляется при двух параметрах дискриминации  $k_i$  по уровню сигналов:

$$k_i = (U_{g.i} - U_{min.i}) / U_{m.i}; \quad k_2 = 1 - k_1, \quad (5)$$

где  $U_{g.i}$  – уровень дискриминации;  $U_{min.i}$  и  $U_{m.i}$  – минимальное значение и амплитуда  $i$  – того сигнального импульса  $U(\tau_i)$ , соответственно.  $U_{m.i} = U_{max.i} - U_{min.i}$  – амплитуда сигнального импульса.

С учетом  $k_i$ , отношение длительности фронтов сигнального импульса  $\tau_{f.i}(U_{g.i})$  на уровне дискриминации  $U_{g.i}$  к длительности

по его основанию  $\tau_f$  определяются отношением фронтов импульса по его основанию  $\tau_f$

$$\tau_{f.i}(U_{g.i}) / \tau_f = k_i U_{m.i} / U_{m.i} = k_i. \quad (6)$$

Из уравнения (2) с учетом уравнения (6) длительности фронтов сигнального импульса на произвольном уровне дискриминации можно представить в виде:

$$\begin{aligned} \tau_{f.i}(U_{g.i}) &= \tau_{f.i+}(U_{g.i}) = \\ &= \tau_{f.i-}(U_{g.i}) \tau_{f.i} = k_i (A_d / W_p). \end{aligned} \quad (7)$$

На основании уравнений (4) и (7) длительность импульсов информационных сигналов  $\tau_i$  для различных значений  $k_i$ , равна:

$$\tau_i(k_i) = D_{p.i} / W_p + A_d(2k_i - 1) / W_p. \quad (8)$$

В соответствии с условием (5)  $k_2 = 1 - k_1$  и уравнения (8) длительности сигнальных импульсов с параметрами дискриминации  $k_1$  и  $k_2$  соответственно равны:

$$\tau_i(k_1) = D_{p.i} / W_p + A_d(2k_1 - 1) / W_p \quad (9)$$

$$\tau_i(k_2) = D_{p.i} / W_p + A_d(1 - 2k_1) / W_p, \quad (10)$$

Значения воздушной скорости БЛА  $W_p$  и линейные размеры частиц  $D_{p.i}$  (спектр размеров) определяются из уравнений (9) и (10) в виде:

$$W_p = 2A_d(2k_1 - 1) / [\tau_i(k_1) - \tau_i(k_2)]. \quad (11)$$

$$\begin{aligned} D_{p.i} &= \{[\tau_i(k_1) + \tau_i(k_2)] / [\tau_i(k_1) - \tau_i(k_2)]\} \times \\ &\times A_d(2k_1 - 1). \end{aligned} \quad (12)$$

Протяженность дистанции полета  $R = W_p T$  за время измерения  $T$  определяется уравнением:

$$R = (2A_d(2k_1 - 1) / [\tau_i(k_1) - \tau_i(k_2)]) T. \quad (13)$$

Истинное объемное содержание частиц заданной фракции на дистанции  $R$  за время измерения  $T$  определяется из уравнения (14)

$$\varphi = \frac{1}{2T} \sum_{i=1}^n [\tau_i(k_1) + \tau_i(k_2)], \quad (14)$$

где  $n$  – число частиц заданного размера  $D_{p.i}$ , прошедших через измерительную апертуру ОВД  $A_d$  за время  $T$ .

Размер апертуры ОВД  $A_d$  определяется диаметром сердцевины используемого световода 10 мкм и формирующей короткофокусной линзы с коэффициентом увеличения 5–10.  $A_d$  выбирается из условий обеспечения требуемой разрешающей способности и обеспечения наилучшего соотношения сигнал / шум, которое при прочих равных условиях пропорционально отношению размеров (площадей) частицы с минимальными размерами  $D_{p.min}$  и диаметра используемого световода ОВД  $D_{св}$ , т. е. отношением  $D_{p.min} / D_{св}$ .

Автоматизированная обработка данных требует представления выходных сигналов ОВД

цифровой форме. Выбор шага дискретизации по времени  $\Delta t$  при заданной ошибке квантования по уровню  $\Delta U$  является определяющим фактором для обеспечения высокой точности параметров преобразования.

Выбор требуемого шага дискретизации  $\Delta t$  проведен по критерию измерения скорости БЛА с заданной относительной погрешностью:

$$\delta_w = \frac{\Delta W}{W_p}, \quad (15)$$

где  $\Delta W$  – абсолютная погрешность измерения скорости (элемент разрешения по скорости).

Данную величину можно представить в виде:

$$\delta_w = \frac{A_D}{W_p \tau_f n_d} = \frac{1}{n_d}, \quad (16)$$

где  $n_d$  – требуемое число точек дискретизации с равномерным шагом  $\Delta t$  по длительности  $\tau_f$ .

В этой связи

$$\Delta t = \tau_f \delta_w. \quad (17)$$

Из (17) с учетом верхней граничной частоты сигналов ОВД  $f_{в.гр} = W_p / 0,35 A_d$  требуемый шаг дискретизации определяется уравнением:

$$\Delta t = \frac{\delta_w}{0,35 f_{в.гр}}, \quad (18)$$

при заданной погрешности  $\delta_w$  и апертуры ОВД  $A_d$ .

Полученные оценки обнаружительной способности и точности определения линейных размеров частиц опасных респираторных фракций: чувствительность – на уровне обнаружения одиночных частиц (счетных концентраций); погрешность определения линейных размеров частиц не более 5-7 %.

Разработанный метод открывает широкие возможности оперативной малозатратной диагностики микрофизических параметров твердофазного аэрозоля с БЛА, реализуется на БЛА малых классов с допустимой целевой нагрузкой 0,5-0,8 Кг и энергообеспечением на уровне 1,5-2 Вт.

### Литература

1. Моношкина В.Г., Суторихин И.А. Опасная респираторная фракция частиц приземного атмосферного аэрозоля. // Оптика атмосферы и океана, 1996. – Т. 9. – № 06. – С. 843–845.
2. Global premature mortality due to anthropogenic outdoor air pollution and the contribution of past climate change [Electronic resource] / R.A. Silva [et al] // Environmental Research Letters / 2013. – Vol.8, № 3. Mode of access: <http://iopscience.iop.org/article/10/1088/1748-9326/8/3/034005/pdf>.-Date of access:14.08.2018.
3. Зуев В.Е., Наац И.Э. Обратные задачи лазерного зондирования атмосферы. Новосибирск : Наука, 1982. – 242 с.
4. Лысенко С.А., Кугейко М.М., Хомич В.В. Многочастотное зондирование загрязненной атмосферы твердыми частицами с разделением на респираторные фракции // Оптика атмосферы и океана, 2016. – Т. 29. – № 1. – С. 70–79.
5. Иванов В.И., Лазарчик А.Н. Низкокогерентная оптико-волоконная диагностика пароводяных потоков // Энергетика и энергоэффективные технологии: Сб. докладов V Междунар. научно-практ. конф. РФ. Липецк, 2012. – С. 138–140.

УДК 621.382

## КОНТРОЛЬ ПАРАМЕТРОВ ГРАНИЦЫ РАЗДЕЛА КРЕМНИЙ-ДВУОКИСЬ КРЕМНИЯ ПОСЛЕ БЫСТРОЙ ТЕРМООБРАБОТКИ МЕТОДАМИ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЛЬТФАРАДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК И ЗОНДОВОЙ ЭЛЕКТРОМЕТРИИ

Жарин А.Л.<sup>1</sup>, Гусев О.К.<sup>1</sup>, Воробей Р.И.<sup>1</sup>, Пантелеев К.В.<sup>1</sup>, Тявловский А.К.<sup>1</sup>, Тявловский К.Л.<sup>1</sup>, Пилипенко В.А.<sup>2</sup>, Солoduха В.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>ОАО «ИНТЕГРАЛ» - управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ», Минск, Республика Беларусь

Изучение влияния быстрой термообработки на параметры границы раздела кремний-двуокись кремния проводилось путем анализа вольтфарадных характеристик и пространственного распределения контактной разности потенциалов (КРП) такой системы. Первый из методов относится к традиционным методам характеристики полупроводниковых структур [1]. Анализ пространственного распределения КРП осуществлялся по методу сканирующего зонда Кельвина с использованием измерительной системы бесконтактной характеристики полупроводниковых пластин СКАН-2013 [2]. В качестве образцов для исследования использовались кремниевые пластины КЭФ 4,5 и КДБ 12 с пленкой двуоксида кремния, сфор-

мированной пирогенным окислением. Часть пластин перед этим проходила операцию предварительной термообработки. На данных пластинах, как прошедших предварительную обработку, так и без таковой, были проведены указанные исследования вольтфарадных характеристик и пространственного распределения КРП по их площади. После этого для пленки двуоксида кремния на всех пластинах была проведена операция быстрой термообработки при температуре 850 °С, после чего выполнена повторная характеристика электрофизических свойств их поверхности.

Анализ вольтфарадных характеристик МОП-структур на кремнии *p*-типа с предварительной быстрой термообработкой и без нее до и после