

Светодиоды средневолнового ИК диапазона на основе гетероструктур A^3B^5 в газоаналитическом приборостроении. Возможности и применения 2014-2018

© Б.А. Матвеев, Г.Ю. Сотникова

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
194021 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: ioffeled@mail.ru

Поступила в редакцию 30.11.2018 г.
В окончательной редакции 28.03.2019 г.
Принята к публикации 09.04.2019 г.

Рассмотрены работы, вышедшие из печати в период с 2014 по 2018 гг., направленные на создание недисперсионных и оптико-акустических ИК газоанализаторов со светодиодными источниками излучения, выполненными из гетероструктур A^3B^5 и работающими в диапазоне длин волн от 3 до 5 μm . Проведен анализ возможностей газоаналитической аппаратуры на основе упомянутых светодиодов при регистрации CO , CO_2 , метана и других газов.

Ключевые слова: недисперсионный газоанализатор, оптико-акустический газоанализатор

DOI: 10.21883/OS.2019.08.48046.357-18

Благодаря усилиям ученых, инженеров, производителей, а также менеджеров по продажам технический термин „светодиод“ (СД) давно потерял свою новизну. Это и неудивительно, поскольку сфера применений СД постоянно расширяется, о чем свидетельствует, в частности, появление обзоров работ по созданию аналитических приборов, использующих СД, точнее, оптически согласованных пар СД-фотоприемник [1–3]. Особое место среди таких приборов занимают устройства, работающие в среднем ИК диапазоне спектра (3–14 μm), где имеются два окна прозрачности атмосферы (3–5 μm и 8–14 μm), а значит, имеется возможность для проведения измерений пропускания газовой среды при прохождении излучения от СД к фотоприемнику. При этом в зависимости от типа анализируемого газа и задачи измерений оптический ход лучей может составлять от нескольких миллиметров до нескольких десятков метров. Ранее нами уже была представлена ретроспектива создания СД средневолнового ИК диапазона на основе гетероструктур A^3B^5 и описаны их реализованные применения в трассовых и портативных газоанализаторах (ГА) [4]. За 5 лет, прошедших после опубликования этой ретроспективы, появилось большое количество патентов и более двух десятков работ, представляющих численное моделирование или описывающих ГА с использованием упомянутых выше СД, что делает осмысление результатов, полученных в этих публикациях, актуальным.

Недисперсионные ИК газоанализаторы

Принцип работы недисперсионных ИК ГА (англ. термин — „NDIR gas analyzers“) не менялся со времени открытия закона поглощения Бера–Ламберта, описывающего ослабление интенсивности исходного излучения

при его прохождении через среду с коэффициентом поглощения $\alpha(\lambda)$ [cm^{-1}], зависящим от свойств конкретного газа и длины волны λ [см]. В самом простом случае такой сенсор состоит из оптически согласованных источника и приемника излучения с узкими диаграммами направленности, ориентированными навстречу друг другу (рис. 1).

Применительно к сенсору, имеющему в своем составе узкополосный фотодиод (ФД) и СД, параметры которых в интервале длин волн (λ_1 – λ_2) могут зависеть от их температуры (T), закон Бера–Ламберта может быть применен для вычисления передаточной функции сенсора τ [5]:

$$\tau(C, L, T) = \frac{U(C, L, T)}{U_0(L, T)} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} A(\lambda, T) \cdot \exp[-\alpha(\lambda) \cdot L \cdot C] d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} A(\lambda, T) d\lambda}, \quad (1)$$

где $A(\lambda, T) = S_{PD}(\lambda, T) \cdot I_{LED}(\lambda, T)$ — аппаратная функция сенсора, $S_{PD}(\lambda, T)$ — (спектральная) чувствительность ФД, $I_{LED}(\lambda, T)$ — интенсивность излучения СД на длине волны λ (далее — спектр излучения СД),

$\alpha(\lambda)$ — спектральный коэффициент поглощения газа, заимствованный, например, из базы данных HITRAN, L — длина взаимодействия излучения СД с газом, C — концентрация газа в исследуемом воздухе, $U(C, L, T)$ — выходной сигнал ФД при наличии на оптическом пути измеряемого газа,

$U_0(L, T)$ — выходной сигнал ФД без измеряемого газа.

В качестве графической иллюстрации следствия из вышеприведенных формул на рис. 2 показаны спектр

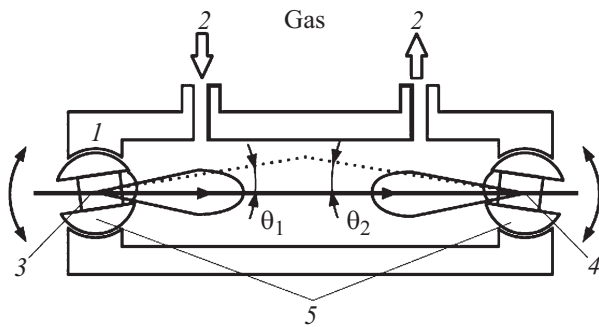


Рис. 1. Схема сенсора, в котором 1 — цилиндрическая газовая кювета, 2 — штуцеры для прокачки газа, 3, 4 — источник и приемник излучения, снабженные иммерсионными линзами, 5 — юстировочные элементы для согласования диаграмм направленности излучения источника и чувствительности фотоприемника (θ_1 и θ_2 — телесные углы диаграмм направленности) [5].

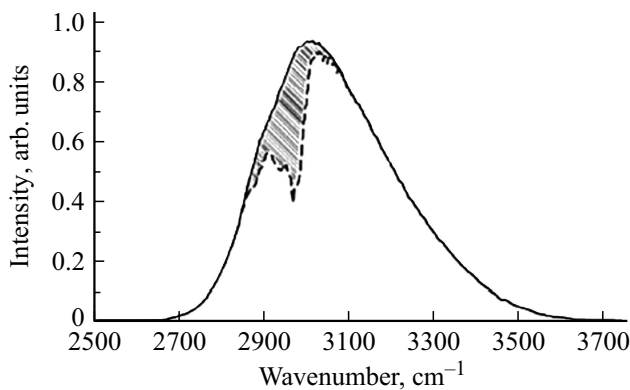


Рис. 2. Спектр СИ на основе InAs до прохождения его излучения через среду, содержащую метан (сплошная кривая) и произведение спектра СИ на спектр пропускания воздушно-метановой смеси (штриховая кривая) [6].

излучения СИ на основе InAs до прохождения через среду, содержащую метан (CH_4 сплошная кривая), и „искаженный“ в результате поглощения излучения молекулами метана (штриховая кривая) [6]. При попадании излучения на широкополосный приемник с равномерной в интервале длин волн ($\lambda_1 - \lambda_2$) фоточувствительностью его фототок будет пропорционален площади под соответствующими кривыми на рис. 2, т.е. будет уменьшаться при появлении метана в оптическом тракте и/или при увеличении его концентрации. В дополнение к рис. 2, на рис. 3 показана передаточная функция для сенсора углекислого газа (CO_2), состоящего из узкополосных иммерсионных ФД и СИ на основе InAsSb, при различных температурах [5].

Корректировка показаний ГА с учетом температурных зависимостей чувствительности фотоприемника и интенсивности СИ в широком интервале температур (рис. 3), хотя и является вполне решаемой задачей, например, с помощью корректирующей функции экспоненциально-

го вида [7], но не всегда достаточна для достижения требуемой точности измерений. Одним из способов уменьшения температурного влияния на показания ГА является подбор рабочей длины волны СИ и узкополосного фильтра для взаимной компенсации изменений амплитуды и максимума излучения [8]. Для повышения достоверности показаний ГА наряду с использованием аналитических выражений, корректирующих значение полезного сигнала [5,7], широко применяют также и термостабилизацию чувствительных элементов с помощью одно- или двухступенчатых термоэлектрических охладителей (ТЭО), снабженных термодатчиком и блоком питания с обратной связью [5,9–12]. Использование ТЭО позволяет значительно уменьшить интервал неконтролируемого изменения температуры как чувствительных элементов, так и электронного обрамления сенсора [13], что увеличивает точность „аналитической“ компенсации температурного изменения параметров СИ и ФД. В отдельных случаях, когда требование высокой точности и быстродействия измерений отсутствует, принудительная термостабилизация СИ и использование корректирующих функций могут быть опущены [14].

Другим немаловажным фактором, который принят во внимание большинством разработчиков ГА, является перекрестная чувствительность к мешающим газам из-за протяженности спектральных характеристик как диодных элементов, так и самих газов [15,16], например, CO_2 и угарного газа (CO). Бытует также мнение, что даже при наличии температурной компенсации портативный ГА с одним каналом измерений (т.е. ГА без опорного канала) создать невозможно [8]. Для снижения перекрестной чувствительности измерение передаточной функции проводят на нескольких выделенных длинах волн, например, в ближнем [17] или среднем [9,18–21] ИК диапазонах спектра и/или используют узкополос-

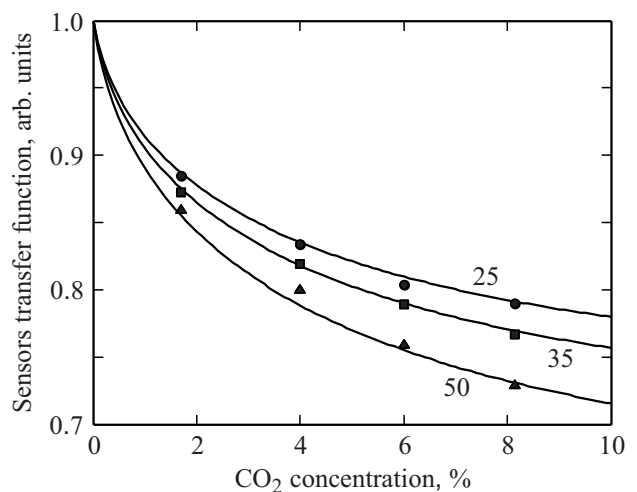


Рис. 3. Семейство передаточных функций сенсора для $L = 4$ cm (сплошные линии). Точками представлены значения передаточной функции, измеренные в процессе испытаний сенсора на калиброванных смесях при температурах 25, 35, $50^{\circ}C$ [5].

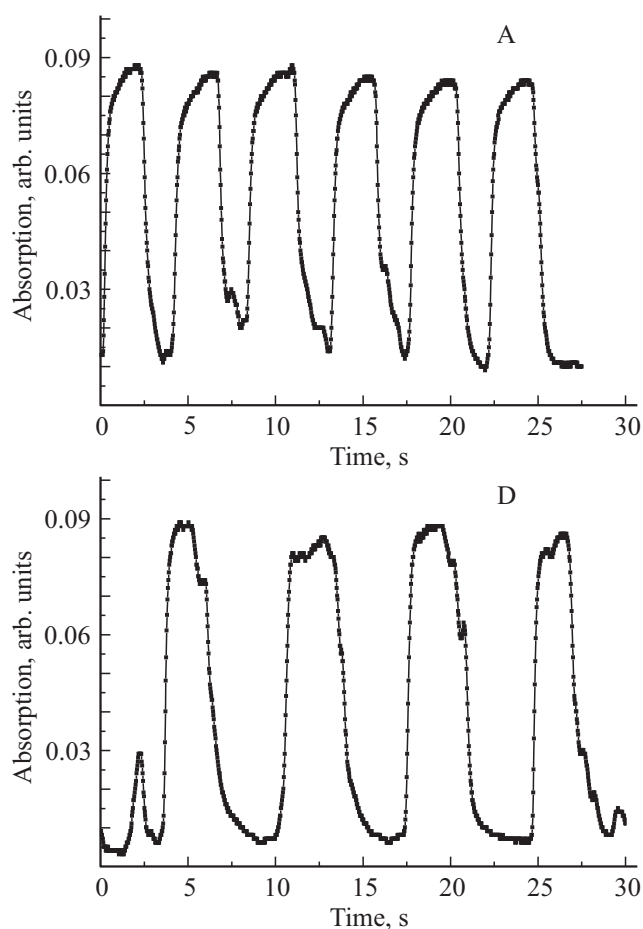


Рис. 4. Два типа капнограмм (A и D), полученных в реальном времени с разрешением 50 ms [5].

ные фильтры [7,9,14,18–20,22,23]. При этом обработка данных нередко осуществляется с помощью фурье-преобразования сигналов, создаваемых СД, работающими на индивидуальных частотах модуляции¹ [9,18,19,24], например, 55, 77 и 115 kHz для длин волн 3,6, 4,2 и 4,7 μm [9].

Характерные времена нарастания и спада интенсивности излучения СД и фототока ФД составляют несколько десятков наносекунд, что позволяет создавать системы с пороговой чувствительностью в несколько десятков нановатт при полосе пропускания 1 MHz [25]. Благодаря этому обеспечивается возможность измерения быстроменяющихся (т.е. „мгновенных“) значений концентрации газа при больших значениях отношения сигнал/шум. Это позволяет контролировать и изучать ряд быстропротекающих процессов, например, изменение содержания CO_2 в выхлопе двигателя внутреннего сгорания [9] и в цилиндре работающего двигателя [24]. Для последнего применения используют стыковку СД с волокном, введенным внутрь рабочей полости цилиндра [24]. Такие

¹ Подобная обработка сигнала используется также и в оптико-акустических ГА (см. например, [29]).

измерения важны для разработки нового поколения экологически чистых автомобилей.

Не менее важным применением является также и контроль параметров „биологического газообменника“, т.е. легких человека; для такого использования существенным является низкое энергопотребление СД и небольшие размеры/масса сенсора, что оказывается актуальным как для использования на международной космической станции [18–20], так и для встраивания оптоэлектронных сенсоров в существующие системы и аксессуары для искусственной вентиляции легких [26]. В последнем случае благодаря высокому быстродействию и большому значению коэффициента поглощения на длине волны 4,3 μm делается возможным анализ распределения углекислого газа в процессе одного выдоха при небольшом объеме пробы, что позволяет пульмонологу проводить инвазивную диагностику различных заболеваний и оценивать состояние пациентов, в том числе и у новорожденных. На рис. 4 в качестве примера различий характеристик „биологического газообменника“ приведены экспериментальные результаты мониторинга дыхания (капнограммы) двух сотрудников ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН (A и D), полученные в реальном времени с разрешением 50 ms [5]. Упомянем также и о возможности применения таких датчиков для определения и анализа стрессового состояния высокоорганизованного биологического объекта [27].

Оптико-акустические ГА

Оптико-акустические ГА (англ. термин — „PA gas analyzers“) являются исторически первым освоением промышленностью типом ГА и отличаются от рассмотренных выше тем, что в качестве фотоприемника выступает микрофон, улавливающий колебания воздуха при зондировании газа модулированным излучением, имеющим длину волны вблизи его полосы поглощения. В качестве микрофона для измерений амплитуды таких колебаний в последнее время чаще всего используют пьезоэлектрический датчик резонансного типа на основе

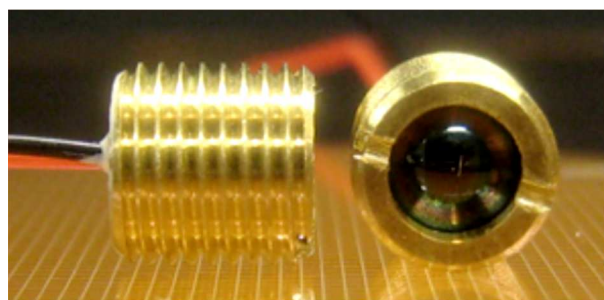


Рис. 5. Фотография использованного в [28] СД LED42Sg, на которой маркерные штрихи расположены на расстоянии 0,5 mm друг от друга. Диаметр незакрытой корпусом части линзы составляет 3,2 mm. Аналогичные СД были использованы также в работах [5,9,18–20,24,26,31,34].

Характеристики анализаторов

Тип анализатора	Тип СД, длина волны	L , cm	Диапазон измерения, газ	Время накопления	Точность	Ссылка
Недисперсионный	Плоский, 2.3 μm	50	5–100% CH_4	–	0.1%	[10]
	Плоский, 2.3 μm	150	1–10% CH_4	–	–	[12]
	Плоский, 3.4 μm	–	0–5% CH_4	2 s	250 ppm v/v	[33]
	Иммерсионный, 3.4 μm	–	> 135 $\mu\text{g C}_2\text{H}_5\text{OH/l}$	–	–	[34]
	Плоский, 4.3, μm	4.5	0–1% CO_2	–	> 12 ppm v/v	[7]
	Плоский, 4.3, μm	–	0.03–10% CO_2	–	–	[14]
	Плоский, 4.3, μm	8	0.1 CO_2	–	–	[23]
	Иммерсионный, 4.3, μm	0.2	0–10% CO_2	30 ms	5%	[5]
	Иммерсионный, 4.3, μm	0.8	0–4% CO_2	4 ms	0.1% v/v	[24]
	Иммерсионный, 4.3, μm	8	0–10% CO_2	4 ms	30 ppm v/v	[9]
	Иммерсионный, 4.3 μm	2–5	0–5% CO_2 5.1–10% CO_2 10.1–15% CO_2 15.1–20% CO_2	< 30 ms	$\pm 0.2\%$ $\pm 4\%$ $\pm 6\%$ 10%	[26]
Иммерсионный, 4.7 μm	8	0–4% CO	4 ms	400 ppm v/v	[9]	
Оптико-акустический	Плоский, 4.2 μm	–	CO_2	–	–	[30]
	Иммерсионный, 3.4 μm	4	0–60% CH_4	10 s	1%	[28]

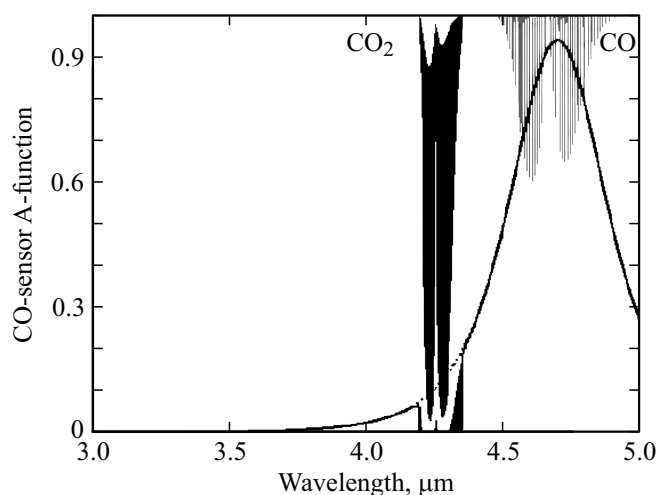


Рис. 6. Аппаратная функция для сенсора со СД, излучение которого прошло через „газовый фильтр“, наполненный углекислым газом, и спектры пропускания углекислого ($\lambda = 4.3 \mu\text{m}$) и угарного ($\lambda = 4.7 \mu\text{m}$) газов, при 30°C [31].

кварца [28] или кремниевый кантилевер, полученный по MEMS технологии [29,30]. Считается, что такие микрофоны подвержены минимальному температурному влиянию, по крайней мере, гораздо менее значительному, чем фотодиоды [30]. При этом для компенсации температурной зависимости амплитуды и положения

максимума СД, как и для NDIR ГА, используют аналитические функции, например, эмпирически полученный полином 3-й степени [29]. В работе [28] в качестве источника зондирующего излучения в оптико-акустическом газоанализаторе смеси биогаза (т.е. смеси CH_4 и CO_2) были использованы СД с длинами волн 3.4 и 4.2 μm с иммерсионной кремниевой линзой диаметром 3.5 mm (рис. 5); использование таких линз позволяет увеличить эффективность СД от 4 до 5 раз [6]. В качестве детектора импульсного изменения давления биогаза был использован пьезоэлектрический датчик резонансного типа на основе кварца ($f_r = 32.768 \text{ kHz}$). Следует отметить, что в отличие от многих работ, в работе [28] указано на преимущество синусоидальной модуляции интенсивности СД для получения максимального отношения сигнал/шум. Кроме этого, в этой работе, как и в [30], приведены примеры „корреляционных“ измерений, при которых селективность к газу повышена за счет использования „газовых“ кювет, наполненных измеряемым или мешающими газами. Описанные „газовые фильтры“ используются, разумеется, и в NDIR ГА [15,31], например, в ГА с наполненной углекислым газом кюветой, расположенной на пути излучения СД с длиной волны 4.7 μm , предназначенным для измерения концентрации угарного газа [31]. Изменение спектральных характеристик аппаратной функции сенсора при использовании CO_2 -фильтра продемонстрировано на рис. 6.

В таблице приведены типичные параметры опубликованных оптико-акустических и NDIR-сенсоров, из которой видно, что основное внимание разработчиков ГА на основе СД было уделено разработке ГА для трех основных газов: CH_4 ($3.4\ \mu\text{m}$), CO_2 ($4.3\ \mu\text{m}$) и CO ($4.7\ \mu\text{m}$). При этом можно встретить утверждение о том, что пороги обнаружения в случае использования диодных оптопар уступают таковым для оптико-акустических сенсоров при прочих равных условиях [29]. Вывод, сделанный в [29], по-видимому, не следует распространять на все существующие варианты NDIR и оптико-акустических сенсоров по следующим причинам:

— во-первых, существует существенный разброс параметров как СД (см., например, [23]), так и ФД, опубликованных и/или имеющихся на рынке. Так, например, заявленная в работе [29] мощность ($35\ \mu\text{W}$, $200\ \text{mA}$) существенно уступает мощности иммерсионных СД, использованных, например, в [28] ($\lambda = 3.4\ \mu\text{m}$, $200\ \mu\text{W}$ (CW)). Кроме того, нередко условия выделения полезного сигнала и рабочие параметры ФД [29] или СД [23], используемых при сравнении NDIR сенсоров, не указываются. Вместе с тем известно, что низкое динамическое сопротивление средневолновых ФД делает задачу изготовления малошумящего фотоприемного модуля, содержащего предварительной усилитель, нетривиальной, т. е. требующей отдельного рассмотрения [13,25,32];

— во-вторых, количество реализованных NDIR сенсоров с высокими эксплуатационными параметрами никак не уступает количеству таких примеров для оптико-акустических сенсоров (таблица);

— в-третьих, фотоакустические сенсоры подвержены влиянию вибрационных шумов, и поэтому вряд ли могут быть использованы для некоторых специфических применений, например, для создания подвижных (мобильных) ГА и/или встроенных систем диагностики работы двигателя внутреннего сгорания.

Как бы там ни было, но, исходя из данных опубликованных работ, можно заключить, что СД средневолнового ИК диапазона уже доказали и свою надежность, и устойчивость параметров. Сочетание этих свойств СД с бурно развивающейся микропроцессорной техникой и методами обработки сигнала дает основания отказаться в будущем от дорогостоящих систем термостабилизации и реализовать тем самым основные преимущества СД — их малые габариты, высокое быстродействие и низкое энергопотребление. Поэтому можно ожидать, что в ближайшем будущем и NDIR, и оптико-акустические сенсоры на основе средневолновых СД будут бурно развиваться, добавляя к выпускаемым ныне [4,26,34] все новые и новые виды и типы ГА.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Филачев А.М., Таубкин И.И., Трищенко М.А. // Успехи прикладной физики. 2015. Т. 3. № 1. С. 77.
- [2] Vui D.A., Hauser P.C. // *Analytica Chimica Acta*. 2015. V. 853. P. 46. [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://dx.doi.org/10.1016/j.aca.2014.09.044>
- [3] Yeh P., Yeh N., Lee C.-H., Ding T.-J. // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017. V. 75. P. 461. [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://dx.doi.org/10.1016/j.snb.2016.03.040>.
- [4] Матвеев Б.А. // Фотоника. 2014. № 6 (48). С. 80. [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://www.photonics.su/journal/article/4406>.
- [5] Александров С.Е., Гаврилов Г.А., Капралов А.А., Матвеев Б.А., Ременный М.А., Сотникова Г.Ю. // ЖТФ. 2018. Т. 88. № 9. С. 1433. Doi:10.21883/JTF.2018.09.46433.35-18; [Aleksandrov S.E., Gavrilov G.A., Kapralov A.A., Matveev B.A., Remennyi M.A., Sotnikova G.Yu. // *Technical Physics*. 2018. V. 63. N 9. P. 1390. doi 10.1134/S1063784218090025]
- [6] Карандашев С.А., Матвеев Б.А., Ременный М.А. // ФТП. 2019. Т. 53. № 2. С. 147.
- [7] Eberhardt A., Scholz L., Westermann S., Sachs T., Langer M., Wöllenstein J., Palzer S. // *Proc. Engineer*. 2014. V. 87. P. 1318. doi 10.1016/j.proeng.2014.11.690
- [8] Tkachuk M., Suchalkin S. Патент США № 8957376, 2015.
- [9] Thurmond K., Loparo Z., Partridge W., Vasu S.S. // *Appl. Spectroscopy*. 2016. V. 70. N 6. P. 962. doi 10.1177/0003702816641261
- [10] Fanchenko S., Baranov A., Savkin A., Sleptsov V. // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2016. V. 108. 012036. doi 10.1088/1757-899X/108/1/012036
- [11] Fanchenko S.S., Baranov A.M., Savkin A.V., Samotaev N.N. // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2016. V. 151. 012021. doi 10.1088/1757-899X/151/1/012021
- [12] Fanchenko S., Baranov A., Savkin A., Petukhov A., Kalinina K., Zhurtanov B., Velikotny M. // *IEEE Workshop on Environmental, Energy and Structural Monitoring Systems (EESMS), Trento, Italy, July 9-10, 2015. Proceedings*. 2015. P. 146. doi 10.1109/EESMS.2015.7175868
- [13] Aleksandrov S.E., Gavrilov G.A., Kapralov A.A., Sotnikova G.Yu. // *Phys. Proc*. 2015. V. 73. P. 177. doi 10.1016/j.phpro.2015.09.151.
- [14] Безъязычная Т.В., Богданович М.В., Кабанов В.В., Кабанов Д.М., Лебедев Е.В., Паращук В.В., Рябцев А.Г., Рябцев Г.И., Шпак П.В., Щемелев М.А., Андреев И.А., Кунцына Е.В., Шерстнев В.В., Яковлев Ю.П. // ФТП. 2015. Т. 49. № 7. С. 1003; [Bezyazychnaya T.V., Bogdanovich M.V., Kabanov V.V., Kabanov D.M., Lebiadok Y.V., Parashchuk V.V., Ryabtsev A.G., Ryabtsev G.I., Shpak P.V., Shchemelev M.A., Andreev I.A., Kunitsyna E.V., Sherstnev V.V., Yakovlev Yu.P. // *Semiconductors*. 2015. V. 49. P. 980. doi 10.1134/S1063782615070052
- [15] Dinh T.-V., Choi In-Y., Son Y.-S., Kim Jo-Ch. // *Sensors and Actuators B Chemical*. 2016. V. 231. P. 529. doi 10.1016/j.snb.2016.03.040.
- [16] Lisakov S.A., Sidorenko A.I., Zorin I.S., Sypin E.V. // 19th International Conference on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM. 2018. P. 391. June 29–July 3, 2018, Erlagol, Russia.

- [17] *Fanchenko S., Baranov A., Savkin A., Somov A., Calliari L.* // Multi-wavelength IR method for monitoring air pollution in cities. IEEE International Smart Cities Conference (ISC2). Trento, Italy, 12–15 Sept. 2016. doi 10.1109/ISC2.2016.7580867
- [18] *Villar M.S.* [Электронный ресурс] Режим доступа http://etd.fcla.edu/CF/CFE0006671/Michael_Villar_Thesis_Final
- [19] *Villar M., Thurmond K., Urso J., Parupalli A., Ninnemann E., Terracciano A., Kapat J., Vasu S.* // AIAA SPACE and Astronautics Forum and Exposition, Orlando, FL, September 12–14. 2017. ISBN: 978-1-62410-483-1. doi 10.2514/6.2017-5370
- [20] *Terracciano A.C., Thurmond K., Villar M., Urso J., Ninnemann E., Parupalli A., Loparo Z., Demidovich N., Kapat J.S., Partridge W.P.Jr., Vasu S.S.* // New Space. 2018. V. 6, N 1. doi 10.1080/05704928.2018.1474766
- [21] *Maslar J.E., Hoang J., Kimes W.A., Sperling B.A.* // Appl. Spectroscopy. 2015. V. 69. N 3. P. 332. doi 10.1366/14-07695
- [22] *Fleming L., Gibson D., Song Sh., Li Ch., Reid S.* // Surface & Coatings Technology. 2018. V. 336. P. 9. doi 10.1016/j.surfcoat.2017.09.033
- [23] *Camargo E.G., Goda Y., Morohara O., Fujita H., Geka H., Ueno K., Shibata Y., Kuze N.* // Proc. SPIE. 10404, Infrared Sensors, Devices, and Applications VII, 104040R (30 August 2017); doi 10.1117/12.2272905
- [24] *Yoo J., Prikhodko V., Parks J.E., Perfetto A., Geckler S., Partridge W.P.* // Appl Spectrosc. 2015. V. 69. N 9. P. 1047. doi 10.1366/14-07796. Epub 2015 A
- [25] *Александров С.Е., Гаврилов Г.А., Капралов А.А., Сотникова Г.Ю.* // ПЖТФ. 2016. Т. 42. № 5. С. 81; [*Aleksandrov S.E., Gavrilov G.A., Kapralov A.A., Sotnikova G.Yu.* // Tech. Phys. Lett. 2016. V. 42. N 3. P. 263. doi 10.1134/S1063785016030020.]
- [26] Treaton 2018, QuRe sensor. [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://www.treat-on.com/tovary/oem-medical-solutions/product/228>
- [27] *Елизаров А.Ю.* // ПЭТФ. 2017. Т. 43. № 12. С. 3.
- [28] *Köhring M., Böttger S., Willer U., Schade W.* // Sensors (Basel). 2015. V. 15. N 5. P. 12092. doi 10.3390/s150512092
- [29] *Wittstock V., Scholz L., Bierer B., Perez A.O., Wöllenstein J., Palzer S.* // Sensors and Actuators B. 2017. V. B 247. P. 930. doi 10.1016/j.snb.2017.03.086
- [30] *Scholz P., Ortiz Perez A., Knobelspies S, Wöllenstein J., Palzer S.* // Proc. Engineer. 2015. V. 120. P. 1233. (available online at www.sciencedirect.com 1877-7058).
- [31] *Sotnikova G.Yu., Aleksandrov S.E., Gavrilov G.A.* // Proc. SPIE. 2009. V. 7356. P. 73561T. doi 10.1117/12.820668
- [32] *Александров С.Е., Гаврилов Г.А., Сотникова Г.Ю.* // ПЖТФ. 2014. Т. 40. № 16. С. 58; [*Aleksandrov S.E., Gavrilov G.A., Sotnikova G.Y.* // Tech. Phys. Lett. 2014. V. 40. N 8. P. 704. doi 10.1134/S1063785014080161]
- [33] *Кижасев С.С., Калинина К.В., Петухов А.А., Гурина Т.И., Миронова А.Н., Черняев А.В., Стоянов Н.Д., Салихов Х.М.* // Труды 2-й Российско-Белорусской научно-технической конференции „Элементная база отечественной радиоэлектроники: импортозамещение и применение“ им. О.В. Лосева, Н. Новгород, 17–19 ноября 2015 г. С. 163–166. ISBN 978-5-9903092-3-8
- [34] Лазерные системы („Алкорамка“) 2018. [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://www.lsystems.ru/en/alcoframes/>