
ОПТИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК 543.27.8
DOI: 10.17586/0021-3454-2020-63-12-1103-1111

ПРИМЕНЕНИЕ СОВРЕМЕННЫХ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ ИСТОЧНИКОВ И ПРИЕМНИКОВ СРЕДНЕГО ИК-ДИАПАЗОНА ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ ГОРЮЧИХ ГАЗОВ

Д. А. РОЖКОВ¹, А. М. ГУРОВИЧ², С. Я. ЧАКЧИР³, П. А. ГАПОНОВ⁴

¹Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: denis.rohkow@gmail.com

²ООО „Инновационная техника и технологии“, 196006, Санкт-Петербург, Россия

³ООО „НПП „Адвент“, 190020, Санкт-Петербург, Россия

⁴Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
„ЛЭТИ“ им. В. И. Ульянова (Ленина), 197376, Санкт-Петербург, Россия

Рассмотрены вопросы, связанные с созданием дистанционного газоанализатора, работающего в среднем инфракрасном диапазоне, проанализированы элементы как отечественных производителей, так и зарубежных аналогов. Описана рабочая схема, оценены ее энергетические потери, измерена зависимость изменения сигнала от концентрации газа на дистанциях 1 и 2 м, теоретически оценена работа датчика на дистанциях 5 и 10 м. Результаты расчетов и измерений показывают, что на данном этапе прибор уступает современным дистанционным газоанализатором, однако способен работать с высокой точностью при расстоянии между модулями от 5 до 100 м и наилучшим образом подойдет для непрерывного стационарного мониторинга промышленных объектов на наличие утечек.

Ключевые слова: *средний ИК-диапазон, дистанционный газоанализатор, источник, приемник, горючий газ, метан, зависимость сигнала от концентрации*

Введение. Метан является самым распространенным органическим газом в атмосфере и широко применяется во многих отраслях человеческой деятельности. Одной из особенностей метана является инфракрасный спектр поглощения, что делает эту область длин волн перспективной для детектирования [1]. В настоящее время существуют различные датчики для детектирования горючих углеводородов [2—5]. Светодиоды среднего ИК-диапазона успешно применяются в газоанализе [6, 7]. В статье описан разработанный для дистанционного обнаружения метана прибор, основанный на явлении поглощения веществом излучения средней инфракрасной области спектра. Энергетическая оценка прибора при различных расстояниях между источником и приемником излучения и измерения в газовой кювете на расстояниях 1 и 2 м при различных концентрациях показала, что датчик на данном этапе уступает зарубежным аналогам, однако позволяет достаточно эффективно обнаруживать изменение уровня метана в воздухе на расстояниях до 100 м. Также в статье рассмотрены возможные варианты улучшения прибора для повышения основных параметров до уровня зарубежных аналогов.

Компоненты прибора. В средней ИК-области спектра метан имеет полосы поглощения в окрестностях следующих длин волн:

- 1,65 мкм (максимум коэффициента поглощения $\approx 0,004 \text{ см}^{-1}$);
- 2,3 мкм (максимум коэффициента поглощения $\approx 0,009 \text{ см}^{-1}$);
- 3,3 мкм (максимум коэффициента поглощения $\approx 0,45 \text{ см}^{-1}$).

Существуют дистанционные газоанализаторы, работающие в окрестностях 1,65 и 2,3 мкм [4, 5, 8], однако наиболее перспективен для детектирования углеводородов, таких как метан, этан, пропан и бутан, диапазон от 3,0 до 3,5 мкм, поскольку перечисленные алканы имеют полосы поглощения в этом диапазоне [9]. Помимо того, при одинаковой концентрации метана коэффициент поглощения на длине волны 3,3 мкм значительно больше, чем на более коротких волнах ИК-диапазона [10]. Также при использовании полосы поглощения 3,3 мкм значительно меньше фон солнечного излучения [11], поэтому рабочий диапазон длин волн прибора находится в районе 3,3—3,44 мкм.

В качестве источника используется инфракрасный излучающий диод Lms34LED-CG* с максимумом излучения в районе 3,3—3,44 мкм. Особенностью диода является использование халькогенидной линзы [12], которая значительно повышает квантовую эффективность и уменьшает телесный угол расхождения излучения. Для детектирования газообразных углеводородов выбран фотодиод с длиной волны максимума чувствительности ($>90\%$) в районе 2,2—3,4 мкм Lms36PD-05, того же производителя, длина волны максимума чувствительности ($>90\%$) в районе 2,2—3,4 мкм. Из рис. 1 видно, что такая комбинация диодов позволяет идентифицировать смесь углеводородов.

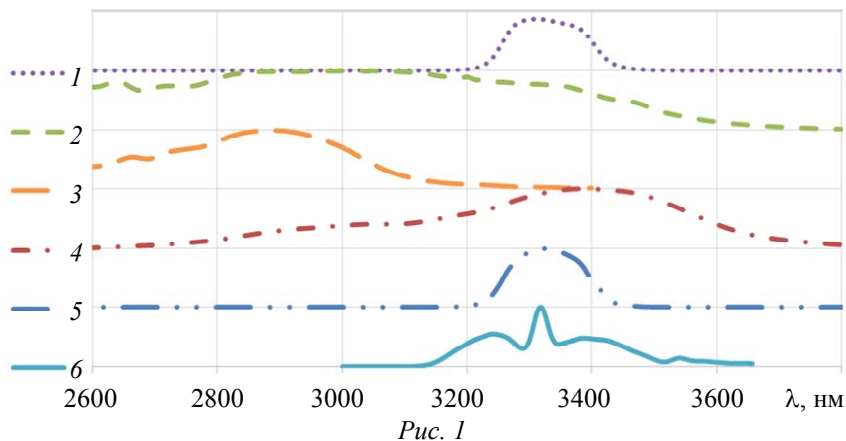


Рис. 1

На рис. 1 изображены: 1 — спектральный коэффициент пропускания фильтра FB3330-150; 2 — спектральная чувствительность фотодиода Lms36PD-05; 3 — спектр излучения контрольного светодиода Lms28LED; 4 — спектр излучения измерительного светодиода Lms34LED-CG; 5 — условная аппаратная функция улучшенного прибора; 6 — спектр поглощения CH_4 .

Для создания параллельного пучка лучей между диодами использована пара одинаковых параболических зеркал MPD169-M01**. В каждый модуль прибора установлено прозрачное в используемой области спектра защитное окно WG01050-E того же производителя, что и зеркало.

Для предварительной грубой юстировки датчика используется пара „лазер—зеркало“. На один из модулей прибора установлен лазер, причем он расположен на тыльной стенке модуля, а в передней сделано отверстие, через которое должен пройти луч. Далее вышедший из модуля луч должен отразиться от расположенного на втором модуле зеркала и попасть в отверстие на первом модуле. Более точная юстировка производится благодаря подвижкам с микрометрическими винтами и достигается за счет получения максимального уровня сигнала.

* <http://ru.lmsnt.com>

** <https://www.thorlabs.com/index.cfm>

Таким образом, разработанная модель детектора метана (рис. 2) включает: 1 — инфракрасный излучающий диод Lms34LED-CG; 2 — лазер юстировочный, 5 мВт, 650 нм; 3 — параболические отражатели MPD169-M01, \varnothing 25,4 мм; 4 — защитные окна WG01050-E; 5 — зеркало для юстировочного лазера PF07-03-M01*; 6 — фотоприемник Lms40PD-05-CG.

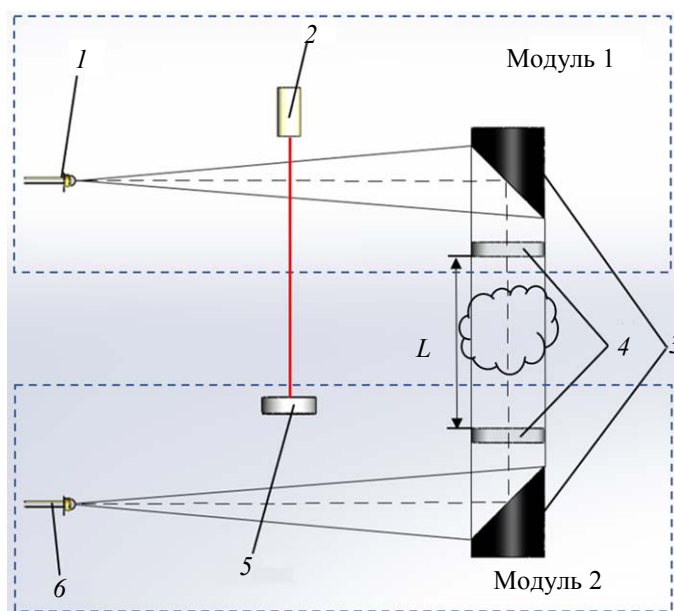


Рис. 2

Прибор работает в импульсном режиме, что позволяет обеспечить максимальную пиковую мощность 700 мкВт [13]. Выходной сигнал с фотоприемника формируется в виде уровня постоянного напряжения, обратно пропорционального коэффициенту пропускания среды. Используемый вольтметр позволяет регистрировать напряжение с точностью 0,01 В.

Возможно улучшение существующей модели прибора. Например, использование лишь одной пары „светодиод—фотодиод“ не позволяет построить прибор с высокой избирательностью из-за спектра излучения диода, значительно превышающего по ширине спектр поглощения метана. Повысить избирательность можно, в частности, применением специализированного фильтра FB3330-150**. При такой комбинации подобранных диодов и фильтра приводятся в соответствие ширина полосы пропускания прибора и ширина спектра поглощения метана. Таким образом, при достаточной концентрации метана между источником и приемником изменение уровня сигнала на выходе с фотоприемника будет максимальным.

На промышленных объектах задача идентификации может быть усложнена необходимостью высокоточного измерения концентрации: верхний предел измерения объемной доли газа до 100 % нижний концентрационный предел распространения пламени не должен превышать 5 % от диапазона измерений, или 20 % от показаний***. Одним из решений такой задачи может быть использование дополнительного источника в качестве „опорного“, помимо уже используемой измерительной пары диодов [14]. В таком случае один из светодиодов является измерительным, т.е. излучающим на длине волны, соответствующей максимальному поглощению анализируемого вещества, а второй светодиод — контрольным, излучение которого не поглощается веществом, и сигнал с которого будет являться опорным. Оба излучения должны регистрироваться поочередно фотодиодом или двумя фотодиодами, и разница в сигнале будет пропорциональна концентрации анализируемого вещества. В случае такой схемы

* <https://www.thorlabs.com/index.cfm>

** <https://www.thorlabs.com/index.cfm>

*** ГОСТ ИЕС 60079-29-1-2013

для детектирования метана в качестве контрольного светодиода можно использовать, например, Lms28LED*.

Оценка энергетических потерь. При работе датчика возникают потери на апертуре, рассеяние в параллельном пучке, потери на оптических компонентах.

Для оценки потерь на апертуре используются апертурный угол зеркала $\varphi = 6^\circ$ и диаграмма направленности светодиода. Расчет заключается в вычислении отношения энергии, попавшей на зеркало, ко всей излучаемой светодиодом энергии:

$$K_A = \frac{\int_0^\varphi f(x) dx}{\int_0^{90} f(x) dx}, \quad (1)$$

где x — угол распространения излучения, $f(x)$ — значение интенсивности в зависимости от направления излучения. Для используемых компонентов $K_A \approx 0,27$.

Из-за того что светодиод не является точечным источником, сформированному с помощью параболического зеркала параллельному пучку будет свойственно рассеяние. Оценить потери можно, определив диаметр пучка, пришедшего на зеркало второго модуля:

$$D = d + L \frac{y}{f}, \quad (2)$$

где $d = 25,4$ мм — диаметр пучка излучения после отражения от зеркала первого модуля, $y = 0,3$ мм — размер чипа светодиода, $f = 152,4$ мм фокусное расстояние MPD169-M01, L — расстояние между модулями. Потери энергии в таком случае оцениваются как отношение диаметров пучка $K_S = \frac{d}{D}$.

Коэффициент светопропускания системы вычисляется по формуле:

$$K_{\text{absorb}} = (1 - \rho)^2 (1 - \alpha)^{2l} R^2 = 0,9, \quad (3)$$

где $\rho = 0,013$ — коэффициент отражения от поверхности раздела воздух—стекло защитного окна, $\alpha = 0,067$ — коэффициент поглощения защитного окна, $l = 3$ мм — толщина защитного окна, $R = 0,966$ — коэффициент отражения зеркал.

При известной мощности светодиода P_{LED34} зависящая от расстояния L между модулями мощность излучения на фотодиоде будет равна $P_0 = P_{\text{LED34}} K_A K_S K_{\text{absorb}}$.

Расчет минимальной концентрации метана. Для определения минимальной концентрации метана прежде всего необходимо определить чувствительность используемого фотодиода, характеризуемую эквивалентной мощностью шума, величина которого складывается из теплового и светового шума. Напряжение теплового шума вычисляется по формуле:

$$U_T = \sqrt{4kT\Delta f R_{sh}} = 91 \text{ мкВ}, \quad (4)$$

где $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К — постоянная Больцмана, $T = 293$ К — температура окружающей среды, $\Delta f = 1$ ГГц — частота сигнала, $R_{sh} = 0,5$ кΩ — сопротивление фотодиода. Для оценки уровня светового шума можно воспользоваться следующей формулой:

$$U_I = R_{sh} \sqrt{2e(I_d + I_{ph})\Delta f} = 193 \text{ мкВ}, \quad (5)$$

* <http://ru.lmsnt.com>

где e — заряд электрона, $I_d=300$ мкА — значение темнового тока, $I_{ph} = SP_0 = 166$ мкА — ток, создаваемый излучением (S — чувствительность фотодиода). Эквивалентная мощность шума равна:

$$NEP = \frac{U_T + U_I}{R_{sh}S} = 0,47 \text{ мкВт.} \quad (6)$$

Зная эквивалентную мощность шума, можно рассчитать минимальную концентрацию метана в воздухе, которую способен детектировать прибор. Для расчета необходимо воспользоваться формулой:

$$\chi = \frac{1}{LK_{эф}} \ln \left(\frac{P_0}{P_0 - NEP} \right), \quad (7)$$

где $K_{эф} = 2,1 \text{ см}^{-3}$ — эффективный коэффициент поглощения (на основе данных HITRAN-2008) [15]. Из рис. 3 видно, что для достижения высокой точности при измерениях расстояние между модулями датчика должно быть больше 5 м.

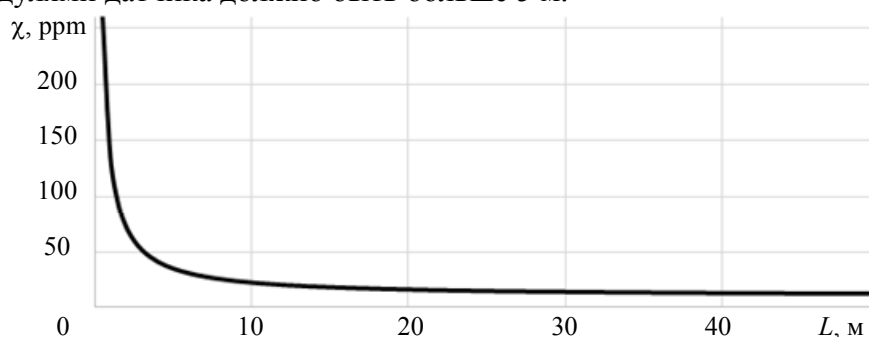


Рис. 3

Результаты измерений. Для модели датчика измерено падение напряжения при различных концентрациях на расстоянии 1 и 2 м между модулями датчика. Схема эксперимента представлена на рис. 4. Для создания необходимой концентрации использовалась газовая кювета и сосуды известных объемов. Также была предусмотрена возможность поддержания постоянного давления в сосудах, равного атмосферному. Измерения проводились при температуре 20 °С. На рис. 5 представлены полученные графики.

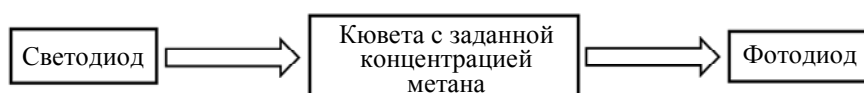


Рис. 4

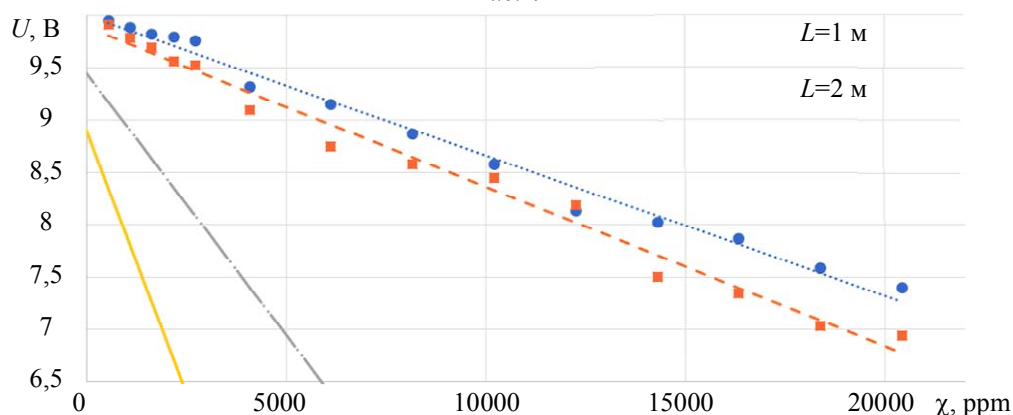


Рис. 5

Выбор расстояний для проведения эксперимента обусловлен отсутствием возможности создания в используемой кювете оптического пути больше 2 м. Для более точной оценки применимости метода необходимо провести испытания с кюветой длиной не менее 5 м.

Отклонение экспериментальных точек от графика линейной аппроксимации в большей степени обусловлено методической погрешностью (порции газа измерялись не очень точно). На основании полученных данных произведен расчет теоретических прямых зависимости падения напряжения от концентрации при расстоянии между модулями 5 и 10 м (рис. 6).

Среднеквадратичное отклонение (СКО) в эксперименте получились 0,11 и 0,13 В для $L=1$ и 2 м соответственно. Принимая эти значения равными реальному шуму на фотодиоде, можно получить зависимость отношения сигнал/шум от расстояния между модулями датчика. Из рис. 6 видно, что прибор способен работать с высокой точностью при расстоянии между модулями 100 м.

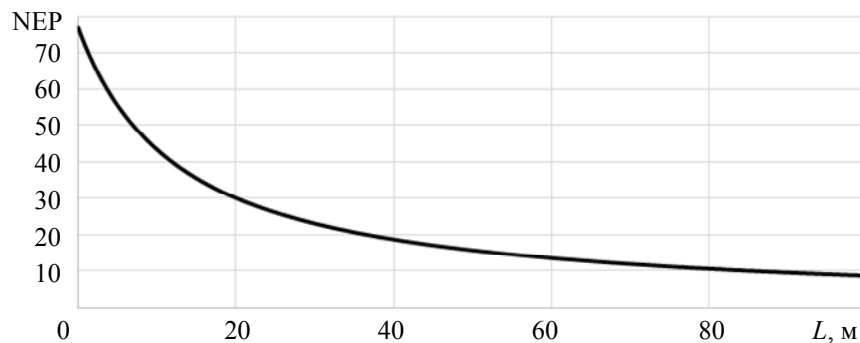


Рис. 6

Также значения СКО позволяют оценить погрешность работы прибора. На данном этапе погрешность измерений не превышает $\pm 10\%$ от показаний.

Сравнение с аналогами. Для сравнения разработанного газоанализатора с уже используемыми были выбраны популярные приборы с разным принципом работы: контактный полупроводниковый датчик MQ-2* и дистанционный газоанализатор с лазерным диодом**. В таблице представлены их некоторые характеристики.

Преимуществами полупроводниковых газоанализаторов являются небольшая стоимость и отсутствие необходимости юстировки. Однако область их применения ограничивается только постоянным мониторингом небольших помещений на наличие определенной концентрации газа в воздухе. Наиболее универсальны дистанционные газоанализаторы. В настоящее время часто используются портативные приборы с использованием лазерного диода. Их основные преимущества — дистанция работы до 30 м и предел обнаружения 5 ppm·m, поэтому их основным назначением является поиск уже имеющихся утечек или периодические проверки газопровода. Особенностью разработанного датчика является дистанция работы до 100 м, однако по остальным характеристикам на данном этапе он уступает газоанализатору RLGD-100.

Датчик	Предел обнаружения, ppm·m	Время обнаружения, с	Дистанция работы, м	Погрешность измерения, %	Диапазон измерений, ppm·m
Полупроводниковый MQ-2	5000	10	—	—	—
Лазерный RLGD-100	5	0,1	от 0,5 до 30	± 10	от 0 до 50000
Диодный ИТМО-ИТТ	35 (при расстоянии между модулями 5 м)	0,1	от 5 до 100	± 10	от 0 до 25000

* <https://www.waveshare.com/>** <https://hmagrp.com/>

Заключение. Своевременное реагирование на появление утечек метана является важной частью обеспечения безопасности в современном мире. Представленные результаты дают основание полагать, что использование газоанализаторов, работающих в средней инфракрасной области и основанных на поглощении веществом определенного спектрального состава излучения, для детектирования горючих газов, в частности метана, крайне эффективно. Результаты расчетов и измерений показывают, что на текущем этапе прибор уступает современному дистанционным газоанализатором, однако он способен работать с высокой точностью при расстоянии между модулями 5—100 м, что является его основным преимуществом. Разработанный датчик наилучшим образом подойдет для непрерывного стационарного мониторинга промышленных объектов на наличие утечек.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Cicerone R. J., Oremland R. S. Biogeochemical aspects of atmospheric methane // *Global biogeochemical cycles*. 1988. Vol. 2, N 4. P. 299—327. <https://doi.org/10.1029/GB002i004p00299>.
2. Fedorenko G., Oleksenko L., Maksymovych N. Semiconductor gas sensors based on Pd/SnO₂ nanomaterials for methane detection in air // *Nanoscale research letters*. 2017. N 12. P. 329. DOI 10.1186/s11671-017-2102-0.
3. Sibuh Th., Nishi Shahnaj H. Instruments for Methane Gas Detection // *Intern. J. of Engineering Research and Applications*. 2014. Vol. 4, N 5. P. 137—143.
4. Fei Wang, Shuhai Jia, Yonglin Wang, Zhenhua Tang. Recent developments in modulation spectroscopy for methane detection based on tunable diode laser // *Applied sciences*. 2019. N 9. P. 2816. DOI: 10.3390/app9142816.
5. Crawford M., Stewart G., McGregor G., Gilchrist J. R. Design of a portable optical sensor for methane gas detection // *Sensors and Actuators*. 2006. Vol. 113. P. 830—836. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2005.03.105>.
6. Werle P., Slemr F., Maurer K., Kormann R. Near- and mid-infrared laser-optical sensors for gas analysis // *Optics and lasers in engineering*. 2002. Vol. 3, N 2—3. P. 101—114. [https://doi.org/10.1016/S0143-8166\(01\)00092-6](https://doi.org/10.1016/S0143-8166(01)00092-6).
7. Shih-Hua Huang, Yen-Jie Huang, Hsiang-Chen Chui. Fiber-optic-based methane detection using mid-infrared light emitting diode // *IEEE Sensors J.* 2018, N 18(15). P. 6169—6174. doi:10.1109/jsen.2018.2845443.
8. Wang Wen-qing, Zhang Lei, Zhang Wei-hua. Analysis of optical fiber methane gas detection system // *Procedia Engineering*. 2013. Vol. 52. P. 401—407. DOI: 10.1016/j.proeng.2013.02.160.
9. Тимофеев Ю. М., Васильев А. В. Основы теоретической атмосферной оптики. СПб, 2007. 152 с.
10. Fanchenko S., Baranov A., Savkin A., Petukhov A. Non-dispersive LED-based methane open path detector capabilities // 2015 IEEE Workshop on Environmental, Energy, and Structural Monitoring Systems (EESMS) Proceedings. 2015. DOI: 10.1109/EESMS.2015.7175868.
11. Харланов А. Н., Шилина М. И. Инфракрасная спектроскопия для исследования адсорбционных, кислотных и основных свойств поверхности гетерогенных катализаторов. МГУ, 2011. 110 с.
12. Абель О. Я., Кузнецов М. М., Соснов А. Н., Соснова Н. К. Использование халькогенидов в оптике // *Современные проблемы науки и образования*. 2012. № 6 [Электронный ресурс]: <<https://science-education.ru/ru/article/view?id=8102>>.
13. Willert C., Stasicki B., Klinner J., Moessner S. Pulsed operation of high-power light emitting diodes for imaging flow velocimetry // *Measurement science and technology*. 2010. Vol. 21. P. 129—247. DOI: 10.1088/0957-0233/21/7/075402.
14. Макаров Н. С., Глебус И. С. Разработка опорного канала когерентного лазерного дальномера // *Интерэкспо Гео-Сибирь-2012. Междунар. науч. конф. СГГА. Новосибирск, 2012. Т. 1. С. 90—95.*
15. Катаев М. Ю. Анализ содержания метана атмосферы с помощью инфракрасных LED-диодов // *Доклады ТУСУР*. 2015. № 4(38).

Сведения об авторах

Денис Алексеевич Рожков

— студент; Университет ИТМО; факультет прикладной оптики / световая инженерия; E-mail: denis.rohkow@gmail.com

- Андрей Маркович Гурович** — канд. техн. наук; ООО „ИТТ“; генеральный конструктор;
E-mail: gk@ittspb.com
- Сергей Яковлевич Чакчир** — канд. техн. наук; ООО «НПП „Адвент“»; исполнительный директор;
E-mail: chakchir@adventspb.ru
- Павел Андреевич Гапонов** — студент; СПбГЭТУ „ЛЭТИ“, кафедра электронных приборов и устройств; E-mail: pavel.gaponov.2000@gmail.com

Поступила в редакцию
21.09.2020 г.

Ссылка для цитирования: Рожков Д. А., Гурович А. М., Чакчир С. Я., Гапонов П. А. Применение современных отечественных источников и приемников среднего ИК-диапазона для обнаружения горючих газов // Изв. вузов. Приборостроение. 2020. Т. 63, № 12. С. 1103—1111.

THE USE OF MODERN DOMESTIC SOURCES AND RECEIVERS OF THE MID-IR RANGE FOR THE DETECTION OF COMBUSTIBLE GASES

D. A. Rozhkov¹, A. M. Gurovich², S. Ya. Chakchir³, P. A. Gaponov⁴

¹ITMO University, 197101, St. Petersburg, Russia
E-mail: denis.rohkow@gmail.com

² LLC Innovative Equipment and Technologies, 196006, St. Petersburg, Russia

³ LLC Scientific Production Enterprise "ADVENT", 190020, St. Petersburg, Russia

⁴ St. Petersburg Electrotechnical University "LETI", 197376, St. Petersburg, Russia

Issues related to the creation of a remote gas analyzer operating in the mid-infrared range are considered, elements of both domestic manufacturers and foreign analogues are analyzed. The working scheme is described, its energy losses are estimated, the dependence of the signal change on the gas concentration at distances of 1 and 2 m is measured, the operation of the sensor at distances of 5 and 10 m is theoretically estimated. The results of calculations and measurements show that at this stage the device is inferior to modern remote gas analyzer, however, it is capable of working with high accuracy with a distance between modules from 5 to 100 m and is best suited for continuous stationary monitoring of industrial facilities for leaks.

Keywords: the mid-IR range, Remote gas analyzer, Mid-IR sources, Mid-IR receivers, combustible gas, methane, signal vs. concentration

REFERENCES

1. Cicerone R.J., Oremland R.S. *Global biogeochemical cycles*, 1988, no. 4(2), pp. 299–327, <https://doi.org/10.1029/GB002i004p00299>.
2. Fedorenko G., Oleksenko L., Maksymovych N. *Nanoscale research letters*, 2017, no. 12, pp. 329, DOI 10.1186/s11671-017-2102-0.
3. Mr. Sibin Thomas, Ms. Nishi Shahnaj Haider. *International Journal of Engineering Research and Applications*, 2014, no. 5(4), pp. 137–143.
4. Fei Wang, Shuhai Jia, Yonglin Wang, Zhenhua Tang. *Applied sciences*, 2019, no. 9, pp. 2816, DOI: 10.3390/app9142816.
5. Crawford M., Stewart G., McGregor G., Gilchrist J.R. *Sensors and Actuators*, 2006, no. 113, pp. 830–836, <https://doi.org/10.1016/j.snb.2005.03.105>.
6. Werle P., Slemr F., Maurer K., Kormann R. *Optics and lasers in engineering*, 2002, no. 2-3(3), pp. 101–114, [https://doi.org/10.1016/S0143-8166\(01\)00092-6](https://doi.org/10.1016/S0143-8166(01)00092-6).
7. Shih-Hua Huang, Yen-Jie Huang, Hsiang-Chen Chui. *IEEE Sensors Journal*, 2018, no. 15(18), pp. 6169–6174, DOI:10.1109/jsen.2018.2845443.
8. Wang Wen-qing, Zhang Lei, Zhang Wei-hua. *Procedia Engineering*, 2013, vol. 52, pp. 401–407, DOI: 10.1016/j.proeng.2013.02.160.
9. Timofeev Yu.M., Vasiliev A.V. *Osnovy teoreticheskoy atmosferynoy optiki* (Fundamentals of Theoretical Atmospheric Optics), St. Petersburg, 2007, 152 p. (in Russ.)
10. Fanchenko S., Baranov A., Savkin A., Petukhov A. *2015 IEEE Workshop on Environmental, Energy, and Structural Monitoring Systems (EESMS) Proceedings*, 2015, DOI: 10.1109/EESMS.2015.7175868.
11. Kharlanov A.N., Shilina M.I. *Infrakrasnaya spektroskopiya dlya issledovaniya adsorbtsionnykh, kislotnykh i osnovnykh svoystv poverkhnosti geterogennykh katalizatorov* (Infrared Spectroscopy for Studying Adsorption, Acidic and Basic Surface Properties of Heterogeneous Catalysts), Moscow, 2011, 110 p. (in Russ.)
12. <https://science-education.ru/ru/article/view?id=8102>. (in Russ.)
13. Willert C., Stasicki B., Klinner J., Moessner S. *Measurement science and technology*, 2010, vol. 21, pp. 129–247, DOI: 10.1088/0957-0233/21/7/075402.

14. Makarov N.S., Glebus I.S. *Interekspo Geo-Sibir'* (Interexpo Geo-Siberia), Int. Scientific. Conf. SGGA, Novosibirsk, 2012, vol. 1, pp. 90–95. (in Russ.)
15. Kataev M.Yu. *Proceedings of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics*, 2015, no. 4(38). (in Russ.)

Data on authors

- | | |
|----------------------------|--|
| Denis A. Rozhkov | — Student; ITMO University; Faculty of Applied Optic;
E-mail: denis.rohkow@gmail.com |
| Andrey M. Gurovich | — PhD; LLC Innovative Equipment and Technologies, General
Designer; E-mail: gk@ittspb.com |
| Sergey Ya. Chakchir | — PHD; LLC Scientific Production Enterprise "ADVENT", Executive
Manager; E-mail: chakchir@adventspb.ru |
| Pavel A. Gaponov | — Student; St. Petersburg Electrotechnical University "LETI",
Department of Electronic Instruments and Devices;
E-mail: pavel.gaponov.2000@gmail.com |

For citation: Rozhkov D. A., Gurovich A. M., Chakchir S. Ya., Gaponov P. A. The use of modern domestic sources and receivers of the mid-IR range for the detection of combustible gases. *Journal of Instrument Engineering*. 2020. Vol. 63, N 12. P. 1103—1111 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2020-63-12-1103-1111