

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ЭКОЛОГИИ,  
МЕДИЦИНЫ, БИОЛОГИИ

УДК 543.422

РАЗРАБОТКА ТЕЧЕЙСКАТЕЛЯ МЕТАНА НА ОСНОВЕ  
АБСОРБЦИОННОЙ СПЕКТРОСКОПИИ  
С ПРИМЕНЕНИЕМ ДИОДНЫХ МАТРИЦ

© 2024 г. А. А. Бойко<sup>a,b,\*</sup>, А. Ю. Кирьякова<sup>a,b,c</sup>, Е. Ю. Ерушин<sup>a,b,c</sup>, Н. Ю. Костюкова<sup>a,b,c</sup>

<sup>a</sup>Новосибирский национальный исследовательский государственный университет  
Россия, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2

<sup>b</sup>Институт лазерной физики Сибирского отделения Российской академии наук  
Россия, 630090, Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 15Б

<sup>c</sup>Новосибирский государственный технический университет  
Россия, 630073, Новосибирск, просп. К. Маркса, 20

\*e-mail: baa.nsk@gmail.com

Поступила в редакцию 25.05.2023 г.

После доработки 29.06. 2023 г.

Принята к публикации 25.07.2023 г.

Статья посвящена исследованию течеискателя метана на основе абсорбционной спектроскопии. В качестве источника излучения использовалась светодиодная матрица с длиной волны около 3.3 мкм, где расположена одна из линий поглощения метана. Система стабилизирована по температуре. Получена пороговая чувствительность около 60 ppm CH<sub>4</sub>.

DOI: 10.31857/S0032816224020188 EDN: QRVNKD

## 1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время активно развиваются технологии создания малогабаритных устройств для поиска утечек газов и замеров их концентраций [1–3]. Одним из газовых маркеров для уровня экологии и утечек газопроводов и нефтепроводов является метан. Метан не имеет цвета и запаха, в два раза легче воздуха, мало растворим в воде, взрывоопасен при концентрации в воздухе от 5% до 15% [4]. В природе метан составляет основную долю в добываемом из газовых и газоконденсатных месторождений природном газе (около 87%). Основными источниками выбросов метана являются сельскохозяйственная деятельность, утечки газопроводов и утечки шахтного метана. Рост концентрации метана в атмосфере имеет большое воздействие на изменение климата [5].

Предотвращение утечек метана из трубопроводов является эффективным способом уменьшения выбросов метана. Одним из методов детектирования и определения концентрации различных газовых примесей является

абсорбционный метод оптического газоанализа [2, 6, 7]. В его основе лежит измерение уровня поглощения излучения при прохождении через анализируемую газовую среду. Изменение уровня мощности фиксируется фотоприемником после прохождения через оптический тракт с газовой смесью. В оптическом тракте происходит поглощение света, за счет чего на фотоприемник приходит меньшая мощность лазерного излучения.

## 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Постановка задачи заключалась в создании малогабаритного недорогого сенсора метана с чувствительностью не хуже, чем 100 ppm. Для решения поставленной задачи по совокупности параметров были выбраны свето- и фотодиоды российского производства компании ООО “ЛЕД Микросенсор НТ”. У компании ООО “ЛЕД Микросенсор НТ” имеется готовый модуль, состоящий из источника и приемника света для детекции высоких концентраций метана (выше 1000 ppm). Для увеличения интенсивности излучения была

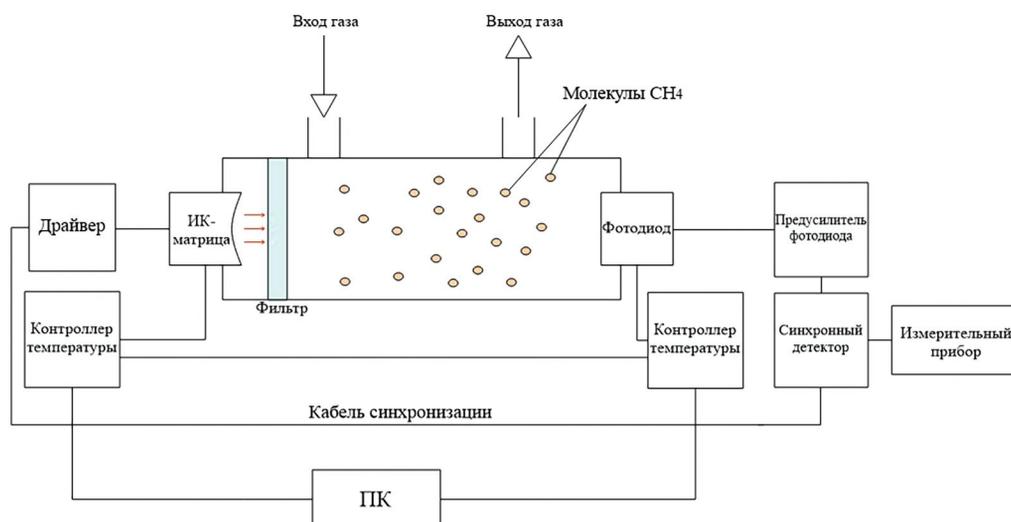


Рис. 1. Принципиальная схема течеискателя метана на основе светодиодных матриц.

Таблица 1. Основные параметры матрицы Lms34LED-4M-TEM-R

Параметр	Значения
Максимальная длина волн излучения, нм	3300–3440
Полуширина спектра, нм	250–600
Оптическая мощность, мкВт	500–700
Максимальный рабочий ток, А	2
Температура работы/хранения, °С	–60...+90
Корпус	ТО-5 со встроенным термоэлектрическим модулем и параболическим рефлектором с сапфировым стеклом

выбрана модель светодиодной четырехэлементной матрицы Lms34LED-4M-TEM-R с длиной волны 3.3–3.44 мкм. Данный прибор обладал встроенным отражателем на задней стенке, при этом матрица была установлена на элемент Пельтье. Общие параметры светодиодной матрицы показаны в табл. 1 [8]. В качестве приемника был выбран фотодиод Lms36PD-05-TEM-R в аналогичном варианте исполнения. Основные параметры фотодиода представлены в табл. 2 [8]. Общая схема прибора показана на рис. 1. Газовая кювета имеет размеры 160×36×41.5 мм<sup>3</sup>. Система сбора и анализа данных включала в себя стандартный драйвер D-51 и синхронный детектор SDM также от компании ООО «ЛЕД Микросенсор НТ». Для контроля и поддержания температуры источника и приемника на заданном уровне мы разработали контроллеры.

На рис. 2 представлен спектр поглощения метана, записанный нами с помощью спектрометра на основе широко перестраиваемого параметрического генератора света и лазерной оптико-акустической спектроскопии [9]. На длине

волны около 3319 нм наблюдается узкий интенсивный пик поглощения.

Как показано на рис. 3, с увеличением температуры спектр излучения светодиодной матрицы смещается в длинноволновую область и интенсивность излучения уменьшается. Фиксированная температура матрицы позволяет гарантировать стабильность спектра и совместить максимальную интенсивность излучения матрицы с максимумом линии поглощения метана.

Как следует из табл. 2, фотодиод обладает максимальной чувствительности в спектральной области 2.2–3.4 мкм. В эту область попадают также спектры поглощения других газов. Зависимость чувствительности фотодиода от длины волны представлена на рис. 4.

Из представленной на рис. 4 зависимости следует, что в диапазон чувствительности фотодиода попадает атмосферное влияние – поглощение воды, которое газоанализатор может определить как ложную концентрацию метана. Спектр поглощения паров воды из спектральной базы данных HITRAN [10] представлен на рис. 2 справа.

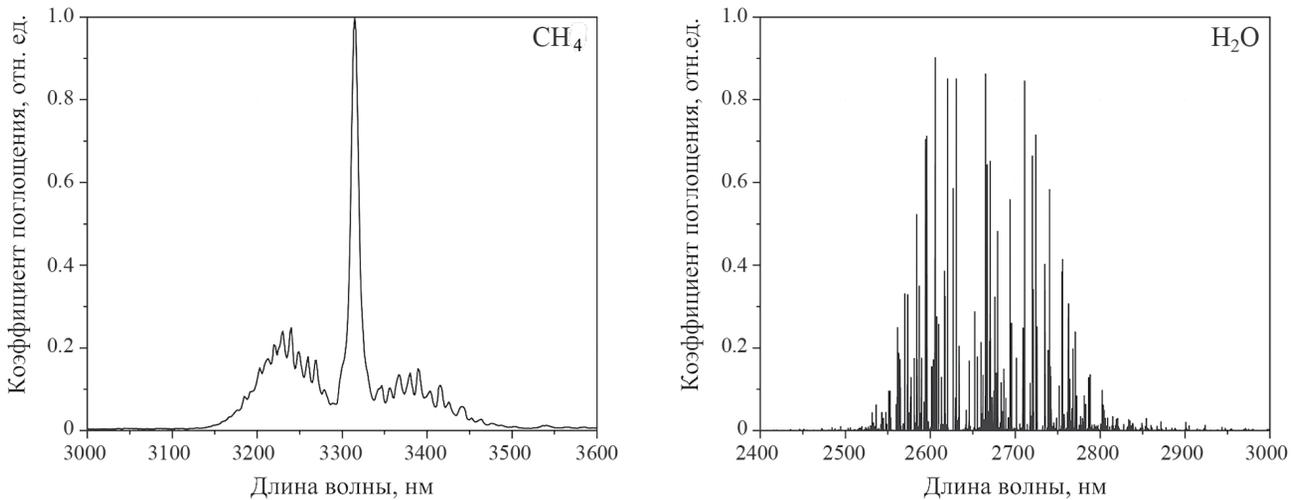


Рис. 2. Спектры поглощения метана (слева) и воды (справа).

Таблица 2. Основные параметры фотодиода Lms36PD-05-TEM-R

Параметр	Условия	Значения
Диапазон максимальной чувствительности, нм	На уровне 80%	2200–3400
Темновой ток, мкА	0.1 В (при 23 °С)	197
Темновое сопротивление, кОм	10 мВ (при 23 °С)	0.46
Эквивалентная мощность шума, Вт/Гц <sup>1/2</sup>	λ=3.3 мкм (при 23 °С)	5 · 10 <sup>-12</sup>
Обнаружительная способность, см · Гц <sup>1/2</sup> /Вт	λ=3.3 мкм (при 23 °С)	8.5 · 10 <sup>9</sup>
Размер чувствительной площадки, мм	– 0.5	
Температура работы/хранения, °С	–	+5...+90
Корпус	ТО-5 со встроенным термоэлектрическим модулем и параболическим рефлектором с кварцевым стеклом	

Для предотвращения влияния паров воды на детектор в схему устанавливается полосовой фильтр, который имеет центральную длину волны полосы пропускания 3250 нм. Спектр пропускания фильтра и спектр поглощения метана представлены на рис. 5. Использование полосового фильтра позволяет сократить рабочий диапазон свето- и фотодиодов от 3.0 до 3.4 мкм и заметно снизить влияние паров воды.

Драйвер управления светодиодной матрицы работает в импульсном режиме, для получения максимальной мощности излучения светодиода выставлена частота 16 кГц. Предусилитель предназначен для преобразования и усиления сигнала переменного тока ИК-фотодиодов. Предусилитель обеспечивает работу фотодиода в фотогальваническом режиме. При таком режиме фотодиод является источником фототока, который усиливается и преобразуется в сигнал напряжения, при этом форма результирующего

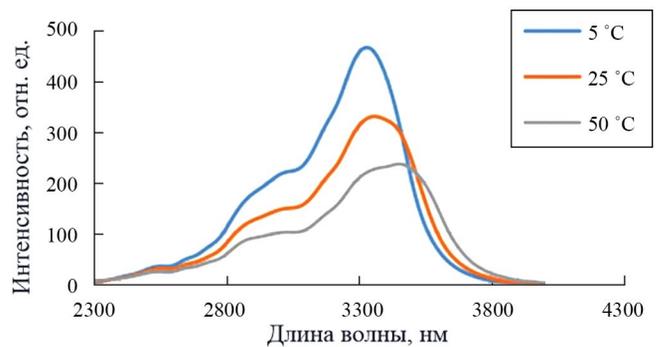


Рис. 3. Зависимость интенсивности излучения матрицы от температуры.

сигнала напряжения соответствует форме сигнала фототока [8]. Стабилизация температуры матрицы и фотодиода осуществляется с помощью ПИД-регулятора с контроллером и программным обеспечением, позволяющими стабилизировать температуру в диапазоне от 0 °С до 40 °С.

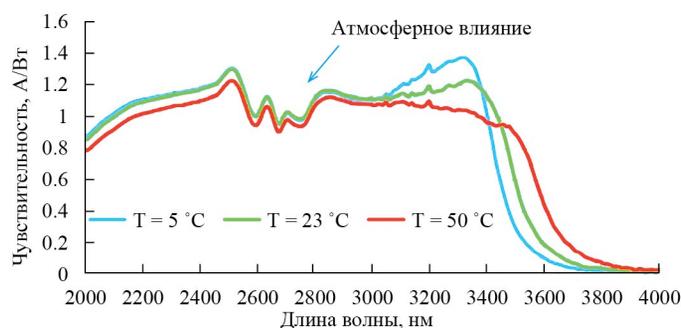


Рис. 4. Зависимость чувствительности фотодиода от длины волны.

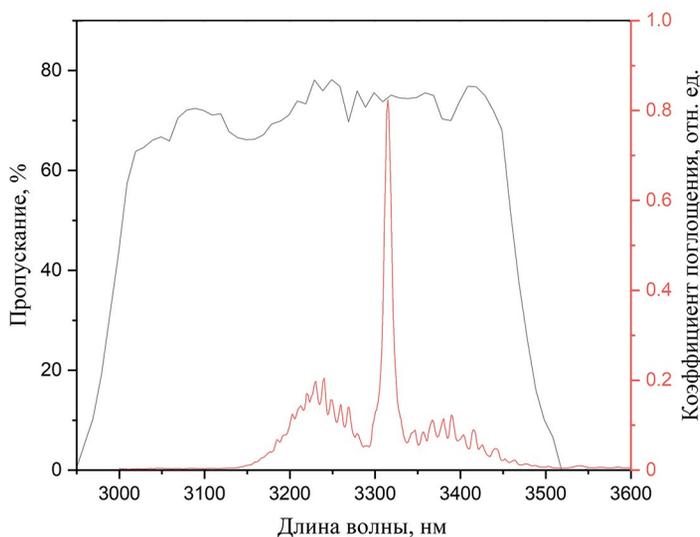


Рис. 5. Спектр пропускания фильтра и спектр поглощения метана.

### 3. МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ

Продувка детектора осуществляется через штуцер. С помощью сжатого азота происходит продувка и калибровка детектора. При наличии метана в оптической ячейке происходит ослабление сигнала согласно закону Бугера–Ламберта–Бера:

$$I = I_0 e^{-\alpha CL}, \quad (1)$$

где  $I$  — измеряемая интенсивность излучения,  $I_0$  — интенсивность падающего излучения,  $C$  — концентрация метана,  $\alpha$  — коэффициент поглощения для единичной концентрации,  $L$  — длина оптического пути.

При помощи фотодиода регистрируется падение уровня сигнала, пропорциональное поглощенной газом световой энергии. После калибровки детектора аттестованными газовыми смесями с известной концентрацией метана делается вывод об измеряемых величинах концентраций.

### 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОВЕДЕННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

В ходе экспериментов были выбраны оптимальные параметры работы системы, установленные на драйвере. Длительность импульсов 20 мкс, выбор указанной длительности обусловлен тем фактом, что чем больше длительность импульса, тем больше интенсивность излучения в данной системе. Частота повторения импульсов 16 кГц, так как это повышает уровень средней мощности. Ток питания матрицы 0.2 А, это максимально возможный ток работы матрицы, указанный производителем.

На рис. 6 показаны данные проведенного исследования влияния температуры свето- и фотодиодов на величину выхода с усилителя сигнала. С увеличением температуры наблюдается уменьшение сигнала.

В эксперименте использовались несколько газовых смесей метана в азоте, концентрации были следующими: 1%, 0.1%, 0.05%,

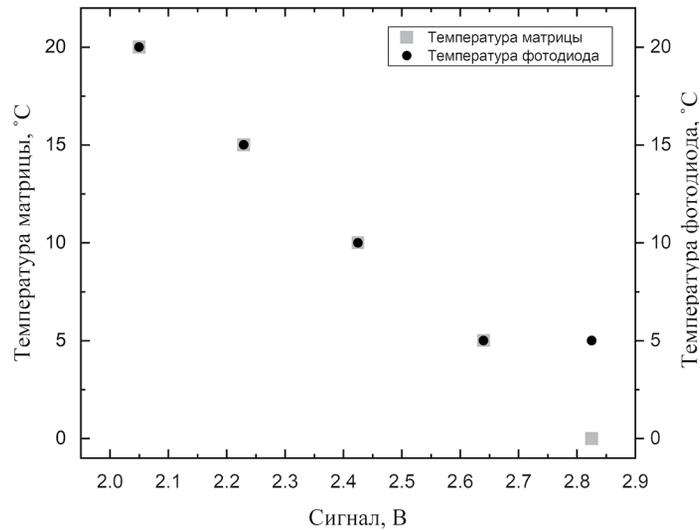


Рис. 6. Зависимость уровня выходного сигнала от температур, установленных на матрице и фотодиоде.

Таблица 3. Результаты тестирования течейскаателя при разных концентрациях метана

Смесь газов	Концентрация CH <sub>4</sub> , ppm	Выходной сигнал, В	Стандартное отклонение, мВ	Стандартное отклонение, ppm
Сжатый азот	0	2.825	1	30
CH <sub>4</sub> +N <sub>2</sub>	100	2.821	1.8	54
CH <sub>4</sub> +N <sub>2</sub>	500	2.810	1.2	36
CH <sub>4</sub> +N <sub>2</sub>	1000	2.800	1.2	36
CH <sub>4</sub> +N <sub>2</sub>	10000	2.672	2.2	66

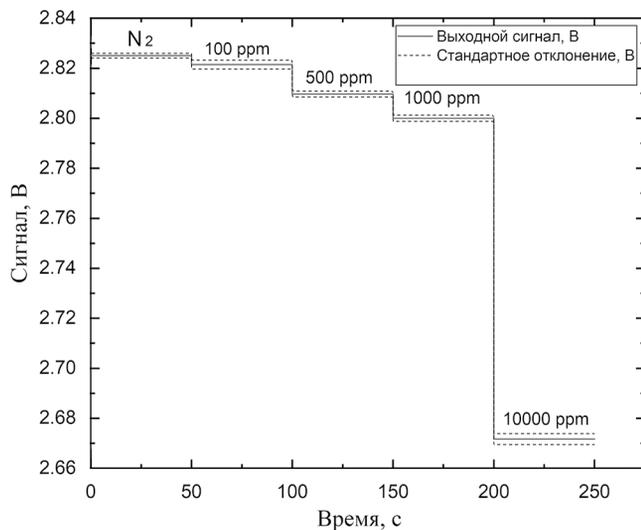


Рис. 7. Результаты тестирования течейскаателя при разных концентрациях метана.

при различных концентрациях метана представлены в табл. 3 и на рис. 7.

Стандартное отклонение сигнала связано с шумами фотодиода формулой

$$S = \sqrt{\frac{\sum (U_i - \bar{U})^2}{n - 1}}, \quad (2)$$

где  $n$  – количество измерений, для каждой концентрации было проведено 10 экспериментов.

По результатам экспериментов построена зависимость уровня сигнала от концентрации метана в ячейке, представленная на рис. 8.

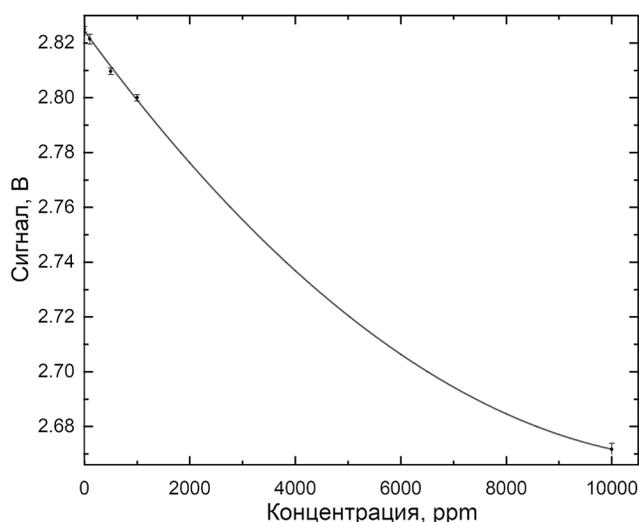
Изменению сигнала на 1 мВ соответствует концентрация метана примерно 30 ppm. Ожидаемая пороговая чувствительность 55–60 ppm CH<sub>4</sub>.

## 5. ВЫВОДЫ

В данной работе представлены результаты исследования течейскаателя метана на основе абсорбционной спектроскопии с применением диодной матрицы с длиной волны около 3.3 мкм.

0.01%. Установлены температуры для матрицы 0 °С и для фотодиода 5 °С, погрешность составила 0.1 °С.

Для продувки ячейки использовался сжатый азот первого сорта, объемная доля азота не менее 99.99%. Результаты тестирования системы



**Рис. 8.** Зависимость уровня сигнала от концентрации метана в ячейке.

Для системы подобран оптимальный режим работы, выполнена температурная стабилизация. В ходе проведенного исследования получена пороговая чувствительность примерно 60 ppm  $\text{CH}_4$ . Данный детектор газа является недорогим, компактным и имеет достаточную чувствительность для поиска утечек метана, а также для решения задач геологоразведки.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Результаты работы по исследованию абсорбционного течеискателя метана выполнены в рамках госзадания FSUS-2020-0036.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Табарин В.А., Шестаков А.В., Чжан Ю.В., Ермаков А.А., Палант А.И. // Транспорт на альтернативном топливе. 2014. № 4 (40). С. 80.
2. Щербакова С.Н., Венгеров А.С. // Российский химический журнал. 2021. № 4. С. 5.
3. Белов М.Л., Титаренко К.С., Городничев В.А. // Радиостроение. 2020. № 5. С. 51.
4. Трофимова Г.И., Трофимов Н.И., Бакушкина И.А., Черемисина В.Г. // Символ науки. 2016. № 11. С. 165.
5. Жилиба А.И., Вандышева Г.А., Грибанов К.Г., Захаров В.И. // Environmental Dynamics and Global Climate Change. 2011. Т. 2. № 1. С. 1. <http://doi.org/10.17816/edgcc211-14>
6. Агеев Б.Г., Грицута А.Н., Клишкин А.В., Куряк А.Н., Осипов К.Ю., Пономарёв Ю.Н., Симонова Г.В. // КЭ. 2017. Т. 47. № 10. С. 956.
7. Bielecki Z., Stacewicz T., Smulko J., Wojtas J. // Appl. Sci. 2020. V. 10. P. 5111. <http://doi.org/10.3390/app10155111>
8. Каталог продукции ЛЕД Микросенсор НТ. <http://ru.lmsnt.com>
9. Karapuzikov A.A., Sherstov I.V., Kolker D.B., Karapuzikov A.I., Kistenev Yu.V., Kuzmin D.A., Styrov M.Yu., Dukhovnikova N.Yu., Zenov K.G., Boyko A.A., Starikova M.K., Tikhonyuk I.I., Miroshnichenko I.B., Miroshnichenko M.B., Myakishev Yu.V., Loconov V.N. // Physics of wave phenomena. 2014. V. 22. P. 189. <http://doi.org/10.3103/S1541308X14030054>
10. HITRAN molecular spectroscopic database. <https://hitran.org/>