Недисперсионный инфракрасный датчик углеводородов на основе оптопар из $p-n$-гетероструктур InAsSbP/InAs(Sb)

© Р.Э. Кунков, С.А. Карандашев, А.А. Климов, Т.С. Лухмырина, М.А. Ременный

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

E-mail: Kunkov.re@mail.ioffe.ru

Поступила в Редакцию 5 мая 2026 г.
В окончательной редакции 22 июля 2026 г.
Принята к публикации 19 августа 2026 г.

Сообщается о разработке недисперсионного инфракрасного датчика углеводородов на основе свето- и фотодиодов из гетероструктур *n*-InAs/*n*-InAsSbP/InAs(Sb)/*p*-InAsSbP, работающих в спектральной полосе поглощения метана и других углеводородов 3–3.5 мкм. Приведены результаты исследования фотоэлектрических и люминесцентных свойств используемых оптоэлектронных компонентов в интервале температур 200–375 K и результаты испытаний газового датчика в интервале температур $-20-+50\,^{\circ}$C и интервале концентраций метана 100 ppm — 100 об.%. Показано достижение порога обнаружения метана не более 25 ppm (23 °C) при длительности выборки 30 мс, частоте опроса 1 Гц, оптическом пути 5 см и энергопотреблении менее 8 мВт.

Ключевые слова: гетероструктуры InAsSb, средневолновые ИК светодиоды, средневолновые ИК фотодиоды, недисперсионный газовый датчик, газовый анализ, датчик углеводородов.

DOI: 10.61011/FTP.2026.10.64211.9768

1. Введение

Газовые датчики углеводородов (англ. Hydrocarbons — HC), в частности метана, являются крайне распространенными и востребованными, так как данные вещества относятся к классу горючих и взрывоопасных соединений. Одним из наиболее перспективных подходов к созданию таких датчиков является недисперсионный инфракрасный (англ. Non-Dispersive InfraRed — NDIR), основанный на селективном поглощении молекулами газа ИК излучения, который, несмотря на наличие ограничений по избирательности и чувствительности, позволяет достичь порог обнаружения до 1 ppm [1]. Классическими считаются датчики на основе накальных источников и пироэлектрических приемников ИК излучения [2], которые ценят за относительно высокую точность и большой срок службы, но они ограничены высоким энергопотреблением и низким быстродействием оптоэлектронных компонентов (ОЭК). Современной альтернативой выступают датчики на основе относительно недорогих термобатарей и тепловых источников на основе MEMS технологий [3], использование которых позволило существенно снизить энергопотребление. Также распространены сенсоры, в которых используются фотодиоды (ФД) и оптически возбуждаемые светодиоды (СД) на основе солей свинца [4], к преимуществам которых относят низкое энергопотребление. Однако недостатками последних являются невысокая точность и дрейф параметров ОЭК.

Несмотря на долгую историю разработки и внедрения NDIR сенсоров метана, задача разработки подобных устройств не теряет своей актуальности. Это подтверждается, в том числе, списком коммерчески доступных аналогов, разработка или модернизация которых проводилась в последние годы [2–4], что является следствием как развития оптоэлектронной компонентной базы и уровня микроэлектроники в целом, так и возрастающих требований разработчиков газоаналитического оборудования, направленных на уменьшение размеров, веса и энергопотребления (тренд на минимизацию SWaP — Scale, Weight and Power). При этом используемые ОЭК во многом определяют достижимые параметры датчика, такие как точность и измеряемый диапазон, средняя потребляемая мощность и срок службы. В дополнение к этому детекторы углеводородов должны разрабатываться согласно международным требованиям взрывозащищенности, которые, в том числе, ограничивают температуру элементов конструкции, интегральную мощность излучения, напряжение питания и потребляемый ток. Вследствие этого перспективной альтернативой является разработка инфракрасных датчиков, использующих СД и ФД на основе гетероструктур (ГС) из твердых растворов InAsSb(P), характеризующихся низким энергопотреблением, большим сроком службы и относительно невысокой стоимостью [5,6]. Перспективность данного подхода, в том числе, подтверждается рядом уже опубликованных работ, касающихся разработки NDIR сенсоров углекислого газа на основе СД и ФД [7,8]. Данная работа является продолжением работы [9] и во многом опирается на ее результаты. Однако в ходе данной работы решались задачи: по разработке оптической схемы с измерительным и опорным каналами для детектирования метана и других HC на основе СД и ФД из ГС *n*-InAs/*n*-InAsSbP/InAs(Sb)/*p*-InAsSbP, а также повышению эффективности их работы как оптопар в широком интервале температур; разработка на их основе малогабаритного NDIR сенсора с увеличенной относительно данных работы [9] длиной оптического

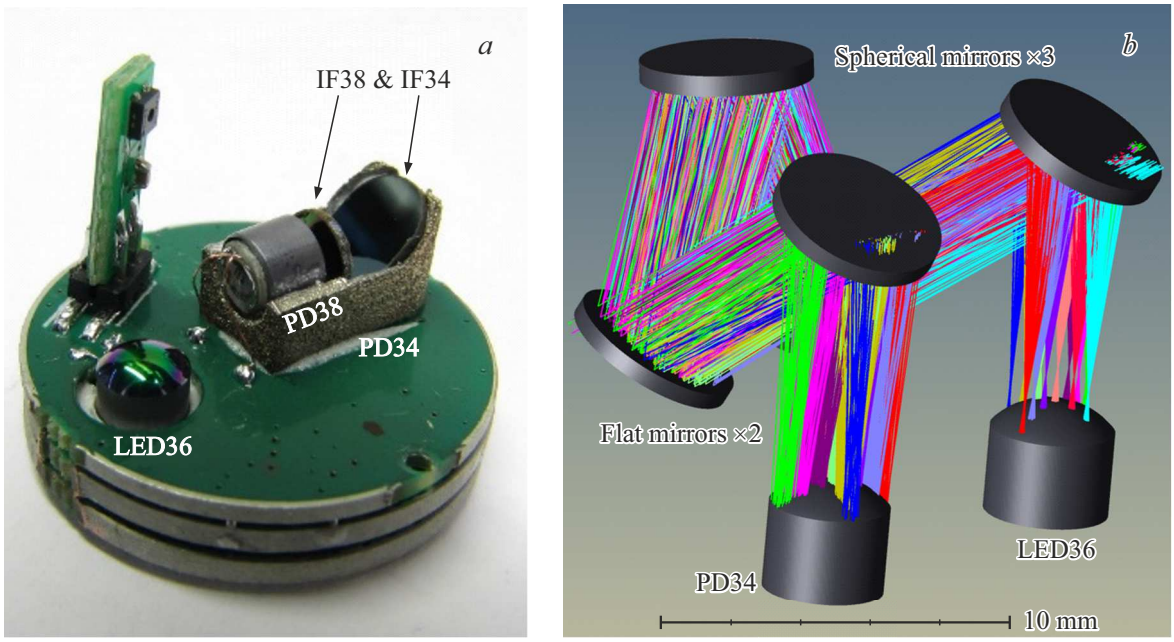

Рис. 1. Изображения полусборки без корпуса и оптики (a) и оптической схемы датчика (b).

пути, меньшим временем выборки и сниженным энергопотреблением.

2. Результаты и обсуждение

В ходе данной работы была разработана многоходовая оптическая схема датчика с длиной оптического пути ≥ 5 см и технология ее изготовления, которая позволила сохранить стандартные внешние размеры датчика: $\varnothing 20 \times 16$ мм (рис. 1).

Кроме этого, следует отметить, что выбор ОЭК для детектирования метана и других НС не настолько очевиден, как для детектирования углекислого газа [9], в связи с близостью полос поглощения метана и паров воды в области ~ 3 мкм и „хвоста“ полосы поглощения метана вплоть до 3.8 мкм, что осложняет выбор фотодиода опорного канала. Одним из используемых вариантов является оптическая схема, в которой используется опорный канал с максимумом спектра чувствительности ~ 3 мкм и заграждающий фильтр, отсекающий полосы поглощения воды. В данной работе предложен вариант, представленный на рис. 2, a, в котором фотодиод опорного канала и его интерференционный фильтр расположены в полосе длин волн ~ 3.8 мкм; измерительный канал „нацелен“ на максимум полосы поглощения метана ($\lambda \approx 3.35$ мкм); максимум излучения СД расположен вблизи 3.8 мкм, что обеспечивает относительно равномерную накачку обоих каналов. Для данных оптоэлектронных компонентов были проведены исследования фотоэлектрических и люминесцентных свойств, аналогичные работе [9]. Интегральные сигналы оптопар измерительного (LED36-IF34-PD34) и опорного (LED36-IF38-PD38) каналов, а также среднеквадратичные шумы в полосе частот $\Delta f = 1$ Гц при работе совместно с используемым в датчике углекислого газа операционном усилителе (ОУ) ADA4897-1 [10], а также с ОУ OPA838 [11] представлены на рис. 2, b. Для расчета шумов ФД в составе фотоприемного устройства с ОУ использовались результаты работы [12], в которой рассматриваются три основных источника шума: сам ФД, характеризующийся тепловым шумом „темнового“ сопротивления R_0; ОУ, характеризующийся шумами по току и по напряжению (i_{n_OP} и e_{n_OP}, соответственно); сопротивление обратной связи, также характеризующееся тепловым шумом с сопротивлением R_{fb}. При этом для расчета суммарного токового шума $I_{n|\Sigma}(\Delta f)$ формулируются их токовые эквиваленты, вследствие чего выражение для шума выглядит как

$$I_{n_\Sigma}(\Delta f) = \sqrt{\Delta f} \cdot \sqrt{i^2_{n_\mathrm{PD}} + i^2_{\mathrm{OP}} + i^2_{\mathrm{fb}}}$$

$$= \sqrt{\Delta f} \cdot \sqrt{\frac{4kT}{R_o} + i^2_{n_\mathrm{OP}} + \left(\frac{e_{n_\mathrm{OP}}}{R_0}\right)^2 + \frac{4kT}{R_{\mathrm{fb}}}}\ [\mathrm{A}], \quad (1)$$

где первое слагаемое относится к шумам фотодиода; второе и третье — шумы ОУ по току и напряжению; последнее слагаемое — тепловой шум сопротивления обратной связи трансимпедансного усилителя; Δf — эквивалентная ширина интегрирования полосы шума (англ. — NEB).

Как видно из рис. 2, b, использование OPA838 позволяет добиться меньших шумов при пониженных температурах ввиду его меньших токовых шумов ($1\,\mathrm{пА} \cdot \mathrm{Гц}^{-1/2}$ против $2.4\,\mathrm{пА} \cdot \mathrm{Гц}^{-1/2}$), однако большие шумы по напря-

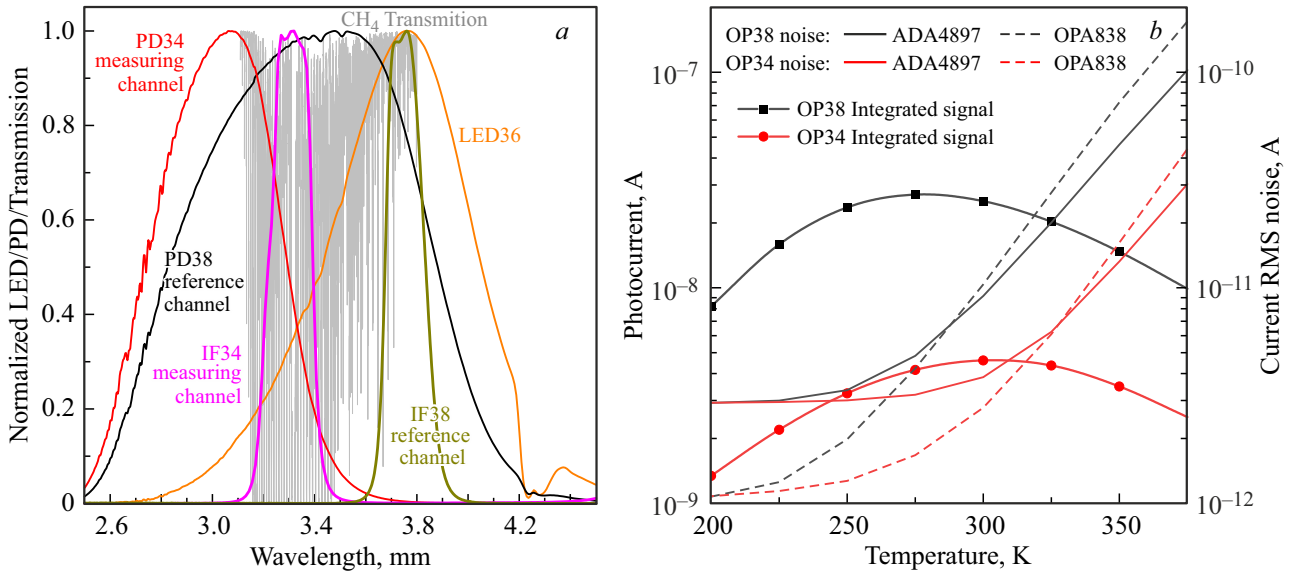

Рис. 2. Нормализованные спектральные характеристики используемых оптоэлектронных компонентов и поглощение CH_4 (a); интегральные сигналы оптопар измерительного и опорного каналов и их шумы при работе совместно с ОУ (300 K) (b).

жению ($1.8\,\text{нВ}\cdot\text{Гц}^{-1/2}$ против $1.1\,\text{нВ}\cdot\text{Гц}^{-1/2}$) приводят к более резкому росту шума при повышенных. При этом выбор OPA838 вместо ADA4897 может быть продиктован его значительно меньшим энергопотреблением в рабочем/спящем режимах (1 мА/2 мкА против 6 мА/130 мкА).

Для полученного прототипа был проведен ряд испытаний: градуировка при фиксированной температуре 23 °C по широкому набору концентраций метана от 100 ppm до 100 об.% (рис. 3, a); зависимости сигналов оптопар в интервале температур $-20-+50\,^\circ$C в чистом азоте и в газовой смеси 5 об.% метана с азотом (рис. 3, c).

Экспериментальные точки, полученные в ходе испытаний аппроксимировались функцией, в которой относительный сигнал $u(c)=\frac{u_{\text{meas}}}{u_{\text{ref}}}$ представляется как [13]

$$u_c = u_0 \int_{-1/2}^{1/2} \exp\left(-\frac{c/c_0}{2\arctan\left(\frac{1}{2a}\right)}\cdot\frac{a}{x^2+a^2}\right)dx, \qquad (2)$$

где $u_0=u(c=0)$, u_{meas} и u_{ref} — сигналы оптопар измерительного и опорного каналов соответственно, c — концентрация газа, а c_0 и a — параметры аппроксимации (рис. 3, b). Расчет оптимальных c_0 и a производится путем минимизации суммы квадратов отклонений экспериментальных данных градуировки от теоретической кривой:

$$\min_{c_0,a}\sum_{i=1}^{n}\left(u_{\text{exp},i}-u(c_0,a,c_i)\right)^2. \qquad (3)$$

При этом преимуществом данной аппроксимации является необходимость только в двух экспериментальных точках (классические аппроксимации требуют минимум 3 [14,15]), кроме $C=0$, что упрощает „заводскую“ калибровку датчиков. Порог обнаружения по уровню 1σ ($\text{LOD}_{1\sigma}$) определяется как отношение среднеквадратичного отклонения сигнала ($\sigma_u=u_0\cdot\delta u$) и крутизны передаточной функции в точке нулевой концентрации (S), которая определяется как производная в точке ($C=0$). Так как $u(c)=\frac{u_{\text{meas}}}{u_{\text{ref}}}$, то, по правилу перехода погрешности, погрешность определения $\delta u=\sqrt{\delta u_{\text{meas}}^2+\delta u_{\text{ref}}^2}$:

$$\text{LOD}_{1\sigma}=\frac{\sigma_u}{S}=u_0\sqrt{\left(\frac{RMS_{\text{meas}}}{u_{\text{meas}}}\right)^2+\left(\frac{RMS_{\text{ref}}}{u_{\text{ref}}}\right)^2}\Big/\left|\frac{du}{dc}\right|_{c=0}. \qquad (4)$$

По результатам данных двух испытаний мы можем рассчитать „экспериментальный“ порог обнаружения датчика в интервале температур $-20-+50\,^\circ$C и сравнить его с результатами численных оценок, выполненных аналогично предыдущей работе (см. рис. 4) при условии, что в соответствии с ГОСТ погрешность устройства определяется по уровню 2σ (вероятность ошибки 5 %), вследствие чего линии для 1σ и 3σ исключены из рассмотрения. Для выполнения этого по одной точке ($C=5$ об.%) с0 масштабировался в соответствии с рис. 3, b при условии, что параметр $a\approx\text{const}(T)$ слабо зависит от температуры.

Из графика видно, что ход реальной температурной зависимости LOD отличается от модели, что, по-видимому, связано с резкой температурной зависимостью сигнала опорного канала, отличающейся от расчетной, которая привела к относительному росту LOD при понижении температуры. Также видно значительное (≈ 10 раз) отличие от теоретического порога обнаружения при NEB = 10 Гц, которое, однако, хорошо согласуется при учете следующих факторов: при анализе системы цифровой обработки сигнала было получено

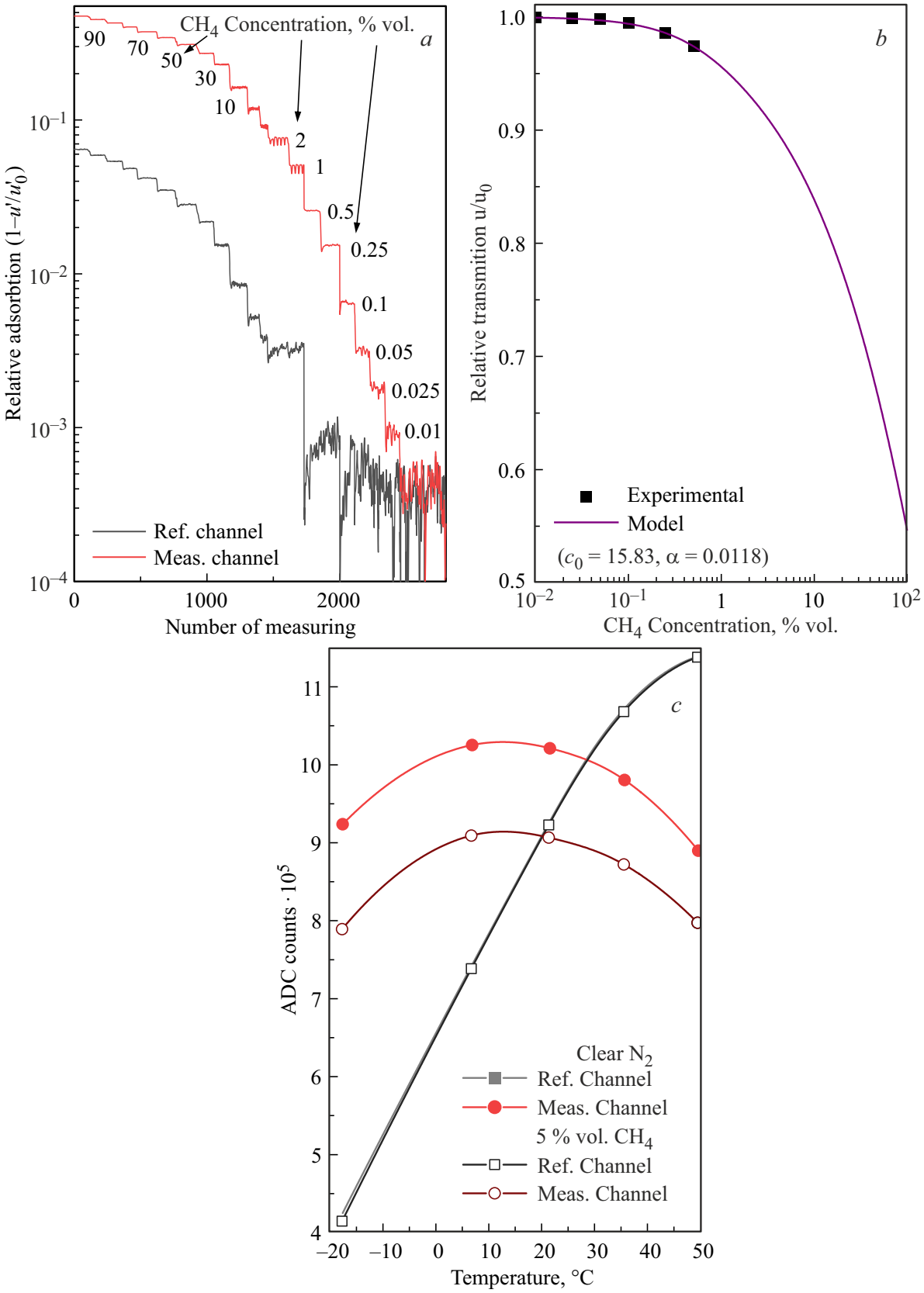

Рис. 3. Градуировка при температуре 23 °C (*a*) и построенная по ней аппроксимация (*b*), зависимость реакции на 5 об.% метана от температуры (*c*).

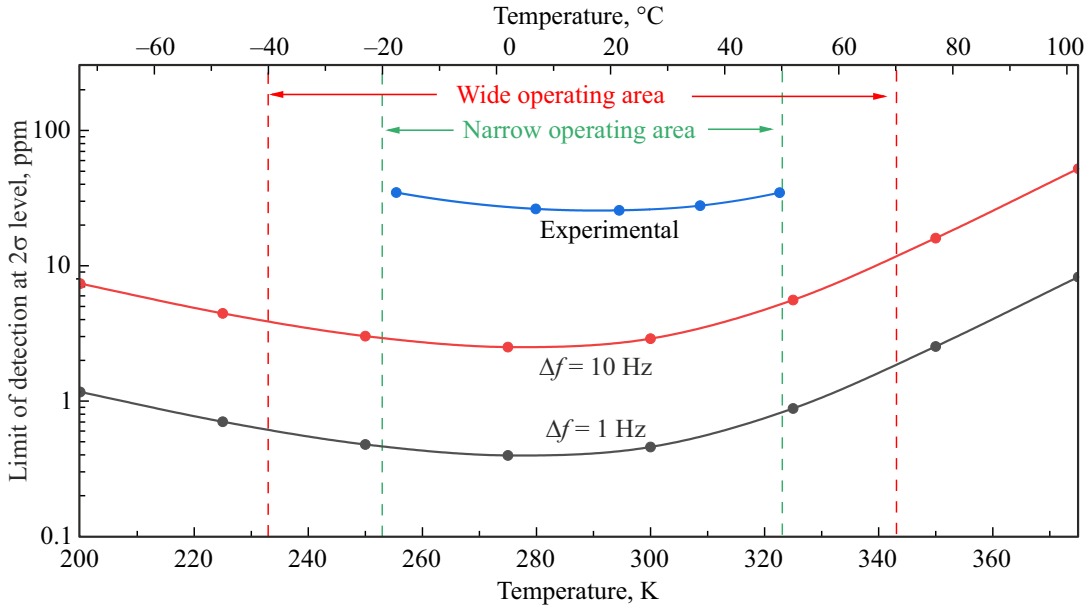

Рис. 4. Температурные зависимости порога обнаружения, рассчитанные для полосы шума 1 Гц, 10 Гц и на основе тестирования прототипа в рабочем диапазоне температур −20 − +50 °C.

Сравнение параметров недисперсионных инфракрасных датчиков CH_4

Разработчик	ФТИ Иоффе (данная работа)	eLichens (Fr) BIL104-5E (2024 г.) [3]	Dynament (UK) Platinum [2]	Optosense (RU) MIPEX-02 [16]	Optosense (RU) MIPEX-05 (2025 г.) [4]
Источник/приемник	ПП InAsSb(P)	MEMS IR + Thermopile	Тепловые	ПП PbS, PbSe	ПП PbS, PbSe
Порог обнаружения	< 0.005 об.% (250–325 K)	0.005 об.% („RT“)	0.05 об.%	0.1 об.%	0.1 об.%
Относительная погрешность	0.1 % показаний	10 % показаний	0.1 (2) % показаний	5 % показаний	5 % показаний
Динамический диапазон	100 об.%	100 об.%	5 (100) об.%	20/100 об.%	20/100 об.%
Время установки сигнала T95	≈ 10 с	≈ 30 с	≈ 30 с	≈ 30 с (60 с с пылевым фильтром)	≈ 15 с (25 с с пылевым фильтром)
Потребляемая мощность при частоте опроса 1 Гц	≈ 8 мВт	0.35 мВт при опросе1 раз в 5.5 с	24–420 мВт	3.5 мВт	0.2 мВт
Диапазон рабочих температур	−20 − +50 °C	−20 − +50 °C	−20 − +50 °C	−20 − +50 °C	−20 − +50 °C

значение NEB ≈ 16 Гц; коэффициент передачи оптики из пяти зеркал с никелевым финишным покрытием составляет ≈ 0.25–0.35; существуют оптические потери, связанные с погрешностями сборки как СД и ФД, так и самих датчиков. Тем не менее был получен порог обнаружения не хуже 35 ppm по уровню 2σ в интервале температур −20 − +50 °C и 25 ppm по уровню 2σ при комнатной температуре.

3. Сравнение с мировым уровнем

Полученные параметры позволяют сравнить разработанный прототип недисперсионного инфракрасного датчика метана с коммерчески доступными аналогами, параметры которых приведены в таблице. Сравнение с приведенными данными показывает, что разработанный прототип превосходит лучшие зарубежные аналоги по порогу обнаружения целевого газа: в 15–20 раз в сравнении с датчиком компании „Dynament“ и в ≈ 50 раз в сравнении с отечественным датчиком компании „Optosense“.

При этом разработанный прототип имеет малое энергопотребление, недостижимое для NDIR датчиков на основе классических тепловых источников и приемников [2], не сильно уступая в этом параметре и их современным аналогам, использующим источники и тер-

мобатареи на основе MEMS технологий (с поправкой на частоту опроса) [3]. При этом разработка имеет перспективы дальнейшего уменьшения энергопотребления вплоть до значений $\leqslant 0.5$ мВт при частоте опроса 1 Гц.

4. Заключение

Были получены и исследованы свето- и фотодиоды, содержащие гетероструктуры n-InAs/n-InAsSbP/InAs(Sb)/p-InAsSbP, работающие в полосе поглощения углеводородов ≈ 3.4 мкм и полосе опорного канала ≈ 3.8 мкм в интервале температур 200–400 K, на основе которых был разработан недисперсионный малогабаритный датчик метана, характеризующийся порогом обнаружения ≤ 35 ppm в диапазоне температур $-20 - +50\,^{\circ}$C (25 ppm при 23 °C) при времени выборки 30 мс и частоте опроса 1 Гц, оптическом пути 5 см и энергопотреблении < 8 мВт.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] Е.А. Кочелаев, В.В. Петров. Опт. и спектр., **131** (10), 1431–1440 (2023). DOI: 10.61011/OS.2023.10.56895.5312-23

[2] Platinum Series Standard Methane NDIR Gas Sensor. Data Sheet. Rev. 8. Dynament Ltd., 2015. URL: dynament.com (дата обращения: 30.04.2026).

[3] BIL104-5E NDIR Methane Gas Sensor. Technical Specification. eLichense Co., Ltd., 2024. URL: elichense.com (дата обращения: 30.04.2026).

[4] Датчики оптические газовые серии MIPEX-05. Техническое описание. (ООО „Оптосенс“, Санкт-Петербург, 2026). URL: optosense.ru (дата обращения: 30.04.2026).

[5] С.А. Карандашев, Б.А. Матвеев, М.А. Ременный. ФТП, **53** (2), 147 (2019). DOI: 10.21883/FTP.2019.02.47124.8961

[6] А.А. Климов, Р.Э. Кунков, Т.С. Лухмырина, Б.А. Матвеев, М.А. Ременный. ФТП, **59** (6), 332 (2025). DOI: 10.61011/FTP.2025.06.61568.8070

[7] Б.А. Матвеев, В.И. Ратушный, А.Ю. Рыбальченко, Г.Ю. Сотникова. Глобальная ядерная безопасность, **1**, 110 (2011).

[8] С.Е. Александров, Г.А. Гаврилов, А.А. Капралов, Б.А. Матвеев, М.А. Ременный, Г.Ю. Сотникова. ЖТФ, **88** (9), 1433 (2018). DOI: 10.21883/0000000000

[9] Р.Э. Кунков, С.А. Карандашев, А.А. Климов, Т.С. Лухмырина, М.А. Ременный. Опт. и спектр., **133** (11), 1169 (2025).

[10] ADA4897-1/ADA4897-2/ADA4898-1/ADA4898-2. Data Sheet. Rev. C. Analog Devices, Inc., 2015. URL: analog.com (дата обращения: 30.04.2026).

[11] OPA838 1-mA, 300-MHz Gain Bandwidth, Voltage-Feedback Op Amp. Data Sheet. Rev. E. Texas Instruments, Inc., 2023. URL: https://www.ti.com/lit/ds/symlink/opa838.pdf (дата обращения: 30.04.2026).

[12] Г.А. Гаврилов, Б.А. Матвеев, Г.Ю. Сотникова. Письма ЖТФ, **37** (18), 50 (2011).

[13] K.-D. Kim, K.-S. Song, H.-U. Hwang, C.-M. Choe, S.-J. Im, J.-S. Pae, C.-S. Ri, K.-S. Ho. AIP Advances, **14** (10), 105220 (2024). DOI: 10.1063/5.0232201

[14] W. Ye, Z. Tu, X. Xiao, A. Simeone, J. Yan, T. Wu, F. Wu, C. Zheng, F.K. Tittel. Sensors, **20** (19), 5461 (2020). DOI: 10.3390/s20195461

[15] A. Schliesser, N. Picqué, T.W. Hänsch. Nature Photonics, **6** (7), 440 (2012). DOI: 10.1038/nphoton.2012.142

[16] Датчики оптические газовые серии МИП-ВГ. Техническое описание (ООО „Оптосенс“, Санкт-Петербург, 2026). URL: optosense.ru (дата обращения: 30.04.2026).

Редактор А.Н. Смирнов

Hydrocarbons NDIR sensor based on InAsSbP/InAs(Sb) $p-n$-heterostructures optopairs

R.E. Kunkov, S.A. Karandashev, A.A. Klimov, T.S. Lukhmyrina, M.A. Remennyi

Ioffe Institute,
194021 St. Petersburg, Russia

Abstract This study presents the development of a non-dispersive infrared (NDIR) hydrocarbon sensor based on n-InAs/n-InAsSbP/InAs(Sb)/p-InAsSbP LEDs and photodiodes operating in the 3–3.5 μm absorption band. Electroluminescence and photoelectric characteristics were investigated in the temperature range of 200–375 K. The developed sensor achieves a detection threshold of 50 ppm with a 30 ms sampling time at a 1 Hz rate, an optical path of 5 cm, and power consumption below 8 mW.