23

# Инфракрасный сенсор углекислого газа на основе свето- и фотодиодов из твердых растворов InAsSb(P)

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

ФТИ им. А.Ф. Иоффе,
Санкт-Петербург, Россия

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

*Поступила в редакцию 30.04.2025 г.*
*В окончательной редакции 28.08.2025 г.*
*Принята к публикации 24.10.2025 г.*

Сообщается о результатах разработки и исследования свето- и фотодиодов на основе гетероструктуры $n$-InAs/N-InAsSbP/InAsSb/P-InAsSbP с рабочей длиной волны около 4.2 $\mu$m ($T = 296$ K). Приведены данные исследования электролюминесценции и фотоэлектрических характеристик в интервале температур 200–500 K. Сообщается о результатах разработки на основе вышеуказанных компонентов недисперсионного малогабаритного датчика углекислого газа, характеризующегося порогом обнаружения не более 25 ppm при частоте выборок 128 ms, оптическом пути 2 cm и энергопотреблении менее 50 mW.

**Ключевые слова:** гетероструктуры InAsSb, средневолновые ИК светодиоды, средневолновые ИК фотодиоды, недисперсионный газовый датчик углекислого газа.

DOI: 10.61011/OS.2025.11.62165.7969-25

## Введение

Углекислый газ ($CO_2$) является ежедневным спутником жизнедеятельности человека, проявления негативного влияния которого на организм человека начинаются при концентрациях около 0.1–0.15 %vol (1000–1500 ppm), поэтому допустимые уровни содержания углекислого газа в производственных, офисных и жилых помещениях строго регламентируются, а важность его контроля является общепризнанной.

Одним из наиболее перспективных подходов к созданию датчиков диоксида углерода является инфракрасный (ИК) недисперсионный (Non-dispersive Infrared — NDIR), основанный на избирательном поглощении ИК излучения молекулами газа и характеризующийся высокой селективностью к газу, большим сроком службы и чувствительностью вплоть до единиц ppm [1]. Очевидно, что параметры используемых оптоэлектронных компонентов во многом определяют достижимые уровни пороговой чувствительности и точности сенсора. На сегодняшний день наибольшее распространение получили датчики на основе тепловых источников и приемников ИК излучения [2], характеризующиеся высоким энергопотреблением, низким быстродействием и относительно невысокой чувствительностью. Также используются ИК (средневолновые) сенсоры, в которых используются фотодиоды и оптически возбуждаемые светодиоды на основе солей свинца [3], недостатком которых считается отсутствие долговременной стабильности.

Перспективной альтернативой является разработка ИК датчиков, использующих свето- и фотодиоды на основе материалов $A^3B^5$, в частности гетероструктур из твердых растворов InAsSb(P), характеризующихся высокой металлургической стабильностью и относительно невысокой стоимостью. В ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН на протяжении многих лет проводятся разработка и исследование оптоэлектронных компонентов на основе твердого раствора InAsSb, в том числе работающих в диапазоне длин волн около 4.2 $\mu$m [4–6], и оптических датчиков на их основе [7]. Задачами настоящей работы являлись улучшение характеристик оптоэлектронных компонентов (свето- и фотодиодов (СД и ФД далее)), повышение эффективности их работы как оптопары в широком интервале температур, разработка на их основе малогабаритного недисперсионного датчика углекислого газа с высоким уровнем интегрированности оптических, оптоэлектронных и электронных компонентов.

## Экспериментальные результаты

Исследуемые образцы свето- и фотодиодов были изготовлены из гетероструктуры N-InAsSbP/InAsSb$_x$/P-InAsSbP с активной/фоточувствительной областью InAsSb$_x$ ($x = 0.08$) толщиной 3–4 $\mu$m, выращенной методом ЖФЭ на подложках $n^+$-InAs (100). Характерными чертами конструкции свето- и фотодиодов являлись флипчип-конструкция с диаметром активной/фоточувствительной области около 140 $\mu$m и вводом/выводом излучения через подложку толщиной 20–40 $\mu$m, иммерсионное сопряжение чипа с линзой из Si диаметром 3.5 mm с просветляющим покрытием.

На рис. 1 приведены спектральные характеристики электролюминесценции при токе накачки 200 mA в непрерывном режиме и фоточувствительности в интервале температур 200–500 K.

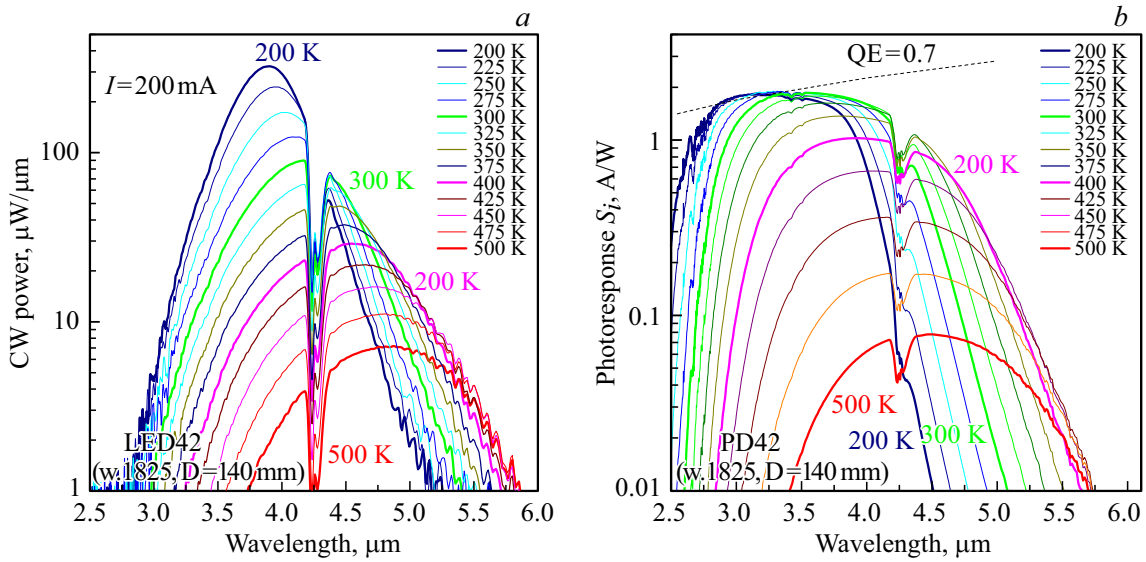



**Рис. 1.** Спектры электролюминесценции ($a$) и токовой чувствительности ($b$) в интервале температур 200–500 K.

По сравнению с ранее опубликованным результатами впервые продемонстрирована возможность работы средневолновых оптоэлектронных компонентов при столь высоких температурах (до 500 K), увеличены токовая чувствительность и „темновое“ сопротивление ФД, а также выходная мощность СД [8]. Улучшение параметров стало возможным благодаря оптимизации дизайна эпитаксиальной структуры, в частности благодаря уменьшению толщины активной/фоточувствительной области, что привело к уменьшению самопоглощения излучения и уменьшению темнового тока.

На основе вышеописанных компонентов, а также ранее разработанного иммерсионного фотодиода с рабочей длиной волны 3.8 $\mu$m, отмеченного на рисунках как PD38, был разработан малогабаритный недисперсионный оптический датчик со следующими характерными особенностями: оптическая схема с измерительным и опорным каналом, в которой излучение от светодиода (LED42) делится и фильтруется с помощью интерференционных оптических фильтров (IF42 и IF38) и фокусируется на измерительный (PD42) и опорный (PD38) каналы. Нормированные спектральные характеристики указанных компонентов для комнатной температуры, а также спектр пропускания углекислого газа в используемом диапазоне длин волн приведены на рис. 2, $a$. На рис. 2, $b$ представлены температурные зависимости интегральных сигналов оптопар измерительного (LED42-IF42-PD42) и опорного (LED42-IF38-PD38) каналов, рассчитанные по формуле

$$I_{ph} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} P_{\mathrm{LED}}(\lambda) T_{\mathrm{IF}x}(\lambda) S_{\mathrm{IPD}x}(\lambda) d\lambda, \qquad (1)$$

где $P_{\mathrm{LED}}(\lambda)$ — спектральная зависимость мощности LED42, $T_{\mathrm{IF}x}(\lambda)$ — спектр пропускания интерференционного фильтра, $S_{\mathrm{IPD}x}(\lambda)$ — спектр токовой чувствительности фотодиода для соответствующей оптопары.

Основываясь на полученных зависимостях „темнового“ сопротивления от температуры (рис. 3, $a$), были рассчитаны шумы фотоприемника отдельно и совместно с операционным усилителем первого каскада ADA4895-1. Расчет производился для полосы частот $\Delta f = 1$ Hz за пределами влияния шумов $1/f$ по формуле [9]

$$I_{n_\Sigma}(\Delta f) = \Delta f \sqrt{i_{n_PD}^2 + i_{OP}^2 + i_{fb}^2}$$

$$= \Delta f \sqrt{\frac{4kT}{R_o} + i_{n_OP}^2 + \left(\frac{e_{n_OP}}{R_o}\right)^2 + \frac{4kT}{R_{fb}}} \, [A], \qquad (2)$$

где первое слагаемое относится к шумам фотодиода, второе и третье — шумы операционного усилителя (ОУ) первого каскада, последнее слагаемое — тепловой шум сопротивления обратной связи первого каскада. Как видно из рис. 3, $a$, ОУ вносит значительный вклад в шумы, особенно на границах температурного диапазона. При этом в области повышенных температур основной вклад вносят шумы ОУ по напряжению ($e_{n_OP}$), при пониженных вероятнее всего происходит выход на асимптотику теплового шума сопротивления обратной связи $R_{fb}$.

На рис. 3, $b$ приведены температурные зависимости соотношения сигнал/шум, полученные на основе зависимостей, приведенных на рис. 2, $b$ и 3, $a$, и данные для комнатной температуры, полученные на разработанном прототипе датчика углекислого газа. Меньшее экспериментальное значение отношения сигнал/шум, вероятнее всего, связано с большей шириной полосы частот реальных цифровых фильтров и потерями из-за неидеальности оптической системы.

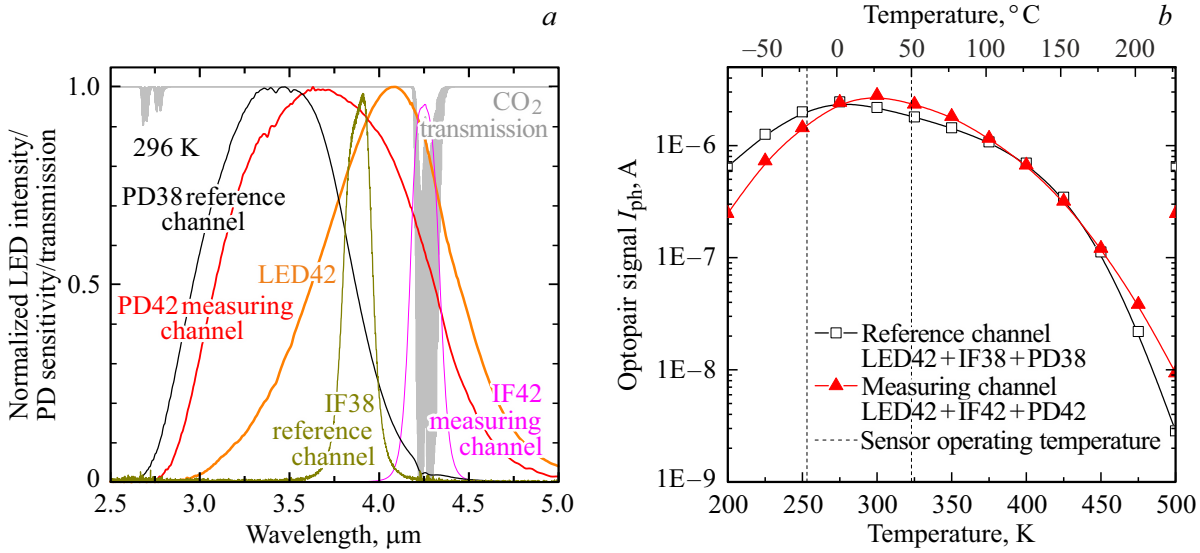



**Рис. 2.** Нормированные спектральные характеристики используемых оптоэлектронных компонентов и поглощение $CO_2$ (*a*); температурные зависимости сигналов оптопар измерительного и опорного каналов (*b*).

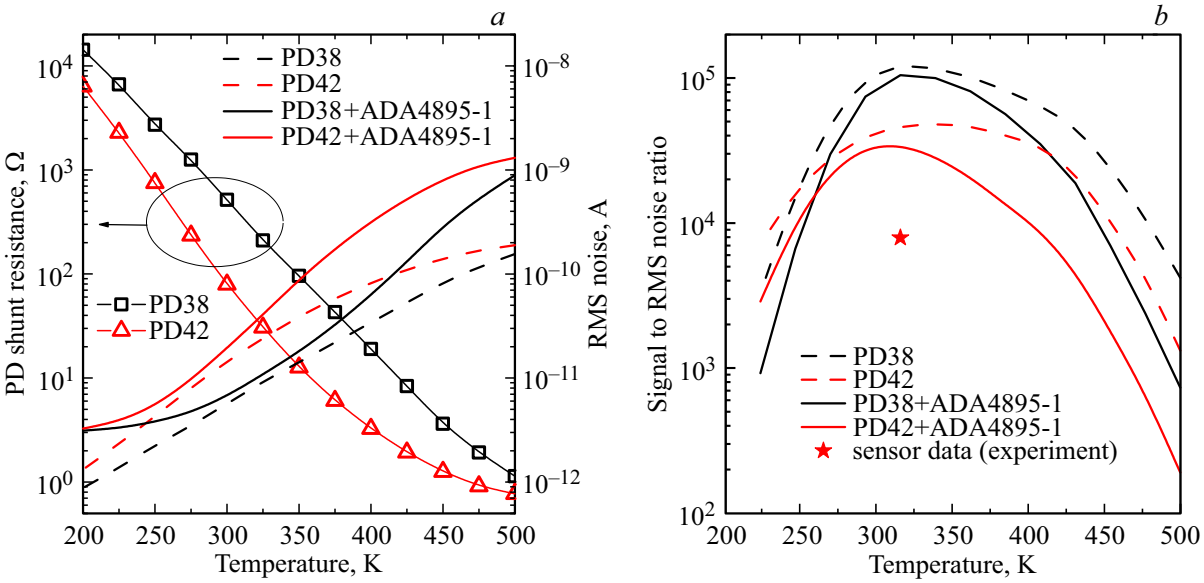



**Рис. 3.** Температурные зависимости темнового сопротивления и величин шумов фотодиодов отдельно и в цепи ОУ (*a*), отношений сигнал/шум оптопар (*b*).

Для оценки порога обнаружения углекислого газа был проведен расчет передаточной функции датчика при комнатной температуре. Для этого по формуле

$$I_{ph} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} (1 - \exp(-k(\lambda)Cd))P_{\text{LED42}}(\lambda)T_{\text{IF42}}(\lambda)S_{\text{IPD42}}(\lambda)d\lambda \tag{3}$$

($k(\lambda)$ — спектральная зависимость коэффициента поглощения углекислого газа, $C$ — концентрация газа в % vol, $d$ — длина оптического пути) проводился расчет интегральных сигналов оптопар с учетом спектра пропускания ИК излучения на длине оптического пути 2 cm. Данные для спектральной зависимости коэффициента поглощения углекислого газа были взяты из открытой библиотеки HITRAN.

Полученная зависимость представлена на рис. 4, *a* в отсчетах АЦП. Из полученных зависимостей SNR и передаточной функции датчика в приближении её малого изменения от температуры был произведен расчет порога обнаружения углекислого газа в диапазоне температур 200–500 K для полосы частот $\Delta f = 1$ Hz, а также нанесены экспериментальные точки, полученные в ходе тестирования прототипа газового датчика при комнатной температуре. Среднеквадратичный шум (СКО) был оценен на уровне 15 отсчетов АЦП при

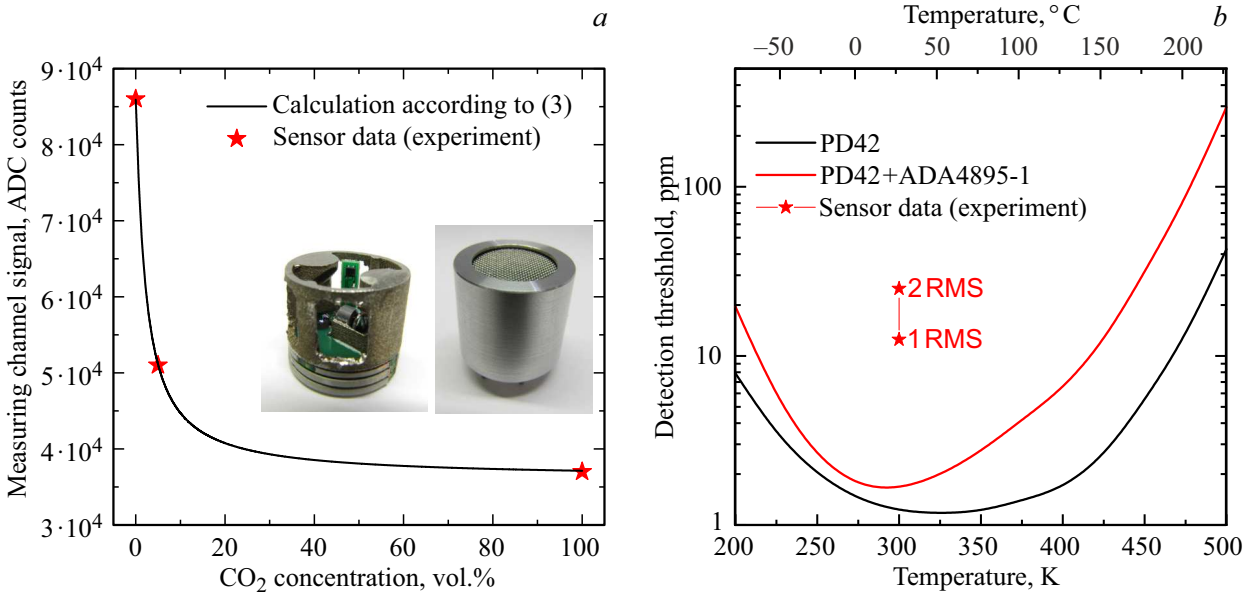



**Рис. 4.** Передаточная функция датчика при комнатной температуре и фотография прототипа (*a*), температурные зависимости порога обнаружения (*b*).

оценке размаха полезного сигнала от 85940 до 37127 отсчетов АЦП, при этом порог обнаружения по уровню 2СКО (95 % измерений при нормальном распределении ошибок) составил $\approx 0.0025$ %vol (25 ppm) Относительная погрешность измерения не превышает 0.1 % полученного значения в диапазоне концентраций до 10 %vol.

Фотография разработанного прототипа датчика углекислого газа приведена на вставке к рис. 4, *a*. Датчик представляет собой полноценное устройство индустриального уровня под управлением микроконтроллера с цифровым выводом сигнала и высокой степенью интеграции используемых компонентов; выполнен в компактном корпусе размером ∅20−16 mm и имеет среднее энергопотребление менее 50 mW.

Было проведено сравнение характеристик экспериментального образца датчика с коммерчески доступными аналогами, которые показали преимущества разработанного датчика по параметрам быстродействия (6−30 раз), порогу обнаружения (до 2 раз) и динамическому диапазону (более 2 раз) [2,3].

## Заключение

Были получены и исследованы свето- и фотодиоды на основе гетероструктуры *n*-InAs/N-InAsSbP/InAsSb/P-InAsSbP с рабочей длиной волны около 4.2 $\mu$m ($T = 296$ K) в интервале температур 200−500 K, на основе которых был разработан недисперсионный малогабаритный датчик углекислого газа, характеризующийся порогом обнаружения не более 25 ppm при частоте выборок 128 ms, оптическом пути 2 cm и энергопотреблении менее 50 mW.

### 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 (2023). DOI: 10.61011/OS.2023.10.56895.5312-23
[2] Инфракрасные недисперсионные газовые датчики компании Dynament (UK). [Электронный ресурс]. URL: http://www.dynament.ru/pdf/tds0048.pdf
[3] Инфракрасные недисперсионные газовые датчики компании Optosense (RU). [Электронный ресурс]. URL: https://optosense.ru/upload/iblock/212/ESAT.100700.00%20%D0%A0%D0%AD.pdf
[4] Н.В. Зотова, Н.Д. Ильинская, С.А. Карандашев, Б.А. Матвеев, М.А. Ременный, Н.М. Стусь, В.В. Шустов, Н.Г. Тараканова. ФТП, **4** (6), 717 (2006).
[5] А.Л. Закгейм, Н.В. Зотова, Н.Д. Ильинская, С.А. Карандашев, Б.А. Матвеев, М.А. Ременный, Н.М. Стусь, А.Е. Черняков. ФТП, **43** (3), 412 (2009).
[6] Н.Д. Ильинская, С.А. Карандашев, Н.Г. Карпухина, А.А. Лавров, Б.А. Матвеев, М.А. Ременный, Н.М. Стусь, А.А. Усикова. ФТП, **50** (5), 657 (2016).
[7] 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
[8] Иммерсионные свето- и фотодиоды, работающие на длине волны 4.2 мкм. [Электронный ресурс]. URL: http://www.ioffeled.com/Specifications/LED42.pdf, URL: http://www.ioffeled.com/Specifications/PD42.pdf
[9] Г.А. Гаврилов, Б.А. Матвеев, Г.Ю. Сотникова. ФТП, **37** (18), 50 (2011).