

14.3

Диодные оптопары на основе InAsSb для сенсоров углекислого газа, работающих в режиме реального времени

© С.Е. Александров, Г.А. Гаврилов, А.А. Капралов, Б.А. Матвеев, М.А. Ременный, Г.Ю. Сотникова

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
194021 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: bmat@iropt3.ioffe.ru, ioffeled@mail.ru

(Поступило в Редакцию 11 января 2018 г.)

Приведены результаты исследования эффективности оптопар, выполненных на неохлаждаемых иммерсионных свето- и фотодиодах на основе твердого раствора InAsSb, обладающих низкими шумами и высоким быстродействием. Исследования показали хорошие перспективы использования предлагаемых оптопар в малогабаритных низковольтных сенсорах углекислого газа: значения пороговой чувствительности сенсора на уровне сотен ppm и погрешности измерений не хуже 5% в широком диапазоне измерения концентраций до 10 v/v% при высоком временном разрешении (50 ms) и малом объеме пробы (не более 50 ml). Достигнутые повышение быстродействия и снижение объема пробы расширяют диагностические возможности капнографии и открывают возможности использования аппаратуры в педиатрии и капнографии бокового потока, включая измерение „мгновенных“ значений концентрации CO₂ в процессе дыхания.

DOI: 10.21883/0000000000

Введение

Инфракрасная (ИК) спектроскопия закономерно занимает прочное место среди надежных и экспрессных методов качественного и количественного анализа состава газовых, жидких и твердых смесей веществ [1]. Для реализации на практике методов ИК спектроскопии в последние годы все более активно используется диодная (оптоэлектронная) элементная база на основе узкозонных полупроводников A³B⁵, обеспечивающая возможность проведения оптических измерений в среднем ИК диапазоне спектра (3–5 μm) [1–3]. Применительно к измерению концентрации углекислого газа одна из первых конструкций оптоэлектронных сенсоров или, другими словами оптопар, содержала светодиода (СД) с рабочей длиной волны 4.2–4.3 μm на основе полупроводникового твердого раствора InAsSbP и фотосопротивление (ФС) на основе солей свинца [4]. Описанные в [4] конструкции сенсора были впоследствии неоднократно модифицированы и использованы, в частности, при разработке портативных газоанализаторов (ГА) на основе оптопар „иммерсионный СД из InAsSb–ФС на основе PbSe“, выпускавшихся в России [5]. Иммерсионные СД были также использованы в оптико-акустических ГА, обеспечивающих низкий порог обнаружения CO₂ (11 ppm при времени измерения 1 s) [6], но подверженных влиянию вибрационных помех.

Важным шагом в развитии оптических сенсоров CO₂, не чувствительных к вибрациям, явилась разработка и создание неохлаждаемых иммерсионных фотодиодов (ФД) с максимумом чувствительности на длине волны 4.1–4.3 μm на основе твердого раствора InAsSb, обладающих низкими шумами и высоким быстродействием [7], и оптимизация схем детектирования фототоков для низ-

коомных ФД [8]. Это позволило перейти к разработке ГА CO₂ на основе оптопар с минимально возможными напряжением питания и энергопотреблением при высокой точности измерений и небольшом объеме пробы [9–12]. Последнее обстоятельство крайне важно при измерениях CO₂ в выдохе пациентов, особенно для новорожденных детей, имеющих малый объем легких [13]. Кроме этого, высокое быстродействие вышеуказанных сенсоров и высокая скорость газообмена в кювете малого объема являются обязательными для проведения анализа изменения концентрации CO₂ в режиме реального времени (т.е. в капнографии), так как существенно расширяет диагностические возможности медико-биологических исследований и контроля [13]. Вместе с тем вопросы и обсуждение аспектов применения диодных оптопар для измерений CO₂ в режиме реального времени, в частности для капнографии, практически не рассматривались в литературе.

В настоящей работе приводятся и обсуждаются свойства оптоэлектронных сенсоров на основе оптопар СД-ФД применительно к измерению концентрации CO₂, включая измерение „мгновенных“ значений концентрации в процессе выдоха.

1. Метрологические характеристики оптоэлектронного сенсора CO₂

Для анализа работы оптопар в недисперсионных (NDIR) оптических ГА используется предложенная ранее универсальная модель сенсора, описывающая его работу с позиций теории измерительных устройств [14]. В рамках этой модели были введены понятия аппаратной и передаточной функций [11], которые определяют все метрологические характеристики сенсора как измеритель-

ля концентрации газа. Такой подход позволяет сравнить ГА, выполненные на различной элементной базе и при различных условиях работы, определить требования к конфигурации сенсора и режимам работы излучателя и приемника для достижения предельно возможной чувствительности при заданном быстродействии.

Аппаратная функция $A(\lambda, T)$ сенсора представляет собой произведение спектральных характеристик элементов оптопары с учетом их температурных зависимостей. Аналитические выражения $A(\lambda, T)$ были получены на основе статистического анализа большого числа спектральных характеристик СД и ФД на основе InAsSb в широком температурном интервале.

При использовании оптопар со спектральными характеристиками, перекрывающими некоторую полосу $\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1$, аппаратная функция сенсора содержит как информационные (поглощаемые газом), так и неинформационные (не поглощаемые газом) спектральные составляющие и позволяет установить интегральную связь между выходным сигналом сенсора и значением концентрации газа ($C, v/v\%$). В качестве выходного сигнала сенсора удобно использовать безразмерную величину, пропорциональную пропусканию газовой смеси $\tau(C, L, T)$, тогда передаточная функция сенсора описывается интегральным выражением вида

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

где $A(\lambda, T) = S_{PD}(\lambda, T) \cdot I_{LED}(\lambda, T)$ — аппаратная функция сенсора, $S_{PD}(\lambda, T)$ — чувствительность ФД, $I_{LED}(\lambda, T)$ — интенсивность излучения СД, $\alpha(\lambda)$ — спектральный коэффициент поглощения газа, L — длина взаимодействия излучения СД с газом, $U(C, L, T)$ — выходной сигнал ФД при наличии газа, $U_0(L, T)$ — выходной сигнал ФД без газа.

Основной задачей модели является расчет ожидаемой передаточной функции и основных метрологических характеристик сенсора для заданной конфигурации оптопары, а также оценка влияния различных факторов (в первую очередь температуры) на стабильность его показаний. В качестве примера, на рис. 1, *a* показано температурное смещение аппаратной функции сенсора на основе диодной оптопары с максимумом спектральной характеристики $\lambda_{max}(20^\circ\text{C}) = 4.125 \mu\text{m}$ относительно спектральной области пропускания CO_2 , обозначенной серым цветом в верхней части рисунка. На рис. 1, *b* представлено семейство ожидаемых передаточных функций данного сенсора, рассчитанных на основании интегрального выражения (1) для длины взаимодействия с газом $L = 4 \text{ cm}$ и с учетом линейчатой структуры спектра поглощения CO_2 . Адекватность модели для углекислого газа была ранее подтверждена экспериментальной проверкой во ВНИИМ им. Д.И. Менделеева на

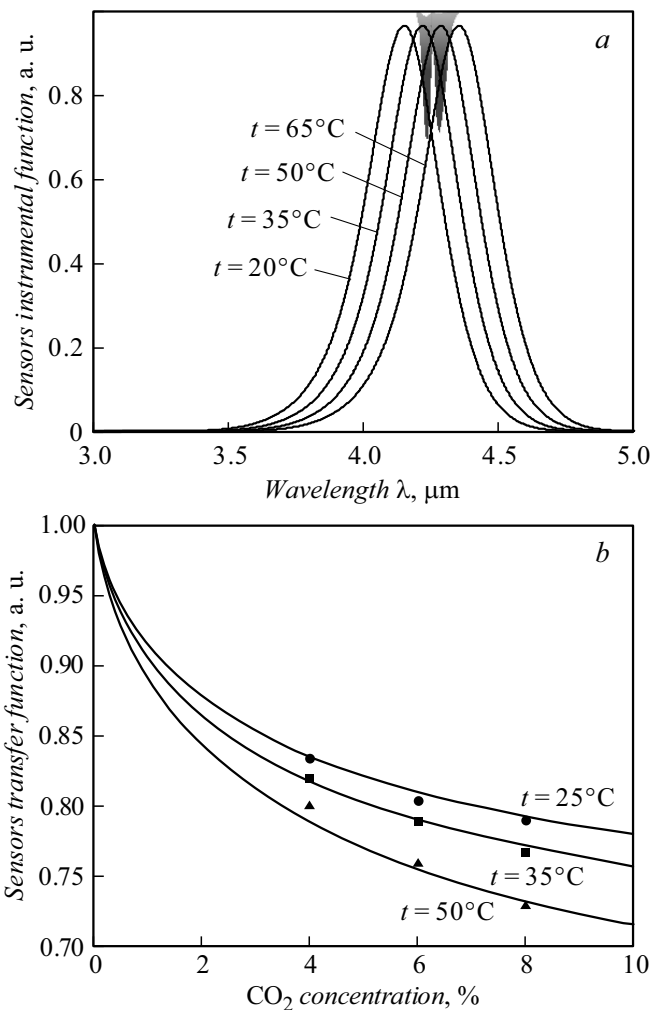


Рис. 1. Аппаратные функции сенсора на основе оптопары СД-ФД при температурах 20, 35, 50 и 65°C . Для наглядности приведен спектр пропускания смеси азота и углекислого газа (*a*) и семейство передаточных функций сенсора для $L = 4 \text{ cm}$ (сплошные линии) (*b*). Точками представлены экспериментальные значения выходного сенсора при различных температурах в процессе его испытаний на калиброванных смесях.

калиброванных смесях CO_2 и N_2 в диапазоне концентраций $0.01 - 10 v/v\%$ [11].

Из рис. 1 видно, что изменение температуры приводит к перераспределению информационных и неинформационных спектральных составляющих аппаратной функции сенсора и, как следствие, к существенному изменению его передаточной функции. Таким образом, корректный расчет концентрации газа возможен либо при условии стабилизации температуры элементов оптопары, либо путем измерения температуры сенсора, например, с помощью контактного термометра и учета ее значений при дальнейших расчетах.

Решение интегрального уравнения (1) является достаточно сложной вычислительной задачей, однако для малых значений приведенных концентраций $CL, v/v \cdot \text{cm}$

можно использовать приближение передаточной функции с набором эффективных значений коэффициента поглощения, $\alpha_{\text{eff}}(T)$, рассчитанных для ряда рабочих температур

$$\tau(C, L, T) = \frac{U(C, L, T)}{U_0(T)} = K(T) \exp[-\alpha_{\text{eff}}(T)LC] + \tau_0(T), \quad (2)$$

где $\tau_0 = \tau(C = 1, L, T)$ — значение выходного сигнала сенсора при температуре T и 100%-й концентрации газа, определяемое наличием неинформативных спектральных составляющих $A(\lambda, T)$, $K(T)$ — коэффициент, определяемый при калибровке сенсора и отражающий вклад информативных спектральных составляющих $A(\lambda, T)$.

Расчеты показывают, что для сенсора углекислого газа на основе рассматриваемых диодных оптопар приближение (2) справедливо для значений $CL \leq 0.2 \text{ v/v} \cdot \text{cm}$.

Минимальное регистрируемое изменение пропускания $d\tau$ обратно пропорционально значению отношения сигнал/шум, Ψ , реализуемого в измерительной схеме сенсора при заданном быстродействии. Чувствительность сенсора ($d\tau/dC$) и связанные с ней значения погрешности измерений (dC) и порога обнаружения (Limit Of Detection — LOD) можно рассчитать из приближенного выражения (3)

$$dC = 1/(\Psi d\tau/dC) = 1/(\Psi L \cdot \alpha_{\text{eff}}(T) K(T) \exp(-\alpha_{\text{eff}}(T)LC)), \quad \text{LOD} = \frac{1}{\Psi L \alpha_{\text{eff}}(T) K(T)}. \quad (3)$$

Нетрудно видеть, что произведение (ΨLK) можно рассматривать как параметр эффективности сенсора, и получение его максимально возможного значения является основной задачей при разработке газоанализаторов с предельными характеристиками по чувствительности и заданном быстродействии.

Повышение эффективности использования зондирующего ИК излучения и снижение шумов фотодетектора позволяет повысить значение Ψ и уменьшить длину взаимодействия излучения с газом, сохраняя высокое значение (ΨLK). Для капнографии это приводит к значительному снижению объема пробы, забираемой у пациента, что расширяет возможности использования аппаратуры в педиатрии и капнографии бокового потока.

2. Описание образцов и их характеристики

Для создания оптопар использовались двойные гетероструктуры $p\text{-InAsSbP}/n\text{-InAsSb}_{0.08}/n\text{-InAs}$, состав и свойства которых достаточно подробно описаны в работах [7,15,16]. Чипы СД и ФД, имеющие круглую мезу с широким круглым анодом диаметром $\sim 0.2 \text{ mm}$, и

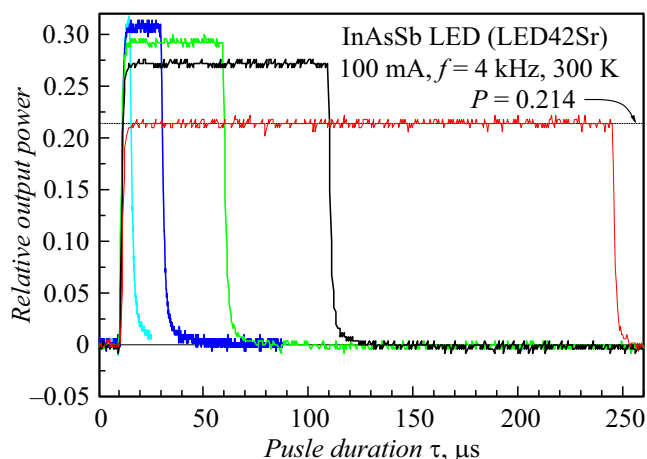


Рис. 2. Осциллограммы выходной мощности СД при 300 К для различных значений длительности тока накачки при его фиксированных амплитуде (100 мА) и частоте (4 кГц).

катод, расположенные на эпитаксиальной поверхности подложки $n\text{-InAs}$, создавались методами стандартной фотолитографии с применением „мокрого“ химического травления. Подробную схему аналогичного чипа с описанием состава и отражательных свойств контактов, а также особенностей перераспределения в нем излучения можно найти в работе [17].

Свободная от контактов поверхность чипа с помощью халькогенидного стекла „приклеивалась“ к плоской поверхности кремниевой линзы в форме „сферы Вейерштрасса“ с просветленной поверхностью, радиусом кривизны 2.6 mm, как было показано ранее, например в [6,7,18]. Диаметр линзы составлял 3.5 mm, а диаметр открытой для излучения части — 3.2 mm. В дальнем поле полуширина диаграммы направленности для СД составляла $\sim 10 \text{ deg}$ [6], при этом на расстоянии 20 mm от линзы формировалось увеличенное изображение активной области СД (мезы) [19]. Диаграмма направленности ФД была также узкой с полушириной $\sim 10 \text{ deg}$ [7]. С увеличением температуры максимумы спектров фоточувствительности ФД и излучения СД смещались в длинноволновую область спектра (рис. 1). При этом при $t = 20^\circ\text{C}$ интегральная мощность СД при токе 200 mA составляла $35 \mu\text{W}$ (CW), а обнаружительная способность в максимуме спектральной характеристики ФД — $2 \cdot 10^{10} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$.

На рис. 2 приведены осциллограммы выходной мощности СД для различных значений длительности тока накачки при его фиксированных амплитуде (100 мА) и частоте (4 кГц), при которой шум $1/f$ обычно меньше теплового шума ФД. Измерения проводились в „стационарном“ режиме, т.е. после окончания переходных процессов, когда разогрев СД за счет джоулева тепла для измерений при фиксированной длительности импульса не менялся в процессе каждого выделенного импульса тока. Так, например, на рис. 2 видно хорошее совпадение мощности излучения при длительности импульса $250 \mu\text{s}$

и постоянного уровня $P = 0.214$. Отметим, что измерения проводились без принудительного охлаждения в „комфортных“ для СД условиях, когда отсутствовала его катастрофическая деградация; зона опасных для СД режимов питания, установленная эмпирически, обозначена заштрихованной областью на рис. 3, *b*.

Наряду с падением мощности излучения, вызванной большой длительностью импульса, следует учитывать также и уменьшение коэффициента преобразования при увеличении тока. Это уменьшение есть фундаментальное свойство средневолновых СД, связанное с ожереконбинацией и приводящее к сублинейности ватт-амперной характеристики [16]. Последнее продемонстрировано данными на рис. 3, *b*, где, в частности, показано, что более чем десятикратное увеличение амплитуды тока при длительности импульса $20 \mu\text{s}$ приводит к возрастанию импульсной оптической мощности всего лишь в 6 раз. Нелинейность ватт-амперной характеристики приводит к тому, что средняя оптическая мощность СД, или, иными словами, величина выходного сигнала оптопары также сублинейно зависит от длительности импульса тока и его амплитуды (рис. 3, *a*). Из данных на рис. 3, *a* видно также, что оптимальным режимом, с точки зрения получения максимального отношения сигнал/шум при использовании СД в газовом сенсоре с частотой импульсов $f = 4 \text{ kHz}$, является режим с небольшой скважностью и амплитудой тока 100–200 мА.

Расходимость лучей СД накладывает ряд ограничений на тип и размеры оптической кюветы, которая ко всему прочему должна иметь минимальный объем для обеспечения возможности быстрого газообмена в капнографах бокового потока. На рис. 4 представлены экспериментальные зависимости фототока ФД от расстояния между

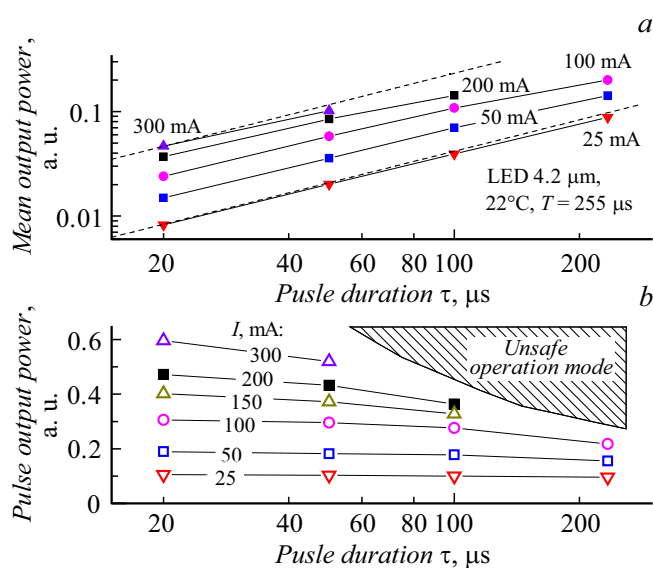


Рис. 3. Зависимости выходной средней (*a*) и импульсной (*b*) мощности излучения СД (LED42 Sr) от длительности импульса тока накачки. Штриховые линии — линейная зависимость вида $P_{\text{mean}} \sim \tau/T$, где T — период следования импульсов.

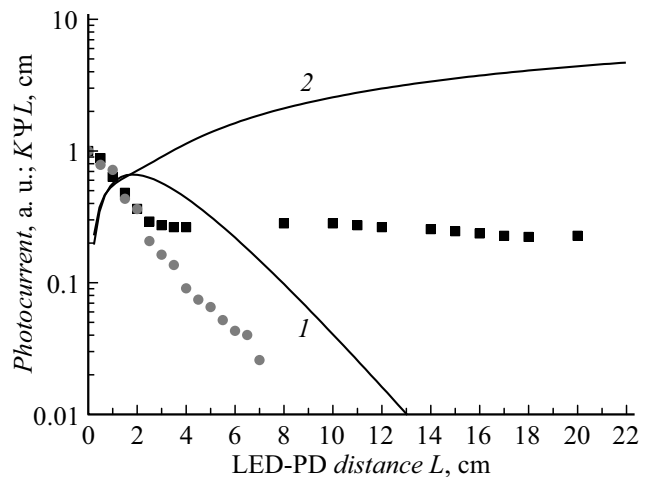


Рис. 4. Экспериментальные зависимости выходного сигнала оптопары и расчетные кривые параметра эффективности сенсора $K\Psi L$ от расстояния L между СД и ФД для открытого оптического канала (●, кривая 1) и для цилиндрической алюминиевой кюветы диаметром 3.5 mm (■, кривая 2).

ФД и СД при фиксированном токе через СД для случая открытого оптического канала (схема может быть использована в капнографах основного потока) и для цилиндрической алюминиевой кюветы с полированными внутренними стенками (схема для измерения бокового потока).

Полученные экспериментальные данные позволяют оценить взаимное влияние этих двух факторов на чувствительность сенсора. Сплошными линиями на рис. 4 представлены расчетные зависимости параметра эффективности сенсора ($K\Psi L$) от расстояния L между элементами оптопары (в расчетах полагалось $K = 1$). Видно, что для свободного пространства (кривая 2) наблюдается довольно узкая область наилучшей эффективности сенсора при $L \sim 1.5$ –2 см, в то время как при использовании газовой кюветы в виде цилиндрической кюветы (кривая 1) эффективность сенсора с ростом L сначала резко повышается (до $L \sim 1.5$ –2 см), а затем ее рост замедляется.

Измерения зависимости выходного сигнала оптопары от диаметра кюветы при $L = \text{const}$ показали, что выходной сигнал ФД остается постоянным при уменьшении ее диаметра от 3.5 до 2.5 mm, после чего наблюдается резкое снижение сигнала. Проведенные эксперименты позволили определить оптимальный для наших компонентов размер кюветы, при котором сочетаются эффективное использование мощности зондирующего излучения СД и минимальный объем газовой пробы ($V = 5 \text{ ml}$) при внутреннем диаметре кюветы 2.5 mm.

3. Лабораторный макет сенсора дыхания

Для проведения экспериментальных исследований прототипа медицинского сенсора дыхания (капнографа)

был изготовлен лабораторный макет, схема которого представлена на рис. 5.

Газовая кювета была выполнена в виде металлического цилиндра с внутренним диаметром 2.5 mm и $L = 20$ mm (объем 5 ml). Кювета снабжена юстировочными элементами, обеспечивающими согласование осей диаграмм направленности излучения СД и чувствительности ФД, которые могут иметь неконтролируемое отклонение от оси [20]. СД работал в импульсном режиме с частотой модуляции 2 kHz, при этом значение Ψ было более 300 при быстродействии сенсора 50 ms (усреднение по 100 импульсам СД) и амплитуде импульсов тока накачки СД 200 mA.

СД и ФД находились в тепловом контакте с газовой кюветой, температура которой измерялась с помощью контактного Pt-термометра с точностью $\pm 0.1^\circ\text{C}$. Это позволяет производить коррекцию показаний сенсора в соответствии с семейством передаточных характеристик (2) для набора эффективных значений коэффициента поглощения газового сенсора, $\alpha_{\text{eff}}(T)$. Схема детектирования сигнала ФД выполнена на элементной базе, обеспечивающей его максимальную чувствительность при минимальном температурном дрейфе в соответствии с рекомендациями, приведенными в работах [8,21,22]. Моделирование передаточных функций газового сенсора для $L = 20$ mm и заданных спектральных характеристик оптопары в области 4.1–4.3 μm в диапазонах температур 20–50 $^\circ\text{C}$ и концентраций 0–10 v/v% позволило рассчитать ожидаемые значения $\alpha_{\text{eff}}(T)$, $\tau_0 = \tau$ ($C = 1$, $L = 20$ mm, $T = 300$ K) и чувствительности сенсора к углекислому газу для $\Psi = 300$. Расчеты показывают, что значения α_{eff} в указанном диапазоне температур меняется незначительно и составляет величину порядка 25 cm^{-1} , τ_0 лежит в диапазоне 0.5–0.75, порог обнаружения LOD = 0.04 v/v%, относительная погрешность — не хуже 5% от измеряемой величины в диапазоне измеряемых концентраций 0–10 v/v% при быстродействии 50 ms и объеме пробы 5 ml.

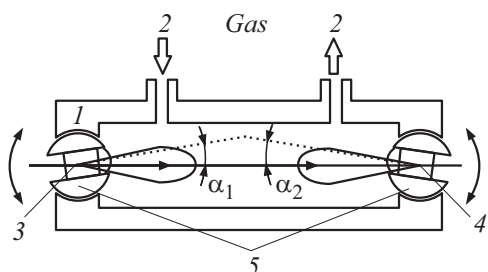


Рис. 5. Схема макета сенсора углекислого газа с использованием оптопары на основе InAsSb. 1 — цилиндрическая газовая кювета; 2 — штуцеры для прокачки газа; 3, 4 — иммерсионные СД и ФД; 5 — юстировочные элементы для согласования диаграмм направленности излучения СД и чувствительности ФД (α_1 - и α_2 -телесные углы диаграмм направленности СД и ФД).

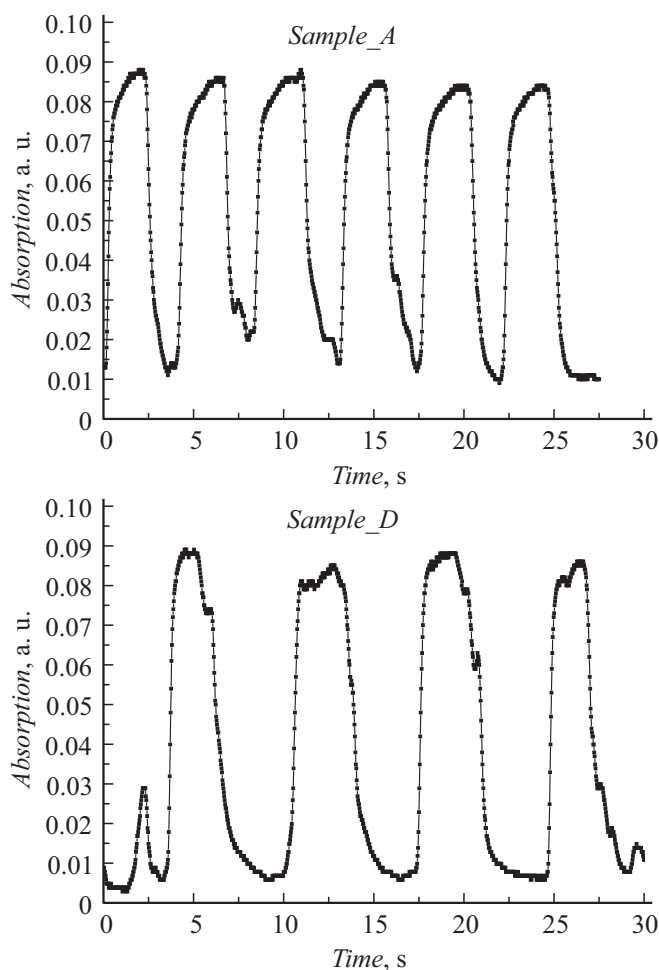


Рис. 6. Капнограммы, полученные в реальном времени с разрешением 50 ms.

На рис. 6 приведены экспериментальные результаты мониторинга дыхания (капнограммы) двух человек, полученные в реальном времени с разрешением 50 ms.

Заключение

Характеристики разработанного сенсора углекислого газа, содержащего диодные оптопары на основе InAsSb, соответствуют, а по ряду параметров (быстродействие и скорость газообъема в пробе) превышают лучшие образцы измерительных устройств, представленных в настоящее время на рынке медицинской аппаратуры для диагностики дыхания человека.

Конкурентные преимущества разработанных сенсоров обусловлены использованием в них отечественной элементной базы — иммерсионных диодных оптопар, обеспечивающих не только высокую чувствительность, быстродействие, помехоустойчивость, малые габариты и низкое потребление, но и возможность использования как в качестве самостоятельных приборов, так и встраивания в существующие диагностические комплексы.

Список литературы

- [1] *Hodgkinson J.P., Tatam R.P.* // Meas. Sci. Technol. 2013. Vol. 24. P. 012004.
- [2] *Zymelka D., Matveev B., Aleksandrov S., Sotnikova G., Gavrilov G., Saadaoui M.* // Flex. Print. Electron. 2017. Vol. 2. P. 045006. DOI: 10.1088/2058-8585/aa900a
- [3] *Бинзи В.Н., Степанов Е.В., Чучалин А.Г., Миляев В.А., Москаленко К.Л., Шулагин Ю.А., Янгузарова Л.Р.* // Труды ин-та общей физики им. А.М. Прохорова. 2005. Т. 61. С. 189.
- [4] *Johnston S.F.* // Meas. Sci. Technol. 1992. Vol. 3. P. 191–195.
- [5] *Матвеев Б.А.* // Фотоника. 2014. Вып. 6. С. 80–91.
- [6] *Kuusela T., Peura J., Matveev B.A., Remennyy M.A., Stus' N.M.* // Vibrational Spectroscopy. 2009. Vol. 51. P. 289–293.
- [7] *Remenniy M.A., Matveev B.A., Zotova N.V., Karandashev S.A., Stus' N.M., Pinskaya N.D.* // SPIE Proc. 2007. Vol. 6585. P. 658504. DOI: 10.1117/12.722847
- [8] *Гаврилов Г.А., Матвеев Б.А., Сотникова Г.Ю.* // ПЖТФ, 2011. Т. 37. Вып. 18. С. 50–57.
- [9] *Avdonkin K.J., Makukha V.K.* // Proceedings of the 6th Annual International Siberian Workshop on Electron Devices and Materials. 2005. P. 153–154.
- [10] *Yoo J., Prikhodko V., Parks J.E., Perfetto A., Geckler S., Partridge W.P.* // Applied Spectroscopy. 2015. Vol. 69. P. 1047–1058. DOI: 10.1366/14-07796
- [11] *Sotnikova G.Y., Gavrilov G.A., Aleksandrov S.E., Kapralov A.A., Karandashev S.A., Matveev B.A., Remennyy M.A.* // IEEE Sensors Journ. 2010. Vol. 10. P. 225–234. DOI: 10.1109/JSEN.2009.2033259
- [12] *Безъязычная Т.В., Богданович М.В., Кабанов В.В., Кабанов Д.М., Лебедев Е.В., Парашук В.В., Рябцев А.Г., Рябцев Г.И., Шпак П.В., Цемелев М.А., Андреев И.А., Куницына Е.В., Шерстнев В.В., Яковлев Ю.П.* // ФТП. 2015. Т. 49. Вып. 7. С. 1003–1005.
- [13] *Carpography*, Second addition / Ed. by J.S. Gravenstein, M.V. Jaffe, N. Gravenstein, D.A. Paulus. Published by Cambridge University Press, 2011. 473 p.
- [14] *Электрические измерения неэлектрических величин* / Л.: Энергия, 1975. 576 с.
- [15] *Ильинская Н.Д., Карандашев С.А., Карпухина Н.Г., Матвеев Б.А., Ременный М.А., Стусь Н.М., Усикова А.А.* // ФТП. 2016. Т. 50. Вып. 5. С. 657–662.
- [16] *Зотова Н.В., Ильинская Н.Д., Карандашев С.А., Матвеев Б.А., Ременный М.А., Стусь Н.М.* // ФТП. 2006. Т. 40. Вып. 6. С. 717–723.
- [17] *Закгейм А.Л., Ильинская Н.Д., Карандашев С.А., Карпухина Н.Г., Матвеев Б.А., Ременный М.А., Стусь Н.М., Усикова А.А., Черняков А.Е.* // ФТП. 2017. Т. 51. Вып. 2. С. 269–275. DOI 10.21883/FTR.2017.02.44117.8380
- [18] *Карандашев С.А., Матвеев Б.А., Ременный М.А., Шленский А.А., Лукин Л.С., Ратушный В.И., Корюк А.В., Тараканова Н.Г.* // ФТП. 2007. Т. 41. Вып. 11. С. 1389–1394.
- [19] *Зотова Н.В., Карандашев С.А., Матвеев Б.А., Ременный М.А., Стусь Н.М.* // Оптик. журн. 2012. Т. 79. Вып. 9. С. 60–65.
- [20] *Гаврилов Г.А., Сотникова Г.Ю., Александров С.Е., Усачев С.А., Капралов А.А.* // Полезная модель № 75 885 по заявке № 2008113124/22 от 26.03.2008.
- [21] *Александров С.Е., Гаврилов Г.А., Сотникова Г.Ю.* // Письма в ЖТФ. 2014. Т. 40. Вып. 16. С. 58–64.
- [22] *Александров С.Е., Гаврилов Г.А., Сотникова Г.Ю.* // Письма в ЖТФ. 2016. Т. 42. Вып. 5. С. 81–88.