

Фотоприемники на основе гетероструктур GaInAsSb/GaAlAsSb для практических задач прецизионной диодной лазерной спектроскопии

© Е.В. Куницына¹, И.А. Андреев¹, Г.Г. Коновалов¹, А.А. Пивоварова¹, Н.Д. Ильинская¹, Ю.П. Яковлев¹, Я.Я. Понуровский², А.И. Надеждинский², А.С. Кузьмичев², Д.Б. Ставровский², М.В. Спиридонов²

¹ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, 194021 Санкт-Петербург, Россия

² Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, 119991 Москва, Россия

E-mail: kunits@iropt9.ioffe.ru

Поступила в Редакцию 3 февраля 2022 г.

В окончательной редакции 10 февраля 2022 г.

Принята к публикации 10 февраля 2022 г.

Рассмотрены отечественные неохлаждаемые фотоприемники на основе гетероструктур GaInAsSb/GaAlAsSb, которые могут применяться в прецизионной диодной лазерной спектроскопии. Диапазон спектральной чувствительности фотоприемников с диаметром фоточувствительной площадки 1.0 и 2.0 мм составляет 1.0–2.4 мкм. Токовая монохроматическая чувствительность на длине волны 2.1 мкм имеет значение 1.0 А/Вт без смещения. Емкость достигает 375 пФ при диаметре площадки 1.0 мм и 800–5000 пФ при 2 мм. Представлены современные газоанализаторы на основе диодных лазеров и GaInAsSb/GaAlAsSb-фотоприемников для медицинской скрининговой диагностики заболеваний по выдыхаемым компонентам воздуха, контроля примесных газов в процессе ректификационной очистки неорганических гидридов, контроля утечек метана в газовых трубопроводах, а также для регистрации выхлопных газов движущегося автомобиля.

Ключевые слова: фотоприемник, гетероструктура, диодная лазерная спектроскопия, газоанализатор.

DOI: 10.21883/FTP.2022.05.52355.9813

1. Введение

В настоящее время развитие современной техники требует минимизации размеров аналитической аппаратуры и высокой точности проводимых измерений. Диодная лазерная спектроскопия (ДЛС) является одной из наиболее динамично развивающихся областей лазерной физики применительно к задачам аналитической химии и газоанализа. Прогресс в технологии диодных лазеров и фотоприемников в ближнем и среднем ИК диапазонах, а также развитие методов высокочувствительной ИК спектрометрии поглощения привели к созданию нового поколения газоаналитических систем. Такие системы отличаются высокой чувствительностью к измеряемой компоненте, а также рекордными спектральным разрешением и быстродействием.

Для газоаналитических измерений промышленно выпускаются как диодные лазеры с выводом излучения в одномодовое волокно, работающие в ближнем ИК диапазоне [1], так и квантово-каскадные диодные лазеры, генерирующие в среднем ИК диапазоне [2]. В частности, для длин волн 1.3 и 1.55 мкм разработаны полупроводниковые лазеры на основе AlGaInAs/InP [3,4], а также InGaAsP/InP MQW структур [5]. Для диапазона 1.25–1.65 мкм были созданы лазеры на основе нитридов

III группы и их твердых растворов GaInNAs, GaInAsSb, AlGaIn [6–9].

Регистрация лазерного излучения в ближнем и среднем ИК диапазонах является одной из важнейших проблем лазерной физики. Полупроводниковые фотоприемники на основе халькогенидов свинца, быстродействие лучших из которых составляет 3–5 мкс [10], мало пригодны для работы с диодными лазерами, требующими значительно более высокого быстродействия.

В ближней ИК области спектра широко применяются фотоприемники на основе гетероструктур InGaAs/InP, в активной области которых используется прямозонный твердый раствор In_{0.53}Ga_{0.47}As [11]. В работе [12] сообщалось о создании быстродействующих InGaAs/InP-фотоприемников с полосой пропускания до 20 ГГц при диаметре чувствительной площадки 18 мкм. В свою очередь в работе [13] авторами показано, что при уменьшении площади чувствительной площадки многослойных InGaAs-фотоприемников до 24 мкм² полоса пропускания может достигать > 100 ГГц. Однако для ряда применений уменьшение размера чувствительной площадки нежелательно, так как это приводит к потерям в чувствительности.

В настоящее время для газового анализа в ИК диапазоне спектра используются фотоприемники на основе InSb [14,15]. В работе [16] сообщалось об использовании серий неохлаждаемых InSb фотодиодов для сенсора та-

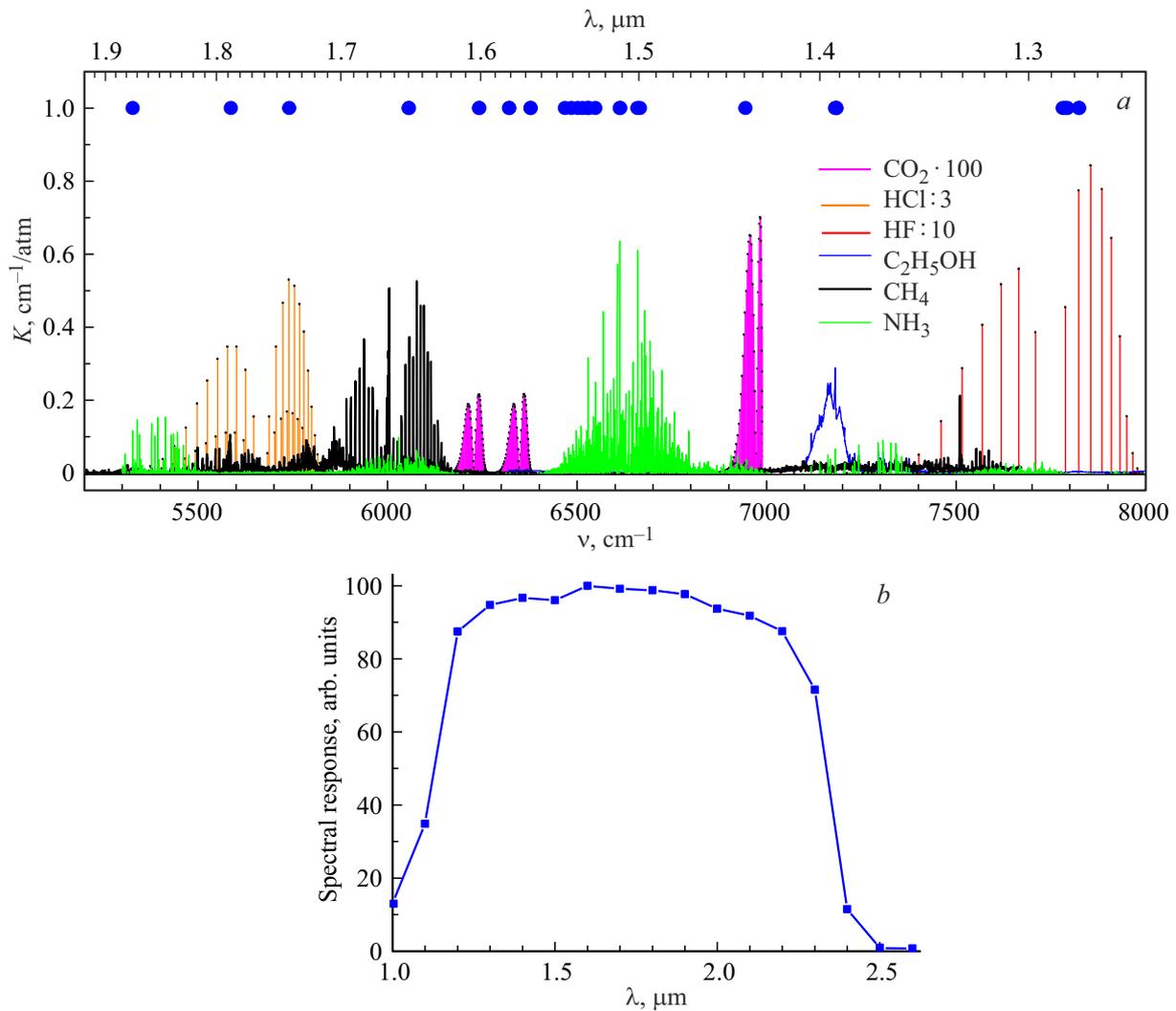


Рис. 1. Спектральные характеристики в ближнем ИК диапазоне: *a* — полосы поглощения легких молекул (синие метки — спектральные области, для которых промышленно выпускаются диодные лазеры); *b* — фотоответ GaSb/GaInAsSb/GaAlAsSb приемника при комнатной температуре. (Цветной вариант рисунка представлен в электронной версии статьи).

ких газов как CO_2 , CO и NO_x . Тем не менее для многих InSb-фотодиодов требуется охлаждение до 80–200 К.

В лаборатории ИК оптоэлектроники ФТИ им. А.Ф. Иоффе созданы фотоприемники на основе узкозонных соединений $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ для ближнего и среднего ИК диапазонов спектра. В отделе диодной лазерной спектроскопии Института общей физики им. А.М. Прохорова РАН (ИОФ РАН) разработаны приборы на основе диодных лазеров и фотоприемников, предназначенные для решения аналитических и диагностических задач экологии, медицины, контроля технологических процессов и т.д.

Данная работа посвящена неохлаждаемым фотоприемникам на основе гетероструктур GaSb/GaInAsSb/GaAlAsSb и их практическому применению в диодной лазерной спектроскопии для задач газоанализа в медицине, экологии, в электронной и оптоэлектронной промышленности.

2. Фотоприемники на основе гетероструктур GaInAsSb/GaAlAsSb для ближнего и среднего ИК диапазонов

Известно, что обертона, расположенные в спектральном диапазоне 1–2 мкм, где многие молекулы легких газов имеют полосы поглощения (рис. 1, *a*), являются характеристическими для связей C–H, O–H, N–H и т.д. Фотодиоды на основе гетероструктуры GaSb/GaInAsSb/GaAlAsSb обладают спектральной чувствительностью в диапазоне 1.0–2.4 мкм, что позволяет детектировать указанные полосы поглощения. Максимальная чувствительность (> 90%) наблюдается для длин волн излучения 1.45–2.2 мкм (рис. 1, *b*).

В работе [17] мы показали, что GaSb/GaInAsSb/GaAlAsSb-фотодиоды имеют достаточно высокое быст-

Таблица 1. Параметры GaSb/GaInAsSb/GaAlAsSb фотодиодов

Параметр, единицы измерения	Значение параметра	
Диаметр фоточувствительной площадки, мм	1.0	2.0
Площадь фоточувствительной площадки, мм ²	0.79	3.14
Диапазон спектральной чувствительности (> 10%), мкм	1.0–2.4	
Диапазон максимальной спектральной чувствительности (> 90%), мкм	1.45–2.2	
Токовая монохроматическая чувствительность при $\lambda = 2.1$ мкм, $U_{rev} = 0$ В, А/Вт	1.0	
Дифференциальное сопротивление, кОм	1.05	0.4–1.5
Темновой ток при $U_{rev} = 0.2$ В, мкА	75	50–200
Емкость при $U_{rev} = 0$ В, пФ	375	800–5000
Время нарастания и спада импульса фототока по уровню 0.1–0.9 (нагрузка 50 Ом, $U_{rev} = 0$ В), нс	30–45	100–770



Рис. 2. Фотодиодная линейка из 5 элементов в стандартном корпусе ТО-8.

родействие для регистрации без криогенного охлаждения излучения квантово-размерных WGM-лазеров с длиной волны основной моды в диапазоне 2.2–2.3 мкм. Однако измерение спектров поглощения легких молекул в различных физических процессах методами ДЛС требует использования спектрально-согласованных фотоприемников с параметрами (чувствительность, быстродействие и т.д.), определенными для каждой конкретной задачи. Так, например, фотоприемники с меньшей площадью чувствительной площадки имеют более низкий уровень обратных темновых токов и, соответственно, шумов, а также меньшую емкость (более высокое быстродействие), чем приборы с большей площадью. С другой стороны, уменьшение площади чувствительной площадки ведет к снижению спектральной чувствительности и сложностям юстировки.

В табл. 1 представлены значения основных параметров GaSb/GaInAsSb/GaAlAsSb-фотодиодов с диаметром фоточувствительной площадки 1 и 2 мм. Быстродействие разработанных приборов составляет 30–45 нс при диаметре 1 мм и 100–770 нс при диаметре 2 мм, что, как будет продемонстрировано далее, является достаточной величиной для работы в составе ДЛ-газоанализаторов.

Для стабилизации температуры использовался термоэлектрический модуль в корпусе ТО-8.

Также нами была создана фотодиодная линейка, состоящая из пяти элементов с диаметром 1.0 мм (см. рис. 2).

3. Принципы детектирования легких газовых примесей методами ДЛС

Абсорбционная спектроскопия и газоанализ с применением диодных лазеров основаны на принципах молекулярной спектроскопии поглощения, суть которых сводится к измерению поглощения ИК излучения на колебательно-вращательном переходе молекулы согласно закону Бугера–Ламберта. Для этих целей излучение диодного лазера сканируется в строго выбранном диапазоне длин волн, содержащем частоту перехода молекулы, что позволяет обеспечить высокую селективность к измерению выбранной молекулярной компоненты.

Блок-схема газоанализатора на основе диодного лазера и фотоприемников для измерения газовых примесей в ближнем ИК диапазоне представлена на рис. 3.

Сигнал, регистрируемый фотоприемником (рис. 3, блок 4) после прохождения излучения лазера через

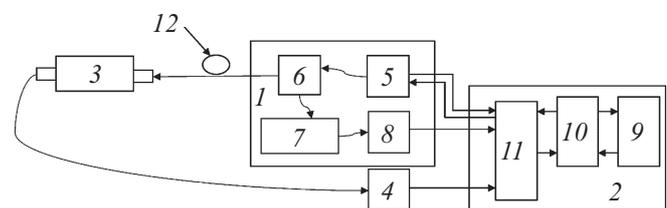


Рис. 3. Блок-схема газоанализатора на основе диодного лазера и фотодиода ближнего ИК диапазона для измерения газовых примесей: 1 — блок лазерного излучения, 2 — блок управления, приема и обработки данных, 3 — аналитическая кювета с волоконным входом, 4 — фотоприемник аналитического сигнала, 5 — модуль диодного лазера, 6 — волоконный разветвитель, 7 — кювета сравнения с интерферометром Фабри–Перо, 8 — фотоприемник сигнала сравнения (реперного), 9 — цифровой программируемый модуль, 10 — модули ЦАП и АЦП, 11 — модуль преобразователей аналоговых сигналов, 12 — волоконно-оптический кабель.

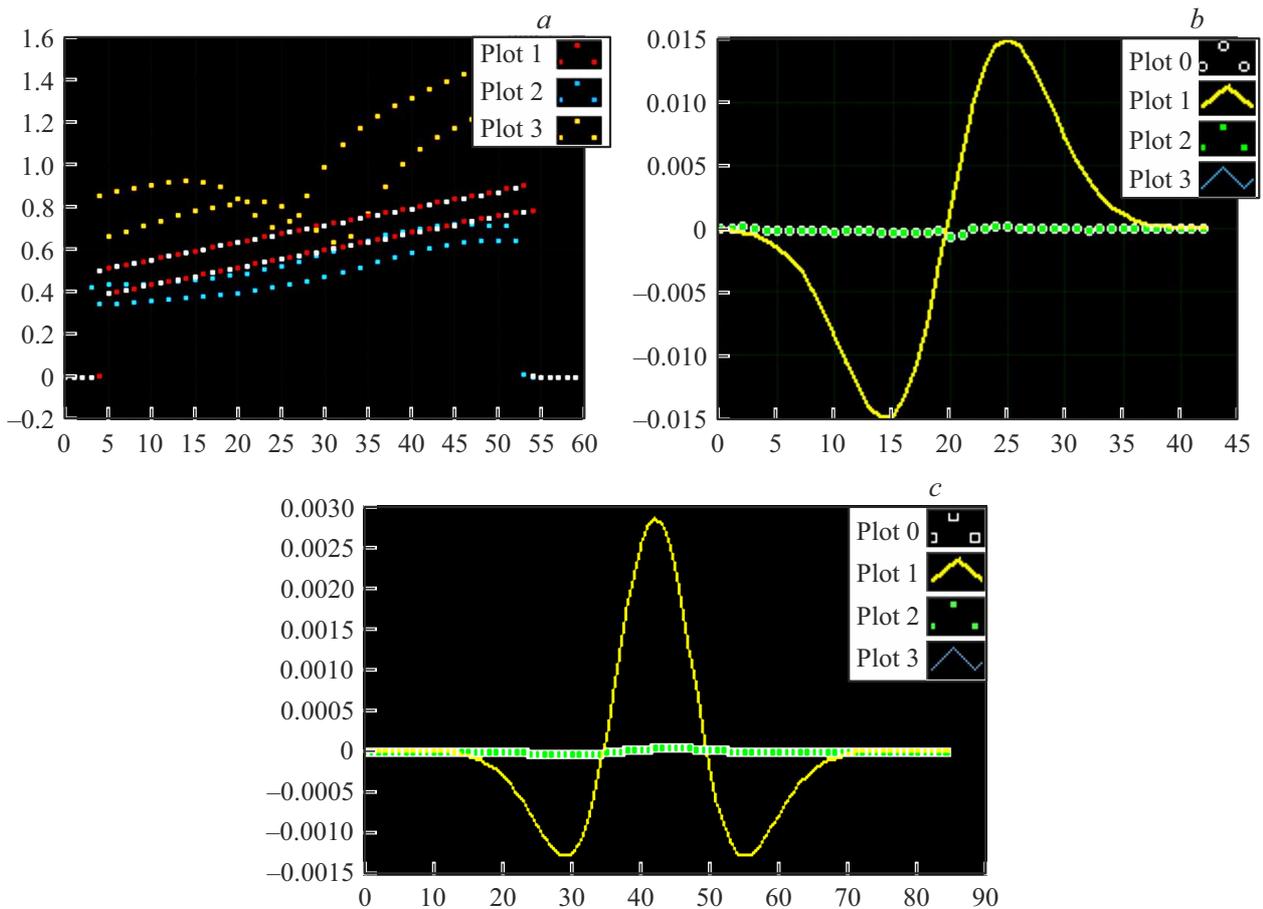


Рис. 4. Сигналы импульсов диодного лазера, зарегистрированные фотоприемниками в реперном (верхняя зависимость) и аналитическом каналах (а); логарифмы частотно-сдвинутых компонент сигналов, а (b); автокорреляционная и кросскорреляционная свертка сигналов b (c). (Цветной вариант рисунка представлен в электронной версии статьи).

исследуемый газ, можно представить в виде

$$I = I_0 T(\nu) = I_0 \exp[-\sigma(\nu)P_0CL] = I_0 \exp[-K(\nu)], \quad (1)$$

где I_0 — интенсивность излучения лазера, $T(\nu)$, $K(\nu)$ — спектры пропускания и поглощения соответственно, $\sigma(\nu)$ — сечение поглощения, P_0 — давление исследуемой газовой смеси, C — концентрация детектируемой молекулы, L — длина оптического пути в кювете с исследуемым газом.

Диодный лазер возбуждался периодическими импульсами тока трапецевидной формы. Длительность импульса тока накачки составляла 1–2 мс, частота повторения — 40 Гц. Мощность, излучаемая лазером, а также сигнал, регистрируемый фотоприемником, имели форму, близкую к трапецевидной. Длительность импульса тока накачки — 1–2 мс, частота повторения — 40 Гц. Изменение тока накачки во время импульса сопровождается изменением частоты излучения.

Импульс тока накачки диодного лазера модулируется по амплитуде с частотой, равной частоте ЦАП/АЦП преобразователя (рис. 3, блок 10). Частота оптимизируется под полосу пропускания предусилителей фотоприемников аналитического и реперного каналов (рис. 3,

блок 4, блок 8) и составляет 111.111 КГц. Глубина модуляции подбирается таким образом, чтобы обеспечить частотный сдвиг в режиме генерации на полуширину линий поглощения исследуемого газа и получить максимальный контраст поглощения.

На рис. 4 представлены сигналы диодного лазера, визуализированные на экране ноутбука.

Для определения концентрации исследуемого газа проводится математическая обработка амплитудно-модулированных сигналов (рис. 4):

1 — регистрация сигналов пропускания в реперном и аналитическом каналах (рис. 4, а). Сигналы сдвинуты на величину глубины модуляции;

2 — логарифмирование частотно-сдвинутых компонент сигналов пропускания в реперном и аналитическом каналах в соответствии с законом Бугера–Ламберта–Берра и получение коэффициентов поглощения (рис. 4, б). Следует отметить, что форма сигналов схожа с первой производной от сигнала пропускания;

3 — автокорреляционная R_{xx} и кросскорреляционная свертки поглощения реперного сигнала, кросскорреляционная свертка R_{xy} реперного сигнала с аналитическим. Эта процедура обеспечивает дополнительную

фильтрацию полезного сигнала, зашумленного помехой (рис.4, с);

4 — линейная регрессия R_{xy} по R_{xx} и нахождение коэффициента совпадения функций α , который определяется как $\alpha = R_{xy}/R_{xx}$.

Концентрация исследуемого газа C (в ppm, одна частица на миллион) пропорциональна величине α и вычисляется по формуле

$$C = \frac{\alpha \cdot P_R \cdot L_R}{P_A \cdot L_A} \cdot 10^6, \quad (2)$$

где α — коэффициент совпадения функций R_{xy} и R_{xx} , P_R, P_A — парциальное давление газа в канале сравнения (реперном) и в аналитическом канале соответственно, L_R, L_A — оптические длины в кювете реперного канала и аналитической кювете соответственно.

Представленная процедура вычисления концентрации исследуемого газа существенно ограничивает различные низкочастотные (вибрационные, фликкерные) шумы приемно-регистрирующего тракта газоанализатора. Она линейна к измерению концентраций газов при малых величинах поглощения (фоновые измерения).

4. Газоанализ с помощью ДЛС

Основным преимуществом ДЛС в газоанализе молекулярных объектов является высокая точность измерений в сочетании с высоким быстродействием. ДЛ-газоанализаторы с волоконным выводом излучения компактны, имеют автономное питание и могут как встраиваться в любые системы газоанализа (ректификационные колонны, центрифуги для изотопоселекции и т.д.), так и устанавливаться на мобильные платформы (автомобиль, вертолет, беспилотные летательные платформы и т.д.).

В отделе ДЛС ИОФ РАН были созданы ДЛ-газоанализаторы на основе GaSb/GaInAsSb/GaAlAsSb-фотодиодов, разработанных в лаборатории ИК оптоэлектроники ФТИ им. А.Ф. Иоффе.

4.1. Скрининговая ДЛС-диагностика заболеваний по выдыхаемому воздуху

Ранняя диагностика различных заболеваний позволяет избежать развития необратимых изменений в организме человека, осложнений, снижения качества жизни, а в ряде случаев спасти ему жизнь. В настоящее время особое внимание уделяется скрининговой диагностике. Скрининговое исследование в медицине понимается как комплекс мер, направленных на выявление заболеваний у большой группы пациентов при отсутствии выраженных симптомов. Основными требованиями к скрининговому тесту являются простота, неинвазивность и безопасность процедур тестирования, а также высокая скорость обработки данных и возможность выявления заболеваний на ранней стадии.

Многоканальный анализатор для неинвазивного скрининга и биомедицинских исследований был разработан на основе диодных лазеров ближнего ИК диапазона производства компании „NTT Electronics“ (Япония) и GaSb/GaInAsSb/GaAlAsSb-фотодиодов, описанных выше. Прибор позволяет измерять такие биомаркеры выдыхаемого воздуха как молекулы-изотопомеры двуокиси углерода $^{12}\text{CO}_2$ и $^{13}\text{CO}_2$, молекулы метана CH_4 , аммиака NH_3 , воды H_2O и сероводорода H_2S . Измерение концентрации молекул проводилось в многопроходной кювете с базовой длиной 40 см и объемом 1.8 л, построенной по схеме Эррио (Herriott). Полная длина оптического пути в такой кювете достигала 26 м. В работе использовались три диодных лазера с волоконным выводом излучения. Детектирование CH_4 осуществлялось на длине волны 1.665 мкм, измерения $^{12}\text{CO}_2$, $^{13}\text{CO}_2$ и H_2S проводились вблизи 1.602 мкм, а NH_3 и H_2O — вблизи 1.512 мкм. Все измерения были сделаны в режиме реального времени.

Клинические испытания диодного лазерного спектрометра проводились в Городской клинической больнице им. В.М. Буянова (ГКБ № 12 г. Москва) [18]. Было обследовано в общей сложности более ста пациентов. Исследование было проведено в соответствии с Хельсинкской декларацией (2013) и одобрено Комитетом по этике Городской клинической больницы им. В.М. Буянова Департамента здравоохранения Москвы и Комитетом по этике Центральной клинической больницы Российской академии наук. От каждого из включенных в исследование пациентов было получено информированное согласие.

Тесты включали измерение и исследование биомаркеров $^{12}\text{CO}_2$, $^{13}\text{CO}_2$, CH_4 , NH_3 , H_2O и H_2S в выдыхаемом воздухе пациентов с различными заболеваниями. Проведенные исследования показали эффективность разработанного ДЛ-спектроанализатора для анализа компонентов выдыхаемого воздуха с целью выявления функ-

Таблица 2. Технические характеристики многоканального ДЛ-газоанализатора

Параметр, единицы измерения	Значение параметра
Длина волны регистрации, нм:	
CH_4	1625
$\text{NH}_3, \text{H}_2\text{O}$	1512
$^{12}\text{CO}_2, ^{13}\text{CO}_2, \text{H}_2\text{S}$	1602
Предел детектирования, ppm:	
CH_4	0.1
$^{12}\text{CO}_2$	20
$^{13}\text{CO}_2$	20
H_2S	0.4
NH_3	0.03
H_2O	100
Время установки рабочего режима после включения, мин	10
Время измерения единичной пробы, с	30
Рабочая температура, °C	от +10 до +45

циональных нарушений при различных заболеваниях органов пищеварения, кардиореспираторной системы, заболеваниях, обусловленных нарушением азотоотделяющей функции почек, и др.

Для регистрации излучения диодного лазера в аналитическом и реперном каналах использовались GaSb/GaInAsSb/GaAlAsSb-фотодиоды с диаметром чувствительной площадки 1 мм (см. табл. 1). Обнаружительная способность таких фотодиодов составляла $D^* = 1 \cdot 10^{11} \text{ Вт}^{-1} \cdot \text{см} \cdot \text{Гц}^{1/2}$.

Технические характеристики разработанного многоканального ДЛ-спектроанализатора для неинвазивного скрининга и биомедицинских исследований приведены в табл. 2.

4.2. Контроль примесей в процессе получения высокочистых гидридов

Высокочистые гидриды NH_3 , PH_3 , AsH_3 , SiH_4 , GeH_4 широко используются в электронной и оптоэлектронной промышленности. Концентрация примесей в конечном продукте гидридов не должна превышать десятки ppb (одна миллиардная доля). Контроль примесей в процессе ректификационной очистки гидридов в режиме реального времени является задачей, с которой успешно справляется технология газоанализа на основе диодных лазеров. В настоящее время для ФГУП «НПП „Салют“» (г. Нижний Новгород) создана, апробирована и эксплуатируется линейка приборов на базе диодного лазера с волоконным выводом излучения для непрерывного мониторинга примесей H_2O , CO_2 , CH_4 , NH_3 и др. в процессе ректификации высокочистых гидридов. Газоанализаторы встраиваются непосредственно в ректификационные колонны, что позволяет проводить непрерывный контроль примесей в процессе очистки гидридов [19]. Длительность гидридов и составляет > 10 ч. Контроль примесей в „on-line“ режиме методами ДЛС позволяет оптимизировать время очистки гидридов. В табл. 3 приведен перечень регистрируемых примесей методами ДЛС. В качестве принимающего излучения устройства использованы

Таблица 3. Примеси, регистрируемые с помощью ДЛ-газоанализаторов в процессе ректификационной очистки неорганических гидридов

Примесь	Длина волны регистрации, нм	Гидриды	Чувствительность, мол%
H_2O	1.391	NH_3 , PH_3	$1 \cdot 10^{-5}$
NH_3	1.512	AsH_3	$5 \cdot 10^{-5}$
C_2H_2	1.635	SiH_4	$2 \cdot 10^{-4}$
CH_4	1.651	SiH_4	$4 \cdot 10^{-5}$
CO_2	2.004	PH_3 , SiH_4 , AsH_3	$1 \cdot 10^{-4}$
H_2S	1.601	AsH_3	$1 \cdot 10^{-3}$
C_2H_2	1.531	PH_3 , SiH_4	$1 \cdot 10^{-4}$

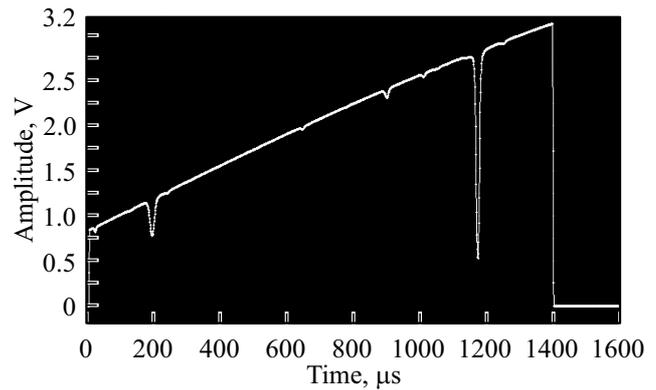


Рис. 5. Спектр поглощения метана, зарегистрированный на длине волны 1.65 мкм.

GaInAsSb/GaAlAsSb-фотодиоды с диаметром чувствительной площадки 2 мм (см. табл. 1).

4.3. Контроль концентрации метана

Контроль концентрации метана CH_4 в промышленно опасных зонах является чрезвычайно важной задачей в угольной, нефтяной и газовой промышленности. Минимальная взрывоопасная концентрация CH_4 в воздухе составляет не более 5%. Газоанализаторы, измеряющие до взрывоопасный уровень метана, не должны иметь электрических контактов, при этом работать на удаленных расстояниях и обладать высокой чувствительностью в широком диапазоне температур (от -40°C до $+50^\circ\text{C}$) при высоких влажности и запыленности. Совместно с предприятиями группы компаний ОАО «АК „Транснефть“» был разработан газоанализатор [20], предназначенный для детектирования метана методом абсорбционной спектроскопии с использованием диодного лазера ближнего ИК диапазона и выносного датчика — однопроводной оптической кюветы длиной 50 мм с волоконным вводом и выводом излучения удаленностью > 50 км. Основным элементом датчика являются оптические кюветы с волоконным вводом и выводом, которые для работы в реальных климатических условиях помещены в пылевлагозащищенный корпус.

В каждом приборе использованы два GaSb/GaInAsSb/GaAlAsSb-фотоприемника с диаметром чувствительной площадки 2 мм (см. табл. 1). На рис. 5 представлен спектр поглощения метана, зарегистрированный с помощью газоанализатора на длине волны 1.65 мкм.

Длительность импульса диодного лазера составляла 4.5 мс, длина перестройки частоты — 2.3 см^{-1} . Приемники с чувствительной площадкой относительно большого размера (2 мм) позволяли регистрировать слабый сигнал с оптического тракта.

4.4. Регистрация выхлопных газов движущегося автомобиля

Известно, что многие современные устройства для измерения концентрации газообразных веществ не предпо-

Таблица 4. Параметры дистанционного сенсора для регистрации выхлопных газов движущегося автомобиля

Наименование параметра, ед. изм.	Значение параметра
Габариты приемно-передающего блока, мм	400 × 500 × 400
Масса приемно-передающего блока, кг	14,8
Габариты аппаратно-программного блока, мм	400 × 300 × 500
Масса аппаратно-программного блока, кг	9,0
Напряжение и частота питающей сети, В, Гц	230, 60
Потребляемая мощность, Вт	146
Время установления рабочего режима после включения питания, мин	10
Температура, °С	от +10 до +45
Анализируемая среда	Выхлоп движущегося автомобиля
Скорость объекта, км/ч	Не более 60
Чувствительность к компонентам выхлопных газов, об%	
CH ₄ (1651 нм)	0.002
CO (1578 нм)	0.5
CO ₂ (2004 нм)	0.02
NO (5260 нм)	0.01

лагают работу с движущимися источниками. Одна из последних совместных разработок отдела ДЛС ИОФ РАН и лаборатории ИК оптоэлектроники ФТИ им. А.Ф. Иоффе — дистанционный сенсор, основным преимуществом которого является возможность регистрации выхлопных газов CH₄, CO₂, CO и NO движущегося автомобиля [21].

Сенсор состоит из трех основных частей: приемопередающей оптической системы, электронного блока управления и регистрации, а также блока отражения. Приемопередающая система и блок отражения должны находиться на уровне выхлопной трубы автомобиля. Прибор создан на базе диодного лазера, GaSb/GaInAsSb/GaAlAsSb-фотодиодов с диаметром чувствительной площадки 2 мм, а также 5-элементной фотодиодной линейки (см. рис. 2). Использование такой линейки позволило эффективно принимать сканированное по пространству излучение лазеров и тем самым увеличить зону охвата при „on-line“ регистрации выхлопных газов автомобилей, движущихся со скоростью не более 60 км/ч. Параметры сенсора приведены в табл. 4.

5. Заключение

В работе приведены параметры GaSb/GaInAsSb/GaAlAsSb-фотоприемников, разработанных в ФТИ им. А.Ф. Иоффе, и представлены перспективные разработки Института общей физики им. А.М. Прохорова РАН на основе данных фотоприемников и диодных лазеров. Созданные газоанализаторы применяются в медицинской скрининговой диагностике, в системах контроля утечек метана в газовых трубопроводах и примесных газов при ректификационной очистке неорганических гидридов, а также для дистанционной регистрации выхлопных газов движущегося автомобиля.

В будущем развитие новых технологий создания лазеров с пико- и фемтосекундной длительностью импульсов генерации в ближнем и среднем ИК диапазонах

приведет к расширению области аналитических применений ДЛС. Такие системы позволят изучать динамическую картину быстро протекающих процессов, таких как внутреннее движение молекул, элементарные стадии химических реакций, релаксация фотовозбужденных электронов в полупроводниках, первичные стадии преобразования света в фотосинтезирующих и зрительных пигментах и др. Таким образом, быстродействующие фотоприемники для работы в спектральном окне 1–3 мкм становятся все более востребованными.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] <https://www.ntt-electronics.com>
- [2] Ch. Mann, Q. K. Yang, F. Fuchs, W. Bronner, R. Kiefer, K. Köhler, H. Schneider, R. Kormann, H. Fischer, T. Gensty, W. Elsässer. *Quantum Cascade Lasers for the Mid-infrared Spectral Range: Devices and Applications*. In: B. Kramer (eds). *Advances in Solid State Physics* (Springer, Berlin–Heidelberg, **43**, 3518 (2003). https://doi.org/10.1007/978-3-540-44838-9_25
- [3] L. Hou, S. Tang, B. Hou, S. Liang, J.H.H. Marsh. *IEEE J. Select. Topics Quant. Electron.*, **24** (6), 1102508 (2018).
- [4] А.А. Мармалюк, Ю.Л. Рябоштан, П.В. Горлачук, М.А. Ладугин, А.А. Падалица, С.О. Слипченко, А.В. Лютецкий, Д.А. Веселов, Н.А. Пихтин. *Квант. электрон.*, **47** (3), 272 (2017).
- [5] G. Belenky, L. Shterengas, C.W. Trussell, C.L. Reynolds, jr., M.S. Hybertsen, R. Menna. In: *Future Trends in Microelectronics: The Nano Millennium*, ed. by S. Luryi, J. Xu, A. Zaslavsky (N. Y., Wiley-Interscience, 2002) p. 231.
- [6] A.Y. Egorov, D. Bernklau, B. Borchert, S. Illek, D. Livshits, A. Rucki, M. Schuster, A. Kaschner, A. Hoffmann, Gh. Dumitras, M.C. Amann, H. Riechert. *J. Cryst. Growth*, **227–228**, 545 (2001).

- [7] S.R. Bank, M.A. Wistey, H.B. Yuen, L.L. Goddard, H.P. Bae, J.S. Harris. *J. Vac. Sci. Technol. B*, **23** (3), 1337 (2005).
- [8] J.W. Ferguson, P. Blood, P.M. Smowton, H. Bae, T. Sarmiento, J.S. Harris, N. Tansu, L.J. Mawst. *IEEE J. Quant. Electron.*, **47** (6), 870 (2011).
- [9] Е.В. Луценко, Н.В. Ржеуцкий, А.Г. Войнилович, И.Е. Свистенков, А.В. Нагорный, В.А. Шуленкова, Г.П. Яблонский, А.Н. Алексеев, С.И. Петров, Я.А. Соловьев, А.Н. Петлицкий, Д.В. Жигулин, В.А. Солодуха. *Квант. электрон.*, **49** (6), 540 (2019).
- [10] E.G. Camargo, S. Tokuo, H. Goto, N. Kuze. *Sensors Mater.*, **26** (4), 253 (2014).
- [11] И.Б. Чистохин, К.С. Журавлев. *Успехи прикл. физики*, **3** (1), 85 (2015).
- [12] O.A. Kozyreva, Y.V. Solov'ev, I.S. Polukhin, A.K. Mikhailov, G.A. Mikhailovskiy, M.A. Odnoblyudov, E.Z. Gareev, E.S. Kolodeznyi, I.I. Novikov, L.Ya. Karachinsky, A.Yu. Egorov, V.E. Bougrov. *IOP Conf. Ser.: J. Phys.: Conf. Ser.*, **917**, 052029 (2017).
- [13] K. Sun, A. Beling. *Appl. Sci.*, **9** (4), 623 (2019).
- [14] M. Razeghi. *Eur. Phys. J. Appl. Phys.*, **23** (3), 149 (2003).
- [15] B.W. Jia, K.H. Tan, W.K. Loke, S. Wicaksono, K.H. Lee, S.F. Yoon. *ACS Photonics*, **5** (4), 1512 (2018).
- [16] Camargo, S. Tokuo, H. Goto, N. Kuze. *Sensors Mater.*, **26** (4), 253 (2014).
- [17] Е.В. Куницына, М.А. Ройз, И.А. Андреев, Е.А. Гребенщикова, А.А. Пивоварова, М. Ahmetoglu (Afrailov), Е.В. Лебедок, Р.Ю. Микучич, Н.Д. Ильинская, Ю.П. Яковлев. *ФТП*, **54** (7), 677 (2020).
- [18] Я.Я. Понуровский, А.И. Надежденский, Д.Б. Ставровский, Ю.П. Шаповалов, М.В. Спиридонов, А.С. Кузьмичев, А.А. Карабиненко, Ю.М. Петренко. *Соврем. технологии в медицине*, **12** (5), 71 (2020).
- [19] Я.Я. Понуровский, Д.Б. Ставровский, Ю.П. Шаповалов, М.В. Спиридонов, А.С. Кузьмичев, А.И. Надежденский, А.П. Котков, Н.Д. Гришнова, О.С. Аношин, А.И. Скосырев, Д.М. Полежаев. *Неорг. матер.*, **56** (12), 1356 (2020).
- [20] А.Т. Кулаков, А.И. Надеждинский, Д.И. Плешков, Ю.П. Шаповалов, Я.Я. Понуровский. *Устройство и способ измерения концентрации газообразных веществ*. Патент РФ RU2598694C2 (2014).
- [21] Я.Я. Понуровский, А.С. Савранский. *Дистанционный оптический абсорбционный лазерный газоанализатор*. Патент РФ RU2714527C1 (2019).

Редактор Г.А. Оганесян

Photodetectors based on GaInAsSb/GaAlAsSb heterostructures for the practical tasks of precision diode laser spectroscopy

E.V. Kunitsyna¹, I.A. Andreev¹, G.G. Kononov¹, A.A. Pivovarova¹, N.D. Il'inskaya¹, Yu.P. Yakovlev¹, Ya.Ya. Ponurovskii², A.I. Nadezhdinskii², A.S. Kuz'michev², D.B. Stavrovskii², M.V. Spiridonov²

¹ Ioffe Institute,

194021 St. Petersburg, Russia

² Prokhorov General Physics Institute

of Russian Academy of Sciences,

119991 Moscow, Russia

Abstract The paper considers the uncooled photodetectors based on GaInAsSb/GaAlAsSb heterostructures, which can be applied in precision diode laser spectroscopy. The spectral sensitivity range of photodetectors with a photosensitive area diameter of 1.0 and 2.0 mm is 1.0–2.4 μm . The current monochromatic sensitivity at the wavelength of 2.1 μm has a value of 1.0 A/W without bias. The capacity reaches 375 pF with a photosensitive area diameter of 1.0 mm and 800–5000 pF with 2 mm. The modern gas analyzers based on diode lasers and developed photodetectors for medical screening diagnostics by analyzing the gas compositions of exhaled air, for control of impurity gases in the process of rectification of inorganic hydrides, control of methane leaks in gas pipelines, as well as for registration of exhaust gases of a moving car are presented.