

Лазерный детектор дистанционного обнаружения газов CO_2 , CH_4 и NH_3

А.Д.Бритов

Московский энергетический институт (технический университет)

В.М.Белоконев

ФГУП «Альфа» (г. Москва)

А.И.Надеждинский, Д.Ю.Наместников, Я.Я.Понуровский

Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН

Представлен прототип прибора для одновременного измерения следовых концентраций газов CO_2 (1,60 мкм), CH_4 (1,65 мкм) и NH_3 (1,51 мкм) на основе диодных гетеролазеров с одномодовым волоконным выводом излучения. Управление трехканальным газоанализатором производилась с использованием станции ввода/вывода National Instruments PXI-6289M и режима временного мультиплексирования для трех независимых лазерных источников. Достигнутая чувствительность газоанализатора на трассе 100 м составила для $\text{CH}_4 \sim 300$ ppb, для $\text{CO}_2 - 30$ ppm и для $\text{NH}_3 - 0,5$ ppm.

Дистанционное обнаружение следовых концентраций различных газовых примесей в атмосфере является актуальной задачей научного приборостроения. При разработке «электронного носа» перспективным является лазерно-спектроскопический метод, основанный на перестраиваемых по частоте полупроводниковых лазерах и получивший название диодная лазерная спектроскопия (ДЛС). Этот метод имеет ряд неоспоримых преимуществ перед другими оптическими методами [1, 2].

С помощью метода ДЛС, взятого за основу при создании детектора, обеспечивается обнаружение человека по его химическому полю, взрывчатых веществ по их летучим компонентам, утечки метана в газопроводах, а также решаются многие другие прикладные задачи. В Институте общей физики им. А.М. Прохорова РАН (ЦЕНИ ИОФ РАН) создан экспериментальный образец детектора. При разработке принципиальной схемы детектора, удовлетворяющей методу ДЛС, решались две основные задачи:

- 1) выбор оптимальной спектральной области аналитических линий поглощения искоемых газов;
- 2) выбор оптимальных лазеров и фотоприемников, используемых в измерительной системе.

С целью выбора спектральной области наблюдения исследован спектр молекулярного поглощения основных газов, используемых для обнаружения объектов, предназначенных для детектирования, в том числе и человека. Одновременно проанализированы промышленно выпускаемые гетеролазеры с точки зрения возможности их применения в различных диапазонах длин волн, надежности и экономичности.

Необходимо отметить, что с точки зрения интенсивности молекулярного поглощения наиболее приемлемым является средний и дальний ИК-диапазон (2,3–10 мкм), где располагаются фундаментальные полосы поглощения различных молекул. В ближней

ИК-области расположены, как правило, лишь обертоны и комбинационные частоты основных полос, обладающие значительно меньшей интенсивностью. Тем не менее были выбраны гетеролазеры ближнего ИК-диапазона (рис.1). Основная причина этого в том, что существующие в настоящее время полупроводниковые лазеры среднего ИК-диапазона функционируют лишь при низких температурах и чаще всего для их работы требуется охлаждение жидким азотом. Это создает значительные трудности практического использования газоанализаторов, в то же время полупроводниковые лазеры и приемники ближнего ИК-диапазона (0,8–2,3 мкм) работают при температурах, близких к комнатной.

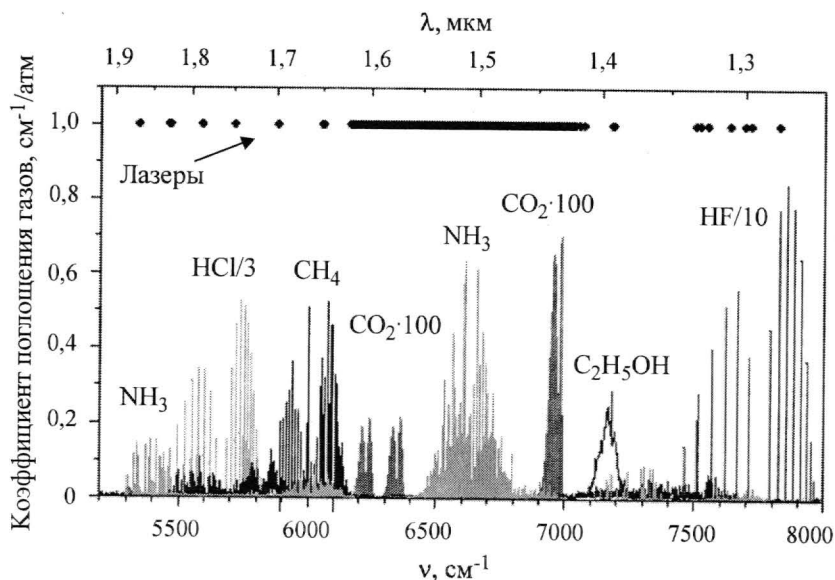


Рис.1. Спектры молекул в ближней ИК-области и частоты промышленно выпускаемых гетеролазеров

В результате проведенного анализа с учетом пропускания атмосферы выбраны аналитические линии поглощения для одновременного мониторинга трех молекулярных объектов – биомаркеров химического поля человека как наиболее универсальных из всех продуктов жизнедеятельности человека: NH_3 (1,51 мкм), CO_2 (1,60 мкм) и CH_4 (1,65 мкм). Следующим этапом исследований стал выбор конструкции применяемого в системе лазера.

Работы Хинкли [3, 4] положили начало применению перестраиваемых диодных лазеров в молекулярной спектроскопии высокого разрешения. Одним из уникальных свойств полупроводниковых гетеролазеров является их способность к перестройке по частоте в достаточно широких пределах простыми аппаратными средствами [5, 6]. При необходимости изменения частоты излучения в достаточно широких пределах ($50\text{--}100\text{ см}^{-1}$) можно использовать изменение рабочей температуры лазера. Для более прецизионного сканирования частоты в области линии поглощения (порядка $1,5\text{--}2\text{ см}^{-1}$) используется режим сканирования с помощью изменения тока накачки гетеролазера. Изменение тока приводит к изменению пространственных функций распределения температуры и концентрации носителей в активной области лазера и, как следствие, к изменению эффективного показателя преломления последней и частоты излучения гетеролазера. В настоящее время можно получать гетеролазеры на основе твердых растворов $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ и $\text{A}^{\text{IV}}\text{B}^{\text{VI}}$, перекрывающие спектральный диапазон от ближнего УФ-диапазона до дальнего ИК-диапазона.

На рис.2 представлена блок-схема трехканального детектора следов газовых примесей в атмосфере на основе гетеролазеров с распределенной обратной связью (РОС).

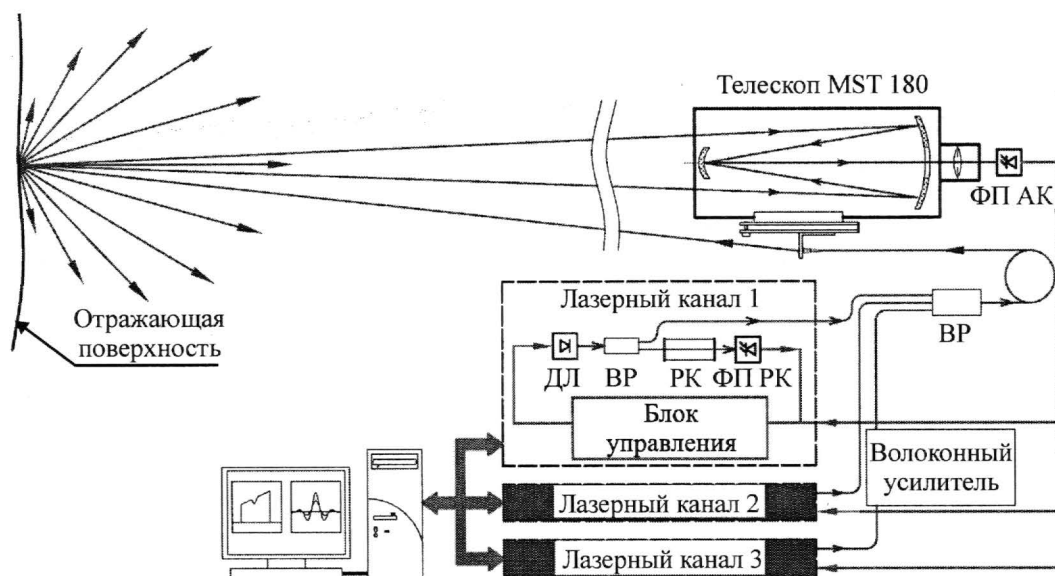


Рис.2. Блок-схема трехканального детектора следов газовых примесей в атмосфере на основе РОС-гетеролазеров

Излучение диодных лазеров (ДЛ) делится на Y-образных волоконных разветвителях на аналитический и реперный каналы. Излучение аналитических каналов объединяется и направляется на топографический отражатель. Малая часть отраженного излучения принимается телескопической системой (MST 180) и регистрируется фотоприемником аналитического канала. Излучение реперного канала в каждом из трех независимых лазерных каналов проходит через реперную кювету, наполненную опорным газом с известным давлением и концентрацией и принимается фотоприемником реперного канала. Накачка трех РОС гетеролазеров осуществляется импульсами трапецевидной формы длительностью для каждого лазера порядка 500 мкс с частотой повторения импульсов от каждого лазера порядка 0,55 кГц. При этом между импульсами от разных лазеров осуществляется задержка порядка 100 мкс. Частота опроса каналов ЦАП/АЦП платы составляет 40 кГц.

Далее для каждого из трех лазерных каналов применяется единый алгоритм обработки сигналов. Эта операция проводится для аналитического и реперного каналов независимо друг от друга с целью определения количественного содержания анализируемого газа.

С помощью температурной стабилизации гетеролазер выводится в необходимый частотный диапазон генерации. После этого на него подается импульс тока трапецевидной формы с наложением модуляции (рис.3,а). Это позволяет сканировать линию поглощения фактически два раза за один импульс сканирования частоты и избавляться в дальнейшем от механических помех путем математической обработки сигнала. Глубина модуляции выбирается из условия, чтобы изменение частоты при изменении тока было значительно меньше ширины линии поглощения.

После приема сигнала фотоприемником осуществляется разделение сигналов S_1 и S_2 внутри импульса сканирования (рис.3,б), берется логарифм отношения этих сигналов, в результате чего получаем функцию $X(t)$ (рис.3,в).

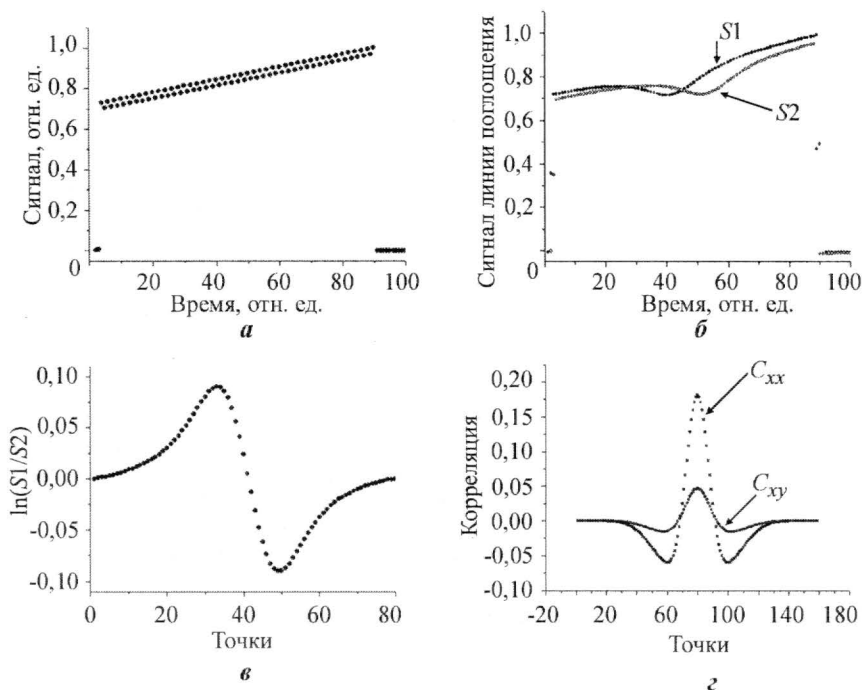


Рис.3. Этапы обработки принимаемого сигнала при определении концентрации: а – сигнал, генерируемый лазером; б – сигнал фотоприемника при сканировании линии поглощения; в – логарифм отношения сигналов на разнесенных частотах S1 и S2; г – функции автокорреляции реперного канала C_{xx} и корреляции аналитического канала с реперным C_{xy}

После проведения корреляционной обработки сигналов реперного и аналитического каналов можно рассчитать концентрацию искомого газа в аналитическом канале в относительных единицах ppm, что соответствует концентрации молекул газа на данной трассе ($1 \text{ ppm} = 10^{-6}$ молекул в объеме):

$$C = \frac{\alpha P_r L_r}{P_a L_a} \cdot 10^6,$$

где α – коэффициент корреляции сигналов в реперном и аналитическом каналах; P_r – парциальное давление газа в реперном канале, P_a – атмосферное давление; L_r , L_a – расстояние, проходимое лазерным излучением в реперном и аналитическом каналах соответственно.

С целью идентификации объекта по анализируемым газам проводится одновременное детектирование с помощью трех гетеролазеров. В данной системе этот режим осуществляется методом, который можно назвать временным мультиплексированием (рис.4). Суть метода заключается в разнесении во времени импульсов от разных лазеров, в результате чего фотоприемник принимает последовательность импульсов трапециевидной формы от трех лазеров с частотой следования порядка 1,66 кГц. Использование режима временного мультиплексирования позволяет проводить одновременные измерения содержания нескольких молекул (в существующей конфигурации возможна реализация до 6 независимых лазерных каналов). При этом время одиночного измерения пропорционально числу измеряемых компонент.

Для осуществления предложенного метода в разработанной системе использовалась рабочая станция National Instruments PXI-1031DC совместно с многоканальными платами ввода/вывода National Instruments PXI-6289M и программным обеспечением, специально

написанным в LabView 7.1. Созданный трехканальный детектор следов газов успешно испытан в лабораторных и полевых условиях и продемонстрировал отличные результаты по одновременной дистанционной регистрации трех молекулярных объектов CO_2 , CH_4 и NH_3 на расстоянии до 100 м.

На рис.5 и 6 представлены результаты лабораторных испытаний по дистанционной регистрации следов газов в атмосфере на трассе 50 м. В ходе эксперимента с небольшими интервалами выпускались контрольные газы: CO_2 (99,96%) – 5 л, CH_4 (99,99%) – 0,5 л и NH_3 (99,99%) – 0,01 л (см. рис.5). На графиках показаны результаты измерений концентраций этих газов во времени. Приведены интегральные (по всей длине измеряемой трассы) значения концентраций газов.

Главным результатом можно считать отсутствие влияния выпуска калиброванной пробы одного вида газа на измерение содержания двух других. Это обстоятельство является принципиальным и говорит о селективности метода измерения.

Результаты лабораторных испытаний по дистанционной регистрации несанкционированного присутствия человека в помещении по молекулярному объекту CO_2 представлены на рис 6. На рис.6,а показаны результаты долговременных измерений. Видно превышение концентрации CO_2 в районе 16 ч, вызванное присутствием в помещении 5 человек в течение 10 мин. На рис.6,б представлены результаты аналогичного эксперимента с участием 11 человек, находившихся в помещении в течение 8 мин.

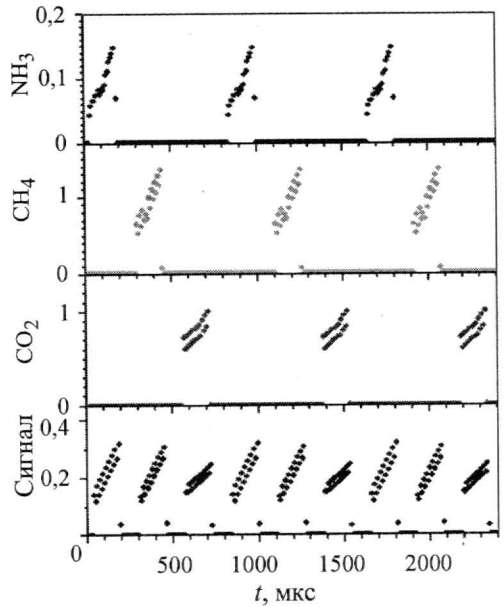


Рис.4. Режим временного мультиплексирования сигнала

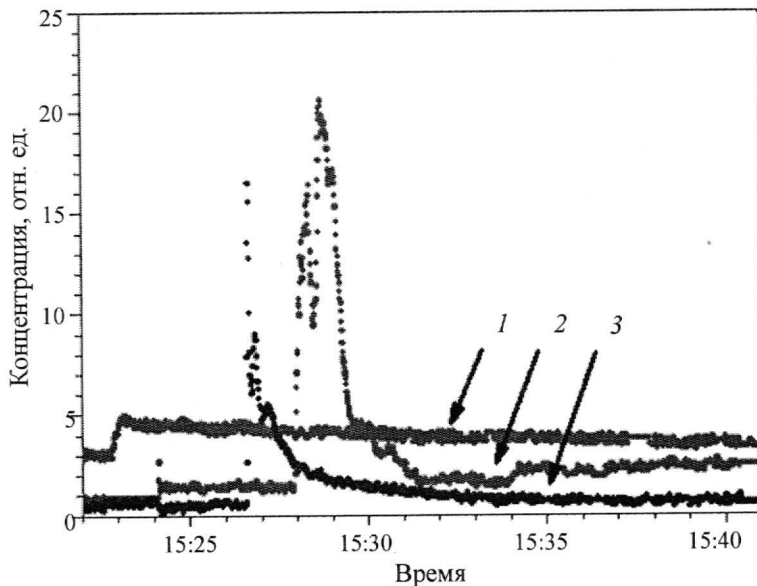


Рис.5. Одновременная регистрация следов газов на трассе 50 м:
1 – CO_2 (ppm/100); 2 – CH_4 (ppm); 3 – NH_3 (ppm·10)

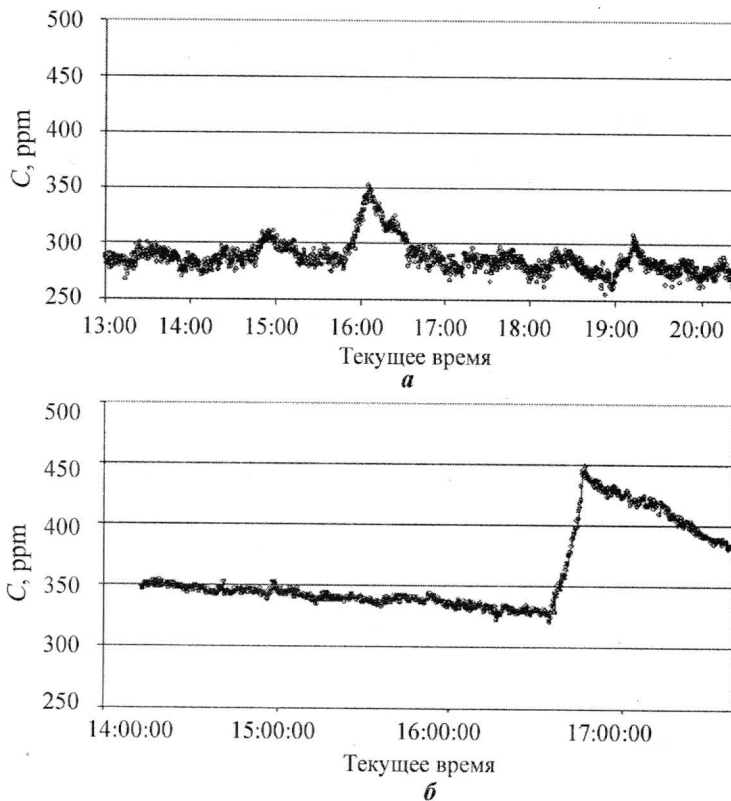


Рис. 6. Дистанционная регистрация несанкционированного присутствия людей в помещении: а – 5 человек в течение 10 мин; б – 11 человек в течение 8 мин

Таким образом, впервые создана система, способная вести мониторинг по трем молекулярным объектам одновременно. Разработанный алгоритм накачки гетеролазеров с математической обработкой сигнала с фотоприемника позволил получить чувствительность на уровне 300 ppb для CH_4 , 30 ppb для CO_2 и 0,5 ppb для NH_3 на трассе до 100 м.

Материалы статьи были доложены на III Международной научно-технической конференции «Информационные технологии в науке, технике и образовании» (Республика Абхазия, Пицунда, 19-29 сентября 2007 г.).

Литература

1. Электронный нос и проблемы безопасности / А.Г.Березин, А.Д.Бритов, Д.Ю.Наместников и др. // Наука и технологии в промышленности. – 2005. – № 3. – С. 31.
2. Березин А.Г., Бритов А.Д., Надеждинский А.И., Наместников Д.Ю. / Оптико-электронный детектор утечек метана // Материалы междунар. научн.-техн. конф. «Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения». – М.: 2004. – Ч. 1. – С. 2091.
3. Hinkley E.D. High-resolution infrared spectroscopy with a tunable diode laser // Appl. Phys. Lett. – 1970. – Vol. 16, Issue 9. – P. 351–354.
4. Hinkley E.D. Laser Monitoring of the Atmosphere // Topics in Appl. Phys. – Berlin: Springer, 1976. – Vol. 14. – P. 157.

5. Дистанционное детектирование ВВ методами диодной лазерной спектроскопии (ДЛС) / *А.И.Надеждинский, Д.Ю.Наместников, Я.Я.Понуровский и др.* // Тез. докл. V общероссийского семинара по диодной лазерной спектроскопии (ДЛС). – М., 2006. – С. 4.

6. Дистанционное обнаружение следов газов / *А.И.Надеждинский, Д.Ю.Наместников, Я.Я.Понуровский и др.* // Сб. тр. III Научн.-техн. конф. «Системы наблюдения, мониторинга и дистанционного зондирования земли» (11 – 15 сентября 2006 г.). – М.: МНТО РЭС им. А.С.Попова, 2006. – С. 37.

Статья поступила
26 ноября 2007 г.

Бритов Александр Дмитриевич – доктор физико-математических наук, профессор кафедры полупроводниковой электроники МЭИ, лауреат Ленинской премии. *Область научных интересов:* молекулярная диодная лазерная спектроскопия и газоанализ с использованием разработанных диодных газоанализаторов высокого разрешения и чувствительности, лазерные оптико-электронные приборы, физика квантовых систем.

Белоконев Виктор Михайлович – кандидат технических наук, заместитель директора ФГУП «Альфа» (г. Москва) по научной работе, начальник НТЦ. *Область научных интересов:* фотоприемники и фотоприемные устройства для тепловидения и инфракрасной техники, оптико-электронные приборы, лазерные приборы, тепловизионные приборы, приборы ночного видения.

Надеждинский Александр Иванович – доктор физико-математических наук, профессор ИОФ РАН. *Область научных интересов:* молекулярная диодная лазерная спектроскопия и газоанализ с использованием разработанных диодных газоанализаторов высокого разрешения и чувствительности, исследование поглощения атмосферных газов.

Наместников Дмитрий Юрьевич – научный сотрудник ИОФ РАН. *Область научных интересов:* лазерные оптико-электронные приборы, молекулярная диодная лазерная спектроскопия и газоанализ с использованием разработанных диодных газоанализаторов высокого разрешения и чувствительности.

Понуровский Яков Яковлевич – кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией ИОФ РАН. *Область научных интересов:* физика спектроскопии, молекулярная диодная лазерная спектроскопия и газоанализ с использованием разработанных диодных газоанализаторов высокого разрешения и чувствительности.

Информация для читателей журнала

«Известия высших учебных заведений. Электроника»

Вы можете оформить подписку на 2008 г. в редакции с любого номера.

Стоимость одного номера – 600 руб. (с учетом всех налогов и почтовых расходов).

Адрес редакции: 124498, Москва, Зеленоград, проезд 4806, д. 5, МИЭТ, комн. 7232

Тел.: (495) 534-62-05. Факс: (495) 530-54-29. E-mail: magazine@rnd.miee.ru

<http://www.miet.ru/static/je/os.html>