

## ЛАЗЕРНОЕ ТРАССОВОЕ ДЕТЕКТИРОВАНИЕ МАЛЫХ КОНЦЕНТРАЦИЙ $N_2O$ – ОДНОГО ИЗ ОСНОВНЫХ РАЗРУШИТЕЛЕЙ ЗАЩИТНОГО ОЗОНОВОГО СЛОЯ ЗЕМЛИ

Разрушение защитного озонового слоя земной атмосферы (озоновые дыры) способно вызвать глобальную экологическую и климатическую катастрофу. Мировое сообщество глубоко озабочено этой проблемой и проявляет к ней постоянное неослабевающее внимание на протяжении многих лет. Достоверно установлено, что за появление озоновых дыр ответственны продукты жизнедеятельности человека – фреоны и закись азота ( $N_2O$ ). К настоящему времени разработаны и уже используются лазерные методики трассового детектирования известных фреонов, например, на основе  $CO_2$ -лазера, линии генерации которого совпадают с их полосами поглощения. Спектральный анализ показал, что основная проблема детектирования  $N_2O$  связана с отсутствием у этой молекулы полос поглощения в диапазонах спектра, где работают известные мощные лазерные источники (см. рис. 1).

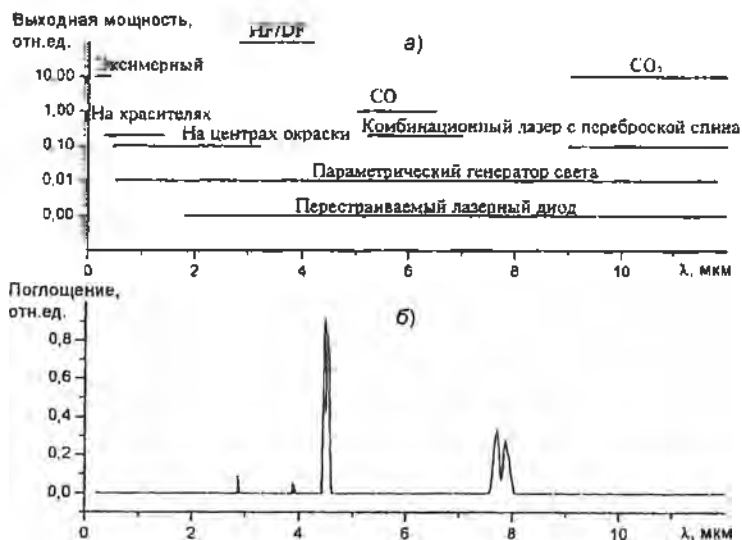


Рис. 1. Характеристики известных лазерных систем, полученная на основе работы [1] (а) и спектр поглощения молекулы  $N_2O$  (б)

В основу предложенной нами методики детектирования  $N_2O$  положена идея, суть которой заключается в использовании  $CO_2$ -лазера на изотопической модификации углекислого газа  $^{12}C^{18}O_2$  с эффективным удвоением частоты его излучения в нелинейном кристалле. У такой лазерной системы существуют соседние линии мощной генерации, как хорошо совпадающие, так и несовпадающие с линиями поглощения  $N_2O$ . Это дает возможность использовать особо точный метод дифференциального поглощения (на линиях «on line» и «off line»). Высокая эффективность такой системы и сильное поглощение молекулы  $N_2O$  (используется самая интенсивная ее полоса с  $\lambda=4,5$  мкм) обеспечивают детектирование малых газовых концентраций вплоть до уровня  $\sim 1$  ppb как на небольших, так и на протяженных трассах.

В результате проведенных исследований разработана методика детектирования малых концентраций  $N_2O$  и создана эффективная лазерная система для ее реализации. Принципиально важно, что трассовое зондирование осуществляется мощным молекулярным газовым лазером. Характерная особенность такого лазера — узкая линия генерации и высокая стабильность спектральных и энергетических выходных параметров. Причем, в отличие от полупроводниковых и твердотельных лазеров это достигается естественным путем без дополнительных устройств, что существенно упрощает лазерную систему.

Для трассового детектирования  $N_2O$  перспективны два типа электроразрядных  $CO_2$ -лазеров. Первый, низкого давления с продольным разрядом, более эффективен при измерениях на малых и средних трассах (0,1–2,0 км). Как правило, он работает при отражении лазерного излучения от так называемого уголкового отражателя [2]. Второй, ТЕА, целесообразно применять на протяженных трассах (>2 км), когда лидар работает по сигналу обратного рассеяния или при отражении импульсов излучения от топоцели [3]. Здесь рассматривается лазерная система и методика детектирования  $N_2O$ , предназначенная для газоанализа на малых и средних трассах

Лазерная система, оптическая схема которой приведена на рис. 2, имеет автоматизированную перестройку длины волны генерации и стабилизированные выходные параметры. В качестве активного элемента используется отпаянная газоразрядная трубка, подобная серийной ГЛ-501, с длиной разрядного промежутка 1,2 м. В экспериментах использовалась изотопозамещенная разновидность двуокиси углерода  $^{12}C^{18}O_2$  с типичным коэффициентом обогащения по  $^{18}O_2$  в заводских условиях — 80 %, т.е. смесь газов содержала 4 %  $^{12}C^{16}O_2$ , 32 %

$^{12}\text{C}^{16}\text{O}^{18}\text{O}$  и 64 %  $^{12}\text{C}^{18}\text{O}_2$ . Получение смеси с более высокой степенью обогащения по  $^{12}\text{C}^{18}\text{O}_2$  намного сложнее и дороже. Мы провели детальные исследования эффективности  $^{12}\text{C}^{18}\text{O}_2$ -лазера в зависимости от степени обогащения углекислого газа [4]. Эти эксперименты показали, что эффективность  $^{12}\text{C}^{18}\text{O}_2$ -лазера практически не падает даже при очень сильном разбавлении активной среды обычной дешевой молекулой  $^{12}\text{C}^{16}\text{O}_2$ , причем вплоть до соотношения  $^{12}\text{C}^{18}\text{O}_2 : ^{12}\text{C}^{16}\text{O}_2 = 1:3$ .

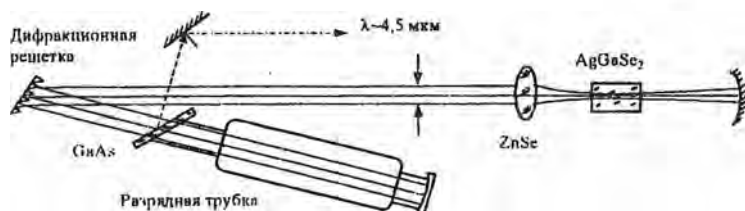


Рис. 2. Оптическая схема лазерной системы

Известно [5], что при питании газоразрядной трубки от импульсного источника пиковая мощность в оптимальном режиме может возрасти более чем на порядок по сравнению с непрерывной электрической накачкой. Это особенно важно для лазеров, которые используются в составе лидарных систем. Во-первых, значительно увеличивается длина зондируемой трассы, во-вторых, импульсно-периодический режим генерации с оптимальной частотой следования импульсов (~1 кГц) удобен при накоплении и обработке оптических и электрических сигналов и не требует дополнительных устройств для модуляции излучения. Особенно актуально использование импульсно-периодического электропитания при генерации 2-ой гармоника (ГВГ) в нелинейных кристаллах. В этом случае значителен выигрыш в КПД преобразования по пиковой мощности. Наши эксперименты показали, что для данного лазера выходная мощность (пиковая) при питании газоразрядной трубки от импульсного источника увеличивается почти на порядок по сравнению с непрерывным питанием и достигает на сильных линиях молекулы  $^{12}\text{C}^{18}\text{O}_2$  ~100 Вт.

ГВГ в среднем ИК диапазоне имеет низкую эффективность. Поэтому для  $\text{CO}_2$ -лазеров остается актуальным разработка новых эффективных оптических схем частотного преобразования. В этом направлении нами был выполнен ряд исследований [6], на основе которых удалось реализовать оригинальную внутрирезонаторную схему ГВГ

(см. рис. 2) Кристалл помещался в резонатор, где плотность поля намного выше, чем на выходе из резонатора. Это позволило существенно увеличить эффективность ГВГ.

В опытах использовался образец монокристалла  $\text{AgGaSe}_2$  высоко-го оптического качества (коэффициент поглощения  $\sim 0,02 \text{ см}^{-1}$ ). Кристалл имел форму правильного прямоугольника, оптические грани которого не просветлялись. Базовая длина  $l$  составляла 19 мм. Параллельность рабочих граней была высокой, что обеспечивало возможность его использования в качестве эталона Фабри-Перро. Угол фазового синхронизма задавался таким образом, чтобы при нормальном падении на кристалл излучения накачки максимум эффективности ГВГ приходился на линии генерации в диапазоне  $9,0 \div 9,1 \text{ мкм}$ . Дифракционная решетка (100 шт/мм) работала в первом порядке дифракции в неавтоколлимационном режиме. Вывод излучения 2-ой гармоники ( $\sim 75\%$ ) осуществлялся через бростеровское окно из GaAs (использовалось то обстоятельство, что поляризация излучения 2-ой гармоники ортогональна поляризации излучения накачки).

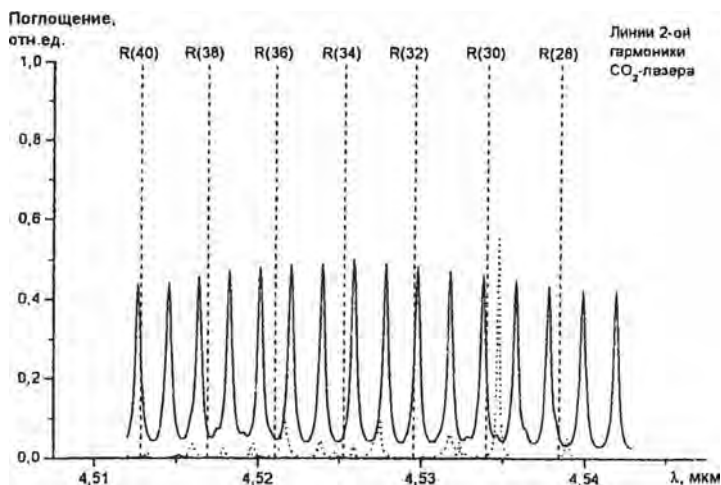


Рис. 3. Спектр поглощения  $\text{N}_2\text{O}$  и фоновых газов  $\text{CO}$  и  $\text{H}_2\text{O}$   
 $2L = 0,2 \text{ см}$ ,  $T = 273 \text{ К}$ . —  $\text{N}_2\text{O}$  (0,32 ppm), - - -  $\text{H}_2\text{O}$  (7750 ppm) +  $\text{CO}$  (0,15 ppm)

В оптимальных условиях пиковая мощность излучения 2-ой гармоники ( $\lambda \sim 4,5 \text{ мкм}$ ) превышала 2 Вт. Этого было вполне достаточно, чтобы проводить трассовое детектирование различных газов:  $\text{N}_2\text{O}$ ,

CO, NO, H<sub>2</sub>O и т.д. на небольшой трассе протяженностью  $L = 0,1$  км (зондируемая длина  $2L = 0,2$  км). При этом использовалась типичная для лидаров приемная система [7], а отражение (диффузное) осуществлялось от фанерного щита, покрытого металлизированной краской.

Из рис. 3, на котором представлены спектральные характеристики получены путем компьютерного моделирования на основе современных пакетов спектроскопических данных по способу дифференциального поглощения, можно выбрать оптимальные пары лазерных линий («on line» и «off line»). В качестве «on line» (линия с максимальным поглощением) бралась удвоенная частота линии R(32) или линии R(40), а в качестве «off line» (линия с минимальным поглощением) выбирались удвоенные частоты соседних с ними линий R(34) или R(38), соответственно. Важно, что указанные лазерные линии не совпадают с линиями поглощения фоновых газов H<sub>2</sub>O и CO, которые всегда присутствуют в атмосфере, и на них получена эффективная генерация.

Оценочные расчеты показали, что достаточно высокая мощность используемой лазерной системы способна обеспечить с высокой точностью (~10 %) измерение малых газовых концентраций N<sub>2</sub>O вплоть до уровня нескольких ppb на трассах, протяженностью ~1 км. При этом для отражения лазерных импульсов целесообразно использовать уголкового зеркальный отражатель.

#### Литература

1. Meyer P.L., Sigrist M.W. Atmospheric pollution monitoring using CO<sub>2</sub> laser photoacoustic spectroscopy and other techniques // Rev. Sci. Instrum. 1990. Vol. 61, № 7. P. 1779–1807.
2. Трассовый газоанализатор на основе перестраиваемого CO<sub>2</sub>-лазера с удвоением частоты / Ю.М. Андреев, В.Г. Воеводин, А.И. Грибенюков и др. // ЖПС. 1987. Т. 47, № 1. С. 15–20.
3. Межерис Р. Лазерное дистанционное зондирование. М.: Мир. 1987. 550 с.
4. Исследование спектра усиления и генерации ТЕА <sup>12</sup>C<sup>18</sup>O<sub>2</sub>-лазера. / В.О. Петухов, Н.Н. Сажина, А.М. Серегин, и др. // ЖПС. 1987. Т. 47, № 2. С. 208–212.
5. Алейников В.С., Масычев В.И. Лазеры на окиси углерода. М.: Радио и связь. 1990. 420 с.
6. Efficient intracavity frequency doubling of CO<sub>2</sub> laser in nonlinear crystals / V.O. Petukhov, V.A. Gorobets, S.Ya. Tochitsky, K.V. Kozlov // Proceedings of SPIE 2001. Vol. 4351. P. 171–175.
7. Petukhov V.O., Gorobets V.A., Kozlov K.V. Program-controlled gas analyser based on TEA CO<sub>2</sub> laser tunable in the super wide spectral region // Proceedings of SPIE 2000. Vol. 4064. P. 23–32.