

УЛЬТРАЗВУКОВОЙ СО₂-ЛАЗЕРНЫЙ ОПТИКО-АКУСТИЧЕСКИЙ ТЕЧЕЙСКАТЕЛЬ

В. С. Старовойтов

Институт физики им. Б. И. Степанова НАН Беларуси, Минск

Проверка технологического оборудования на вакуумную герметичность является актуальной народно-хозяйственной задачей и занимает важное место среди методов неразрушающего контроля. Течеискатели находят широкое применение в автомобильной промышленности, в производстве HVAC-систем, при создании вакуумных систем и систем высокого давления, при изготовлении различного рода упаковки, в аэрокосмической промышленности. Особое место занимают течеискатели, предназначенные для *in situ* локализации источников утечки. Чувствительность этих приборов ограничена влиянием различных свойств атмосферного воздуха. Для наиболее совершенных моделей (гелиевых масс-спектрометрических или галогенных течеискателей) чувствительность (скорость минимальной детектируемой течи) составляет величину $\sim 10^{-8} \text{ см}^3/\text{сек}$. К недостаткам подобных моделей следует отнести ограниченное число веществ, используемых в качестве пробных (для галогенных течеискателей - это фтор/хлор/бром/йод-содержащие соединения) или их высокую стоимость (He).

Одним из возможных путей решения данной проблемы является создание течеискателя, действие которого основано на лазерном оптико-акустическом (ОА) эффекте. Принцип действия ОА-подхода основан на определении амплитуды и фазы акустических колебаний давления газа, возникающих при поглощении модулированного лазерного излучения молекулами газа внутри специально сконструированной ОА-камеры. Высокая чувствительность ОА-детектирования (детектируемое поглощение может достигать $\sim 10^{-10} \text{ см}^{-1}$) реализуется, когда излучение модулируется на частоте одного из акустических резонансов ОА-камеры. Основными достоинствами подхода являются избирательность детектирования по веществу, линейность определения концентраций в широком динамическом диапазоне (вплоть до 8 порядков) и оперативность (вплоть до 1 с). Одними из наиболее перспективных источников излучения представляются лазеры на молекулах СО₂ или их изотопах [1]. Применение СО₂-лазера позволяет получать генерацию излучения для большого числа линий в диапазоне длин волн от 8 до 12 мкм и детектировать большое число веществ (включая фтор/хлор-содержащие соединения), обладающих

связями типа C-O, C-N, C=S, P=O, C-F, S=O, Si-O-, Si-H, P-OC, P-OH, S=O, N-H, P-H, As-H и др [2].

Приложение методов, основанных на CO₂-лазерном ОА-эффекте, для задач течеискания уже рассматривалось ранее. Наибольший успех (чувствительность до 10⁻⁵ см³/с для SF₆) был достигнут в [3], где лазерный луч периодически сканировался по области воздушного пространства в непосредственной близости от предполагаемой течи. Невысокая чувствительность (отсутствие резонансной ОА-камеры) и потенциальная огнеопасность подхода (неканализированный луч CO₂-лазера в непосредственной близости от испытуемого объекта) затруднили дальнейшее развитие подхода. Были рассмотрены и другие схемы ОА-детектирования течи. Общий недостаток этих схем заключается в применении механических обтюраторов для модуляции излучения. Обтюратор является высоко-инерционным устройством. Частоты модуляции, достигаемые с его помощью, не превышают 5 кГц. Геометрические размеры ОА-камер должны быть достаточно велики и исчисляться сантиметрами. Объем камеры может достигать до 1 литра. Как результат, приложение традиционных ("звуковых") методов ОА-детектирования для задач обнаружения газовых потоков, испускаемых малоразмерными объектами, существенно затруднено.

Применение малоинерционных электро- или акусто-оптических модуляторов обеспечивает высокостабильное переключение лазерного излучения [4]. Модулятор, помещенный внутри резонатора лазера, позволяет получать модуляцию на ультразвуковых частотах в максимуме амплитудно-частотной характеристики лазера (50-300 кГц для CO₂-лазера). Это приводит к повышению (в несколько раз) эффективности возбуждения акустических резонансов ОА-камеры по сравнению со "звуковой" модуляцией. Главное достоинство ультразвукового подхода заключается в возможности сокращения размеров ОА-камеры вплоть до миллиметров. При использовании CO₂-лазера объем камеры может составить величину -1 мм³.

Сочетание высокой чувствительности ОА-детектирования с возможностью зондировать газ в миниатюрной камере открывает широкие перспективы для ультразвукового ОА-подхода по сверхчувствительному анализу веществ, испускаемых в газовую среду малоразмерными объектами. Так, например, несколько pptv (10⁻¹⁰ об. %) этилена в азоте (предел детектирования, достигнутый в ОА-экспериментах [5] в течении 1 с) может быть произведено в результате испускания -10⁵ молекул C₂H₄ за 1 секунду (скоростью испускания -10⁻¹⁴ см³/с) отдельным объектом в объ-

еме 1 мм^3 . Согласно этой оценке, минимальные определяемые скорости испускания ряда веществ ($-10^{-14} \text{ см}^3/\text{с}$ для C_2H_4 и O_3 или $-10^{-13} \text{ см}^3/\text{с}$ для NH_3 и SF_6) малы по сравнению с чувствительностью самых совершенных систем детектирования течи ($-10^{-11} \text{ см}^3/\text{с}$ для гелиевой системы, предназначенной для испытания общей герметичности объекта, находящегося внутри вакуумной камеры-стенда).

Столь высокая чувствительность может быть достигнута при определении течи в газовой среде, не содержащей посторонних (фоновых) поглотителей излучения (например, в воздухе с пониженным содержанием H_2O и CO_2). Наличие 2% H_2O (100%-я влажность при 20°C) и 340 ppm CO_2 в атмосферном воздухе обуславливает фоновое поглощение -10^{-6} см^{-1} , ограничивающее чувствительность детектирования. Эта граница соответствует скорости испускания -10^{-10} для C_2H_4 или $-10^{-9} \text{ см}^3/\text{с}$ для SF_6 . Дальнейшее повышение чувствительности ОА-детектирования течи в воздухе (вплоть до двух порядков) может быть реализовано путем применения различных компенсационных схем.

Промышленно выпускаемый компактный волноводный CO_2 -лазер с RF-накачкой может послужить основой для малогабаритной реализации прибора. Эти системы могут быть использованы не только в качестве прибора для испытания на герметичность продукции в стенах завода-изготовителя. ОА-течеискатель на базе CO_2 -лазера может найти применение для поиска мельчайших утечек крайне токсичных (например, стибина, диборана, фосгена, фосфина, арсина и других газов, широко используемых в микроэлектронной промышленности) или взрывоопасных (тринитротолуол или циклотриметилтринитроамин) веществ при их хранении или использовании в технологических процессах. Область применения для предлагаемого прибора может быть существенно расширена путем использования в качестве источника зондирующего излучения CO -лазера, параметрического генератора света или лазера на квантовых каскадных переходах.

В докладе приводятся и обсуждаются результаты экспериментальной реализации предлагаемого подхода.

1. *Starovoitov V. S., Trushin S. A.* // Pure Appl. Opt. 1993. V. 2. P. 505-514.
2. *Старовойтов В. С., Трушин С. А., Чураков В. В.* // ЖПС. 1999. Т. 66, № 3. С.345-350.
3. *Huang E., Dowling D. R., Whelan T., Spiesberger J. L.* // J. Acoust Soc Am. 2003. V. 114, P.1926-1933.
4. *Чижевский В. Н.* // ЖПС. 1993. Т. 58, № 3-4. С. 301-301.
5. *Harren F. J. M., Bijnen F. G. C., Reus J. et al.* // Appl. Phys. B. 1990. V. 50. P.137-144.