

09

## Метод регистрации излучения ИК-диапазона посредством ультразвуковой термометрии

© Д.В. Петров<sup>1,2</sup>, Д.Е. Генин<sup>3</sup>, В.А. Корольков<sup>1</sup><sup>1</sup> Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск<sup>2</sup> Национальный исследовательский Томский государственный университет<sup>3</sup> Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск  
E-mail: dpetrov@imces.ru*Поступило в Редакцию 17 мая 2016 г.*

Рассмотрен способ регистрации излучения ИК-диапазона, основанный на использовании метода ультразвуковой термометрии. Представлены первые результаты экспериментальной апробации данного метода на примере регистрации излучения CO<sub>2</sub>-лазера, а также приведены способы увеличения его пороговой чувствительности.

DOI: 10.21883/PJTF.2017.09.44572.16335

На сегодняшний день наблюдается активное освоение длинноволнового оптического диапазона (дальний ИК, THz), имеющего большие перспективы в областях биологии, медицины, безопасности и многих других. В связи с этим возникает потребность в приемниках данного излучения, обладающих улучшенными эксплуатационными характеристиками [1,2]. Из класса фотонных приемников считаются перспективными узкозонные полупроводниковые детекторы на основе HgCdTe, PbSnTe, Ge:Cu, Ge:Hg, имеющие чувствительность в среднем и дальнем ИК-диапазоне ( $< 30 \mu\text{m}$ ) [3]. Однако из-за технологических трудностей при их производстве они пока относительно дороги, а при работе требуют охлаждения до криогенных температур, что существенным образом затрудняет их применение. Тепловые фотоприемники, известные своей широкополосностью и способностью работать при комнатной температуре, также имеют свои недостатки, среди которых низкое быстродействие и слабая чувствительность по сравнению с

фотонными. Тем не менее одним из самых чувствительных фотоприемников, представленных сегодня на рынке и работающих при комнатной температуре как в дальнем ИК-, так и в ТГц-диапазонах, является детектор Голея [4–6]. В данном типе детектора измерение энергии основывается на том, что падающее излучение вызывает внутри герметичной камеры нагрев газа, и гибкой мембраной регистрируется увеличение его объема. Недостатками таких фотоприемников являются их относительно высокая стоимость, габариты, а также подверженность влиянию вибрационных помех.

В данной статье рассматривается способ регистрации излучения, схожий с используемым в детекторе Голея, но основывающийся на измерении температуры газа.

Основная идея предлагаемого подхода заключается в том, что при поглощении энергии излучения изменение температуры газа, находящегося в герметичной камере, может быть определено посредством ультразвуковой термометрии [7]. Известно, что скорость звука ( $c$ ) в газе однозначно связана с его температурой ( $T$ ) соотношением [8]

$$c = \sqrt{\frac{\chi RT}{\mu}}, \quad (1)$$

где  $\chi = C_p/C_v$  — отношение теплоемкостей данного газа при постоянном давлении и постоянном объеме,  $R$  — универсальная газовая постоянная,  $\mu$  — молекулярный вес газа.

В соответствии с этим изменение температуры газа может быть определено из соотношения

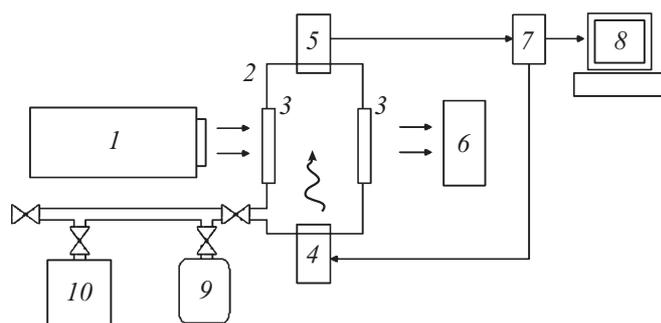
$$\Delta T = \frac{\mu}{\chi R}(c_2^2 - c_1^2), \quad (2)$$

где  $c_1$  и  $c_2$  — скорости распространения звука в газе при температурах  $T_1$  и  $T_2$  соответственно.

Таким образом, в случае поглощения внутри герметичной камеры, наполненной газом, падающего оптического излучения его энергия ( $E$ ) может быть определена посредством измерения скоростей звука в данном газе до воздействия излучения ( $c_1$ ) и после ( $c_2$ ):

$$E = k(c_2^2 - c_1^2), \quad (3)$$

где  $k$  — коэффициент пропорциональности, который может быть рассчитан аналитически либо определен эмпирически путем калибровочных измерений.



**Рис. 1.** Блок-схема экспериментальной установки: 1 — CO<sub>2</sub>-лазер, 2 — измерительная камера, наполненная газом, 3 — окна камеры (CaF<sub>2</sub>), 4 — излучатель УЗ-колебаний, 5 — приемник УЗ-колебаний, 6 — фотоприемник Orpik, 7 — блок питания и электроники, 8 — ПК, 9 — баллон с SF<sub>6</sub>, 10 — форвакуумный насос.

Методы измерения скорости звука на сегодняшний день достаточно хорошо развиты и относительно просты в реализации. Ввиду этого температура газовой среды может быть измерена с относительно малой инерционностью ( $< 10$  ms) при чувствительности 0.01 K [9].

Необходимо отметить, что поглощение оптического излучения может быть осуществлено как черным телом (в качестве поглощающего элемента) с последующей отдачей тепла газу, так и непосредственно самим газом или газовой смесью. В нашем случае экспериментальная апробация описанного выше метода была проведена на примере регистрации излучения с длиной волны  $\lambda = 10.6 \mu\text{m}$  от импульсного CO<sub>2</sub>-лазера путем его поглощения специально подобранной газовой средой, находящейся внутри герметичной камеры (рис. 1).

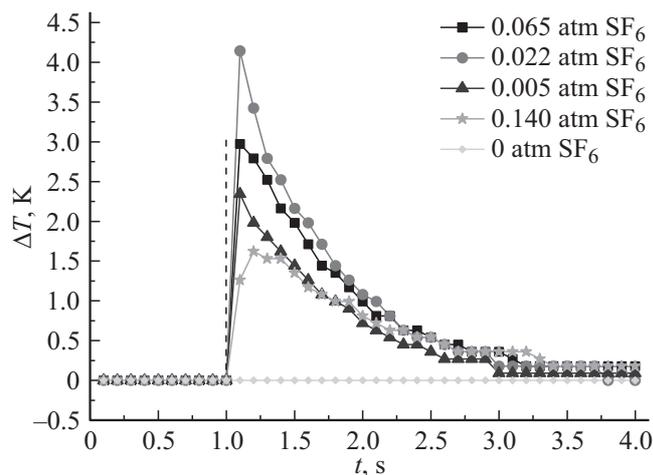
Для проведения экспериментов была изготовлена камера внутренним объемом 11 см<sup>3</sup> с ортогональной схемой совмещения путей распространения акустического и оптического излучений. Внутри нее на расстоянии 64 mm друг от друга были установлены излучатель и приемник ультразвуковых (УЗ) колебаний частотой  $\sim 120$  kHz. Скорость распространения звука между ними определялась путем измерения времени пролета УЗ-импульсов с частотой следования 10 Hz. В соответствии с тактовой частотой используемого АЦП (32 MHz) и расстоянием между УЗ-излучателем и приемником минимальная

регистрируемая величина изменения скорости звука внутри камеры составила  $\sim 0.05$  m/s, что соответствует изменению температуры 0.09 K (в атмосферном воздухе при нормальных условиях).

Также необходимо отметить, что расстояние между входным и выходным окнами камеры составляло 25 mm, а диаметр УЗ-излучателя и приемника — 12 mm. Используемый лазер [10] с установленной диафрагмой на выходе диаметром 12 mm обеспечивал генерацию импульсов с энергией  $320 \pm 10$  mJ длительностью 50 ns (на полувывоте). Контроль энергии излучения производился фотоприемником Ophir с сенсорными головками PE-50BB и FL250A-EX-SH.

В качестве газа, поглощающего оптическое излучение в области  $10.6 \mu\text{m}$ , был выбран элегаз ( $\text{SF}_6$ ), который обладает интенсивными полосами поглощения в данном диапазоне [11]. Проведенный теоретический расчет показал, что ввиду высокого коэффициента поглощения ( $\sim 60 \text{ cm}^{-1}$ ) при его содержании в камере уже на уровне 0.05 atm происходит поглощение более 99.9% падающего излучения. Однако такая среда характеризуется крайне высоким коэффициентом затухания ультразвука. Ввиду этого был использован буферный газ, в качестве которого был выбран атмосферный воздух. Суммарное давление внутри камеры составляло 1 atm.

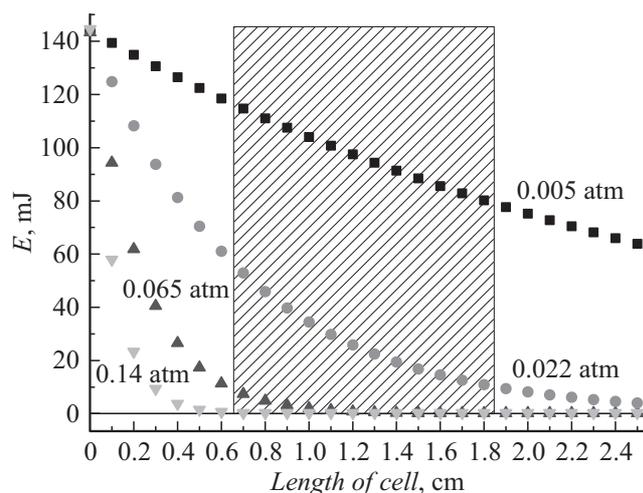
В ходе проведения экспериментов по апробации метода камера наполнялась газовой средой с различным парциальным давлением  $\text{SF}_6$ , после чего внутрь нее направлялось лазерное излучение и регистрировалось изменение скорости звука и соответственно температуры. Полученные экспериментальные результаты представлены на рис. 2. В случае нахождения внутри камеры  $\text{SF}_6$ , после воздействия лазерного излучения регистрировалось резкое изменение температуры с последующим ее уменьшением (в течение  $\sim 3$  s). Время отклика в соответствии с частотой следования УЗ-импульсов составляло 100 ms. В случае наполнения камеры чистым воздухом изменения его температуры после воздействия лазерного излучения не происходило, даже несмотря на нагревание окон камеры, ввиду относительно низких коэффициентов пропускания ( $\sim 45\%$ ). Помимо этого, наблюдалась различная максимальная регистрируемая величина изменения температуры газовой среды при различном парциальном давлении  $\text{SF}_6$ . Данные результаты объясняются различным распределением тепла внутри камеры, выделяющегося в результате поглощения лазерного излучения. На рис. 3 представлен результат моделирования зависимостей ослабления лазерного импульса



**Рис. 2.** Динамика изменения температуры газа внутри камеры при различных парциальных давлениях  $\text{SF}_6$ . Пунктирная линия — момент воздействия лазерного импульса.

при его распространении внутри камеры, наполненной газовой смесью с различными парциальными давлениями  $\text{SF}_6$ . Сопоставляя данные, приведенные на рис. 2 и 3, можно видеть, что зарегистрированные величины изменения температуры газа коррелируют с величинами поглощенной энергии непосредственно внутри области распространения УЗ-импульсов.

Согласно полученным данным, наибольшая величина нагрева была зафиксирована при парциальном давлении  $\text{SF}_6$ , равном 0.022 атм, и составила 4.3 К. Исходя из величины энергии лазерного излучения и чувствительности используемой системы регистрации скорости распространения УЗ, следует, что пороговая чувствительность метода с данной измерительной камерой составила  $\sim 7$  мДж. Необходимо отметить, что в данном случае, в соответствии с теоретическими расчетами, температура газа (до релаксации на стенках) в области взаимодействия с лазерным лучом должна была увеличиться на величину, близкую к 50 К, а после усреднения по всему объему камеры на  $\sim 10.5$  К. Таким образом, при оптимизации внутренних размеров измерительной камеры, а также при увеличении частоты следования УЗ-импульсов,



**Рис. 3.** Динамика ослабления энергии лазерного импульса внутри камеры при различных парциальных давлениях  $\text{SF}_6$ . Штриховкой выделена область распространения ультразвука.

которая может быть увеличена минимум на несколько порядков, инерционность будет меньше, а максимальная регистрируемая величина нагрева будет больше, в результате чего пороговая чувствительность метода будет существенно улучшена. Также стоит отметить, что данный метод может быть использован без дополнительных компонентов для измерения энергии импульсов с большой пиковой мощностью ввиду отсутствия элементов, которые могут быть ими повреждены.

Таким образом, полученные результаты показывают, что на основе предложенного метода может быть создан селективный фотоприемник с большим динамическим диапазоном для регистрации излучения в области  $10.6 \mu\text{m}$ . Помимо этого, путем подбора подходящей газовой среды либо путем использования черного тела для поглощения излучения и последующей отдачи тепла газу возможно осуществление при помощи данного метода регистрации излучения еще более длинноволнового диапазона (дальний ИК, THz).

Работа выполнена при поддержке РФФИ и Фонда „Национальное интеллектуальное развитие“ (грант № 16-32-80039).

## Список литературы

- [1] *Sizov F., Rogalsky A.* // Prog. Quantum Electron. 2010. V. 34. P. 278–347.
- [2] *Войцеховский А.В., Несмелов С.Н., Кульчицкий Н.А.* и др. // Нано- и микросистемная техника. 2012. № 3. С. 25–34.
- [3] *Rogalsky A.* // Infrared Phys. Technol. 2002. V. 43. P. 187–210.
- [4] *Ledwosinska E., Szkopek T., Guermoune A., Siaj M.* // Proc. SPIE. 2012. V. 8261. P. 82610A.
- [5] *Иглакова А.Н., Ошлаков В.К., Селезнев Л.В., Тихомиров Б.А.* // Оптика атмосферы и океана. 2015. Т. 28. № 4. С. 354–358.
- [6] *Гельфанд А.В., Паулиш А.Г., Федоринин В.Н.* // Прикладная физика. 2009. № 2. С. 109–114.
- [7] *Корольков В.А.* // Патент РФ № 2208224. Бюллетень изобретений. 2001. № 2.
- [8] *Красильников В.А., Крылов В.В.* Введение в физическую акустику. М.: Наука, 1984. 400 с.
- [9] *Азбукин А.А., Богушевич А.Я., Кобзев А.А.* и др. // Датчики и системы. 2012. № 3. С. 47–52.
- [10] *Орловский В.М., Панченко А.Н., Тарасенко В.Ф.* // Квантовая электроника. 2010. Т. 40. № 3. С. 192–194.
- [11] *Михайленко С.Н., Бабилов Ю.Л., Головкин В.Ф.* // Оптика атмосферы и океана. 2005. Т. 18. № 9. С. 765–776.