

КОНФЕРЕНЦИЯ В

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ

В АТМОСФЕРЕ И ОКЕАНЕ

КРИТЕРИИ ВЫБОРА ДЛИН ВОЛН ЛАЗЕРОВ ДЛЯ ДИСТАНЦИОННОГО ГАЗОАНАЛИЗА

О.К. Войцеховская, О.В. Егоров, Д.Е. Каширский

Кафедра квантовой электроники и фотоники, Радиофизический факультет, Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия

vok44@mail.tsu.ru, egorov@mail.tsu.ru, kde@mail.tsu.ru

Ключевые слова: CO₂ лазер, водяной пар, спектр пропускания, газоанализ, оптическая диагностика.

Аннотация. Рассмотрены критерии выбора оптимальных длин волн для дистанционного зондирования газовых сред на примере CO₂ лазера. Оценено влияние различных факторов на экспериментальные и теоретические значения спектральных характеристик среды.

Преимущество оптических методов диагностики газовых сред заключается в их бесконтактности, высокой чувствительности, быстродействии и универсальности. Регистрируемые спектральные характеристики являются исходными данными при определении параметров исследуемой среды. При этом точность газоанализа во многом зависит от используемой длины волны (частоты) излучения рабочего лазера. Поэтому предварительное моделирование регистрируемого излучения необходимо для корректного анализа результатов измерений. В рамках метода дифференциального поглощения существуют следующие требования к выбору рабочей длины волны лазера [1]: а) наибольшее совпадение центров линий излучения лазера и поглощения контролируемого газа; б) наименьшее мешающее поглощение другими компонентами; в) расположение в окне прозрачности атмосферы Земли; г) достаточная мощность приходящего на фотоприемник излучения, превышающая его обнаружительную способность.

Однако наряду с перечисленными критериями необходимо учитывать и ещё ряд факторов, обычно не принимаемых во внимание. В первую очередь следует отметить влияние достоверности значений длин волн излучения лазера и параметров спектральных линий поглощающего газа на точность газоанализа. Помимо этого, абсолютные значения измеряемых спектральных характеристик зависят от ширины лазерной линии излучения. Погрешность математического аппарата решения обратной оптической задачи также является важным фактором, который может привести к значительным ошибкам.

Для точных спектроскопических измерений необходимо применять лазеры, работающие в непрерывном режиме генерации. При импульсной генерации частота лазерного излучения может меняться в течение длительности импульса из-за нестационарности процесса. В настоящий момент значения многих центров линий излучения CO₂ лазера определены с

точностью до 10^{-2} см^{-1} [2–4]. Например, для данных [2, 3] расхождения в значениях центров линий переходов $P(40) \div R(40)$, принадлежащих двум основным излучательным полосам CO_2 лазера, наблюдается только в третьем знаке после запятой. Однако при кюветных измерениях малых концентраций газов, когда ширина линий поглощения определяется эффектом Доплера, такая погрешность будет влиять на величину регистрируемого коэффициента поглощения.

При совпадении центров линий излучения лазера и поглощения контролируемого газа величина коэффициента поглощения будет также зависеть от ширины лазерной линии [5]. Ширина линии излучения CO_2 лазера может плавно варьироваться в интервале 250 – 650 МГц при соответствующем изменении мощности 250 – 400 мДж. Например, в [6] ширина линии излучения перехода $P20$ полосы $(00^0_1-10^0_0)$ составила 250 МГц при мощности излучения 250 мДж. В [7] применена новая технология измерения спектральной ширины импульсного лазера и получена величина $0.013 \pm 0.002 \text{ см}^{-1}$, которая совпадает с модельными расчётами. В [8] нами предложен способ определения ширины лазерной линии по величине поглощения водяным паром. При близком (менее 0.001 см^{-1}) совмещении центра лазерной линии с центром линии поглощения газа, увеличение ширины лазерной линии вызывает уменьшение поглощения, а при попадании линии излучения лазера на ближнее крыло поглощения может увеличиваться.

Из рисунка 1 следует, что значения коэффициента поглощения газа H_2O , полученные в независимых экспериментах, расходятся до 40 % и соответствуют различным величинам ширины линии излучения CO_2 лазера. При этом необходимо отметить, в случае газа H_2O присутствуют два механизма поглощения – селективное и континуальное и возможна ситуация, когда эти эффекты компенсируют друг друга. Так при попадании линии излучения CO_2 -лазера в микроокно прозрачности спектра поглощения газа H_2O , изменение коэффициента поглощения от ширины линии излучения пренебрежимо мало (например, для линии $10R16$ ($973.28852 \text{ см}^{-1}$) CO_2 -лазера), так как поглощение определяется только континуальным фактором (рисунок 2).

Базы данных параметров спектральных линий HITRAN [9, 10] и GEISA [11] наиболее популярны при моделировании спектральных характеристики атмосферных и примесных газов. Например, в [12] вычисления сечений поглощения 15 молекул на длинах волн CO_2 лазера и его изотопов осуществлены с использованием базы данных GEISA. В таблице 1 приведены результаты расчётов оптической толщины с использованием различных баз данных для лазерной линии $10R20$. При расчётах центр линии излучения CO_2 лазера был равен $975.93044 \text{ см}^{-1}$ [3] и применялась гауссова форма контура с шириной 0.013 см^{-1} [7]. Температура поглощающего газа H_2O была равна 300 К, парциальное давление – 0.0131579 атм , длина пути 1 см, контур линии поглощения газа H_2O – Фойгт. Как следует из таблицы 1, результаты весьма близки. В

таблице 2 приведены результаты расчётов при варьировании ширины лазерной линии, когда используется база данных HITRAN2012. Результаты из таблицы 2 попадают в интервал экспериментальных значений, приведенных в обзоре [13] – $9.09 \div 12.80 \text{ см}^{-1}$. Отметим, что все расчёты проводились с использованием программного комплекса TRAVA [14].

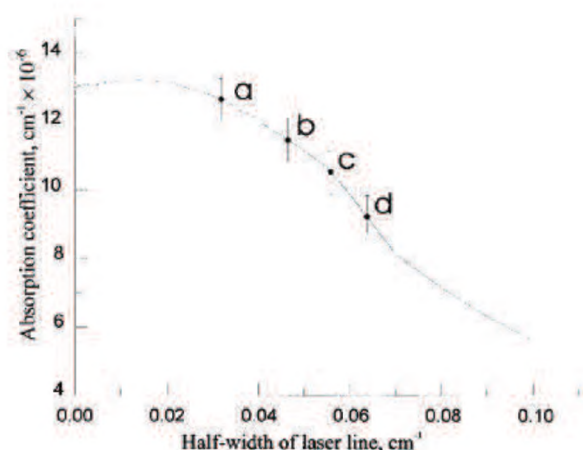


Рисунок 1 – Зависимость коэффициента поглощения газа H_2O от ширины линии CO_2 лазера и согласие с различными экспериментами (рисунок взят из [5])

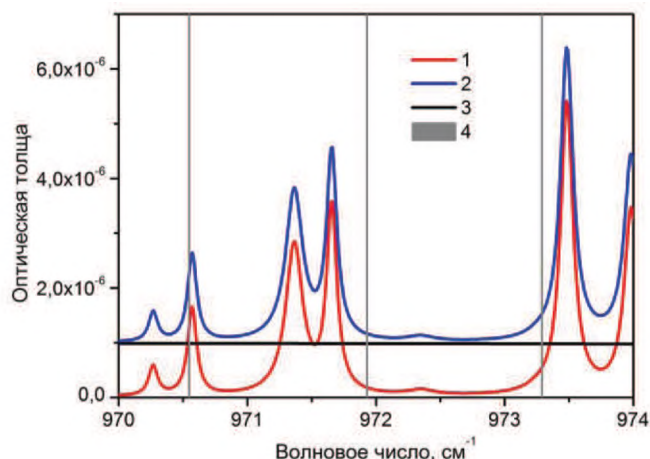


Рисунок 2 – Оптическая толщина с учётом только селективного (1) и только континуального (3) поглощения; 2 – с учётом обоих типов поглощений; 4 – центры лазерных линий R12–R16 CO_2 из [3]

Таблица 1 – Оптическая толщина, вычисленная с использованием различных баз данных (условия расчёта см. тексте)

База данных	HITRAN2012	HITRAN2016	GEISA2015	[15]
Оптическая толщина, $\times 10^6 \text{ см}^{-1}$	10.9508	10.5749	10.7579	12.1655

Таблица 2 – Оптическая толщина, вычисленная с использованием базы данных HITRAN2012 при различных значениях полуширины линии излучения CO_2 лазера (условия расчёта см. тексте)

Ширина лазерной линии см^{-1}	0.001	0.005	0.01	0.05	0.1
Оптическая толщина, $\times 10^6 \text{ см}^{-1}$	9.040	11.05	11.00	9.75	7.76

Дополнительный, но не менее важный критерий формируется при учёте влияния атмосферы Земли. Необходимо оценивать роль ослабления излучения атмосферой в зависимости от местоположения рабочей установки и времени года. Важным индикатором при планировании такого эксперимента является значение произведения:

$$I = T_{atm} (e^{-\Delta K l}) P,$$

где P – мощность излучения на колебательно-вращательном переходе CO_2 лазера; ΔK – разность коэффициентов поглощения зондируемого газа на линии и вне линии; T_{atm} – функция пропускания атмосферы; l – длина пути.

Превышение значения I над обнаружительной способностью имеющегося фотоприемника позволит выбрать оптимальные рабочие линии излучения CO_2 лазера. Особую роль в выборе рабочих линий приобретает расчёт температурных зависимостей коэффициентов поглощения зондируемых газов, поскольку их максимумы достигаются при различных значениях температуры поглощающей среды.

Таким образом, показано, что предварительное моделирование излучения, регистрируемого оптической системой, повышает точность определения характеристик газовых сред.

Работа поддержана стипендиями Президента Российской Федерации (СП-2547.2016.1 и СП-3875.2018.5).

1. Межерис Р. Лазерное дистанционное зондирование // М.: Мир. 1987. 550 с.
2. Amy-Klein A., Vigué H., Chardonnet C. Absolute frequency measurement of $^{12}\text{C}^{16}\text{O}_2$ laser lines with a femtosecond laser comb and new determination of the $^{12}\text{C}^{16}\text{O}_2$ molecular constants and frequency grid // J. Molecular Spectroscopy. 2004. V. 228. No 1. P. 206-212.
3. Freed C., Bradley L.C., O'Donnell R.G. Absolute frequencies of lasing transitions in seven CO_2 isotopic species // IEEE Journal of Quantum Electronics. 1980. V. 16. No. 11. P. 1195–1206.
4. Beck R., Englisch W., Gurs K. Table of Laser Lines in Gases and Vapors // Springer series in optical sciences. 1978. 203 pp.
5. Voitsekhovskaya O.K., Aksenova E.N., Shatrov F.G. Influence of CO_2 -laser linewidth on the measured absorption coefficients of water vapor and ammonia // Appl. Opt. 1999. V.38. No. 12. P. 2337–2341.
6. Duarte F.J. Variable linewidth high-power TEA CO_2 laser // Applied Optics. 1985. V. 24. P. 34-37.
7. Kunets A.V., Makarov G.N., Mironenko V.R., Pak I. Diode laser measurements of a pulsed TEA CO_2 Laser Linewidth // Optics Communications. 1991. V. 84. No 1–2. P. 37-41.
8. Voitsekhovskaya O.K., Volkov D.V., Kashirskii D.E., Korchikov V.S. Determination of spectral width of laser lines in the IR range using the absorption spectroscopy method // Quantum Electronics. 2012. V. 42. No. 7. P. 634-639.
9. Rothman L.S., Gordon I.E., Babikov Y., Barbe A., Chris Benner D., Bernath P.F., et al. The HITRAN2012 molecular spectroscopic database // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 2013. V. 130. P. 4-50.
10. Gordon I.E., Rothman L.S., Hill C., Kochanov R.V., Tan Y., Bernath P.F., et al. The HITRAN2016 molecular spectroscopic database // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 2017. V. 203. P. 3-69.
11. Jacquinet-Husson N., Armante R., Scott N.A., Chedin A., Crepeau L., Boutammine C., et al. The 2015 edition of the GEISA spectroscopic database // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 2016. V. 327. P. 31–72.
12. Rakhymzhan A.A., Chichinin A.I. Calculation of the absorption cross sections of some molecules from GEISA database at the wavelength of isotopically different CO_2 lasers // ISRN Analytical Chemistry. 2013. Article ID 592971. 11 p.
13. Grant W.B. Water vapor absorption coefficients in the 8-12 μm spectral region: a critical review // Appl. Opt. 1990. V. 29. No. 4. P.451–462.
14. Войцеховская О.К., Каширский Д.Е., Егоров О.В. Интернет-ресурс «INTRAVA» для решения задач оптики и спектроскопии газово-аэрозольных сред // Известия высших учебных заведений. Физика. 2015. Т. 58. № 10/3. С. 129-131.
15. Voitsekhovskaya O.K., Egorov O.V., Kashirskii D.E. Analysis of reliability of spectral water vapor line parameters at high temperatures in spectroscopic databases // Russian Physics Journal. 2017. V. 60. No. 2. P. 261-272.