

О.И. Асипцов, В.И. Захаров, К.Г. Грибанов

Взрывное поглощение излучения CO₂-лазера в смеси атмосферного воздуха с углекислым газом

Свердловский филиал НИКИЭТ, г. Заречный, Свердловская обл.

Поступила в редакцию 11.10.2000 г.

Исследуется поглощение излучения 35-ваттного CO₂-лазера при его фокусировке в оптической кювете с атмосферным воздухом комнатной температуры и примесью углекислого газа варьируемой концентрации в интервале 1–100%. Изменение температуры газовой смеси в области перетяжки контролировалось по смещению интерференционных полос в интерферометре типа Маха–Цендера на He–Ne-лазере, одно из плеч которого пересекалось с фокусом излучения CO₂-лазера. Наблюдался эффект сильного разогрева смеси (до 600 К) в области фокусировки при концентрации углекислого газа в кювете, превышающей 20%. Столь сильный нагрев смеси атмосферного воздуха с углекислым газом в области лазерной перетяжки объясняется возникновением эффекта взрывного поглощения при достижении критического значения концентрации углекислого газа.

Введение

Особенности взрывного поглощения ИК-лазерного излучения в молекулярных газах подробно исследовались в литературе теоретически [1–8] и частично экспериментально [9–14]. Механизм взрывного поглощения относится к цепным реакциям, которые реализуются при наличии положительной обратной связи между поглощением и ростом концентрации молекул на нижнем поглощающем уровне, являющемся возбужденным колебательным состоянием. Взрывное поглощение характеризуется экспоненциальным ростом заселенности поглощающих уровней с температурой и резким увеличением коэффициента поглощения из-за разогрева газа в канале лазерного пучка. Благодаря положительной обратной связи явление носит пороговый характер. Пороговое условие определяется интенсивностью излучения, концентрацией поглощающего газа и режимом охлаждения газа в канале лазерного пучка. В лазерных средах оно может проявляться в виде различного рода неустойчивостей, приводящих к флуктуациям мощности лазерного излучения, бистабильности, гистерезисным явлениям и др. [9]. В работе [8] оценивались пороговые условия при распространении в атмосфере Земли мощных лазерных пучков большого диаметра с длиной волны 10,6 мкм.

Целью настоящей работы являются прямое наблюдение явления взрывного поглощения излучения CO₂-лазера в среде атмосферного воздуха с примесью углекислого газа и оценка пороговой концентрации углекислого газа и максимальной температуры воздуха в канале лазерного пучка.

Описание эксперимента

Оптическая схема экспериментальной установки показана на рис. 1. Здесь применен стандартный интерферометрический метод для регистрации изменения температуры газа в кювете [15], основу которой составляет однопроходной интерферометр типа Маха–Цендера (зеркала M_3 ,

M_4 и делительные пластины P_1 и P_2), в одно из плеч которого помещена герметичная кювета с исследуемой газовой смесью.

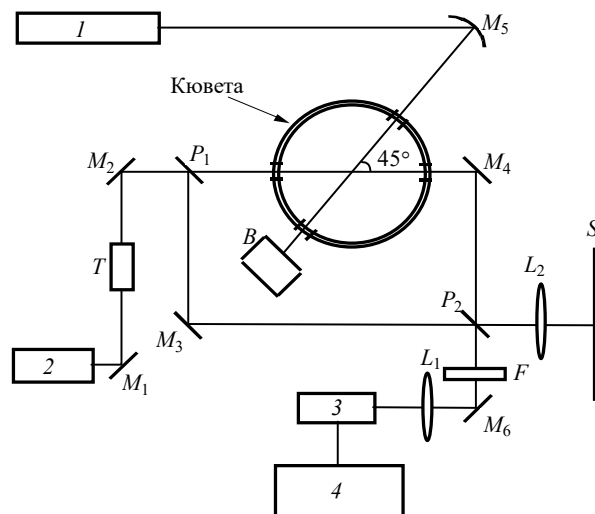


Рис. 1. Схема механизма положительной обратной связи при поглощении резонансного излучения на длинах волн 9,6 и 10,6 мкм молекулами CO₂ в воздухе

На интерферометр через поворотные зеркала M_1 и M_2 подается пучок He–Ne-лазера с длиной волны излучения 632,8 нм. Оптическая кювета представляет собой цилиндрическую емкость из нержавеющей стали, с окнами для ввода и вывода видимого и инфракрасного излучения. Размеры полости кюветы: диаметр 120 мм, высота 100 мм. Центры окон находятся на высоте 80 мм над основанием кюветы. Диаметры всех окон 20 мм. Окна расположены таким образом, что оси видимого и теплового пучков пересекаются в центре кюветы под углом 45°. Окна для ввода излучения CO₂-лазера выполнены из ZnSe в виде плоскопараллельных пластин толщиной 4 мм. Кювета снаб-

жена штуцерами для ввода, вывода и дозировки исследуемого газа.

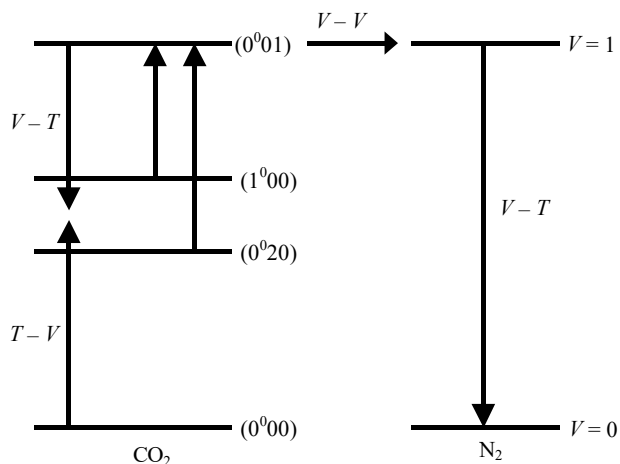


Рис. 2. Схема экспериментальной установки: 1 – CO₂-лазер; 2 – He-Ne-лазер; T – телескоп; B – ограничитель теплового пучка; S – экран; F – светофильтр; L₁, L₂ – собирающие линзы (объективы); M₁, M₂, M₃, M₄, M₆ – плоские зеркала, M₅ – сферическое зеркало; P₁, P₂ – делительные пластинки; 3 – ПЗС-линейка; 4 – ЭВМ типа IBM PC

Теория взрывного поглощения на колебательных переходах в молекулярных газах достаточно подробно изложена в цитируемой выше литературе, а также в обзоре [16]. На рис. 2 представлена схема возбуждения и релаксации уровней молекул углекислого газа и азота, участвующих в процессе разогрева смеси. Согласно работе [8] термический режим при взаимодействии атмосферного воздуха с мощным излучением CO₂-лазера 10,6 мкм описывается уравнением теплового взрыва

$$d\eta/dt = \exp \eta/\tau_1 - \eta/\tau_0, \quad (1)$$

где $\eta = (T - T_0)\theta_{(100)}/T_0^2$ – безразмерная температура; $\tau_1 = \exp(\theta_{(100)}/T_0)(\tau_I + \tau_\Sigma)T_0^2 / A\theta_{(100)}$ – характерное время тепловыделения в лазерном канале; τ_0 – характерное время теплоотвода из канала; T, T₀ – соответственно текущая и начальная температуры в лазерном канале; $\theta_{(100)}$ – характеристическая температура колебательного уровня (100) молекулы CO₂, с которого происходит резонансное поглощение излучения 10,6 мкм и переход молекулы CO₂ на уровень (001); $\tau_I = hv/k\sigma I$ – время накачки этого резонансного перехода, σ – сечение перехода, I – интенсивность лазерного излучения, κ – отношение концентраций углекислого газа и азота в воздухе; $\tau_\Sigma = \kappa/\tau_{CO_2-H_2O} + \kappa/\tau_{N_2-H_2O} + 1/\tau_{N_2-O_2} + \kappa/\tau_{CO_2-N_2}$ – обобщенное время релаксации обобщенного возбужденного уровня системы CO₂ – N₂.

Тепловой взрыв происходит, когда параметр τ_0/τ_1 превосходит критическое значение.

Для атмосферного воздуха (A = 1000 К, $\theta_{(100)} = 2000$ К, T₀ = 300 К) пороговое условие можно выразить в виде

$$\tau_0/(\tau_I + \tau_\Sigma) > 10. \quad (2)$$

В нашем эксперименте в области фокусировки 35-ваттного излучения CO₂-лазера (I ~ 10⁴ Вт/см² в области перетяжки) и концентраций углекислого газа в кювете в

диапазоне 1 – 100% ($\kappa = 0,01 \div 1$) выполняются условия: $\tau_I = 10^{-2} \div 10^{-4}$ с и $\tau_\Sigma = 10^{-4} \div 10^{-6}$ соответственно. В этом случае пороговое условие для возникновения механизма взрывного поглощения определяется установившимся режимом теплоотвода из области лазерной перетяжки, т.е. при условии $\tau_0/\tau_I > 10$. Величина $\tau_0 = D/V$ определяется охлаждением нагреваемой области лазерной перетяжки образующимися конвективными потоками, где D – характерный поперечный размер перетяжки; V – скорость конвекции. Так как возможные величины D и V в нашем случае лежат в интервалах 0,01 – 0,1 см и 1 – 10 см/с соответственно, то τ_0 будет лежать в интервале 10⁻³ – 10⁻¹ с. Очевидно, что при рассматриваемых условиях эксперимента могут реализоваться пороговые условия для взрывного поглощения, что и наблюдалось нами при насыщении атмосферного воздуха в кювете углекислым газом.

В эксперименте использовались газовые смеси со следующим содержанием углекислого газа в воздухе: естественная концентрация CO₂ в атмосфере (0,035%), 1, 5, 10, 20, 30, 50, 80, 100%. Мощность излучения CO₂-лазера в процессе эксперимента поддерживалась на уровне 35 Вт. Результаты сдвига интерференционной картины в зависимости от концентрации углекислого газа в кювете регистрировались на ПЗС-линейку, сопряженную с ЭВМ.

Рис. 3 иллюстрирует характерный вид интерференционной картины, наблюдаемой на ПЗС-линейке при фокусировке излучения CO₂-лазера в кювету и при перекрытом луче CO₂-лазера.

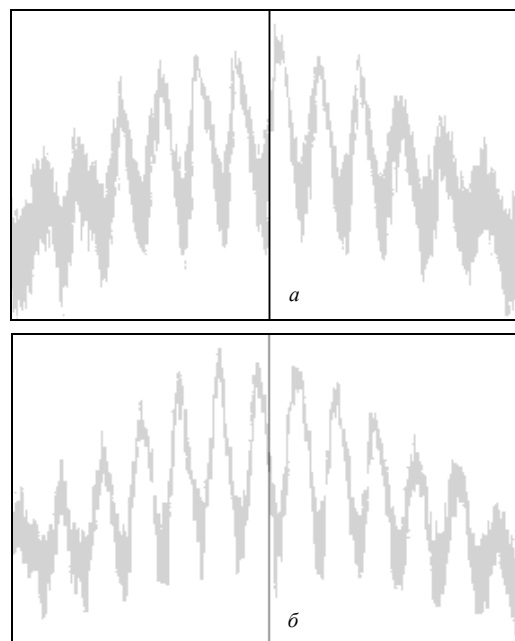


Рис. 3. Положение интерференционных полос при концентрации углекислого газа в воздухе 50%: а – лазерный луч не перекрыт; б – лазерный луч перекрыт перед входом в кювету

На рис. 4 приведена полученная зависимость температуры в области перетяжки от концентрации углекислого газа. Из рис. 4 видно, что пороговое условие по концентрации углекислого газа в воздухе для наших условий эксперимента лежит в районе 15%-го содержания CO₂ в кювете.

Разница температуры воздуха в области перетяжки CO₂-лазера ΔT относительно остальной части кюветы определялась по известной формуле [15]:

$$\Delta T = \lambda/L (dn/dT) \Delta S, \quad (3)$$

где L – длина нагретой CO_2 -лазером области газа в кювете (в нашем случае это проекция нагретой области газа на луч интерферометра); λ – длина волны интерферометра (в данном эксперименте использовался He–Ne-лазер с длиной волны $\lambda = 632,8$ нм); dn/dT – производная показателя преломления по температуре; ΔS – величина смещения максимумов интерференционной картины в относительных единицах расстояния между соседними максимумами.

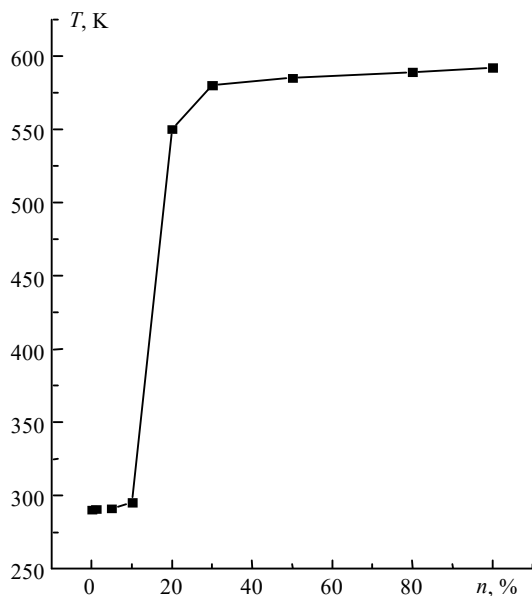


Рис. 4. Зависимость температуры нагрева CO_2 -лазером исследуемой газовой смеси от концентрации двуокиси углерода n в воздухе

В наших экспериментах максимальная величина смещения максимумов интерференционной картины ΔS (100% углекислого газа) составила $3/4$ расстояния между соседними максимумами, проекция нагретой области газа на луч интерферометра $L = 1,2$ мм. Значение dn/dT бралось из таблиц [15] для воздуха. Оцениваемая таким образом максимальная температура воздуха в области перетяжки в надпороговом режиме (100% углекислого газа) составляет около 595 ± 60 К, что значительно выше температуры в подпороговом режиме (0,035, 1, 5, 10% углекислого газа), когда температура газа практически (с точностью до нескольких градусов) равна комнатной, т.е. около 290 К. Несмотря на хорошую чувствительность интерферометрического метода, ошибка определения величины изменения температуры ΔT в области перетяжки в нашем случае достаточно высока и составляет около 20%. По интерферограмме, полученной на экране монитора РС с ПЗС-линейки, величину смещения максимума можно определить достаточно точно (ошибка лежит в интервале 5–10%), поэтому погрешность при определении температуры данным методом определяется главным образом погрешностью измерения величины L . В нашем случае величина L оп-

ределялась непосредственно с экрана S по относительному размеру смещенной интерференционной картины к полной интерференционной картине на экране. Погрешность такого измерения составляла около 20%, что и определяет характерную величину ошибки вычисления значения ΔT по формуле (3).

Заключение

Данным экспериментом проиллюстрирована относительно простая и эффективная схема для наблюдения взрывного поглощения в газовых средах. Впервые наблюдалось взрывное поглощение излучения CO_2 -лазера в атмосферном воздухе с примесью углекислого газа. Это исследование можно рассматривать как один из начальных шагов в экспериментальном изучении большого многообразия критических явлений, возникающих при взаимодействии резонансного ИК-излучения с молекулярными газами [16], а также возможного проявления аналогичных тепловых эффектов в атмосфере Венеры [17] и при значительном накоплении в атмосфере Земли парниковых газов в будущем, главным образом углекислого газа [18,19].

Авторы благодарны В.М. Шмелеву за многочисленные дискуссии и консультации по проблеме взрывного поглощения ИК-излучения в газах, В.Е. Прокопьеву и С.В. Кондратову за полезные рекомендации и помощь при подготовке эксперимента.

1. Ораевский А.Н. // Химия высоких энергий. 1981. № 15. С. 462.
2. Марголин А.Д., Шмелев В.М. // Химическая физика. 1982. №5. С.679.
3. Марголин А.Д., Шмелев В.М. // Химическая физика. 1983. № 2. С. 1480.
4. Марголин А.Д., Шмелев В.М. // Химическая физика 1985. № 4. С. 873.
5. Ораевский А.Н., Проценко И.Е. // Квантовая электроника. 1985. № 12. С. 2290.
6. Васильев Г.К., Макаров Е.Ф., Чернышев Ю.А., Якушев В.Г. // Химическая физика. 1985. № 4. С. 1434.
7. Ораевский А.Н., Проценко И.Е. // Квантовая электроника. 1986. № 13. С. 1467.
8. Шмелев В.М., Захаров В.И., Нестеренко А.И. // Оптика атмосферы. 1989. Т 2. № 6. С. 597.
9. Kaye A.S., Naylor O.L. // Appl. Phys. Lett. 1983. V. 42. N 8. P. 641.
10. Васильев Г.К., Макаров Е.Ф., Чернышев Ю.А., Якушев В.Г. // Химическая физика. 1985. № 4. С. 924.
11. Кузьменко В.А. // Квантовая электроника. 1986. № 13. С. 2523.
12. Кузьменко В.А. // Квантовая электроника. 1986. № 13. С. 2545.
13. Ананьев Б.Ю., Баев Н.К., Данильчев В.А., Ионин А.А. // Квантовая электроника. 1987. № 14. С. 386.
14. Батрак А.В., Березовский В.В., Ораевский А.Н., Проценко И.Е. // Квантовая электроника. 1988. № 15. С. 681.
15. Хауф В., Григуль У. Оптические методы в теплопередаче. М.: Мир, 1973. С. 162.
16. Осипов А.И., Уваров А.В. // УФН. 1996. Т. 166. № 6. С. 639.
17. Кондратьев К.Я., Москаленко Н.И. Парниковый эффект атмосферных планет. Итоги исследований космического пространства. М.: ВИНТИ, 1985. 157 с.
18. Захаров В.И., Шмелев В.М., Грибанов К.Г., Прокопьев В.М. // Атомная энергия. 1992. Т. 72. Вып. 1. С. 98.
19. Zakharov V.I., Gribanov K.G., Falko M.V., Chursin A., Golovko V.F., and Tyuterev V.I.G. // JQSRT. 1997. N 1. С. 1.

O.I. Asiptsov, V.I. Zakharov, K.G. Gribanov. Explosive absorption of CO_2 -laser radiation in a mixture of atmospheric air and carbon dioxide.

The absorption of the 35 W CO_2 -laser radiation focused in the optical cell filled with a mixture of the atmospheric air of room temperature with the CO_2 of varied concentration (1%–100%) is studied in the paper. A variation of the gas mixture temperature in the focus region was controlled by fringe shift in the interferometer of Max-Zender type of the He–Ne-laser, one arm of which intersected the CO_2 -laser radiation focus. The effect of the mixture overheating (to 600 K) in the focus region at the CO_2 concentration more than 20% was observed. Such intense heating of the mixture can be explained by occurring the effect of explosive absorption at reaching critical values of the carbon dioxide concentration.