

УДК 621.373.826

В.В. Осипов, М.Г. Иванов, В.В. Лисенков, И.И. Беляков

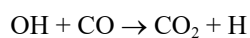
ВЛИЯНИЕ ВОДОРОДА НА ХАРАКТЕРИСТИКИ АКТИВНОЙ СРЕДЫ CO₂-ЛАЗЕРА

Исследуется влияние добавок H₂ на предельную энергию, вводимую в газ в процессе импульсного объемного разряда, и ресурсные характеристики CO₂-лазера. Выявлены основные механизмы повышения устойчивости разряда и восстановления CO₂.

Хорошо известно, что незначительная добавка какой-либо компоненты в газовую смесь может существенным образом изменить энергетические и ресурсные характеристики газоразрядного устройства. Наиболее показательными в этом плане являются добавки в газовую смесь веществ с низким потенциалом ионизации, которые обеспечивают зажигание объемных разрядов и увеличивают их энергетику [1], повышают ресурс работы отпаянных приборов [2].

В CO₂-лазерах достаточно широкое применение получили добавки в активную газовую среду H₂. При этом первоначально основное внимание уделялось необычайно высокой эффективности разгрузки нижних лазерных уровней 10⁰0 и 02⁰0 молекул CO₂ через их состояния 01⁰0 при соударениях с молекулами H₂ [3].

Впоследствии выяснилось еще одно замечательное качество водорода, обуславливающее резкое увеличение ресурсных характеристик отпаянных CO₂-лазеров [4]. Это связывалось со следующим основным механизмом доокисления СО. Атомарный и молекулярный водород, вступая в реакцию с кислородом, образует радикал ОН. Далее ОН и колебательно-возбужденные молекулы СО, реагируя друг с другом, образуют СО₂ и Н:



с константой $K = 1,3 \cdot 10^{14} \text{ мм рт. ст.}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ при 600 К.

Дальнейшие эксперименты, систематизированные в [5], подтвердили положительное влияние добавок водорода в рабочую смесь газов на ресурсные характеристики лазеров.

В настоящей работе исследуются влияние добавок водорода на предельную энергию, вводимую в газ в процессе импульсного объемного разряда, и скорость диссоциации CO₂.

Исследования были проведены на экспериментальном макете технологического CO₂-лазера, разработанного на основе оригинального метода комбинированного возбуждения объемного разряда [6]. В данном методе плазма в разрядном промежутке создается самостоятельным разрядом короткой дли-

тельности, а основная доля энергии (95–97%) вводится во время несамостоятельного разряда на стадии распада плазмы. Напряжение, прикладываемое к разрядному промежутку при несамостоятельном разряде, выбирается из условия максимальной передачи энергии на верхний лазерный уровень. Используемая схема возбуждения позволяла осуществить развязку источников питания самостоятельного и несамостоятельного разрядов без применения элементов, ограничивающих токи этих разрядов.

При проведении экспериментов объем разрядной зоны составлял 1000 см³, скорость потока газа через разрядный промежуток 50 м/с, частота повторения импульсов разряда 100 Гц. Предельная энергия $W_{\text{п}}$, т.е. максимальная энергия, вводимая в газ на стадии объемного горения разряда без образования канала, определялась по осциллограммам тока и напряжения.

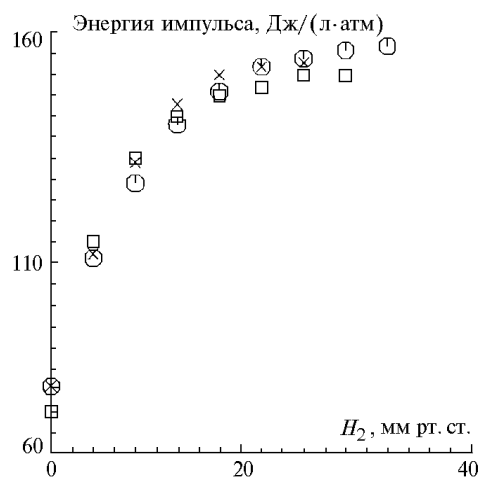


Рис. 1. Зависимость энергии импульса, вложенной на стадии несамостоятельного разряда, от давления H₂ и состава смеси: x – CO₂:N₂:He = 1:4:5, парциальное давление 80 мм рт. ст.; □ – CO₂:N₂:He = 1:3:6, парциальное давление 60 мм рт. ст.; ○ – CO₂:N₂:He = 1:4:7, парциальное давление 50 мм рт. ст.

Зависимость предельной энергии, рассеянной в газовой смеси на стадии несамостоятельного разряда, от парциального давления H₂ приведена на рис. 1. По мере повышения парциального давления водорода

да до 20 мм рт. ст. независимо от состава смеси предельная энергия, рассеиваемая в газовой среде за один импульс (W_n), резко возрастает. Дальнейшее повышение давления H_2 не приводит к сколько-нибудь заметному увеличению W_n . Наиболее важным представляется объяснение причин роста W_n . По нашему мнению, это может быть обусловлено тем, что при увеличении концентрации H_2 происходит снижение скоростей прямой и ступенчатой ионизации, ведущих, как известно, к контракции разряда.

Для проверки этого предположения выполнялись расчеты констант возбуждения и ионизации возбужденных состояний молекул азота с помощью уравнения Больцмана [7]. Исходя из постоянства пороговых значений этих констант, были рассчитаны предельные значения E/P положительного столба несамостоятельного разряда в зависимости от парциального давления водорода (рис. 2) для смеси $CO_2:N_2:He = 1:4:7$ (давлением 50 мм рт. ст.). Неплохое совпадение расчетных и экспериментальных данных говорит о том, что, уменьшая скорость ступенчатой ионизации, водород подавляет развитие неустойчивостей.

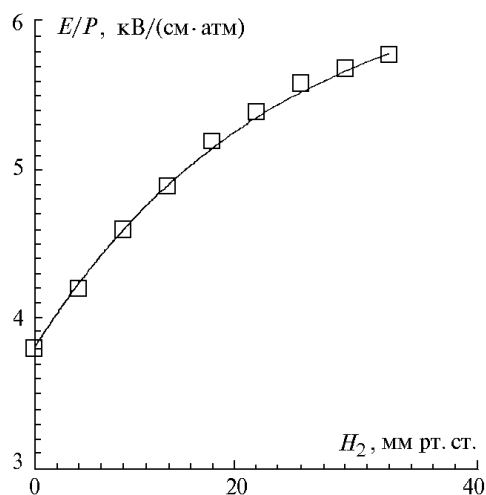


Рис. 2. Зависимость предельных значений E/P от парциального давления водорода; состав смеси $CO_2:N_2:He = 1:4:7$, давление 50 мм рт. ст.; сплошная кривая – расчет, \square – экспериментальные точки

Следует заметить, что данный эффект не будет столь заметным в самостоятельном разряде с высоким перенапряжением, реализующимся при давлениях порядка атмосферного, поскольку в этом случае, как правило, прямая ионизация преобладает над ступенчатой.

Однако в этих условиях водород сохраняет другое полезное свойство – уменьшение деградации рабочей смеси. Исследования данного явления проводились на электроразрядном ТЕА CO_2 -лазере атмосферного давления $CO_2:N_2:He = 1:1:3$ с использованием масс-спектрометра МИ-1201 [8]. В ходе экспериментов обнаружилось, что небольшие (~5%) добавки водорода заметно снижают степень диссоциации CO_2 , а дальнейшее его добавление сказывается не столь существенно (рис. 3, кривая 1).

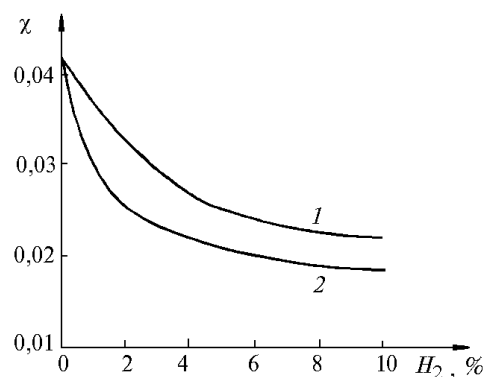


Рис. 3. Зависимость степени диссоциации CO_2 (через 10^4 включений) от концентрации H_2 в смеси газов: 1 – экспериментальная, 2 – расчетная, где степень диссоциации $\chi = \ln([CO_2(0)]/[CO_2(n)])$, $[CO_2(0)]$ – начальная концентрация, $[CO_2(n)]$ – концентрация через 10^4 включений

Причина уменьшения степени диссоциации CO_2 при добавлении водорода, по мнению авторов, заключается в следующем.

В межэлектродном промежутке после окончания протекания тока и рекомбинации плазмы ($\tau < 10^{-3}$ с) могут протекать реакции с участием различных радикалов и нестабильных молекул, в результате которых происходит частичное восстановление CO_2 . Это восстановление может восприниматься в эксперименте как уменьшение степени диссоциации CO_2 , поскольку процессы с характерным временем менее 10^{-3} с невозможно зарегистрировать масс-спектрометром.

Для проверки данного предположения решалась следующая задача. В разрядном промежутке в условиях вышеуказанного эксперимента (смесь $CO_2:N_2:He = 1:1:3$, давление 1 атм) в течение 50 нс происходило разложение CO_2 . Далее прослеживалась цепочка реакций между различными молекулами и радикалами, в результате которых происходит частичное восстановление CO_2 . Балансные уравнения для компонент (CO , O , H , OH , O_2 , H_2O , HO_2 , H_2O_2) решались численно методом Розенброка 3-го порядка точности. Плазмохимические реакции и их константы были взяты из работ [9, 10].

Результаты расчетов показали, что при добавлении в смесь H_2 за время менее 10^{-3} с происходит частичное восстановление CO_2 по схеме, изображенной на рис. 4.

Видно, что CO_2 восстанавливается двумя путями: с помощью радикала OH и с помощью молекулы HO_2 (на рис. 4 они показаны жирными стрелками). Скорости этих процессов резко возрастает при увеличении доли H_2 до 3 ÷ 5% от всей смеси и практически не меняются при дальнейшем росте доли H_2 . Удовлетворительное совпадение экспериментальной и расчетной кривых (см. рис. 3) подтверждает высказанное предположение о том, что наблюдаемое уменьшение степени диссоциации CO_2 с ростом доли H_2 объясняется частичным восстановлением CO_2 в

межэлектродном пространстве в результате плазмохимических реакций по схеме, приведенной на рис. 4.

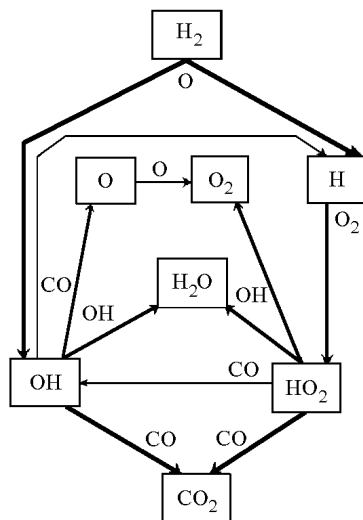


Рис. 4. Схема основных плазмохимических процессов, приводящих к восстановлению CO_2

Таким образом, в статье предложено объяснение причин повышения энергетики несамостоятельного разряда при добавлении водорода в рабочую смесь газов, объяснено снижение степени диссоциации CO_2 в самостоятельном разряде с помощью новой расширенной схемы его восстановления.

1. Бычков Ю.И., Кудряшов В.П., Осипов В.В. // Квантовая электроника. 1974. Т. 1 N 5. С. 1256–1258.
2. Marchetti R., Penco E., Armandillo E., Salvetti S. // Appl. Phys. Lett. 1982. V. 41. P. 601–603.
3. Sharma R.D. // J. Chem. Phys. 1969. V. 50. P. 919–923.
4. Stark D.S., Gross P.H., Foster H.A. // IEEE J. Quant. Electr. 1975. V. QE-11. P. 774–778.
5. Pulsed Gas Lasers / G.A. Mesyats, V.V. Osipov, V.F. Tarasenko // SPIE Optical Engineering Press. 1995. 470 p.
6. Иванов М.Г., Мухачев С.В., Осипов В.В. // Оптика атмосферы и океана. 1995. Т. 8. N 11. С. 1616–1621.
7. Lowke J.J., Phelps A.V., Irwin B.W. // J. Appl. Phys. 1973. V. 44. N 10. P. 4664–4671.
8. Беляков И.И., Богданов П.И., Осипов В.В., Тельнов В.А. // Лазерная техника и оптоэлектроника. 1991. N 3. С. 28–33.
9. Hokazono H., Fujimoto H. // J. Appl. Phys. 1987. V. 62. N 5. P. 1585–1594.
10. Кондратьев В.Н. Константы скоростей газофазных реакций. М.: Наука, 1971. 351 с.

Институт электрофизики УрО РАН,
Екатеринбург

Поступила в редакцию
9 октября 1997 г.

V.V. Osipov, M.G. Ivanov, V.V. Lisenkov, I.I. Belyakov. **The Influence of H_2 on Active Medium Characteristics of CO_2 Laser.**

The paper shows the influence of H_2 on maximum energy of space discharge imputed into the gas, and resources characteristics of CO_2 laser. Main reasons of discharge stability increasing and regeneration of CO_2 have been investigated.