

ОБ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИКАХ ГАЗОРАЗРЯДНЫХ CO₂-ЛАЗЕРОВ

Н. В. Карлов, Ю. Б. Конев, Г. П. Кузьмин

Основной причиной, ограничивающей выходную мощность CO₂-лазеров, является нагревание и диссоциация рабочего газа в электрическом разряде /1-4/. Увеличение энергозатрат и плотности молекул и, следовательно, повышение мощности генерации, возможно только при условии быстрой смены газа при его движении поперек оптической оси резонатора лазера /5,6/. В этой работе приводятся простые формулы, позволяющие оценивать параметры таких лазеров: удельную (на единицу расхода массы активного газа) и погонную мощность в непрерывном режиме, энергию с единицы объема и частоту следования импульсов в импульсном режиме, и сообщается о создании и параметрах импульсного лазера высокого давления. Оценки выполнены применительно к лазерам, возбуждаемым электрическим током.

Если молекулы азота и CO₂ излучают, пролетая через резонатор, все возбужденные в разряде колебательные кванты, то может быть получена мощность

$$P = h\nu N_A (\alpha_1 + k_2 \alpha_2) \frac{m}{\mu_1 + k_2 \mu_2 + k_3 \mu_3}. \quad (1)$$

В этом выражении $h\nu$ - энергия лазерного кванта, N_A - число Авогадро, $\alpha_{1,2}$ - среднее число колебательных квантов, приходящихся на одну молекулу CO₂ и азота соответственно, $k_{2,3}$ - молярные концентрации азота и гелия (или воды), отнесенные к молярной кон-

центрации CO_2 в смеси, w - полный массовый расход газа, $\mu_{1,2,3}$ - молекулярные веса CO_2 , азота и гелия (воды). В разряде может быть достигнуто значение $x_1 \approx x_2 \approx 0,4$ /7/; тогда удельная мощность может составлять 170 квт.сек/кг в случае преобладающего содержания азота и 135 квт.сек/кг в случае смеси $k_2 = k_3 = 2$. В случае возбуждения только азота и последующего перемешивания с невозбужденным CO_2 удельная мощность для последней смеси может составлять 90 квт.сек/кг.

Для практических целей важно оценить погонную мощность лазера. С этой целью формула (1) может быть представлена в виде

$$P = \frac{h\nu}{kT} (x_1 + k_2 x_2) \frac{p}{1 + k_2 + k_3} vNL, \quad (2)$$

где p - полное давление, v - скорость газа, L и N - длина и высота резонатора лазера. Для приведенной выше смеси величина p/L при $p = 0,2$ атм, $T = 300^\circ\text{K}$, $v = 400$ м/сек и $N = 5$ см составляет 500 квт/м.

Представляет интерес оценить повышение температуры газа в процессе генерации. Если η - к.п.д. генерации, то

$$\Delta T = \frac{1 - \eta}{\eta} (x_1 + k_2 x_2) \frac{2}{2(1 + k_2 + \frac{5}{7} k_3)} \frac{h\nu}{k} \quad (3)$$

для смесей с гелием. Если $\eta = 0,4$ (максимальная возможная величина), то для смесей с преобладанием азота $\Delta T = 240^\circ$, для смеси с $k_2 = k_3 = 2$ $\Delta T = 170^\circ$, а при раздельном возбуждении $\Delta T = 110^\circ$. Если учесть, что на возбуждение колебаний CO_2 и N_2 в разряде расходуется не больше 60% подводимой мощности /8/, то общее повышение температуры может превышать 300° , что ограничит мощность лазера. Отсюда ясно, что раздельное возбуждение предпочтительнее, тем более, что возбужденный и нагретый в разряде азот может быть адиабатически расширен и охлажден.

Рассмотрим теперь импульсные CO_2 -лазеры. Наибольшая величина энергии в импульсе определяется энергией колебаний молекул CO_2 и N_2 , находящихся в резонаторе во время генерации импульса излучения. При больших давлениях можно считать, что за время импульса колебательная энергия азота передается молекулам CO_2 и излучается лазером. Тогда энергия одного импульса составляет

$$Q = \frac{1}{2} \frac{h\nu}{kT} \frac{z_1 + k_2 z_2}{1 + k_2 + k_3} p \Omega, \quad (4)$$

где Ω - объем рабочей области. При $p=0,1$ атм, $T=300^\circ\text{K}$ $k_2=1,5$, $k_3=3$ удельная энергия составляет $Q/\Omega = 0,004$ дж/см³.

Размер рабочей области определяется длиной релаксации возбужденных молекул $l = v(1 + k_2)(1 + k_2 + k_3)/(w_1 + k_2 w_2 + k_3 w_3)$; при $T=300^\circ\text{K}$ $w_1 = 350 \text{сек}^{-1} \text{тор}^{-1}$, $w_2 = 100 \text{сек}^{-1} \text{тор}^{-1}$, $w_3 = 85 \text{сек}^{-1} \text{тор}^{-1} / 9$. Для $v = 400$ м/сек $k_2=k_3=2$ и $p=0,2$ атм $l = 5,5$ см. Чтобы газ в рабочем объеме успевал смениться в интервале между импульсами, частота их следования не должна превышать $f_{\text{макс}} = v/l$, что составляет 7 кгц для указанных выше условий.

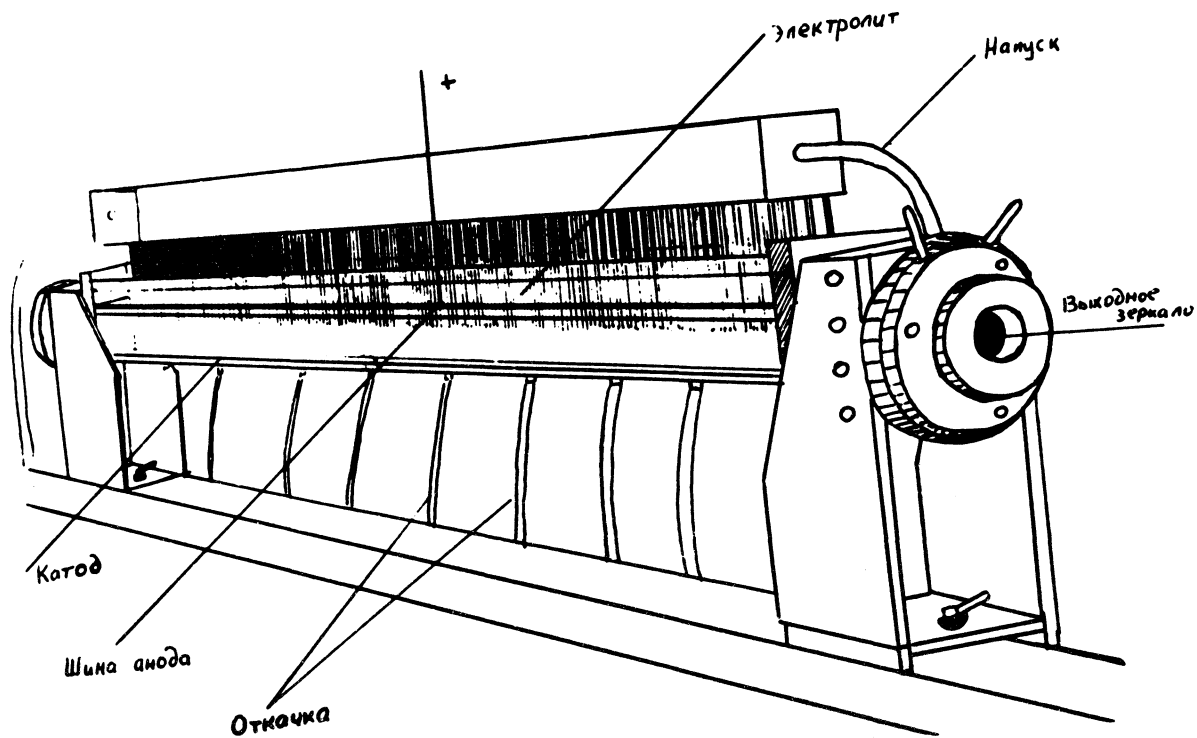
Отметим, что как в непрерывном, так и в импульсном режиме длину релаксации необходимо по возможности увеличивать. В непрерывном режиме это связано с тем, что с увеличением длины релаксации становится возможным увеличение поперечного размера резонатора и, следовательно, уменьшение тепловой нагрузки на зеркала и другие оптические элементы. При большой мощности это обстоятельство может стать решающим. В импульсном режиме увеличение длины релаксации позволяет увеличить объем рабочей области. Поэтому в ряде случаев заданный массовый расход целесообразно обеспечивать при максимально возможной скорости газа и минимальном давлении.

Ниже мы сообщаем о создании импульсного CO_2 -ла-

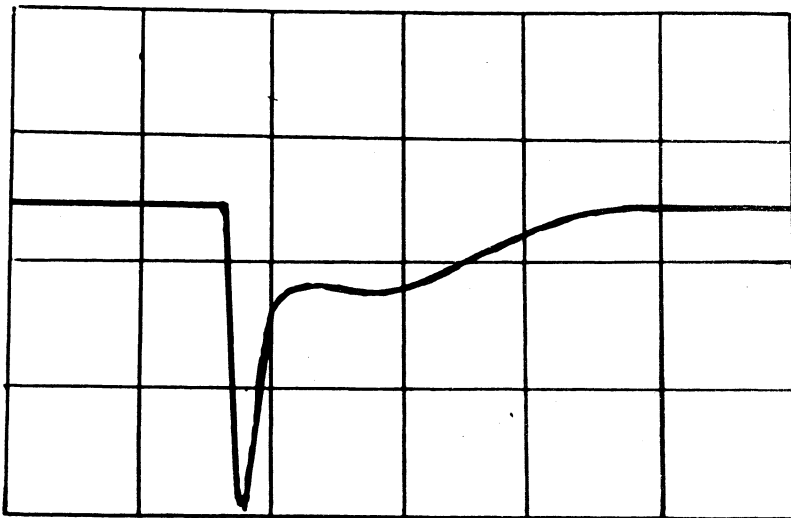
зера высокого давления с поперечной прокачкой и разрядом.

Первоначально были проведены исследования развития инверсии в подобном лазере методом двойной импульсной модуляции /10/ на модельной системе длиной 40 см. При давлении 60 тор на этой системе получена импульсная мощность 20 квт при плотности генерируемой мощности 200 вт/см³. Дальнейшее усовершенствование конструкции привело к системе, показанной на рис. 1. Лазер представляет собой короб из органического стекла размером 80x40x1500 мм, напуск газа в который осуществляется через 360 трубочек из нержавеющей стали, расположенных в 3 ряда в шахматном порядке, которые служат отдельными анодами. В качестве балластных сопротивлений используется электролит, которым служит 0,1% раствор KCl в воде. Напряжение к анодам подводится с помощью общей шины, омываемой электролитом. Катодом служит медная шина, расположенная на дне короба. Разрядный промежуток, образованный анодными трубками и шиной катода, составляет 25 мм. Питание осуществляется путем разряда конденсатора емкостью 0,25 мкф через тиратрон. Общий ток в импульсе равен 500 а при напряжении 20 кв. Откачка производится через 10 отверстий в катоде. Напуск заранее приготовленной смеси происходит через распределительный короб в верхней части лазера. Резонатор образован плоскими зеркалами, одно из которых кварцевое с золотым покрытием, а другое, служащее для вывода мощности, — полупрозрачное из ZnSe.

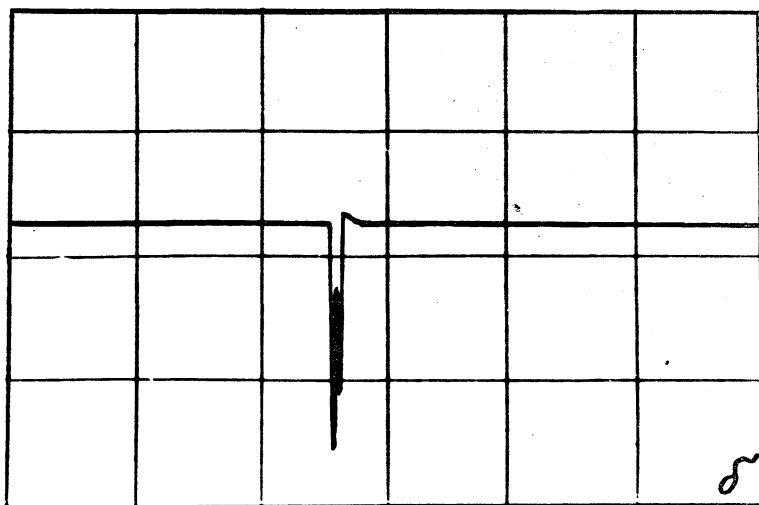
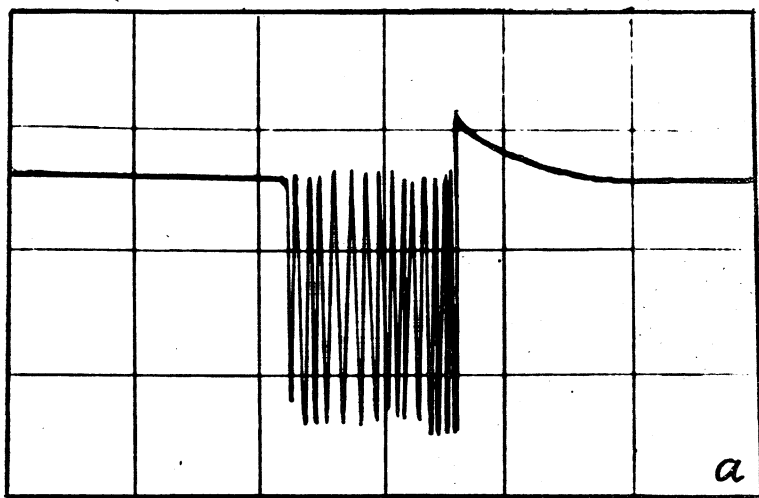
С этой системы в режиме свободной генерации получены импульсы длительностью 10 мксек с энергией в импульсе 2 дж при объеме активной среды 1 л (рис. 2). Лазер работал при давлении 70 тор, газовая смесь состояла из CO₂, N₂, He в соотношении 1:1,5:3. На рис. 2 видно, что после высвечивания мощного начального импульса происходит переход в квазинепрерывный режим, во время которого генерация происходит за счет дополнительного многократного возбуждения молекул CO₂ и N₂ в разряде. На долю начального импульса



Р и с. 1. Общий вид лазера с поперечными прокачкой и разрядом.



Р и с. 2. Импульс излучения в режиме свободной генерации (одно деление - 5 мксек).



Р и с. 3. Импульс излучения в режиме модуляции добротности: а) без диафрагмы, б) при наличии диафрагмы с отверстием 22 мм в резонаторе (одно деление - 20 мксек).

приходится энергия $0,5$ дж или $5 \cdot 10^{-4}$ дж/см³. При модуляции добротности путем вращения сплошного зеркала вокруг оси, совпадающей с направлением пробоя, получают импульсы излучения, состоящие из отдельных пиков длительностью в несколько сотен наносекунд. Введением диафрагм в резонатор можно менять длительность импульса излучения от 30 до 1 мксек (рис. 3), что свидетельствует о сложной модовой структуре излучения.

При вращении сплошного зеркала вокруг оси, перпендикулярной направлению пробоя, импульсы излучения даже при отсутствии диафрагм имеют длительность меньше 5 мксек и менее изрезаны. Такая зависимость формы и длительности импульса от направления вращения свидетельствует о резкой неоднородности активной среды, что является существенным недостатком этого лазера. С учетом неоднородности можно считать, что величина удельной импульсной энергии, полученной экспериментально, хорошо совпадает с выполненными выше оценками.

Авторы благодарят А. М. Прохорова за внимание и интерес к работе и полезные обсуждения и Е. К. Карлову за помощь в эксперименте.

Поступила в редакцию
18 мая 1971 г.

Л и т е р а т у р а

1. А. Г. Свиридов, Н. Н. Соболев, Г. Г. Целиков. Письма в ЖЭТФ, 6, 542 (1967).
2. Б. Ф. Гордиец, Н. Н. Соболев, Л. А. Шелепин. ЖЭТФ, 53, 1823 (1967).
3. Н. В. Карлов, Ю. Б. Конев, Г. П. Кузьмин. РИЭ, 14, 320 (1969).
4. С. С. Алимбиев, Н. В. Карлов, Ю. Б. Конев, Г. П. Кузьмин, Р. П. Петров. РИЭ, 15, 2361 (1970).

5. J. W. Wilson. Appl. Phys. Letts., 8, 159 (1966).
6. W. B. Tiffany, R. Targ, J. D. Foster. Appl. Phys. Letts., 15, 91 (1969).
7. T. A. Cool, J. A. Shirley. Appl. Phys. Letts., 14, 70 (1969).
8. W. L. Nighan, J. H. Bennett. Appl. Phys. Letts., 14, 240 (1969).
9. C. B. Moore, R. E. Wood, B.-L. Hu, J. T. Jardley. J. Chem. Phys., 46, 4222 (1967).
10. Е. К. Карлова, Н. В. Карлов, Г. П. Кузьмин. Краткие сообщения по физике № 11, 51 (1970).