

Высокоэффективный импульсно-периодический CO₂-лазер ЛАЭРТ для технологических применений

В.В.Осипов, М.Г.Иванов, В.В.Лисенков, В.В.Платонов

Обобщены результаты исследований по созданию импульсно-периодического CO₂-лазера, накачиваемого комбинированным разрядом, с объемом активной среды 1000 см³. Показано, что при длительностях накачки 200–500 мкс оптимальные характеристики достигаются при давлениях активной среды 60–100 мм рт. ст. При этом КПД лазера на начальной стадии работы может достигать 22 %, а без учета рассеиваемой в области катодного падения потенциала энергии – 28 %. По мере увеличения числа включений лазера до 3×10^5 его КПД снижается до 12 %. Обнаружено, что добавка СО с относительной концентрацией $[CO]/[CO_2] \sim 0.75$ увеличивает вводимую и излучаемую мощности почти в полтора раза. При этом КПД составляет 10–12 %, а длительность работы – более 10^6 включений со спадом мощности не более 10 %. Добавка водорода до соотношений $[H_2]/[CO_2] \sim 10$ приводит к увеличению вводимой в газ энергии за счет снижения скорости ионизационных процессов. Однако оптимальным является отношение $[H_2]/[CO_2] \sim 1$, при этом мощность излучения возрастает на 15 %. В длительном режиме работы мощность лазера составляла 1 кВт при пиковой мощности 10 кВт и КПД 12 %.

Ключевые слова: CO₂-лазер, импульсно-периодический режим генерации, комбинированный разряд.

1. Введение

В настоящее время проблема создания высокоэффективных и масштабируемых CO₂-лазеров остается по-прежнему важной как для решения технологических задач, так и для разработки крупномасштабных лазерных систем.

В подобных устройствах, как правило, накачка и, соответственно, генерация излучения осуществляются в непрерывном режиме, когда возбуждается вся рабочая среда, прокачиваемая через разрядный объем, и, таким образом, достигаются хорошие энергетические параметры. В импульсном же режиме большая часть газа прокачивается через разрядный объем за промежуток времени между импульсами и оказывается невозбужденной. Кроме того, задача создания мощных импульсно-периодических лазеров осложняется отсутствием мощных, высокоэффективных «быстрых» коммутаторов с большим ресурсом работы.

Однако по воздействию на мишень более эффективным является импульсно-периодическое излучение. В связи с этим длительное время ведется поиск импульсно-периодических методов возбуждения рабочей среды, которые обеспечивали бы высокие удельные энергетические характеристики, масштабируемость и большую эффективность лазера. Возможность решения данной проблемы продемонстрирована созданием CO₂-лазеров, накачиваемых несамостоятельным разрядом, который поддерживается электронным пучком [1]. Эти лазеры обладают высокими удельными энергетическими харак-

теристиками, высоким КПД и способны работать как в непрерывном, так и в импульсно-периодическом режиме, т. е. наиболее полно отвечают требованиям различных технологических процессов. Однако применение таких лазеров в технологии сдерживается из-за наличия в их составе электронных ускорителей, что приводит к сложности конструкции, радиационной опасности и малому сроку службы из-за разрушения под действием электронного пучка металлической фольги, разделяющей вакуумный и газовый объемы.

Наиболее перспективным путем решения данной задачи является использование для создания плазмы в рабочем объеме вместо электронного пучка самостоятельного разряда малой длительности. Такие разряды получили название комбинированных [2]. Для их осуществления предложен ряд методов, различающихся развязкой электрических цепей питания самостоятельного и несамостоятельного разрядов [3–8].

Недостатком этих методов является наличие в цепях питания элементов, существенно ограничивающих ток и удельную энергетику комбинированного разряда, или неодинаковые условия протекания тока в разных межэлектродных промежутках [3].

В настоящей работе излагаются результаты исследований импульсно-периодического CO₂-лазера, накачиваемого комбинированным разрядом, в цепях возбуждения которого отсутствуют элементы, принципиально ограничивающие токи самостоятельного и несамостоятельного разрядов.

2. Экспериментальный комплекс

Экспериментальный комплекс ЛАЭРТ (лазер электроразрядный технологический) содержит следующие основные составляющие: лазерный блок, систему откачки и напуска газов, источники питания несамостоятельного и

самостоятельного разрядов, регистрирующую аппаратуру.

Лазерный блок имел размер $100 \times 102 \times 120$ см. В его корпус, выполненный из нержавеющей стали, помещались медный теплообменник, способный утилизировать 8 кВт тепловой мощности, электродная система и диаметральный вентилятор с размером рабочего колеса 40 см, который приводился в движение электродвигателем 2ПН-112 (3000 об./мин) через самарий-кобальтовую магнитную муфту и обеспечивал скорость потока газа через разрядную зону до 50 м/с. На корпусе лазерного блока крепился устойчивый однопроходный резонатор, состоящий из вогнутого медного зеркала с коэффициентом отражения 98 % и радиусом 20 м и плоскопараллельной пластинки из ZnSe, одна грань которой была просветлена, а вторая имела коэффициент отражения 74 %.

Поступление энергии в газ на стадии несамостоятельного разряда обеспечивалось модифицированным источником питания УЗГБ-04 (1.5–3 кВ, ~15 кВт), а для питания самостоятельного разряда использовался источник питания ИГЛИА-6 (4–10 кВ, ~500 Вт).

Мощность излучения измерялась калориметром ТПИ-2М и через светоделительные пластинки из КС1 – калориметром ИМО-2Н. Измерение максимальной мощности излучения дополнительно контролировалось с помощью измерения скорости испарения воды.

Ток и напряжение горения разряда регистрировались осциллографом Tektronix DS520A. Давление смеси газов измерялось вакуумметром модели 1227. Скорость прокачки газа определялась по скорости вращения ротора электродвигателя и калибровалась с помощью трубок Пито.

Для инициации и поддержания комбинированного разряда использовались схемы возбуждения [9, 10], приведенные на рис. 1.

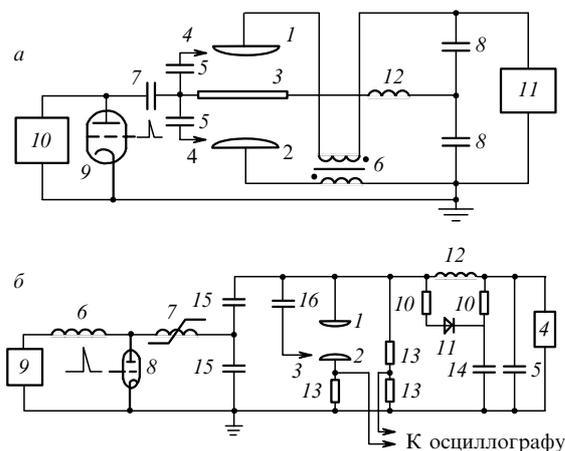


Рис. 1. Схемы возбуждения комбинированного разряда с дополнительным электродом (а) и без него (б):

1, 2 – электроды; 3 – дополнительный электрод; 4 – поджигающие электроды; 5 – конденсаторы поджига; 6 – импульсный трансформатор; 7 – конденсатор; 8 – накопительные конденсаторы блока питания; 9 – тиратрон ТГИ-1000/25; 10 – блок питания поджига; 11 – блок питания лазера; 12 – индуктивность (а);

1, 2 – электроды; 3 – поджигающий электрод; 4 – блок питания лазера; 5 – накопительный конденсатор; 6 – индуктивность; 7 – переменная индуктивность; 8 – тиратрон ТГИ-1000/25; 9 – блок питания поджига; 10 – резисторы; 11 – диоды; 12 – индуктивность; 13 – резисторы для измерения напряжений и токов разряда; 14 – дополнительный накопительный конденсатор; 15 – разрядные конденсаторы; 16 – конденсаторы поджига (б).

Предварительная ионизация рабочей зоны лазера осуществлялась многоканальным диффузным разрядом [11], возбуждаемым в промежутке между одним из основных электродов и секционированным поджигающим электродом, установленным на расстоянии 0.5 см вверх по потоку газа. В обоих вариантах в межэлектродном промежутке зажигался кратковременный (10^{-7} с) самостоятельный разряд, после прекращения которого на стадии распада плазмы реализовывался более длительный (2×10^{-4} с) несамостоятельный разряд. Длительность этого разряда можно было увеличивать путем подачи за время, меньшее 2×10^{-4} с, дополнительных импульсов самостоятельного разряда, поддерживающих плазму в разрядном промежутке.

Основное различие в схемах возбуждения заключается в способах развязки цепей питания самостоятельного и несамостоятельного разрядов.

В первой схеме (рис. 1, а) развязка этих цепей реализуется установкой в межэлектродный промежуток дополнительного электрода 3. В этом случае плазма в промежутке 1–2 создается одновременным зажиганием двух параллельных разрядов в промежутках 1–3 и 3–2. Выравнивание токов в промежутках 1–3 и 3–2 обеспечивается с помощью импульсного трансформатора 6. Протекание тока через промежуток 1–3–2 на стадии несамостоятельного разряда обеспечивается накопителем 8.

При использовании данной схемы активная среда имела размер $4.5 \times 2.8 \times 80$ см (с межэлектродными расстояниями по 2.25 см). В качестве коммутатора 9 применялся тиратрон ТГИ-1000/25. Поджигающие электроды 4 выполнялись из фольгированного стеклотекстолита толщиной 1.5 мм, ширина секции была равна 1.5 мм, расстояние между секциями – 0.5 мм. Суммарная емкость конденсаторов 5 составляла 1.4 нФ, емкость конденсатора 7 – 2 нФ, а конденсаторов 8 – 20 мкФ. Импульсный трансформатор 6 состоял из 20 витков коаксиального кабеля, намотанного на кольцевой феррит размером $\varnothing 10/\varnothing 6 \times 1.5$ см. В качестве первичной обмотки использовалась средняя жила, а в качестве вторичной – оплетка коаксиального кабеля.

В другой схеме (рис. 1, б) используется диодно-индуктивная развязка цепей питания. Наличие в цепи питания несамостоятельного разряда диодов 11 оказывается необходимым для поддержания тока разряда в наиболее критический момент развития, когда заканчивается ток самостоятельного разряда, а нарастание тока несамостоятельного разряда ограничено индуктивностью 12. Установка такой диодной цепи позволяет увеличить предельную энергию, вводимую в газ на стадии несамостоятельного разряда, более чем в полтора раза.

Исследование характеристик CO_2 -лазера с данной схемой возбуждения проводилось при размере активной среды $4 \times 3.1 \times 80$ см. Суммарная емкость конденсаторов 16 равнялась 1 нФ. Емкость основного накопителя 5 составляла 8 мкФ, дополнительного накопителя 14 – 0.5 мкФ. Блок диодов состоял из 22 параллельно соединенных диодов КЦ201Е, индуктивность 12 была равна 10 мкГн.

Анализ схем возбуждения показывает, что наиболее перспективной является первая схема (рис. 1, а), где из-за низкой индуктивности трансформатора тока при встречном включении обмоток отсутствуют элементы, специально ограничивающие ток. Однако, в силу того что не

удалось сделать дополнительный электрод прозрачным, в каждом из промежутков появляется собственное катодное падение потенциала. Видимо, поэтому энергетические характеристики разряда, полученные при использовании второй схемы, оказались на 10 % выше, чем при использовании первой. В связи с этим в дальнейшем приводятся результаты исследований, полученные с использованием второй схемы. Тем не менее нам представляется, что первая схема будет более перспективной для возбуждения активной среды в промежутках с большим межэлектродным расстоянием, где доля энергии, рассеянной в катодном слое, снижается.

3. Модель расчета характеристик лазера

Для расчета характеристик лазера необходимо построение модели, способной учитывать кинетику колебательного возбуждения, обмен и релаксацию колебательной энергии, а также генерацию электромагнитного излучения применительно к условиям возбуждения активной среды комбинированным разрядом.

Основу этой модели составляет система балансных уравнений для электронов, ионов (O⁻, CO₃⁻, CO₂⁺, N₂⁺, He⁺) и нейтральных компонентов газовой среды: N₂ (v = 1 – 5), CO₂ (00⁰1), CO₂ (01⁰0), CO₂ (02⁰0), CO₂ (03⁰0), CO₂ (10⁰0). При этом использовались плазмохимические реакции и реакции колебательной релаксации, приведенные в работах [12, 13]. Константы реакций с участием электронов, зависящие от напряженности поля, вычислялись с помощью уравнения Больцмана, вид и численная схема решения которого приведены в работе [13]. Для описания процесса генерации в систему включались также балансные уравнения для фотонов.

Система решалась численно методом Розенброка 3-го порядка точности [14]. Вычисления проводились последовательно в два этапа. На начальном этапе рассчитывалась ионизация, происходящая на стадии самостоятельного разряда. На следующем этапе, когда концентрация электронов n_e достигала n_e^{max} , напряженность поля E задавалась соответствующей стадии самостоятельного разряда. Концентрация n_e^{max} определялась из следующего условия:

$$e\mu_e E^2 \int_0^\infty n_e(t) dt = w_0, \tag{1}$$

где w_0 – заданный удельный энерговклад; μ_e – подвижность электронов; $n_e(0) = n_e^{max}$.

На этом же этапе рассчитывались основные параметры кинетических процессов в активной среде CO₂-лазера и генерации излучения.

4. Временные характеристики

Оциллограммы импульсов тока самостоятельного разряда, ионизирующего рабочую среду, и несамостоятельного разряда, обеспечивающего ввод основной доли энергии в газ на стадии распада плазмы, а также напряжения на электродах во время несамостоятельного разряда приведены на рис.2. Данные оциллограммы соответствуют пакету из четырех импульсов, следующих друг за другом через 100 мкс (частота следования пакетов 1250 Гц, состав смеси газов CO₂ : N₂ : He = 1 : 6 : 15, давление смеси 60 мм рт. ст.). Анализ отношения энергий,

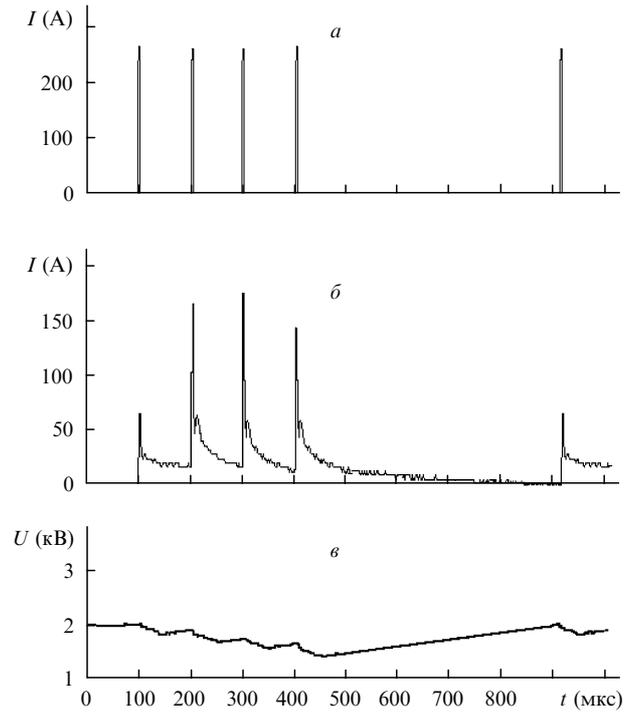


Рис.2. Оциллограммы тока между электродами I в случае самостоятельного (а) и несамостоятельного (б) разрядов и оциллограммы напряжения горения U несамостоятельного разряда (в).

поступающих в газ на стадии самостоятельного и несамостоятельного разрядов, показывает, что в типичных режимах оно составляет 0.01 – 0.03.

Из приведенных оциллограмм видно, что амплитуда импульсов тока несамостоятельного разряда в пакете вначале нарастает, а затем снижается. Этот спад, по нашему мнению, обусловлен наработкой в среде электроотрицательных компонентов типа O₂, NO₂, N₂O, NO, увеличивающих скорость прилипания и снижающих ток разряда [15].

Интересным оказался тот факт, что, если число импульсов в пакете не превышает трех, полная длительность импульсов излучения меняется мало. Оциллограммы импульсов излучения, подтверждающие этот факт, приведены на рис.3. Введенная энергия составляла

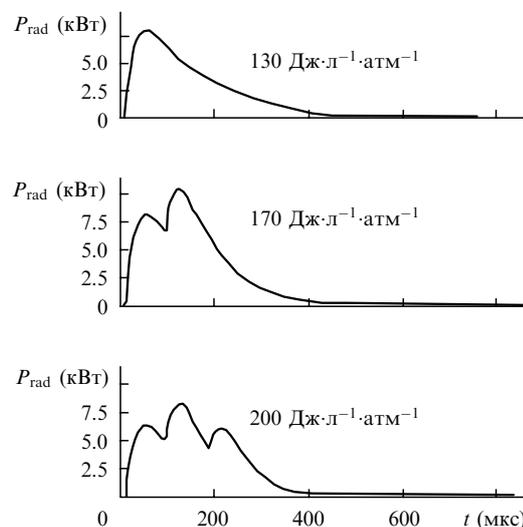


Рис.3. Характерные оциллограммы импульсов излучения, соответствующие одному, двум и трем импульсам накачки в пакете.

130, 170 и 200 Дж·л⁻¹·атм⁻¹ при частоте следования пакетов импульсов 400 Гц. Использовалась газовая смесь состава CO₂:CO:N₂:He = 1.5:1.8:8.5:19 при давлении 60 мм рт. ст. Осциллограмма импульсов излучения, соответствующая трем импульсам в пакете, получена при более низком начальном напряжении из-за ухудшения устойчивости разряда. Следует также заметить, что при увеличении числа импульсов в пакете и повышении энергии, вводимой в газ, в 2–3 раза энергия излучения увеличивается всего в 1.4–1.5 раз, что, по-видимому, связано с нагревом газа.

Особо подчеркнем, что пиковая мощность излучения достигает ~10 кВт при средней мощности ~1 кВт, а форму импульса можно изменять. Эти обстоятельства чрезвычайно важны при использовании лазера в технологии.

5. Энергетические характеристики

При сопоставлении лазеров, возбуждаемых различными методами, в первую очередь сравниваются их эффективности и удельная энергетика. Для этого были численно проанализированы наиболее используемые методы возбуждения лазеров: непрерывный самостоятельный разряд, непрерывный несамостоятельный разряд с оптимальной напряженностью поля для передачи энергии на верхний лазерный уровень, импульсный несамостоятельный разряд с экспоненциально спадающим током (при постоянном и оптимальном поле). Отношение E/N (N – концентрация частиц газа) для самостоятельного разряда выбиралось из условия

$$K_0 N_{\text{CO}_2} + \beta N_{\text{ion}} = K_{\text{CO}_2} N_{\text{CO}_2} + K_{\text{N}_2} N_{\text{N}_2} + K_{\text{He}} N_{\text{He}}, \quad (2)$$

где K_0 – константа диссоциативного прилипания; β – коэффициент рекомбинации; K_j и N_j – константы ионизации, являющиеся функциями E/N , и концентрации j -го компонента газа; $j = \text{CO}_2, \text{N}_2, \text{He}$; N_{ion} – суммарная концентрация ионов.

Данные расчетов приведены на рис.4 в виде зависимости КПД генерации от удельной энергии, переданной в среду в процессе прокачки газа через активную зону лазера. Видно, что наибольший КПД реализуется в импульсном режиме (кривая 1). Различия в КПД лазера при

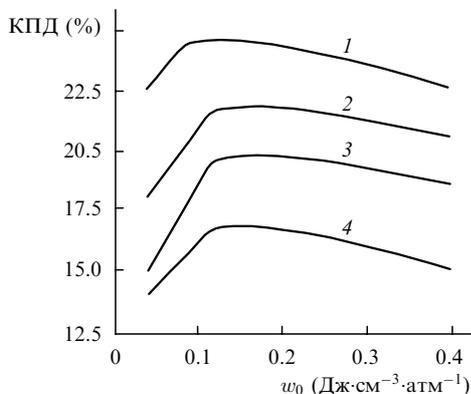


Рис.4. Зависимости КПД CO₂-лазера от удельного энерговклада в среду w_0 при накачке комбинированным разрядом в импульсном режиме (1), несамостоятельным разрядом при ширине электродов 3.5 (2) и 5 см (3) и самостоятельным разрядом в непрерывном режиме (4). Смесь состава CO₂:N₂:He = 1:4:8, давление 0.1 атм, скорость прокачки 50 м/с.

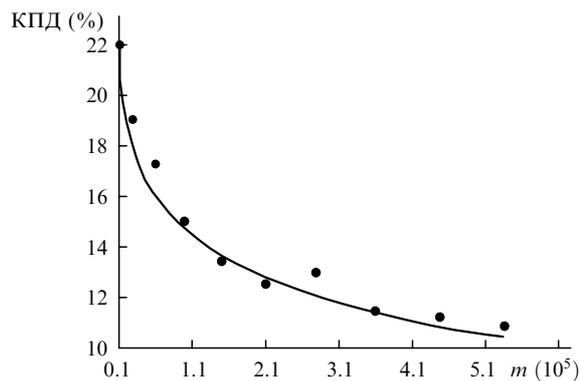


Рис.5. Зависимость КПД CO₂-лазера с комбинированным возбуждением, работающего в отпаянном режиме, от числа включений m для смеси состава CO₂:N₂:He = 1:4:8 при давлении 80 мм рт. ст.

накачке несамостоятельным разрядом импульсного и непрерывного действия (кривые 2, 3) обусловлены, в основном, потерями на VT-релаксацию. КПД лазера еще больше уменьшается при накачке среды самостоятельным разрядом (кривая 4) из-за неоптимального для передачи энергии на верхний лазерный уровень соотношения E/N . Однако следует заметить, что последнее различие будет уменьшаться при увеличении межэлектродного расстояния [16].

Таким образом, среди рассмотренных способов накачки при одинаковой средней мощности, рассеиваемой в газе, накачка импульсно-периодического CO₂-лазера комбинированным разрядом обеспечивает лучшую эффективность и большую энергетика.

На рис.5 приведена экспериментальная зависимость КПД лазера от числа включений, полученная для оптимальных энерговкладов 0.15 Дж·см⁻³·атм⁻¹. Максимальный КПД составляет 22%, что хорошо согласуется с результатами расчетов, выполненных без учета потерь энергии в области катодного падения потенциала. Обращает на себя внимание быстрый спад КПД от 22 до 12% по мере увеличения числа включений от 10⁴ до 3 × 10⁵. Причины такого спада остаются не совсем ясными и возможно связаны с уменьшением концентрации CO₂ и наработкой продуктов его диссоциации: CO, O₂ и окислов азота, снижающих среднюю мощность и КПД лазера [15]. Поэтому в дальнейших экспериментах измерение вводимой и излучаемой энергий, если это специально не оговаривается, проводилось после 10⁶ включений, когда мощность в отпаянном режиме практически стабилизировалась.

Результаты экспериментов по выбору состава смеси газов приведены на рис.6. Измерения выполнены при частоте следования импульсов 700 Гц на первых включениях (кривые 1–4) и через 10⁶ включений (кривая 2). Следует отметить, что с увеличением содержания CO₂ в газовой смеси мощность, рассеянная в газе, уменьшалась (кривая 4). На первых включениях максимальная мощность излучения (кривая 3) была получена для смеси состава CO₂:N₂ = 1:4. Однако через 10⁶ включений оптимальными оказывались смеси, где отношение [CO₂]/([CO₂] + [N₂]) не превышало 0.1. Возможно, что причины этого аналогичны причинам, обуславливающим уменьшение КПД на первых включениях. С ростом содержания гелия в смеси газов вводимые и излучаемые мощности и КПД нарастают, а затем достигают насыщения (кривая 5).

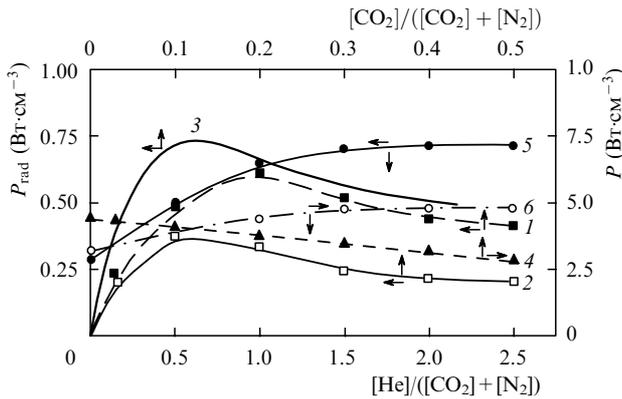


Рис.6. Экспериментальные (1, 2, 4–6) и расчетная (3) зависимости удельной средней мощности излучения P_{rad} (1–3, 5) и удельной средней мощности несамостоятельного разряда (мощности накачки) P (4, 6) от отношений концентраций $[CO_2]/([CO_2] + [N_2])$ (1–4) и $[He]/([CO_2] + [N_2])$ (5, 6), полученные на первых включениях (1, 3–6) и через 10^6 включений (2) при парциальном давлении гелия $p_{He} = 40$ мм рт. ст., давлении смеси CO_2-N_2 $p = 30$ мм рт. ст., частоте следования импульсов $f = 700$ Гц (1–4) и давлении смеси состава $CO_2 : N_2 = 1 : 4$ $p = 20$ мм рт. ст., $f = 800$ Гц (5, 6).

В диапазоне давлений газа 40–80 мм рт. ст. насыщение наступает при отношениях $[He]/([CO_2] + [N_2]) = 1.5–2$ практически независимо от отношения $[CO_2]/[N_2]$. Это значение несколько отличается от полученного для лазеров атмосферного давления [17], где оптимальным является отношение $[He]/([CO_2] + [N_2]) \sim 0.67$. Высокое содержание гелия в исследуемых лазерах, где реализуются более низкие, чем в ТЕА-лазерах, коэффициенты усиления, объясняется большей ролью кинетики релаксационных процессов. В частности, в нашем случае необходима ускоренная разгрузка нижнего лазерного уровня для как можно более длительного поддержания при распаде плазмы коэффициента усиления превышающим его пороговое значение, что, как известно, достигается увеличением скорости расселения нижнего лазерного уровня за счет повышения концентрации гелия.

Для практического применения лазера, работающего в импульсно-периодическом режиме, важными являются средние за период значения мощности накачки P и мощности излучения P_{rad} . Зависимости этих параметров от частоты следования импульсов при различных составах газовой смеси приведены на рис.7.

Поскольку в диапазоне низких частот (до 400–500 Гц)

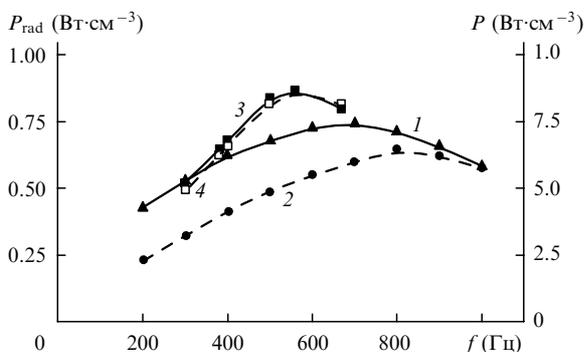


Рис.7. Зависимости мощностей P_{rad} (1, 3) и P (2, 4) от частоты следования импульсов f для смеси состава $CO_2 : N_2 : He = 1 : 4 : 8$ при $p = 70$ мм рт. ст. на первых включениях (1, 2) и смеси состава $CO_2 : CO : N_2 : He = 1 : 0.7 : 10 : 20$ при $p = 60$ мм рт. ст. через 10^6 включений (3, 4).

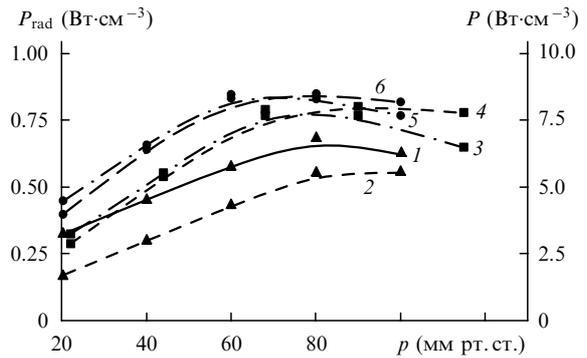


Рис.8. Зависимости мощностей P_{rad} (1, 3, 5) и P (2, 4, 6) от давления рабочей смеси газов p при работе на первых включениях для смесей состава $CO_2 : N_2 : He = 1 : 3 : 6$ (1, 2), $CO_2 : N_2 : He : H_2 = 1 : 3 : 6 : 1$ (3, 4) и $CO_2 : CO : N_2 : He = 1 : 0.7 : 10 : 20$ (5, 6) при $f = 500$ Гц.

мощность накачки линейно растет с увеличением частоты следования импульсов, то и мощность излучения на этом участке растет линейно. При больших частотах происходит насыщение, а затем спад мощности, вводимой в газ, и, следовательно, мощности излучения. В проводимых экспериментах устойчивый максимум энергокладов в несамостоятельный разряд приходился на частоты 600–800 Гц для смесей CO_2-N_2-He и на частоты 400–600 Гц для смесей, содержащих CO .

Снижение мощности накачки, которое ведет к соответствующему снижению мощности излучения, связано, по-видимому, с влиянием газодинамических пробок и приэлектродных процессов на устойчивость разряда [18]. Некоторое уменьшение КПД при увеличении частоты, очевидно, обусловлено ухудшением однородности плазмы разряда и возникновением неоднородности коэффициента усиления вдоль оси резонатора, что при фиксированной добротности резонатора ведет к уменьшению эффективности вывода излучения.

На рис.8 приведены зависимости средних мощностей накачки и излучения от давления смеси. Снижение излучаемой мощности после максимума при постоянной мощности накачки может быть связано с уменьшением коэффициента усиления вследствие столкновительного уширения спектральной линии перехода $00^0_1 \sim 10^0_0$ молекулы CO_2 – процесса, который становится преобладающим при давлении выше 60 мм рт. ст.

На рис.9 показаны зависимости предельной удельной энергии w , вводимой в газ за импульс несамостоятельного разряда, от частоты следования импульсов самостоятельного разряда (один импульс а пакете) для различных составов и давлений газовой смеси. Кривые можно условно разделить на две части: линейный участок до некоторой частоты (500–700 Гц) и участок резкого снижения w после этой частоты. Наличие плато при сравнительно низких энергокладах (кривые 3–5) качественно согласуется с известной теорией импульсно-периодического разряда [18, 19], основанной на влиянии газодинамических пробок и приэлектродных нагретых слоев на устойчивость разряда. Считается, что вследствие протекания тока через разрядный промежуток газ нагревается и расширяется (выравнивая давление) в обе стороны по потоку. Соответственно перерыв между импульсами необходим для того, чтобы все созданные неоднородности плотности газа ушли вместе с потоком.

Это хорошо подтверждается кривыми 4–6, полученными при различных скоростях газового потока и прочих

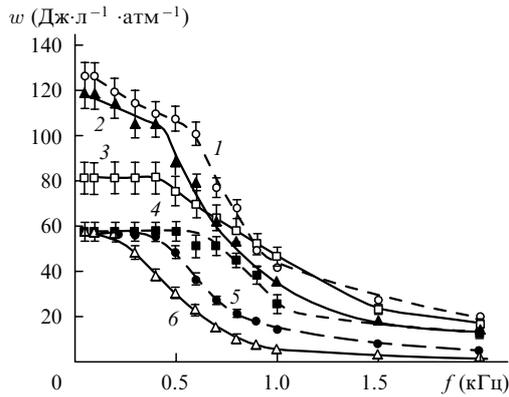


Рис.9. Зависимости предельной удельной энергии w , вводимой в газ за импульс несамостоятельного разряда, от частоты следования импульсов f (один импульс в пакете) для скоростей потока газа через разрядный промежуток 50 (1–4), 40 (5) и 25 м/с (6), а также для различных составов и давлений газовой смеси: $\text{CO}_2:\text{CO}:\text{N}_2:\text{He} = 1.5:1:10:22$, $p = 70$ мм рт. ст. (1), $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He}:\text{H}_2 = 1:4:8:1$, $p = 88$ мм рт. ст. (2), $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He}:\text{H}_2 = 1:3:6:1$, $p = 66$ мм рт. ст. (3), $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He} = 1:3:6$, $p = 60$ мм рт. ст. (4–6).

равных условиях. Видно, что постоянство энергокладов сменяется их резким падением, когда газ за время между импульсами проходит расстояние менее 10 см, что соответствует трехкратной смене газа в разрядном промежутке. При более высоких энергокладах (кривые 1, 2) плато не наблюдается, что, по-видимому, является проявлением дополнительного механизма контракции разряда и будет обсуждаться ниже.

6. Влияние добавок H_2 и CO на характеристики лазера

В CO_2 -лазерах широко используются добавки в смесь газов $\text{CO}_2\text{--N}_2\text{--He}$ молекул CO и H_2 . Как известно [17], такие добавки значительно увеличивают ресурсные характеристики CO_2 -лазеров, работающих в отпаянном режиме. В связи с этим рассмотрим их влияние, в основном, на энергетические характеристики лазера.

Результаты, приведенные на рис.9 (кривые 1–3), показывают, что добавки H_2 и CO в смесь газов $\text{CO}_2\text{--N}_2\text{--He}$ при всех частотах следования импульсов возбуждения увеличивают предельные энергоклады примерно в полтора раза.

В то же время механизмы повышения энергетики разряда при добавках CO и H_2 , по-видимому, разные. Влияние добавок CO в смеси на основе CO_2 обсуждалось ранее [15] и связывалось с уменьшением концентрации образующихся в разряде электроотрицательных компонентов в реакциях



Увеличение предельных энергокладов ранее наблюдалось в [20] при добавках в N_2 , $\text{CO}_2\text{--N}_2$ и CO_2 триэтиламина и NH_3 , что объяснялось снижением скоростей ступенчатой ионизации через состояния $A^3\Sigma_u^+$ и $V^3\Pi_g$ молекул азота. По-видимому, аналогичные процессы могут иметь место и в нашем случае при добавках H_2 .

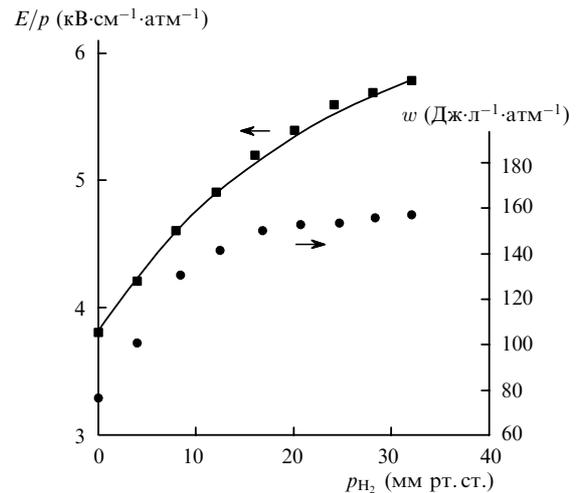


Рис.10. Расчетная (кривая) и экспериментальные (точки) зависимости предельных отношений E/p (■, сплошная кривая) и предельной удельной энергии несамостоятельного разряда w (●) от парциального давления H_2 для смеси $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He} = 1:4:7$ при $p = 50$ мм рт. ст.

Для обоснования этого предположения рассмотрим более подробно влияние на энергетику CO_2 -лазера добавок молекул H_2 , сечения взаимодействия которых достаточно хорошо известны.

Зависимость предельной энергии, рассеянной в газовой смеси на стадии несамостоятельного разряда, w от парциального давления водорода p_{H_2} приведена на рис.10. По мере увеличения p_{H_2} до 20 мм рт. ст. независимо от состава смеси предельная энергия w резко возрастает. Дальнейшее повышение p_{H_2} не приводит к сколько-нибудь заметному увеличению w . Наиболее важным представляется объяснение причин роста w . Как отмечалось ранее, это может быть обусловлено тем, что при увеличении концентрации H_2 происходит снижение скоростей прямой и ступенчатой ионизации, ведущее, как известно, к контракции разряда.

Для проверки этого предположения выполнялись расчеты констант возбуждения и ионизации возбужденных состояний молекул азота с помощью уравнения Больцмана. Исходя из равенства указанных выше констант, были рассчитаны предельные значения E/p положительного столба несамостоятельного разряда в зависимости от парциального давления водорода (рис.10, сплошная кривая) для смеси состава $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He} = 1:4:7$ при давлении 50 мм рт. ст. Неплохое совпадение расчетных и экспериментальных данных говорит о том, что, уменьшая скорость ступенчатой ионизации, водород подавляет развитие неустойчивостей.

На рис.11 показано влияние добавок H_2 и CO на вводимую и излучаемую энергии. Видно, что максимум энергии излучения достигается при парциальном давлении водорода $p_{\text{H}_2} \sim 3\text{--}5$ мм рт. ст. Дальнейшее повышение p_{H_2} ведет к снижению энергии излучения, хотя вводимая энергия продолжает расти (рис.11, кривые 4–6) вплоть до $p_{\text{H}_2} = 30$ мм рт. ст. Это объясняется тем, что после максимума прирост энергии, вводимой в газ, не компенсирует увеличивающуюся скорость расщепления верхнего лазерного уровня за счет роста концентрации H_2 .

С ростом парциального давления CO максимум энергии излучения наблюдается несколько раньше, чем максимум вводимой энергии. При дальнейшем повышении

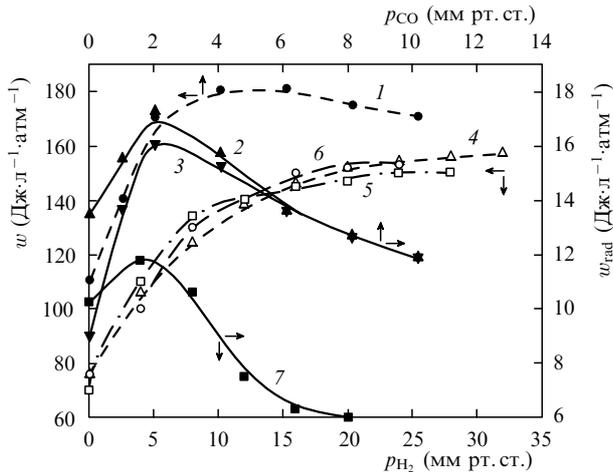


Рис.11. Зависимости удельных вводимой (w ; 1, 4–6) и излучаемой (w_{rad} ; 2, 3, 7) энергий за импульс от парциальных давлений p_{CO_2} (1–3) и p_{H_2} (4–7), полученные на первых включениях (1, 2, 4–7) и через 10^6 включений (3) при $f = 500$ (1–3) и 200 Гц (4–7) для различных составов и давлений газовой смеси: $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He} = 1:4:8$, $p = 60$ мм рт. ст. (1–3), $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He} = 1:4:5$, $p = 80$ мм рт. ст. (4), $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He} = 1:3:6$, $p = 60$ мм рт. ст. (5) и $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He} = 1:4:7$, $p = 50$ мм рт. ст. (6, 7).

давления CO наблюдается небольшое уменьшение вводимой энергии и значительный спад энергии излучения. Последнее вызвано уменьшением коэффициента усиления, поскольку молекулы CO₂ и CO являются «конкурентами» с точки зрения поглощения энергии, что при постоянной добротности резонатора вызывает снижение генерируемой мощности излучения.

В результате этих экспериментов было найдено, что в смеси состава $\text{CO}_2:\text{CO}:\text{N}_2:\text{He} = 1.5:1:8.5:19$ при давлении 60 мм рт. ст. и вводимой в газ мощности 10 Вт/см³ спад излучаемой мощности не превышал 10 % от максимальной за время работы (3×10^7 включений) в отпаянном режиме.

7. Заключение

Создан технологический CO₂-лазер нового поколения, накачиваемый комбинированным разрядом. Лазер способен работать в импульсно-периодическом режиме, при этом форма и длительность импульса излучения могут варьироваться. В технологическом отпаянном режиме с литра активной среды получено излучение со средней мощностью 1 кВт при пиковой мощности 10 кВт. Установлено, что удельная средняя мощность излу-

чения может достигать 10 Вт/см³, а пиковая мощность – 100 Вт/см³.

Показано, что в таком лазере достигаются высокие КПД: 22 % в режиме полной замены газа (первые включения), 28 % без учета доли потерь энергии в области катодного падения потенциала и ~10 % при работе в отпаянном режиме в смесях, содержащих CO.

Найдено, что небольшие добавки H₂ приводят к увеличению вводимой и излучаемой мощностей в 1.5 раза. Установлены оптимальные для получения максимальной излучаемой мощности составы смесей и давления газов, а также частоты следования импульсов генерации.

Отметим также, что высокая надежность работы лазера проверена при получении нанодисперсных порошков A₂O₃ и ZnO₂, стабилизированных Y₂O₃. Неясными остаются причины быстрого уменьшения КПД от 22 до 12 % в течение $\sim 3 \times 10^5$ включений при работе в отпаянном режиме.

1. Бычков Ю.И., Королев Ю.Д., Месяц Г.А. и др. *Инжекционная газовая электроника* (Новосибирск: Наука, 1982).
2. Напартович А.П., Наумов В.Г., Шаисов В.М. *Письма в ЖТФ*, **3**, 349 (1977).
3. Buehkov Y.I., Osipov V.V., Telnov V.A. *J. Physique*, **40**, 161 (1979).
4. Reilly J.R. *J. Appl. Phys.*, **41**, 3411 (1972).
5. Hill A.V. *Appl. Phys. Lett.*, **22**, 670 (1973).
6. Генералов Н.А., Зимаков В.П., Косынкин В.Д., Ройтенбург Д.И. *Физика плазмы*, **3**, 626 (1977).
7. Осипов В.В., Савин В.В., Тельнов В.А. *Журн. прикл. мех. и техн. физ.*, № 2, 10 (1982).
8. Nikumb S.K., Seguin H.J.J., Seguin V.A., Wills R.J., Reshef H.W. *IEEE J. Quantum Electron.*, **25**, 1725 (1989).
9. Осипов В.В., Иванов М.Г., Мехряков В.Н. Патент РФ № 2107366 от 20.03.98; *БИ*, № 8, 498 (1998).
10. Осипов В.В., Иванов М.Г. Патент РФ № 2124255 от 27.12.98; *БИ*, № 36, 423 (1998).
11. Корнев В.Н., Куш Н.П., Скирко Г.П., Осипов В.В., Тельнов В.А. А.с. СССР № 1238670 от 27.07.84.
12. Taylor R.L., Bitterman S. *Rev. Mod. Phys.*, **41**, 26 (1969).
13. Смит К., Томсон Р. *Численное моделирование газовых лазеров* (М.: Мир, 1981).
14. Ракитский Ю.В. и др. *Численные методы решения жестких систем* (М.: Наука, 1979).
15. Карпов В.М., Конев Ю.Г., Орловский В.М., Осипов В.В., Пономарев В.Б. *Квантовая электроника*, **15**, 465 (1988).
16. Judd O.P., Wada J.Y. *IEEE J. Quantum Electron.*, **10**, 12 (1974).
17. Месяц Г.А., Осипов В.В., Тарасенко В.Ф. *Импульсные газовые лазеры* (М.: Наука, 1991).
18. Dzacowic G.S., Wutzke S.A. *J. Appl. Phys.*, **46**, 5061 (1973).
19. Велихов Е.П., Баранов В.Ю., Летохов В.С., Рябов Е.А., Старостин А.Н. *Импульсные CO₂-лазеры и их применение для разделения изотопов* (М.: Наука, 1983).
20. Прохоров А.М., Семенов С.К., Фирсов К.Н. *Квантовая электроника*, **15**, 553 (1988).