

УДК 621.378.324

ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕНЕРАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МАЛОГАБАРИТНОГО ТЕА-CO₂ ЛАЗЕРА

К. М. До, аспирант кафедры ПЭл РГРТУ; quangmanhars@gmail.com

Б. А. Козлов, д.ф.-м.н., профессор кафедры ЭП РГРТУ; kozlov.qe.ryazan@mail.ru

Сообщается о результатах исследований, направленных на сокращение длительности импульсов излучения малогабаритных отпаянных ТЕА-CO₂ лазеров. Минимальные значения длительности импульсов излучения в несколько наносекунд при значениях энергии излучения 50-150 мДж достигнуты в результате увеличения давления рабочих смесей до 6 атмосфер и сокращения длины резонатора до 25 см. Цель работы заключается в теоретическом и экспериментальном определении основных факторов, влияющих на величину длительности импульсов излучения, а также условий, при которых могут быть достигнуты предельно короткие импульсы излучения в малогабаритных CO₂ лазерах атмосферного и сверхатмосферного давлений с приемлемой для практических применений энергией излучения в импульсе.

Ключевые слова: ТЕА-CO₂ лазер, оптический резонатор, объемный разряд, энергия излучения в импульсе, длительность импульса излучения.

DOI: 10.21667/1995-4565-2018-66-4-2-69-76

Введение

Импульсные лазеры на двуокиси углерода, работающие при атмосферном и сверхатмосферном давлении (ТЕА- и ТЕ-CO₂ лазеры), нашли широкое применение в таких областях, как оптическая локация, дистанционный мониторинг окружающей среды, разделение изотопов, лазерная химия, тестирование инфракрасных фотоприемных устройств. Кроме этого, мощные ТЕА-CO₂ лазеры используются для эффективной накачки газовых лазеров дальнего инфракрасного диапазона и для получения наноструктурированных материалов [1-8]. В целом ряде применений требуются импульсы излучения специфической формы (без традиционного для них «хвоста») и длительностью на полувывоте в несколько наносекунд.

Традиционные значения длительностей импульсов излучения малогабаритных ТЕА-CO₂ лазеров на полувывоте составляют 30 ÷ 75 наносекунд при плотности энергии лазерного излучения в пределах 5-20 мДж/см². Получение импульсов излучения с меньшей длительностью возможно при использовании специальных методов, таких как модуляция добротности или синхронизация мод [9, 10]. Однако эти методы достаточно сложны для их практической реализации. Наиболее простым и надежным методом генерации коротких импульсов когерентного излучения является метод переключения усиления,

который автоматически реализуется в ТЕА-CO₂ лазерах при осуществлении «быстрой» накачки [9, 10]. Предельные возможности этого метода для формирования импульсов излучения наносекундной длительности как теоретически, так и экспериментально к настоящему времени изучены не в полной мере.

Расчетная часть

Формирование импульса излучения в ТЕА-CO₂ лазерах происходит в соответствии с механизмом «переключения усиления» [9-11]. Его суть состоит в том, что формирование интенсивного светового поля в резонаторе начинается уже после значительного превышения уровня инверсной населенности (коэффициента усиления активной среды) над пороговым значением. В лазерах с модулированной добротностью подобные условия создаются специально с помощью дополнительных оптических устройств. Это означает, что начальные условия формирования импульсов излучения в ТЕА-CO₂ лазерах с быстрой накачкой (переключением усиления активной среды) и в лазерах с модулированной добротностью (переключением добротности резонатора) идентичны и оптические процессы в этих лазерах описываются одними и теми же уравнениями.

В настоящей работе для расчетов параметров импульсов излучения (энергия излучения в импульсе и длительность импульса излучения)

ТЕА-СО₂ лазеров применялись аналитические выражения, характерные для описания динамики излучения в лазерах с модулированной добротностью [9-11].

Диаграмма энергетических уровней рабочих молекул СО₂ и N₂ изображена на рисунке 1. Формирование инверсной населенности на переходах (00⁰1)→(10⁰0) и (00⁰1)→(02⁰0) молекулы СО₂ осуществляется в результате как прямого электронного возбуждения молекулы СО₂ из основного состояния (00⁰0) в плазме газового разряда, так и в результате передачи энергии состоянию (00⁰1) от возбужденных молекул азота N₂^{*} (v=1) в результате ударов второго рода.

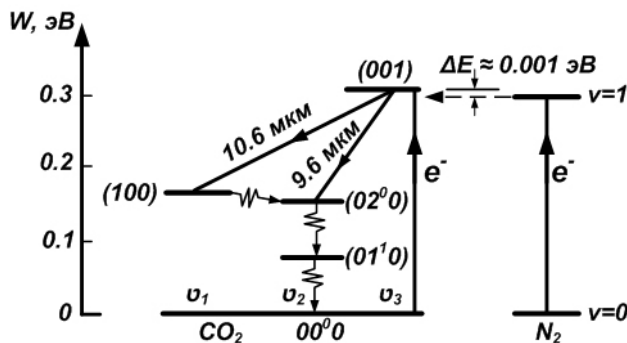


Рисунок 1 – Энергетическая диаграмма нижних колебательных состояний молекул СО₂ и N₂

В условиях быстрого образования инверсной населенности и формирования «гигантского» импульса когерентного излучения трехуровневая система, описывающая процессы заселения и расселения рабочих уровней, сводится к двухуровневой системе [9, 10]. Это позволяет в первом приближении получить аналитические выражения для энергии излучения в импульсе W и его длительности $\Delta\tau$ через известные значения начальной инверсии населенностей, пороговое ее значение, параметры резонатора и геометрические размеры активной среды. Эти выражения имеют следующий вид [9, 10]:

$$W = \frac{-\ln R_2}{4L\sigma} \frac{N_i}{N_p} \eta_E h\nu V_{AC}, \quad (1)$$

$$\Delta\tau = \frac{W}{P_p} = \tau_c \frac{\frac{N_i}{N_p} \eta_E}{\frac{N_i}{N_p} - \ln \frac{N_i}{N_p} - 1} = \left(-\frac{2L}{c} \right) \frac{1}{\ln R_2} \frac{\frac{N_i}{N_p} \eta_E}{\frac{N_i}{N_p} - \ln \frac{N_i}{N_p} - 1}, \quad (2)$$

где $N_i = N_1 - N_2$ – разность плотностей населенностей верхнего и нижнего состояний, см⁻³;

I – плотность потока фотонов в оптическом резонаторе, $I = P/V_{AC}$, фотон/см³;

P – число фотонов в резонаторе;

V_{AC} – объем активной среды, см³;

β – коэффициент потерь, см⁻¹;

σ – сечение взаимодействия излучения с активной средой на частоте перехода, см²;

β_Σ – потери на излучение $\left(\beta_\Sigma = \frac{1}{2L} \ln \frac{1}{R_2} \right)$, см⁻¹;

L – длина резонатора, см;

R_2 – коэффициент отражения выходного зеркала;

N_i, N_p, N_f – начальное, пороговое и конечное значения инверсной населенности на лазерном переходе;

$\eta_E = (N_i - N_p / N_i)$ – коэффициент использования инверсии населенностей;

τ_c – время жизни фотонов в резонаторе.

Применительно к молекуле двуокиси углерода величина N_i соответствует разности населенностей состояний 00⁰1 (N_1) и 10⁰0 (или 02⁰0) (N_2). При проведении расчетов предполагалось, что величина плотности инверсной населенности N_i пропорциональна концентрации молекул двуокиси углерода в рабочей смеси. Коэффициент пропорциональности, он же коэффициент возбуждения, принимался для всех рассматриваемых случаев равным $\beta = 10\%$. То есть величина плотности инверсной населенности N_i задавалась как

$$N_i = \beta \cdot N_{CO_2}. \quad (3)$$

Пороговое значение инверсной населенности, при котором начинается формирование когерентного излучения, определяется суммарными потерями в резонаторе и сечением вынужденного излучения:

$$N_p = \frac{\beta + \beta_\Sigma}{\sigma} = \frac{1}{2L\sigma} \ln \frac{1}{R_2}. \quad (4)$$

Для СО₂-лазеров атмосферного давления сечение вынужденного излучения имеет значение $\sigma = 7 \cdot 10^{-20}$ см² [9].

На рисунке 2 представлены расчетные зависимости длительности импульсов излучения от превышения начальной инверсии населенностей над ее пороговым значением при использовании выходного зеркала резонатора с коэффициентом отражения 0,8 для различных значений длины резонатора L .

Из приведённых зависимостей видно, что с превышением инверсии населенностей в три-четыре раза над пороговым значением длительность импульса лазерного излучения заметно уменьшается. Так, при использовании резонатора длиной в 100 см минимальная длительность им-

пульса излучения составляет 72 нс при отношении начальной инверсной населенности к пороговому значению, равном 4. При длине резонатора 10 см максимальная и минимальная длительности импульса излучения составляют 27 нс и 7 нс, что соответствует отношениям начальной инверсной населенности к пороговому значению 1,5 и 4.

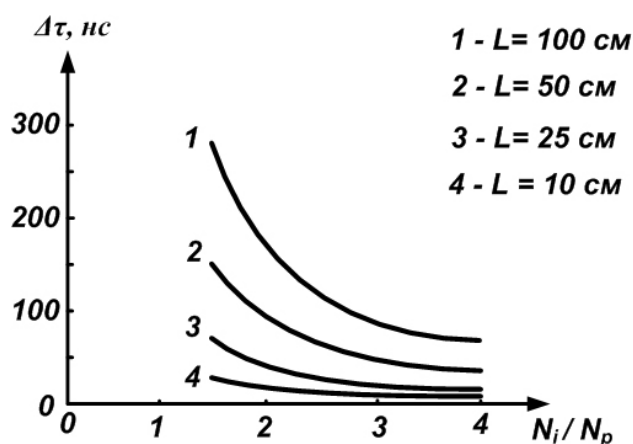


Рисунок 2 – Зависимости длительности импульсов излучения от превышения начальной инверсной населенности над пороговым значением при различных значениях длины резонатора

Очевидно, что дальнейшее увеличение отношения N_i / N_p обеспечит формирование более коротких по длительности импульсов излучения.

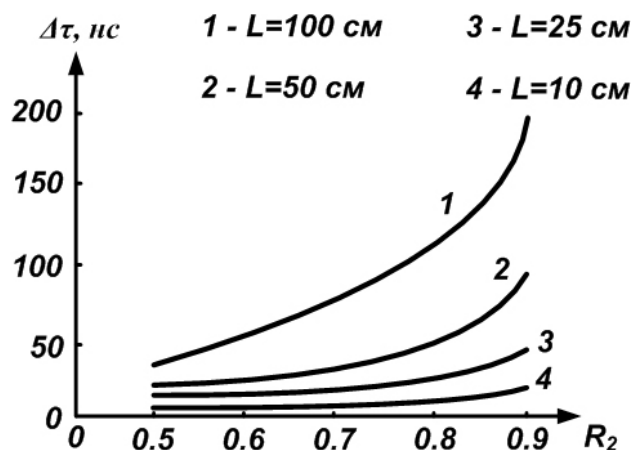


Рисунок 3 – Зависимости длительностей импульсов лазерного излучения от коэффициента отражения выходного зеркала при различных значениях длины резонатора

На рисунке 3 показаны зависимости длительностей импульсов лазерного излучения от коэффициентов пропускания выходного зеркала при различных значениях длины резонатора и отношении начальной инверсной населенности к пороговому значению, равном 3. С уменьшением коэффициента отражения выходного зеркала длительности импульсов излучения уменьшаются. При этом для резонатора с минимальной

длиной $L = 10$ см и коэффициентом отражения выходного зеркала $R = 0,9$ имеет место максимальная длительность импульса излучения $\tau \approx 20$ наносекунд. Для этого же резонатора с коэффициентом отражения выходного зеркала $R = 0,5$ длительность импульса излучения становится значительно меньше и достигает значения $\tau \approx 10$ наносекунд. При больших превышениях уровня инверсной населенности над пороговым значением импульсы излучения будут иметь существенно меньшие длительности.

На рисунке 4 представлены зависимости длительностей импульсов излучения от длины резонатора при отношении начальной инверсной населенности к пороговому значению, равном 3. С уменьшением коэффициента отражения выходного зеркала длительности импульсов излучения уменьшаются и минимальная длительность импульса излучения достигает значения $\tau \approx 10$ наносекунд.

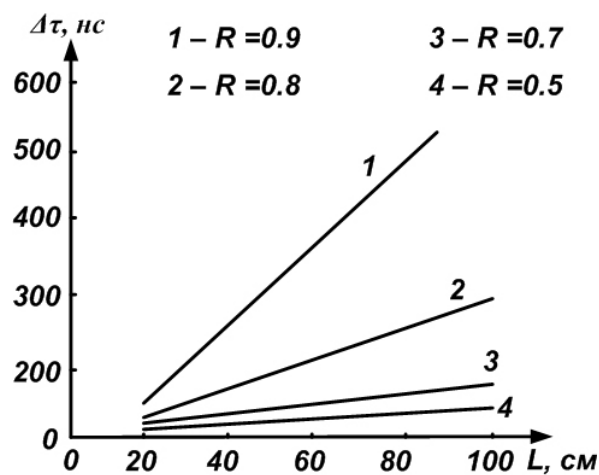


Рисунок 4 – Зависимости длительностей импульсов излучения от длины резонатора при различных значениях коэффициента отражения выходного зеркала

На рисунке 5 приведены расчетные зависимости плотностей энергии излучения в импульсе от давления рабочей смеси с различными исходными составами $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He}$, длинами резонаторов $L_1 = 25$ см и $L_2 = 46$ см и коэффициентом отражения выходного зеркала резонатора $R = 50\%$. Плотность энергии излучения линейно изменяется с увеличением давления смеси как для состава $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He}=3:1:2$, так и для состава $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He}=1:1:2$. В смесях с преобладающим содержанием двуокиси углерода энергия излучения в импульсе имеет большие значения. При этом значения энергии излучения в импульсе очень сильно зависят от длины резонатора. Так, для резонатора с длиной $L_1 = 25$ см характерны максимальные значения плотности энергии излучения $66\text{--}32$ мДж/см³ при общем давлении

смеси 10 атмосфер, а минимальные значения составляют 5 и 1,5 мДж/см³ при давлении в одну атмосферу. Для ТЕА-СО₂ лазера с длиной резонатора $L_2 = 46$ см (кривые 2, 4) плотность энергии излучения в импульсе заметно ниже. Максимальные значения плотности энергии излучения при общем давлении смеси в 10 атмосфер достигают 50-25 мДж/см³, а минимальные значения – 4 и 1,5 мДж/см³ при давлении в одну атмосферу.

Переход к резонатору с коэффициентом отражения выходного зеркала $R = 75\%$ приводит к снижению значений энергии излучения в импульсе. Так, для резонатора с длиной $L_1 = 25$ см максимальные значения плотности энергии излучения в импульсе составляют 42–20,5 мДж/см³ (смеси СО₂:N₂:He=3:1:2 и 1:1:2) при полном давлении 10 атмосфер. Минимальные значения, характерные для давления в одну атмосферу, имеют значения 3,5-1,4 мДж/см³. Переход к резонатору с длиной $L_2 = 46$ см приводит к снижению плотности энергии излучения в импульсе в полтора раза.

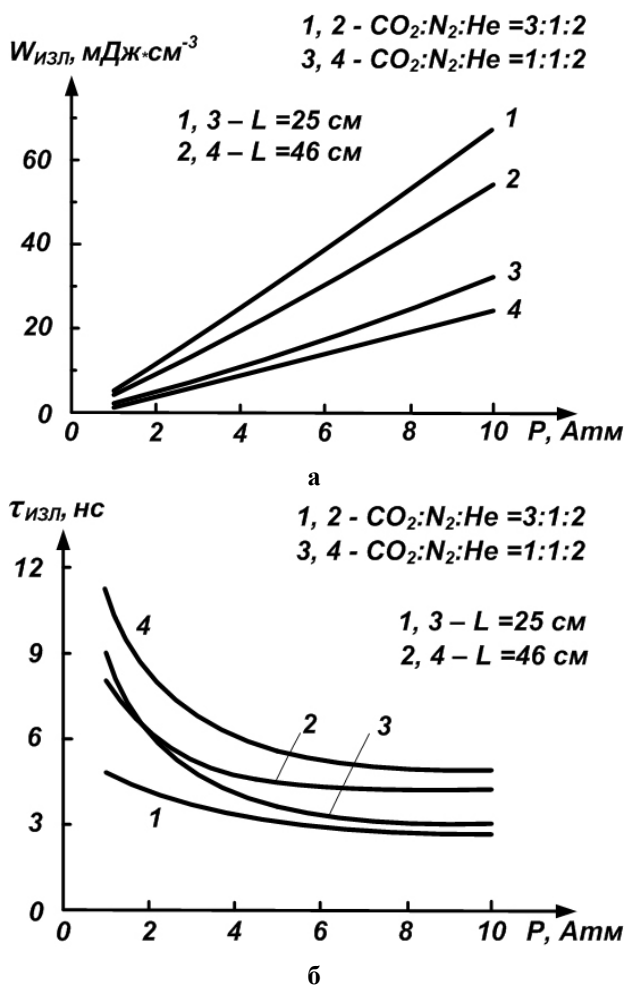


Рисунок 5 – Расчетные зависимости плотности энергии излучения в импульсе (а) и длительности импульса излучения (б) от общего давления для двух значений длины резонатора $L_1 = 25$ см и $L_2 = 46$ см и коэффициента отражения выходного зеркала $R = 50\%$

Длительность импульсов излучения при изменении давления в пределах от одной атмосферы до 10 атмосфер монотонно уменьшается от характерных значений 12-5 нс до 5-3 нс. Минимальные значения длительностей импульсов излучения характерны для смеси с повышенным содержанием двуокси углерода (СО₂:N₂:He= 3:1:2), коэффициенте отражения выходного зеркала резонатора $R = 50\%$ и минимальной длине резонатора 25 см.

Проведенные расчеты показывают, что для формирования импульсов излучения с длительностью менее 10 наносекунд необходимо увеличивать отношение начального значения инверсной населенности к пороговому значению и использовать активные среды и оптические резонаторы с малой длиной. Коэффициент отражения выходного зеркала резонатора при этом должен иметь значения в пределах 0,5-0,75. Заметного превышения начальной инверсной населенности над пороговым значением можно достичь при возбуждении активных сред при давлениях, значительно превышающих одну атмосферу.

Экспериментальная часть

Исследования проводились с малогабаритным ТЕА-СО₂ лазером, оболочка которого могла выдерживать давление газовой смеси до 20 атмосфер. Ее внутренняя часть была изготовлена из алюмооксидной керамики 22ХС диаметром 86 мм, внешняя – из нержавеющей стали. Пространство между цилиндрическими оболочками было заполнено эпоксидной смолой. Резонатор лазера с внутренними зеркалами был образован глухим металлическим зеркалом (пленка золота на стали) с радиусом кривизны 5 м и плоской пластинкой из селенида цинка с отражающим диэлектрическим покрытием, обеспечивающим пропускание излучения на длинах волн в диапазоне от 9 до 11 мкм в 25 %. Длина резонатора могла изменяться в пределах от 25 до 46 см.

Объемный разряд накачки возбуждался в промежутке с объемом $V_{AC} = 18 \times 0,8 \times 0,8$ см³. Катод был выполнен из никеля и имел профиль Брюса [9, 12]. Анод был выполнен из никелевой сетки с пропусканием 50 %. Предварительная ионизация газов в основном разрядном промежутке перед пробоем осуществлялась жестким ультрафиолетовым излучением вспомогательных искровых разрядов, расположенных в один ряд под сеточным электродом. При увеличении давления рабочей смеси необходимый уровень начальной ионизации увеличивается пропорционально кубу давления [12]. Это означает, что энергетические затраты на создание необходимого уровня начальной ионизации, по крайней мере,

также пропорциональны кубу давления. Такие требования могут быть выполнены только лишь при использовании дополнительного импульсного генератора, в котором возможно варьирование энергии возбуждения в необходимых пределах.

Возбуждение вспомогательного и объемного разрядов осуществлялось от автономных импульсных генераторов с плавно регулируемой задержкой между моментами их зажигания. Такой метод возбуждения объемного разряда накачки позволял независимым образом варьировать параметры вспомогательного и объемного разрядов. В качестве высоковольтных импульсных генераторов применялись низкоиндуктивные импульсные трансформаторы, обеспечивающие формирование импульсов напряжения до 120 кВ при длительностях по основанию до 200 нс. Времена нарастания напряжения на разрядных промежутках при этом составляли 40÷60 нс. В качестве коммутаторов в импульсных генераторах применялись импульсные водородные тиатроны марки ТГИ1-1000/25.

Величина энергии лазерного излучения в импульсе определялась из измерений средней мощности излучения P_{CP} и частоты повторения импульсов $F_{повт.}$. Для измерения средней мощности лазерного излучения применялся измеритель средней мощности типа ИМО-2Н. Временное поведение импульсов излучения определялось с помощью быстродействующих фотоприемников типа ФП-1 и ФП-2 и цифрового осциллографа с полосой $\Delta f = 200$ МГц.

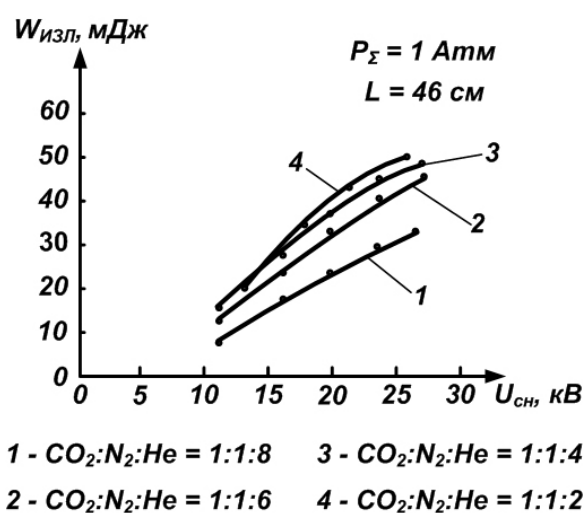


Рисунок 6 – Зависимости энергии излучения в импульсе от напряжения при различных составах рабочих смесей. Длина резонатора $L = 46$ см

На рисунке 6 представлены зависимости энергии лазерного излучения в импульсе от напряжения заряда накопительного конденсатора генератора накачки при различных составах ра-

бочих смесей. Длина резонатора лазера составляла $L=46$ см, объем активной среды $V_{AC}=18 \times 0,8 \times 0,8 \text{ см}^3 \approx 11 \text{ см}^3$. Общее давление рабочих смесей составляло одну атмосферу.

Результаты измерений, отраженные на рисунке 6, показывают, что энергия лазерного излучения в импульсе почти линейно возрастает с ростом напряжения заряда накопительного конденсатора генератора накачки. Наибольшие значения энергии лазерного излучения характерны для рабочей смеси $CO_2:N_2:He=1:1:2$. Максимальная энергия составляет 50 мДж при длительности импульса излучения на полувысоте $\tau \approx 50$ нс, минимальная – 17 мДж и длительность до 60 нс. Для рабочей смеси $CO_2:N_2:He=1:1:8$ максимальные и минимальные значения энергии излучения в импульсе составляли соответственно 33 и 8 мДж при длительности импульса излучения $\tau \approx 60$ нс.

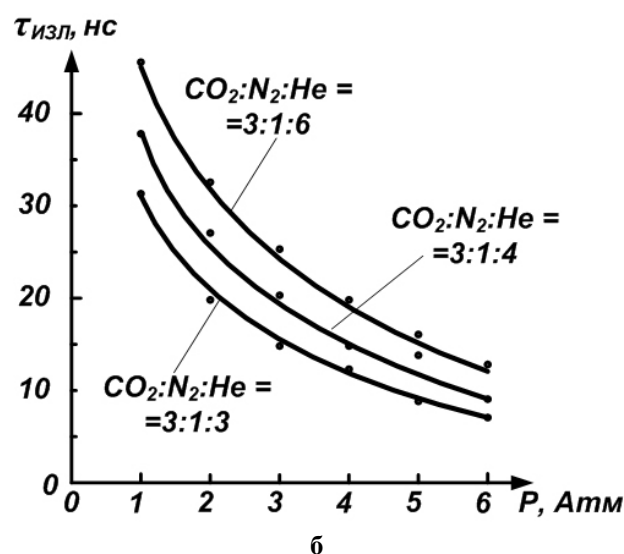
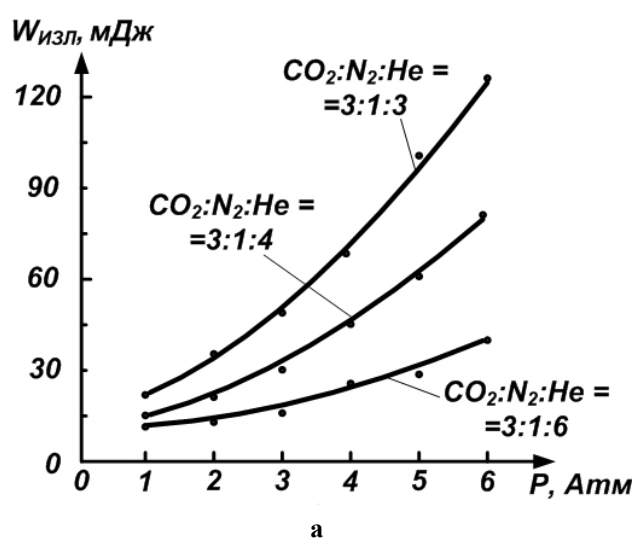


Рисунок 7 – Зависимости энергии (а) и длительностей (б) импульсов излучения от общего давления рабочей смеси для различных исходных составов $CO_2:N_2:He$. Длина резонатора $L = 25$ см

На рисунке 7 представлены зависимости энергии излучения и длительностей импульсов излучения от общего давления для различных составов рабочей смеси и активного элемента с длиной резонатора $L = 25$ см.

С увеличением общего давления энергия излучения увеличивается, а длительность сокращается с уровня $30 \div 45$ нс при давлении в одну атмосферу до $12 \div 7$ нс при 6 атмосферах. При давлении в 6 атмосфер максимальная энергия излучения в импульсе для рабочей смеси $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He}=3:1:3$ составляет 130 мДж, что в 3 раза больше, чем у рабочей смеси $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He}=3:1:6$. При использовании рабочих смесей с соотношением $\text{CO}_2/\text{N}_2 \geq 3$ импульс излучения имеет форму пика без характерного «хвоста».

На рисунке 8 представлены зависимости энергии излучения от соотношения CO_2/N_2 в рабочей смеси $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He}=X:Y:4$ для двух значений общего давления в 1 и 6 атмосфер.

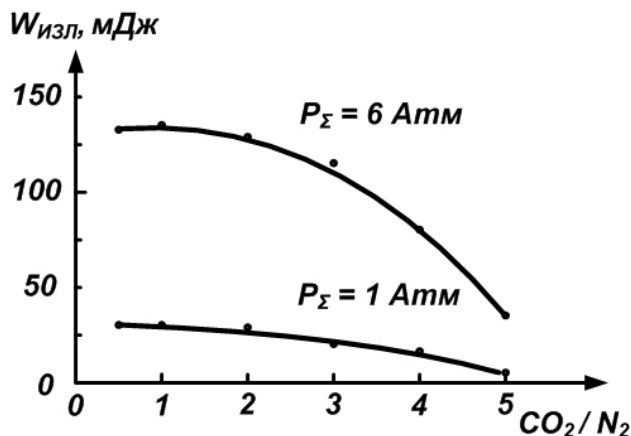
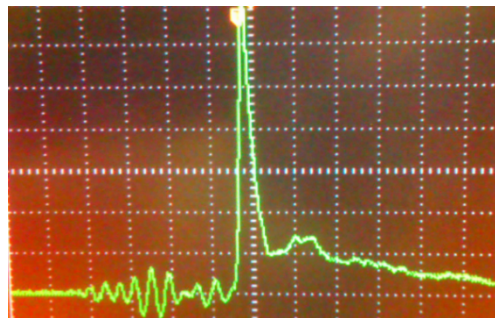


Рисунок 8 – Зависимости энергии излучения в импульсе от соотношения CO_2/N_2 в рабочей смеси $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He}=X:Y:4$ для двух значений общего давления

При общем давлении в 1 атмосферу энергия излучения в импульсе почти линейно уменьшается с увеличением отношения CO_2/N_2 . Максимальная энергия излучения составляет 30 мДж при использовании рабочей смеси $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He}=0,5:1:4$. При увеличении общего давления до 6 атмосфер при увеличении соотношения CO_2/N_2 в смеси $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He}$ энергия излучения в импульсе заметно уменьшается со значения 130 мДж до значения 40 мДж.

Типичная осциллограмма импульса излучения для рабочих смесей $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He}=1:1:4$ представлена на рисунке 9. Временной масштаб составляет 50 нс на клетку. Видно, что импульс излучения имеет сложную структуру. В начальный момент излучение высвечивается в форме «гигантского» импульса, после которого наблюдается достаточно продолжительный «хвост».

В смеси, в которых концентрация двуокиси углерода значительно преобладает над концентрацией молекулярного азота, например в смесях $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He}$ с $\text{CO}_2:\text{N}_2=3:1 \div 5:1$ импульсы лазерного излучения формируются в виде одного «гигантского» пика без характерного для ТЕА- CO_2 лазеров «хвоста».



**Рисунок 9 – Типичная форма импульса излучения для рабочей смеси $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He}=1:1:4$.
Общее давление – 1 атмосфера**

Обсуждение результатов

Проведенные расчеты энергии излучения в импульсе и его длительности по соотношениям (1, 2, 4), полученными для описания динамики излучения лазеров с модулированной добротностью, отражают общую тенденцию экспериментально установленных фактов увеличения энергии излучения в импульсе и сокращения длительности импульсов излучения при увеличении давления рабочей смеси в активном элементе малогабаритного ТЕА- CO_2 лазера. Энергия излучения в импульсе согласно расчетным данным при увеличении давления от 1 до 6 атмосфер (экспериментально освоенный диапазон рабочих давлений в ТЕА- CO_2 лазере) для одних и тех же условий возбуждения увеличивается в 6-8 раз. Экспериментальные данные дают для отношения значений энергии излучения в импульсе для давления рабочей смеси 6 атмосфер к энергии при одной атмосфере величину 3-5 (в зависимости от отношения CO_2/N_2 в рабочей смеси $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He}$).

Увеличение энергии излучения в импульсе с увеличением общего давления газовой смеси связано с тем, что пропорционально общему давлению увеличиваются парциальное давление и концентрация молекул двуокиси углерода в рабочей смеси. Для фиксированного значения эффективности накачки увеличение парциального давления двуокиси углерода означает увеличение числа возбужденных молекул и, как следствие, пропорциональное давлению увеличение энергии лазерного излучения в импульсе.

Снижение значения энергии излучения в импульсе при увеличении отношения CO_2/N_2 в сме-

си $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He}$ обусловлено снижением уровня возбуждения верхнего состояния молекулы двуокиси углерода в результате передачи возбуждения от молекулярного азота. Как следствие – снижение населенности верхнего лазерного состояния 00^0_1 молекулы CO_2 и снижение отношения максимального значения инверсной населенности к его пороговому значению.

Снижение плотностей энергии лазерного излучения в импульсе, как и их абсолютных значений при увеличении длины резонатора, так же как и при увеличении коэффициента отражения выходного зеркала оптического резонатора, обусловлено тем, что при увеличении длины резонатора и коэффициента отражения выходного зеркала уменьшаются пороговое значение инверсной населенности и время пребывания излучения в резонаторе [в соответствии с выражениями (2) и (4)].

Длительность импульса излучения с увеличением давления рабочей смеси ТЕА- CO_2 лазера, сокращением длины резонатора и снижением коэффициента отражения выходного зеркала до 50 % уменьшается в результате существенного превышения начального значения инверсной населенности над пороговым уровнем.

Заключение

В результате проведенных исследований временных характеристик малогабаритного ТЕА- CO_2 лазера получены следующие новые результаты:

1. Основными параметрами, оказывающими заметное влияние на величину энергии излучения в импульсе и длительность импульса излучения малогабаритного ТЕА- CO_2 лазера, являются давление рабочей смеси, ее исходный химический состав, длина резонатора и коэффициент пропускания выходного зеркала.

2. Длительность импульса лазерного излучения уменьшается с увеличением плотности энергии накачки лазера. Минимальные значения длительности импульсов лазерного излучения 50÷60 нс имеют место в ТЕА- CO_2 лазере с длиной резонатора $L = 46$ см и при использовании газовых смесей, в которых относительное содержание молекулярных компонентов имеет значения в пределах $[\text{CO}_2:\text{N}_2]/[\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He}] = 0,5 \div 0,8$, а плотность энергии накачки находится в пределах от 200 до 300 мДж/см³.

3. Для малогабаритного ТЕА- CO_2 лазера с зоной возбуждения объемного разряда $V_{AC} = 18 \times 0,8 \times 0,8$ см³ с длиной резонатора $L = 25$ см при использовании смесей $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He} = 3:1:3$ при атмосферном давлении длительности импульсов излучения составляют 30÷32 наносекунды. При

переходе к рабочим давлениям до 6 атмосфер длительности импульсов лазерного излучения уменьшаются до значений в 6-7 наносекунд.

4. Формирование лазерного излучения в форме одного только «гигантского» импульса обеспечивается активными средами на основе $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He}$, в которых соотношение двуокиси углерода и молекулярного азота находится в пределах от 3:1 до 5:1. Дальнейшее увеличение этого соотношения приводит к заметному снижению энергии излучения в импульсе.

5. Качественное совпадение основных параметров импульсов излучения, рассчитанных по кинетической модели лазера с модулированной добротностью, с параметрами малогабаритного ТЕА- CO_2 лазера при варьировании давления и длины резонатора указывает на возможность применения математического аппарата, развитого для лазеров с модулированной добротностью, для проведения достаточно корректных инженерных расчетов энергии излучения в импульсе и длительности импульса излучения при условии обеспечения многократного (более чем в 4 раза) превышения инверсной населенности над ее пороговым значением в течение времени, соизмеримого с временем формирования импульса лазерного излучения.

Библиографический список

1. Хомич В. Ю., Ямщиков В. А. Основы создания систем электроразрядного возбуждения мощных CO_2 -, N_2 - и F_2 -лазеров. М.: Физматлит, 2015. – 166 с.
2. Баранов Г. А., Астахов А. В., Зинченко А. К. и др. Технологический комплекс для лазерного разделения изотопов углерода // Российский химический журнал. 2001. Т. XLV. № 5-6. С. 56-68.
3. Баранов Г. А., Кучинский А. А. Мощные импульсные CO_2 -лазеры высокого давления и их применения. // Квантовая электроника, том 35, № 3 (2005). С. 219-229.
4. Зуев В. Е. Дистанционное оптическое зондирование атмосферы. – СПб.: Гидрометеиздат, 1992. – 232 с.
5. Козинцев В. И., Белов М. Л., Орлов В. М. Основы импульсной лазерной локации. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – 510 с.
6. Месяц Г. А., Тарасенко В. Ф. Мощные импульсные лазеры на плотных газах // Квантовая электроника, Т. 33. № 7 (2003). С. 568–580.
7. Kozlov B. A., Yastrebov A. B. $\text{CO}_2\text{-NH}_3$ complex for effective generation high-power IR-radiation in range 11-13 mkm. Proceedings of ICLO-2018. Published in: 2018 International Conference Laser Optics. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8435276>. 108 p.
8. Токарев В. И., Хомич В. Ю., Шмаков В. А., Ямщиков В. А. Формирование наноструктур при лазерном плавлении поверхности твердых тел // Доклады РАН. 2008. Т. 419. № 6. С. 754-758.

9. Витteman В. CO₂-лазер. – М.: Мир, 1990. – 360 с.
10. Звелто О. Принципы лазеров. – М.: Лань, 2008. – 720 с.
11. Gilbert J., Lachambre J. L., Rheault F., Fortin R. Dynamics of the CO₂ atmospheric pressure

laser with transverse pulse excitation. Canadian Journal of Physics, 1972, pp. 2523-2535.

12. Карнюшин В. Н., Солоухин Р. Н. Макроскопические и молекулярные процессы в газовых лазерах. – М.: Атомиздат, 1981. – 200 с.

UDC 621.378.324

INVESTIGATION OF SMALL-SIZED TEA-CO₂ LASER GENERATION CHARACTERISTICS

Do Quang Manh, post-graduate student, RSREU, Ryazan; quangmanhars@gmail.com

B. A. Kozlov, Dr. Sc. (Phys. and Math.), professor of Electronic Devices Dept., RSREU, Ryazan; kozlov.qe.ryazan@mail.ru

The study reports about investigation results, which are directed to the decrease of radiation pulse duration in small-sized sealed-off TEA-CO₂ lasers. Minimal duration of laser pulses about a few nanoseconds with energy per pulse 50-150 mJ was achieved by increase of working laser mixtures up to 6 atmospheric and decrease of laser resonator length up to 25 cm. The aim of this work is investigation of main conditions at which laser pulses have durations in nanosecond range.

Key words: TEA-CO₂ laser, optical resonator, volume discharge, laser energy per pulse, laser pulse duration.

DOI: 10.21667/1995-4565-2018-66-4-2-69-76

References

1. Khomich V. Yu., Yamshchikov V. A. Osnovy sozdaniya sistem elektrorazryadnogo возбуждения moshchnykh CO₂-, N₂- i F₂-лазеров. М.: Fizmatlit. 2015. 168 p. (in Russian).
2. Baranov G. A., Astakhov A. V., Zynchenko A. K. i dr. Tekhnologicheskyy kompleks dlia lazernogo razdeleniya izotopov ugleroda. Rossiyskiy khimicheskiy zhurnal. 2001. T. XLV, no. 5-6, pp. 89-95. (in Russian).
3. Baranov G. A., Kuchinsky A. A. Moshchnyye impul'snye CO₂-lazeryi vyisokovo davleniya i ikh primeneniya. Kvantovaya elektronika. 2005. Vol. 35, no. 3, pp. 219-229. (in Russian).
4. Zuev V. E. Distanzionnoye opticheskoye zondirovaniye atmosfery. SPb.: Gidrometeoizdat. 1992. 232 p.
5. Kozinzev V. I., Belov M. L., Orlov V. M. Osnovy impul'snoi lazernoi lokazii. М.: MGTU im. N.E. Bauman, 2006. 510 p. (in Russian).
6. Mesyaz G. A., Tarasenko V. F. Moshchnyye impul'snye lazery na plotnykh gazah. Kvantovaya elect-

ronika. 2003. Vol. 33, no. 7, pp. 568-580. (in Russian).

7. Kozlov B. A., Yastrebkov A. B. CO₂-NH₃ complex for effective generation high-power IR-radiation in range 11-13 mkm. Proceedings of ICLO-2018. Published in: 2018 International Conference Laser Optics. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8435276>. 108 p.

8. Tokarev V. I., Khomich V. Yu., Shmakov V. A., Yamshchikov V. A. Formirovaniye nanostruktur pri lazernom plavlenii poverkhnosti tverdykh tel. Dokladyi RAN. 2008. Vol. 419, no. 6, pp. 754-758. (in Russian).

9. Witteman W. CO₂-laser. 1990. Moscow. Mir, 360 p. (in Russian).

10. Zvelto O. Prinzipy lazerov. М.: Lan'. 2008. 720 p. (in Russian).

11. Gilbert J., Lachambre J. L., Rheault F., Fortin R. Dynamics of the CO₂ atmospheric pressure laser with transverse pulse excitation. Can. J. Phys., 1972, V. 50. Issue 20, pp. 2523-2535 (in Canada).

12. Karniushin V. N., Soloukhin R. I. Makroskopiicheskie i molekularnye prozessy v gasovykh laserah. М.: Atomizdat. 1981. 200 p.