

# Формирование коротких импульсов излучения ТЕА СО<sub>2</sub>-лазера при использовании газовой смеси СО<sub>2</sub>–N<sub>2</sub>–H<sub>2</sub>

М.В.Иващенко, А.И.Карапузиков, И.В.Шерстов

*Показано, что применение оптимизированной газовой смеси СО<sub>2</sub>–N<sub>2</sub>–H<sub>2</sub> с высокой концентрацией водорода (30–40 %) позволяет формировать мощные импульсы излучения ТЕА СО<sub>2</sub>-лазера длительностью ~ 200 нс по основанию, энергия и пиковая мощность которых существенно превышают параметры импульсов, получаемых в бинарных смесях СО<sub>2</sub>–H<sub>2</sub>. По совокупности параметров для генерации коротких мощных импульсов в рассмотренном ТЕА СО<sub>2</sub>-лазере оптимальной является безгелиевая газовая смесь 56 %СО<sub>2</sub>–14 %N<sub>2</sub>–30 %H<sub>2</sub> при давлении 0,7 атм. Установлено также, что малая добавка азота ([СО<sub>2</sub>]/[N<sub>2</sub>] ~ 10–12) к бинарной смеси СО<sub>2</sub>–H<sub>2</sub> способствует не только значительному увеличению энергии и пиковой мощности импульсов (в 3–3,5 раза), но и уменьшению их длительности на полувысоте при сохранении полной длительности (по основанию).*

**Ключевые слова:** ТЕА СО<sub>2</sub>-лазер, короткие импульсы, добавки водорода.

## 1. Введение

Вопросы формирования коротких мощных импульсов излучения ТЕА СО<sub>2</sub>-лазера без так называемого азотного хвоста представляют большой интерес для специалистов по лазерной фотохимии, лазерному разделению изотопов, дистанционному газоанализу, нелинейной оптике и нелинейной лазерной спектроскопии. Наиболее очевидный способ решения данной задачи заключается в обрезании нежелательного азотного «хвоста» типичного импульса ТЕА СО<sub>2</sub>-лазера с помощью специального оптического затвора. При видимой простоте этот метод требует использования сложных дорогостоящих оптических элементов, таких как электрооптический затвор [1] или плазменный обрезающий импульсов [2, 3], разрядник, включаемый лазерным излучением [3], устройства синхронизации и т. д. В работе [22] предложена схема СО<sub>2</sub>-лазера с самомодулирующей внутрирезонаторной потерей, позволяющая генерировать импульсы, свободные от типичного для СО<sub>2</sub>-лазера «хвоста» излучения.

Вместе с тем существует достаточно известный метод устранения «хвоста» импульсов излучения ТЕА СО<sub>2</sub>-лазера, основанный на использовании газовых смесей с уменьшенным содержанием азота или вообще без него [4]. В этом случае не требуются дополнительные оптические элементы, однако общая энергия импульсов заметно падает и становится актуальной задача подбора оптимального состава газовой смеси и режима возбуждения для достижения высоких энергетических параметров лазера. Исследование безазотных газовых смесей СО<sub>2</sub>–H<sub>2</sub> и СО<sub>2</sub>–He [5, 6] показало, что замена гелия водородом способствует увеличению энергии и пиковой мощности импульсов излучения при уменьшении их длительно-

сти. Добавки дейтерия также приводят к увеличению энергии импульсов ТЕА СО<sub>2</sub>-лазера [7, 8], что объясняется процессом дополнительной накачки дейтерием верхнего лазерного уровня. Однако из-за высокой стоимости дейтерия более привлекательны для практического применения газовые смеси с добавками H<sub>2</sub>.

Влияние водорода на параметры излучения ТЕА СО<sub>2</sub>-лазера исследовалось в ряде работ [9–11]. Показано, в частности, что малые добавки водорода в газовую смесь лазера приводят к заметному улучшению его параметров, повышению стабильности объемного разряда, увеличению усиления активной среды. Более высокие энергии [9–11] и пиковые мощности [9, 11] излучения могут быть получены при больших плотностях молекулярных газов и более высоком энергокладе. В то же время деградация рабочей смеси может быть значительно уменьшена [12–15], поскольку водород действует как газообразный катализатор [13].

Рост коэффициента усиления слабого сигнала в смесях, содержащих водород, связано с увеличением скорости релаксации нижнего лазерного уровня 01<sup>0</sup> молекулы СО<sub>2</sub>, которая для водорода в ~20 раз выше, чем для гелия [16]. Однако водород также приводит к дезактивации верхнего лазерного уровня 00<sup>0</sup>1 [16], что при высоких концентрациях H<sub>2</sub> снижает коэффициент усиления [8] и энергию лазерных импульсов [17]. В свете вышеизложенного определение оптимальной концентрации водорода в составе газовых смесей ТЕА СО<sub>2</sub>-лазера является актуальным для эффективной работы лазера. Цель настоящей работы заключается в исследовании влияния добавок водорода на формирование импульсов излучения и ресурс работы перестраиваемого ТЕА СО<sub>2</sub>-лазера.

## 2. Экспериментальная установка

В экспериментах использован перестраиваемый импульсно-периодический ТЕА СО<sub>2</sub>-лазер, подробно описанный в работах [18, 19]. Характерной особенностью лазера является совокупность интенсивной симметрич-

ной УФ преионизации активного объема, оптимальной задержки включения основного разряда ( $\sim 800$  нс) и биполярного малоиндуктивного генератора импульсного напряжения (ГИН), что дало возможность расширить диапазон рабочих давлений в смесях молекулярных газов [18]. Активная среда лазера возбуждалась импульсом тока высокого напряжения длительностью на полувысоте  $\sim 240$  нс. В разрядной ячейке лазера формировался однородный объемный разряд с размерами  $2 \times 3 \times 73$  см (0.44 л) в смеси молекулярных газов  $\text{CO}_2\text{-N}_2\text{-H}_2$  при давлении до 1 атм. Устойчивый селективный резонатор лазера длиной 1.3 м был образован отражательной дифракционной решеткой с периодом  $100 \text{ мм}^{-1}$ , работающей в автоколлимационном режиме, и полупрозрачным зеркалом (плоская пластина из ZnSe, пропускание  $\sim 75\%$ ). Для управления поперечной модовой структурой лазерного пучка внутрь резонатора лазера вводились диафрагмы диаметром от 8 до 30 мм.

Форма импульсов излучения лазера регистрировалась быстродействующим Ge-детектором на фотонном увлечении и записывалась цифровым запоминающим осциллографом типа С9-27. Энергия импульсов определялась с помощью измерителя средней мощности и энергии лазерного излучения типа ИМО-2Н.

Для каждого из выбранных значений давления и состава газовой смеси были произведены по 5 записей осциллограмм формы импульсов излучения ТЕА  $\text{CO}_2$ -лазера при одновременном измерении их энергии. По измеренным энергиям и записанным осциллограммам определялись средние значения и среднеквадратичные отклонения полной энергии импульсов  $E$ , пиковой мощности  $P$ , энергии  $E_1$ , содержащейся в первоначальном интервале шириной 100 нс (в лидирующем пике), относительного распределения энергии  $\xi = E_1/E$ , полной ширины импульсов по уровню 0.5 ( $\tau_1$ ), 0.1 ( $\tau_2$ ) и 0.01 ( $\tau_3$ ) от пиковой мощности излучения  $P$ , а также длительности импульсов  $\tau_4$  по содержанию 99 % полной энергии импульсов  $E$ .

Отметим, что используемая система временной регистрации формы импульсов излучения ТЕА  $\text{CO}_2$ -лазера не позволяла разрешать тонкую временную структуру, обусловленную самосинхронизацией мод, а давала сглаженную форму импульсов. В рамках настоящего рассмотрения влияния добавок водорода на энергетику лазерных импульсов и ресурс работы лазера такой подход, на наш взгляд, является правомерным, т. к. представляемые зависимости отражают интегральные характеристики лазерных импульсов и получены при усреднении по нескольким импульсам.

### 3. Влияние $\text{H}_2$ на параметры импульсов излучения лазера

Для формирования коротких импульсов излучения ТЕА  $\text{CO}_2$ -лазера и исследования влияния водорода на их энергетические и временные параметры была выбрана смесь молекулярных газов  $4\text{CO}_2\text{-N}_2$ , в которую добавлялся водород. Выбор данной смеси был сделан на основе предварительных экспериментов [18] и известных литературных данных [21]. На рис. 1 представлены осциллограммы одиночных импульсов излучения лазера, полученные в газовой смеси  $4\text{CO}_2\text{-N}_2\text{-H}_2$  при оптимальном давлении  $p = 0.7$  атм, которые иллюстрируют изменение формы импульсов излучения лазера при увели-

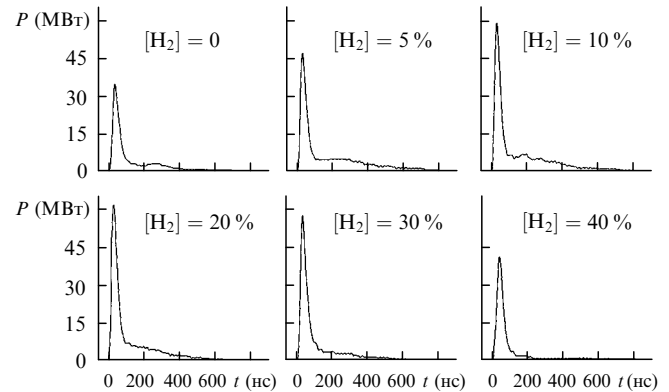


Рис.1. Осциллограммы формы импульсов излучения лазера при использовании газовой смеси  $4\text{CO}_2\text{-N}_2\text{-H}_2$  при различной концентрации водорода и общем давлении  $p = 0.7$  атм.

чению концентрации водорода. На рис. 2 представлены экспериментальные зависимости энергетических и временных параметров импульсов излучения лазера от концентрации водорода в составе упомянутой выше газовой смеси при давлении  $p = 0.7$  атм.

Как видно из рис. 1, 2, добавление водорода в смесь вплоть до концентрации 10 % приводило к увеличению энергии импульсов излучения лазера в 1.8 раза (с 2.4 до 4.3 Дж). При больших концентрациях водорода энергия импульсов уменьшалась. Подобный результат наблюдался в [17, 20], где оптимальная концентрация водорода составляла 3–5 %, а в работе [8] коэффициент усиления слабого сигнала увеличивался с повышением концентрации водорода до 10 %. Пиковая мощность излучения лазера в эксперименте также возрастала в 1.6 раза (с 35 до 56 МВт) при изменении концентрации водорода от нуля до 20 %, а затем уменьшалась. Энергия  $E_1$  менялась в зависимости от концентрации водорода подобно пиковой мощности, испытывая максимум при  $[\text{H}_2] = 20\%$ .

Параметр  $\xi$  показывает изменение распределения

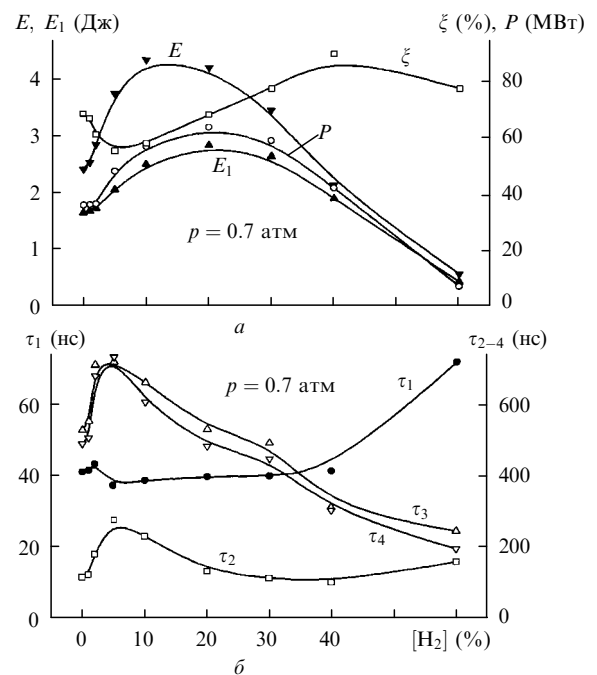


Рис.2. Экспериментальные зависимости энергетических (а) и временных (б) параметров импульсов излучения лазера от концентрации водорода в газовой смеси  $4\text{CO}_2\text{-N}_2\text{-H}_2$ .

энергии «пик/хвост» в зависимости от концентрации водорода. Из рис.1, 2,а видно, что увеличение энергии импульсов при добавках водорода 5–10 % сопровождалось повышением интенсивности азотного «хвоста» и увеличением его относительной доли в составе импульса. Однако дальнейшее повышение концентрации водорода вплоть до 40 % привело к заметному подавлению «хвоста» при незначительном падении пиковой мощности импульсов. Это связано с тем, что большие добавки водорода вызывают дезактивацию верхнего лазерного уровня. В данном случае описанный процесс способствует формированию мощных укороченных импульсов излучения ТЕА CO<sub>2</sub>-лазера.

Длительность импульсов на полувысоте  $\tau_1$  (рис.2,б) в широком диапазоне концентраций водорода оставалась неизменной (~40 нс). Полные длительности импульсов ( $\tau_3$  и  $\tau_4$ ) при изменении концентрации водорода от нуля до 5 % увеличивались и достигали максимума (~700 нс), после чего с ростом концентрации H<sub>2</sub> монотонно падали. Ход зависимостей  $\tau_3$  и  $\tau_4$  от концентрации водорода практически одинаков. Возрастание полной длительности импульсов при малых добавках водорода подтверждает появление азотного «хвоста». Ширина импульсов  $\tau_2$ , определенная по уровню 0.1 от пиковой мощности, также сначала увеличивалась и достигала максимума (~270 нс) при концентрации водорода 5 %, а затем уменьшалась до ~100 нс.

В эксперименте определено также влияние добавок водорода на ресурс работы описанного ТЕА CO<sub>2</sub>-лазера. Для всех рассмотренных выше газовых смесей 4CO<sub>2</sub>-N<sub>2</sub>-H<sub>2</sub> при оптимальном давлении  $p = 0.7$  атм и концентрации H<sub>2</sub> от нуля до 60 % исследована динамика изменения средней мощности излучения лазера во времени при работе в квазиотпаянном режиме на одной заправке с частотой повторения импульсов  $f = 0.5$  Гц. Максимальная средняя мощность наблюдалась при концентрации водорода 10 %, что согласуется с полученной ранее зависимостью энергии одиночных импульсов излучения (рис.2.а). На рис.3 приведены экспериментальные зависимости ресурса работы лазера от концентрации водорода при давлении  $p = 0.7$  атм и частоте следования импульсов  $f = 0.5$  Гц, определенные из осциллограмм средней мощности излучения лазера при разных падениях мощности. Видно, что при малых добавках водорода (5–10 %) ресурс работы лазера минимален.

Максимальный ресурс работы лазера достигнут при концентрации водорода 30 % (состав смеси 56 % CO<sub>2</sub>-

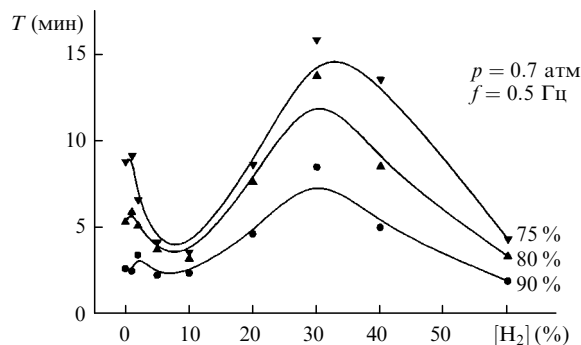


Рис.3. Экспериментальные зависимости ресурса работы лазера  $T$  от концентрации водорода в составе газовой смеси 4CO<sub>2</sub>-N<sub>2</sub>-H<sub>2</sub> в квазиотпаянном режиме, построенные при разных уровнях (75, 80 и 90 %) средней мощности относительно начальной мощности.

14 % N<sub>2</sub>-30 % H<sub>2</sub>). Отметим, что для этой смеси при оптимальном давлении  $p = 0.7$  атм получены импульсы излучения с полной энергией  $E \approx 3.5$  Дж, пиковой мощностью  $P = 58$  МВт, энергией  $E_1 = 2.6$  Дж и  $\xi \sim 80$  % (рис.2,а), что близко к наивысшим значениям этих параметров среди параметров исследованных смесей при ширине импульсов на полувысоте  $\tau_1 = 40$  нс и по уровню 0.1 от пиковой мощности  $\tau_2 = 109$  нс (рис.2,б).

#### 4. Влияние N<sub>2</sub> на параметры импульсов излучения лазера

Как известно, в ТЕА CO<sub>2</sub>-лазерах уменьшение относительного содержания азота в составе газовых смесей приводит к уменьшению общей энергии импульсов излучения и их длительности [21]; при увеличении содержания азота (до определенного предела) наблюдается обратный эффект, в основном за счет азотного «хвоста» импульсов.

На рис.4 представлены экспериментальные зависимости энергетических и временных параметров импульсов излучения лазера от отношения парциальных давлений  $[N_2]/[CO_2]$  в диапазоне от нуля до 0.25 для газовых смесей CO<sub>2</sub>-N<sub>2</sub>-H<sub>2</sub> при фиксированных концентрации водорода (30 %) и давлении смеси ( $p = 0.7$  атм). Как и ожидалось, с увеличением относительного содержания азота энергия и пиковая мощность импульсов излучения лазера возрастали, причем в рассмотренном диапазоне изменения отношения  $[N_2]/[CO_2]$  пиковая мощность не достигала максимума. В нашей ранней работе [19] максимум пиковой мощности в описанном лазере с неселективным

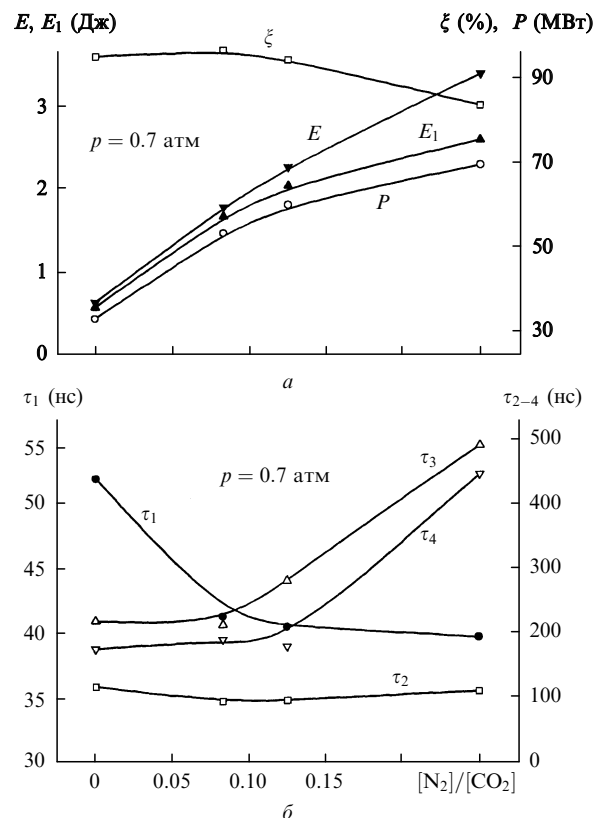


Рис.4. Экспериментальные зависимости энергетических (а) и временных (б) параметров импульсов излучения лазера при использовании газовой смеси CO<sub>2</sub>-N<sub>2</sub>-30 % H<sub>2</sub> от отношения парциальных давлений  $[N_2]/[CO_2]$ .

резонатором наблюдался в смеси состава  $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{H}_2 = 1:1:0.1$ .

Из рис.4 видно, что, начиная с  $[\text{N}_2]/[\text{CO}_2] = 0.125$ , полная энергия импульсов увеличивалась заметно быстрее, чем пиковая мощность и энергия  $E_1$ , а отношение  $\xi$  несколько уменьшалось, что свидетельствует о появлении слабовыраженного азотного «хвоста». Это подтверждается также увеличением полной длительности импульсов  $\tau_3$  и  $\tau_4$  с ростом  $[\text{N}_2]/[\text{CO}_2]$ . Ширина  $\tau_2$  в рассмотренном диапазоне изменения  $[\text{N}_2]/[\text{CO}_2]$  оставалась практически постоянной. Ширина импульсов на полувысоте  $\tau_1$  в отсутствие азота составляла  $\sim 52$  нс, а при добавлении азота в малых количествах резко уменьшалась до 40 нс (в  $\sim 1.3$  раза).

В работе [5] для формирования коротких импульсов излучения ТЕА  $\text{CO}_2$ -лазера без азотного «хвоста» оптимальной по энергии и пиковой мощности оказалась безазотная газовая смесь состава  $\text{CO}_2:\text{H}_2 = 2:1$ , что в нашем эксперименте близко к составу смеси  $\text{CO}_2:\text{H}_2 = 7:3$  при  $[\text{N}_2]/[\text{CO}_2] = 0$ . Из рис.4 видно, что при добавлении азота и возрастании отношения  $[\text{N}_2]/[\text{CO}_2]$  от нуля до 0.125 параметры  $\xi$ ,  $\tau_2$ ,  $\tau_3$ ,  $\tau_4$ , определяющие форму и длительность импульсов излучения, остаются практически постоянными, а длительность  $\tau_1$  уменьшается. Однако энергия и пиковая мощность импульсов даже при такой малой добавке азота возрастают в 3–3.5 раза. Таким образом, для формирования коротких импульсов излучения ТЕА  $\text{CO}_2$ -лазера при использовании газовых смесей  $\text{CO}_2-\text{H}_2$  малые добавки азота при отношении парциальных давлений  $[\text{CO}_2]/[\text{N}_2] \sim 10-12$  способствуют уменьшению длительности импульсов на полувысоте при значительном увеличении энергии и пиковой мощности импульсов без образования азотного «хвоста».

## 5. Влияние добавок Не на параметры импульсов излучения лазера

На фоне описанных выше результатов исследований при использовании газовых смесей, не содержащих гелий, вызывает интерес сравнение параметров импульсов излучения лазера при добавлении гелия в оптимизированную газовую смесь. На этой стадии исследований лазер излучал на линии  $9P(20)$  на ТЕМ<sub>00</sub>-режиме при диаметре внутрирезонаторных диафрагм 10 мм. Разрядная ячейка лазера была заполнена газовой смесью состава  $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{H}_2 = 56\%:14\%:30\%$  при давлении  $p_0 = 0.5$  или 0.7 атм, затем в нее порциями добавлялся гелий вплоть до общего давления  $p = 1.3$  атм.

На рис.5 представлены энергетические и временные зависимости параметров импульсов излучения лазера при добавке Не в вышеупомянутую четырехкомпонентную газовую смесь от общего давления смеси  $p$  при постоянном парциальном давлении безгелиевой смеси  $p_0 = 0.5$  атм. Увеличение давления газовой смеси при добавке гелия привело к уменьшению полной длительности импульсов  $\tau_3$  и  $\tau_4$  (на  $\sim 50\%$ ) и к некоторому увеличению  $\xi$ . Однако при этом длительность импульсов на полувысоте  $\tau_1$  возросла с 43 до 54 нс (на 25%). Одной из причин данного явления может быть уменьшение коэффициента усиления активной среды за счет уширения спектральной линии при повышении общего давления из-за добавления Не в оптимизированную по водороду лазерную смесь.

Подобная картина наблюдалась нами ранее в работе [19], когда импульсы излучения описанного лазера при

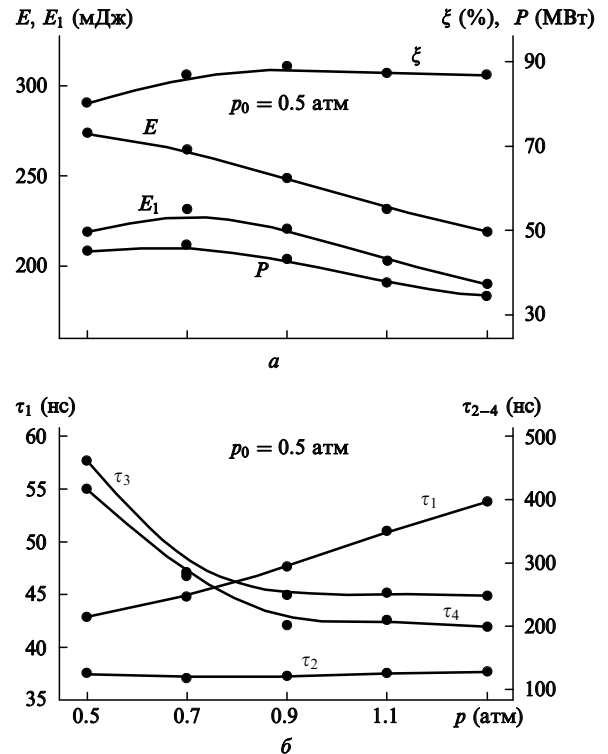


Рис.5. Экспериментальные зависимости энергетических (а) и временных (б) параметров импульсов излучения лазера при использовании четырехкомпонентной газовой смеси состава  $(\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{H}_2):\text{He} = (56:14:30):[\text{He}]$  от общего давления  $p$ .

использовании смеси состава  $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{H}_2 = 1:1:0.1$  имели не только заметно меньшую ширину на полувысоте, чем при использовании смеси состава  $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He} = 1:1:3$ , но и более высокие энергию и пиковую мощность. В работе [6] также наблюдалась заметная разница длительностей импульсов на полувысоте: около 50 нс для смеси  $\text{CO}_2-\text{H}_2$  и 75 нс для смеси  $\text{CO}_2-\text{He}$  (соотношение компонентов в [6] не указано). Все эти экспериментальные данные наряду с результатами наших последних измерений подтверждают тот факт, что в безгелиевых газовых смесях ТЕА  $\text{CO}_2$ -лазера с добавками водорода формируются импульсы излучения с меньшей шириной на полувысоте, чем в газовых смесях, содержащих гелий.

В целом повышение давления газовой смеси при добавлении гелия в исходную четырехкомпонентную смесь в нашем эксперименте привело к уменьшению энергии и пиковой мощности импульсов излучения (рис.5,а), хотя при общем давлении  $p = 0.7$  атм наблюдались максимальные  $P$  и  $E_1$ . Заметим, что при исходном парциальном давлении смеси  $p_0 = 0.7$  атм максимальные  $P$  и  $E_1$  наблюдались также при общем давлении  $p = 0.7$  атм (т. е. в смеси без примеси гелия), которое в описанном лазере для перечисленных смесей является оптимальным.

## 6. Заключение

На основании экспериментальных результатов, полученных в ходе настоящей работы, можно сделать следующие выводы. Добавление водорода в рабочую смесь молекулярных газов состава  $\text{CO}_2:\text{N}_2 = 4:1$  способствует значительному повышению энергии и пиковой мощности импульсов излучения ТЕА  $\text{CO}_2$ -лазера. Максимальные энергия импульсов излучения, пиковая мощность и ресурс работы лазера в квазиотпаянном режиме наблю-

дались при концентрации H<sub>2</sub> 10, 20 и 30 % соответственно, минимальная полная длительность импульсов и максимальное относительное содержание энергии в лидирующем пике – при концентрации H<sub>2</sub> 40 %. Применение газовых смесей CO<sub>2</sub>-N<sub>2</sub>-H<sub>2</sub> с высокой концентрацией водорода (30–40 %) приводит к заметному подавлению «хвоста» импульсов излучения.

Малые добавки азота к газовой смеси CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub> способствуют уменьшению ширины импульсов на полувысоте при значительном увеличении энергии и пиковой мощности импульсов без образования азотного «хвоста». При добавлении гелия в оптимизированную газовую смесь CO<sub>2</sub>-N<sub>2</sub>-H<sub>2</sub> наблюдается уменьшение энергии и пиковой мощности импульсов излучения лазера при увеличении их длительности на полувысоте.

По совокупности параметров для формирования в описанном ТЕА CO<sub>2</sub>-лазере укороченных лазерных импульсов с высокими энергией, пиковой мощностью и ресурсом работы оптимальной является безгелиевая газовая смесь состава CO<sub>2</sub>:N<sub>2</sub>:H<sub>2</sub> = 56:14:30 % при давлении  $p = 0.7$  атм.

Авторы выражают благодарность Ю.В. Афонину (ИЛФ СО РАН) за полезные замечания, сделанные в процессе обсуждения результатов и написания настоящей статьи. Работа выполнена при финансовой поддержке гранта SCOPES No.7SUPJ062201 (Швейцария).

1. Richardson M.C. *Optics Comms*, **10** 302 (1974).

2. Yablonovitch E., Goldhar J. *Appl.Phys.Letts*, **25**, 580 (1974).
3. Kalin A.W., Kesselring R., Cao Hongru, Kneubuhl F.K. *Infrared Phys.*, **33**, 73 (1992).
4. Neve de Mevergnies M. *Appl.Phys.Letts*, **34**, 853 (1979).
5. Trtica M., Vujkovic C.P., Mendas I. *Opt.Quantum Electron.*, **16**, 511 (1984).
6. Trtica M.S., Ribnikar S.V. *Infrared Phys.*, **29**, 351 (1989).
7. Альбрехт Х., Беспалов В.А., Платоненко В.Т. *Письма в ЖЭТФ*, **21**, 74 (1975).
8. Albrecht H. *Optics Comms*, **81**, 193 (1991).
9. Deutsch T.F. *Appl.Phys.Letts*, **20**, 315 (1972).
10. Menyuk N., Moulton P.F. *Rev.Sci.Instr.*, **51**, 216 (1980).
11. Dyer P.E., Tait B.L. *Appl.Phys.Letts*, **41**, 506 (1982).
12. Stark D.S., Cross P.H., Foster H. *IEEE J.Quantum Electron.*, **11**, 774 (1975).
13. Pace P, Lacombe M. *IEEE J.Quantum Electron.*, **14**, 263 (1978).
14. Tan K.O., James D.J., Nilson J.A., Burnett N.H., Alcock A.J. *Rev.Sci.Instr.*, **51**, 776 (1980).
15. Marchetti R., Penco E., Salvetti G. *IEEE J.Quantum Electron.*, **21**, 1766 (1985).
16. Moore C.B., Wood R.E., Hu B.-L., Yardley J.T. *J.Chem.Phys.*, **46**, 4222 (1967).
17. Bhadani P.K., Harrison R.G. *Rev.Sci. Instr.*, **65**, 563 (1994).
18. Иващенко М.В., Карапузиков А.И., Малов А.Н., Шерстов И.В. *ИТЭ*, № 1, 137 (2000).
19. Karapuzikov A.I., Malov A.N., Sherstov I.V. *Infrared Phys.Technol.*, **41**, 77 (2000).
20. Howells S., Cridland J.V., Derrick R.H. *J.Phys.*, **14**, 293 (1981).
21. Ohwadano Y., Sekiguchi T. *Jap.J.Appl.Phys.*, **19**, 1493 (1980).
22. Макаров К.Н., Рерих В.К., Сатов Ю.А., Степанов А.Е., Хоменко С.В. *Квантовая электроника*, **30**, 305 (2000).