

05 Импульсный индукционный CO₂-лазер с энергией излучения 1 J и высоким КПД с ВЧ возбуждением

© А.М. Ражев, Е.С. Каргапольцев[¶], И.А. Трунов

Институт лазерной физики Сибирского отделения РАН,
630090 Новосибирск, Россия
[¶] e-mail: djohn797@mail.ru

Поступила в редакцию 20.10.2021 г.

В окончательной редакции 26.11.2021 г.

Принята к публикации 26.11.2021 г.

Впервые разработан эффективный импульсный газоразрядный индукционный CO₂-лазер с энергией излучения 1.05 J. При этом длительность импульса лазерного излучения составила около 10 ns. Максимальный КПД 21.1% получен при энергии излучения 340 mJ. По проводнику индуктора распространялись импульсы высокочастотного тока, и, таким образом, формировался индукционный разряд для создания инверсной населенности на инфракрасных переходах CO₂*-молекул. Исследованы временные и энергетические характеристики излучения индукционного CO₂-лазера в зависимости от длительности импульса накачки. Проведены оценки пространственных характеристик и спектрального состава излучения разработанного лазера. Расходимость лазерного излучения составила 0.52 mrad. Размер поперечного сечения выходного пучка лазера (диаметр) — около 35 mm.

Ключевые слова: индукционный разряд в смеси газов, высокочастотная модуляция напряжения накачки, инверсия населенностей, выходные характеристики лазерного излучения.

DOI: 10.21883/OS.2022.03.52169.2836-21

Введение

Применительно к методу возбуждения газовых активных сред безэлектродным высокочастотным (ВЧ) разрядом посредством индукции магнитного поля следует упомянуть несколько первых работ. Так, в 1965 г. сообщалось о безэлектродном „торроидальном“ разряде в газовой среде при модулировании импульсов накачки ВЧ электрическим сигналом [1]. Таким образом, был предложен метод создания инверсии населенностей на электронных переходах ионов инертных газов в плазме электрического разряда и сообщалось о получении генерации лазерного излучения в видимом диапазоне оптического спектра. Автором был применен ферритовый сердечник и соленоид, по проводнику которого распространялись импульсы модулированного тока накачки. В продолжение исследования возможностей этого метода возбуждения в 1966 г. в работе [2] авторский коллектив сообщил уже о расширении списка активных лазерных сред и предложил модифицировать способ создания инверсии населенностей при накачке непрерывным безэлектродным ВЧ разрядом. В этой работе авторы применили соленоид, непосредственно расположенный на капилляре разрядной трубки. В 1973 г. авторы работы [3] вернулись к теме исследований авторов работы [2], расширив как список газовых активных сред, так и диапазон длин волн генерации при использовании импульсного режима ВЧ накачки. Упомянутые работы (помимо метода возбуждения) объединяли условия создания индуктивно-связанной плазмы при низких давлениях (до единиц Торр).

Применительно к методу возбуждения газовых активных сред низких и средних давлений импульсным безэлектродным индукционным разрядом упомянем несколько работ, опубликованных в период с 2005 по 2014 гг. [4–12]. В таблице приведены основные экспериментальные данные по всем (с 2005 по 2021 гг.) разработанным на момент написания настоящей работы импульсным индукционным лазерам (кроме активной среды индукционного CO₂-лазера, о разработке которого будет рассказано ниже). В работе [4] впервые для создания инверсной населенности на переходах атомов и молекул было предложено и реализовано в эксперименте применение импульсного индукционного разряда, формируемого импульсными электрическими высоковольтными схемами возбуждения. Для апробации предложенного метода в качестве первой активной среды была использована газовая смесь He:F₂, в которой индукционный разряд формировался в диапазоне давлений от единиц до сотен Торр. В результате проведенных исследований [4] впервые был создан импульсный индукционный лазер видимого диапазона на электронных переходах атомов фтора.

Для апробации индукционного разряда (как метода накачки газовой активной среды на электронно-колебательных самоограниченных переходах) были проведены эксперименты, результаты которых опубликованы в работе [5].

Для расширения возможности получения генерации на переходах других типов с использованием нового метода накачки были проведены исследования по поиску способа создания инверсии населенностей в га-

Импульсные индукционные лазеры

Лазер	Состав газовой активной среды	Давление газовой смеси p , Torr	Длина волны излучения λ , μm	Энергия излучения E , mJ	Длительность импульса излучения t (FWHM), ns	Импульсная мощность излучения P , kW	Расходимость лазерного излучения θ , mrad	Форма выходного пучка	Ссылка
N ₂	N ₂	7	0.3371 0.3577	11	10	1000	0.3	Кольцо ~ Ø 40 mm	[5,15]
HF	He:H ₂ :NF ₃ = 45:1:4	40	2.732 2.763 2.798 2.835 2.873 2.893	19	420	45	He измерялась	Кольцо ~ Ø 20 mm	[16] [17]
	H ₂ :NF ₃ =1:4		2.913						
H ₂	H ₂	0.5–3	0.835 0.887 0.89 1.116 1.122	0.12	18	7	1.2	Кольцо ~ Ø 33 mm	[18] [12]
F I	He:F ₂ =80:1	40–50	0.624 0.635 0.641 0.704 0.713 0.731 0.740 0.756	2.6	80	32	0.4	Кольцо ~ Ø 42 mm	[4,7]
Ar I	He:Ar=3:1	1.5	1.213 1.240 1.270 1.694	0.1	5	20	He измерялась	Круг ~ Ø 7 mm	[19]
	He:Ar=7:1	2.5	1.791						
Xe I	Ar:Xe=1:1	1	0.8409 0.9045 0.9799 1.733 2.026	0.1	8	12.5	1	Кольцо ~ Ø 20 mm	[20]
	He:Xe=1:1								
Ne I	Ne:NF ₃ = 500:1	0.5	0.540 0.594 0.614	0.05	15	3.3	He измерялась	Кольцо ~ Ø 42 mm	[21]
	Ne:NF ₃ = 150:1								
	Ne:NF ₃ = 250:1								
	Ne:SF ₆ = 800:1	15	5	10					
Ne	Ne:H ₂ =1:1	19	0.5853	0.02	180	0.1	2	Кольцо ~ Ø 42 mm	[22]

зовых активных средах на колебательно-вращательных переходах. Первый результат этой работы — создание индукционного CO₂-лазера — был доложен в 2006 г., а затем опубликован в 2007 г. в работе [6]. В работах [7–10] тема индукционного CO₂-лазера получила продолжение.

Следует упомянуть, что в принципе первые публикации результатов создания CO₂-лазера как нового ОКГ датированы 1964 г. [13], а результаты исследований, связанных в том числе с объяснением роли азота в активной среде CO₂-лазера (признаны и по сей день достоверными), принадлежат авторам работы 1966 г. [14].

При анализе результатов, опубликованных в работах [6–10], становится очевидным, что выходная энергия индукционного CO_2 -лазера пропорциональна диаметру разрядной трубки (РТ), т.е. выходная энергия и КПД лазера увеличиваются с увеличением диаметра РТ (от 20 до 42 mm). В результате проведения упомянутых выше исследований была выявлена необходимость увеличения эффективности созданного индукционного CO_2 -лазера и необходимость продолжить оптимизацию параметров возбуждения и состава активной среды. Это и было основной целью данного цикла исследований [6–10].

Таким образом, выявлена возможность использования импульсного режима зажигания и поддержания индукционного разряда модулированным высокой частотой напряжением — ВЧ накачки. В работе [10] приведены результаты, свидетельствующие, что при использовании импульсных высоковольтных схем возбуждения происходит преимущественное возбуждение электронных состояний N_2 (на эти процессы расходуется основная энергия индукционного разряда). Тогда как ВЧ системы возбуждения позволяют получать преимущественно низкоэнергетичные электроны. Это обстоятельство, в свою очередь, позволяет избежать потери энергии накачки на возбуждение электронных уровней N_2 , но при этом возбуждать его колебательные уровни и эффективно (резонансно) передавать возбуждение молекулам CO_2 . В попытке оптимизации параметров возбуждения активной среды индукционного CO_2 -лазера в эксперименте были получены результаты, которые опубликованы в [11,12]. В итоге, несмотря на ограничения при зажигании индукционного разряда в РТ с внутренним диаметром, большим чем 20 mm, была продемонстрирована возможность работы индукционного CO_2 -лазера с относительно высоким КПД (около 17%) и впервые с распределением энергии по кругу, а не с кольцевой формой выходного пучка. Вследствие того, что вкладываемая энергия была ограничена 100 mJ, выходная энергия составила величину, не превышающую 20 mJ.

В связи с изложенным целью настоящей работы является разработка электрической схемы возбуждения на основе коммерческого ВЧ источника питания с устройством согласования, обеспечивающим оптимальные параметры возбуждения активной среды на колебательно-вращательных переходах, и создание эффективного импульсного индукционного CO_2 -лазера.

Экспериментальная установка и аппаратура регистрации/измерения характеристик

Разработана экспериментальная установка (рис. 1) с ВЧ источником питания фирмы „AdvancedEnergy“ мод. „CESAR®RF“ ($f_{\text{mod}} = 27.12 \text{ MHz}$, 1000 W) („RF“) и устройством согласования „VarioMatch“ („MN“).

В качестве газонаполненной РТ использовалась керамическая трубка длиной 1600 mm с внутренним диа-

метром около 42 mm. Материал РТ выбран вследствие необходимости обеспечения хорошего охлаждения рабочей смеси за счет диффузии тепла на стенку РТ. Индуктор представлял собой соленоид, состоящий из отдельных, бифилярно ориентированных на РТ секций, включенных параллельно. В качестве секций индуктора использовался набор изолированных отрезков многожильного провода (256 медных жил) определенной длины, оптимизируемый в ходе работы. Секции индуктора размещались в виде последовательно расположенных витков на внешней поверхности РТ. Для обеспечения работы индукционного CO_2 -лазера в режиме с частотой повторения импульсов более 5 Hz вдоль его оптической оси осуществлялась прокачка рабочей смеси. Расход рабочей газовой смеси при этом не превышал $\sim 91/\text{h}$.

По торцам РТ перпендикулярно оптической оси в юстировочных узлах располагались плоские зеркала для герметизации и обеспечения положительной обратной связи. В работе использовался плоскопараллельный резонатор, который был образован задним плоским зеркалом из кремния с коэффициентом отражения 99% (компания „OphirOpticsGroup“) и двумя передними „полупрозрачными“ зеркалами из ZnSe („OphirOpticsGroup“) с коэффициентами отражения (R) 30 и 48% на рабочей длине волны 10.6 μm .

Для проведения исследований энергетических характеристик индукционного CO_2 -лазера использовался измеритель мощности и энергии излучения „OphirStarBright“ с измерительной головкой PE50 B-DIF-C фирмы „OphirPhotonics“.

Для определения длительности импульсов лазерного излучения и формы осциллограмм использовалось охлаждаемое жидким азотом фотосопротивление (германий,

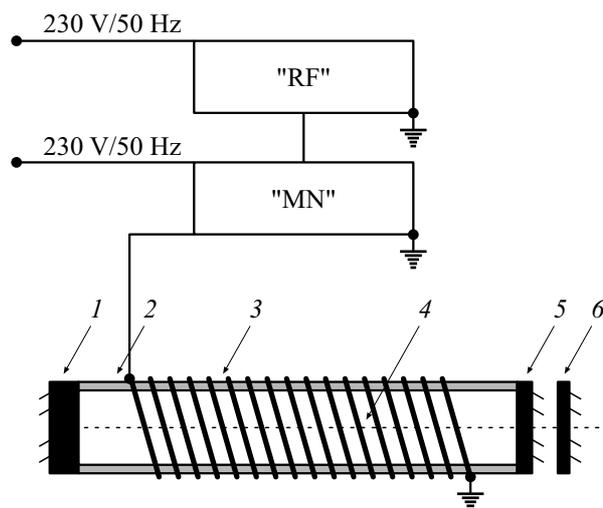


Рис. 1. Электрическая блок-схема системы возбуждения и разрядная трубка индукционного CO_2 -лазера. 1 — „плотное“ зеркало из кремния; 2 — разрядная трубка; 3 — условное изображение индуктора лазера (соленоид); 4 — активный объем; 5 — зеркало (ZnSe), $R \sim 30\%$; 6 — выходное зеркало (ZnSe), $R \sim 48\%$.

легированный золотом) и совместно с ним запоминающий цифровой осциллограф Tektronix (TDS 2014B). Для верификации этих результатов был применен неохлаждаемый ИК детектор импульсных оптических сигналов „VIGO“ (HgCdTe) с постоянной времени до 5 ns и спектральной чувствительностью в диапазоне от 2 до 14 μm .

Для оценки длительности и формы осциллограмм импульсов накачки, формируемых ВЧ источником питания, применялся высоковольтный щуп „Tektronix“ мод. P6015A и упомянутый цифровой осциллограф.

Определение спектра лазерного излучения проводилось с помощью монохроматора МДР-23 (с дифракционной решеткой 75 l/mm) и измерительной головки PE50 B-DIF-C „OphirPhotonics“ (в качестве фотодетектора).

Оценка пространственных характеристик излучения индукционного CO₂-лазера проводилась с помощью термобумаги и тепловизора „НТГ“ мод. НТ-301, ИК матрица которого имела разрешение 384 \times 288 pix. Спектральный диапазон работы тепловизора 8–14 μm .

Газовая система позволяла готовить многокомпонентные газовые смеси, обеспечивать вакуумирование РТ и газового тракта, обеспечивать регулируемый поток рабочей смеси для поддержания рабочего давления при продолжающейся продольной прокачке рабочей смеси вдоль оптической оси РТ.

Результаты и обсуждение

Исходя из сказанного выше (во введении) следует, что с увеличением активной длины и внутреннего диаметра РТ представляется возможным получить высокие значения выходной энергии индукционного CO₂-лазера. Таким образом, для достижения поставленной цели работы предстояло провести научно-исследовательскую работу по оптимизации конструктивного исполнения индуктора лазера (соленоида), расположенного на РТ с внутренним диаметром 42 mm и длиной 1600 mm при накачке рабочих смесей He:N₂:CO₂ импульсами тока ВЧ источника питания „CESAR@RF“.

В результате проведенной оптимизации индуктор представлял набор секций с 14 витками в каждой, обеспечивающий зажигание индукционного разряда с активной длиной 1150 mm при давлениях рабочей смеси до 50 mbar.

В результате оптимизации состава рабочей смеси (по параметру максимальной энергии в импульсе лазерного излучения индукционного CO₂-лазера, работающего в импульсном режиме с частотой следования импульсов возбуждения до 10 Hz) была выбрана газовая смесь He:N₂:CO₂ = 8 : 2 : 1 при давлении \sim 10 mbar.

При исследовании временных характеристик разработанного лазера на входы осциллографа подавались сигналы (рис. 2): импульс напряжения накачки (после ослабления высоковольтным щупом в 1000 раз) и импульс напряжения (при работе лазера с ненулевой

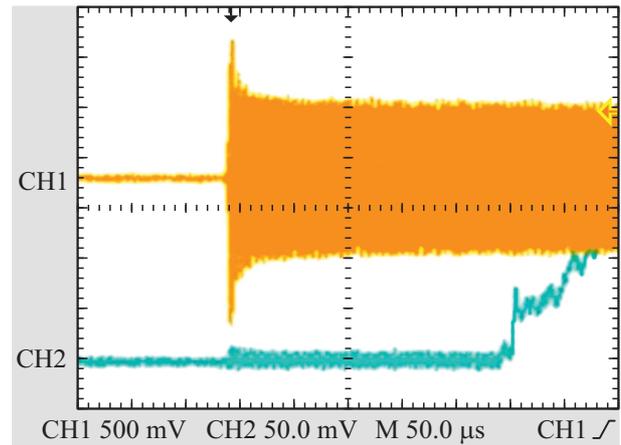


Рис. 2. Начальные участки осциллограмм импульса напряжения высокочастотного источника питания (модулированный высокой частотой электрический сигнал на входе первого канала осциллографа — „CH1“) и оптического импульса инфракрасного лазерного излучения (электрический сигнал на входе второго канала осциллографа — „CH2“). Временная развертка осциллографа соответствует 50 $\mu\text{s}/\text{cell}$.

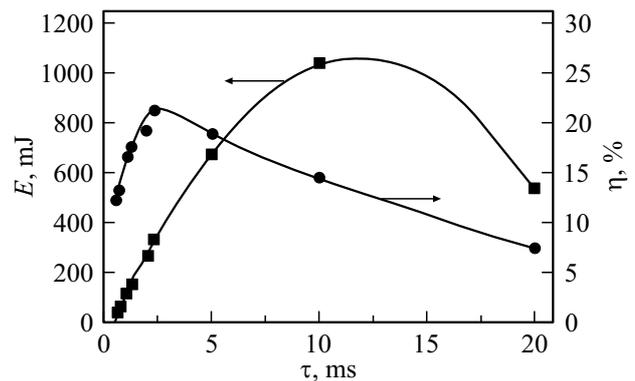


Рис. 3. Зависимость энергии (E) в импульсе излучения индукционного CO₂-лазера и его КПД (η) от длительности импульса накачки (τ).

энергией излучения), формируемый на фотосопротивлении, охлаждаемом жидким азотом (канал 2). Импульс напряжения ВЧ накачки представляет собой синусоиду ($f_{\text{mod}} = 27.12 \text{ MHz}$) определенной длительности (τ) с периодом колебаний модулирующего сигнала $\sim 38 \text{ ns}$. Значение τ задается аппаратно вручную и может принимать конкретные значения, определяемые сочетанием двух параметров: частоты повторения импульсов напряжения (f , в Hz) и их скважности (S , в %). Амплитуда напряжения ВЧ накачки (размах синусоидальных колебаний) зависит от того, развился индукционный разряд или нет. При развитии индукционного разряда наблюдается наличие „переходного процесса“, который длится $\sim 20 \mu\text{s}$ от начала формирования импульса напряжения ВЧ накачки. Амплитуда напряжения ВЧ накачки

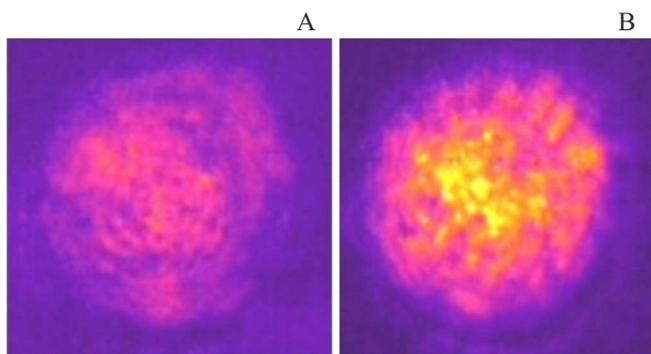


Рис. 4. Тепловизионное изображение лазерного пучка при $\tau = 10$ ms, полученное на поверхности мишени из полиметилметакрилата, после поглощения одного импульса лазерного излучения (А) и после серии импульсов ($f = 1$ Hz) лазерного излучения (В).

при этом уменьшается от ~ 2.6 kV до „стационарной“ величины ~ 1.5 kV.

На рис. 3 представлены полученные зависимости выходной энергии излучения (E) и КПД (η , по запасенной энергии) разработанного CO_2 -лазера от длительности импульса напряжения накачки (τ) при максимальной выходной мощности ВЧ источника (в эксперименте ~ 720 W при отраженной от индуктора мощности около 10 W).

С точки зрения дальнейшего практического применения разработанного лазера важным экспериментальным результатом является преодоление условного значения выходной энергии 1 J и реализация эффективности лазера с η выше 20%.

Таким образом, в импульсном режиме работы при $\tau = 10$ ms энергия достигла значения 1.05 J, что соответствует значению $\eta \sim 14.5\%$. При этом оценка величины удельного энергоємса дает значение ~ 0.85 J/l. В свою очередь в режиме работы с $\tau = 2.25$ ms достигается значение $\eta \sim 21.1\%$ при энергии в импульсе ~ 340 mJ.

Важным выводом является то, что при аппаратном уменьшении выходной мощности ВЧ источника питания от значений 720 W ($E \sim 1050$ mJ) и ниже (при постоянной $\tau = 10$ ms) энергия излучения индукционного CO_2 -лазера также практически линейно снижалась до $E \sim 250$ mJ (это значение E обеспечивается выходной мощностью ВЧ источника питания на уровне 300 W). Дальнейшее снижение мощности накачки сопровождается более резким уменьшением E вплоть до срыва генерации при значениях выходной мощности ВЧ источника питания ниже 250 W ($E \sim 150$ mJ). Снижение мощности накачки сопровождалось оптимизацией (уменьшением) давления рабочей смеси в РТ.

С применением тепловизора „НТИ“ и получением тепловизионного изображения была проведена оценка распределения энергии выходного пучка лазера в перпендикулярном направлении при поглощении ИК излучения материалом мишени. Мишень располагалась

на расстоянии 3.5 m от выходного зеркала CO_2 -лазера. Использовались три материала мишени: полиэтилентерефталат (пленка толщиной 0.1 mm), полиметилметакрилат (пластина толщиной 2 mm), древесноволокнистая плита. Наиболее информативными (с точки зрения отсутствия „пересветки“ изображения) из трех являются изображения, наблюдаемые на мишенях из полиэтилентерефталата и полиметилметакрилата. Тепловизор располагался под углом около 30° к направлению распространения лазерного излучения, слева на расстоянии 600 mm от поверхности мишени. На рис. 4 представлены зарегистрированные тепловизором изображения на мишени из полиметилметакрилата.

Полученные изображения отображают температуру участков облученной мишени в зависимости от цвета. Таким образом, можно наблюдать тенденцию постепенного повышения температуры поверхности мишени от периферии пучка к центру.

Следовательно, при оценке размеров основная энергия лазерного излучения сосредоточена в выходном пучке диаметром ~ 35 mm. Этому исследованию предшествовал анализ воздействия излучения лазера на термочувствительную поверхность термобумаги для оценки угла расходимости пучка лазерного излучения исследуемого лазера. Проводилась оценка диаметра границ термоотпечатков на расстоянии 0.5 и 3.5 m от выходного зеркала резонатора лазера. Параметры ВЧ накачки (длительность импульса ВЧ накачки τ) выбирались таким образом, чтобы термобумага отображала границу воздействия лазерного пучка при поглощении около тридцати импульсов лазерного излучения. Таким образом, основная энергия импульсов лазерного излучения, следующих друг за другом с $f = 1$ Hz, ограничена кругом, диаметр которого зависел от расстояния регистрации и составил 37.6 mm (на расстоянии 0.5 m) и 40.8 mm (на расстоянии 3.5 m).

Для оценки временных характеристик излучения индукционного CO_2 -лазера при различных значениях τ проведено исследование в эксперименте. На рис. 5 представлены типичные осциллограммы напряжения импульса накачки и оптического импульса излучения разработанного лазера.

Следовательно, поведение во времени оптического импульса излучения исследуемого лазера (при использовании ВЧ накачки активной среды) соответствует импульсу накачки и характеризуется относительно быстрым падением интенсивности излучения лазера при окончании импульса накачки. Задержка между моментом подачи ВЧ напряжения на индуктор и моментом начала формирования оптического импульса излучения индукционного CO_2 -лазера составляет ~ 380 μs .

Анализируя осциллограмму напряжения импульса излучения индукционного CO_2 -лазера (рис. 5), следует отметить наличие „пика“ незначительной амплитуды, который, по нашему мнению, свидетельствует о наличии излучения электронно-возбужденных CO_2^* -молекул на

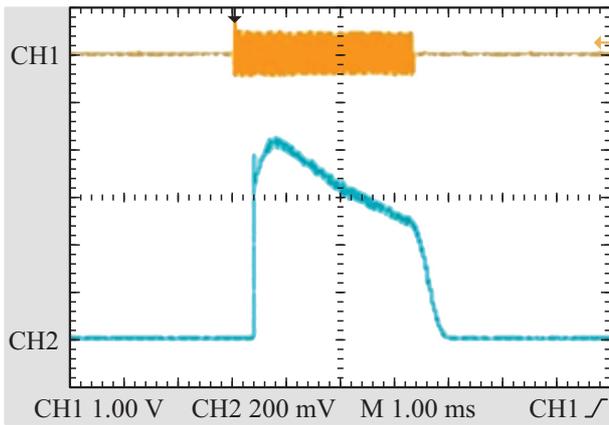


Рис. 5. Осциллограммы напряжения импульса накачки (модулированный высокой частотой электрический сигнал на входе первого канала осциллографа — „CH1“ — длительностью 3.36 ms) и импульса излучения (электрический сигнал на входе второго канала осциллографа — „CH2“) CO₂-лазера (длительность оптического импульса $t_{\text{puls}} \sim 3.0$ ms, „Full Width at Half Maximum“ — „FWHM“) при возбуждении рабочей газовой смеси состава He:N₂:CO₂ = 8 : 2 : 1 (давление рабочей смеси $p \sim 10$ mbar). Временная развертка осциллографа соответствует 1.0 ms/cell.

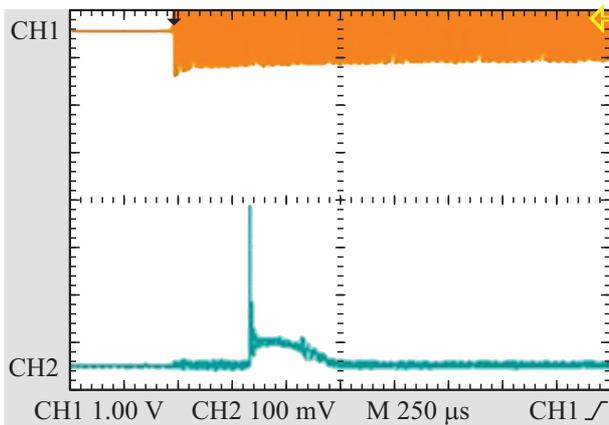


Рис. 6. Осциллограммы напряжения импульса накачки (модулированный высокой частотой электрический сигнал на входе первого канала осциллографа — „CH1“ — длительностью $\tau = 2.5$ ms. На рисунке представлено только начало импульса накачки) и импульса излучения (электрический сигнал на входе второго канала осциллографа — „CH2“) CO₂-лазера (длительность оптического импульса $t_{\text{puls}} \sim 0.28$ ms („Full Width at Half Maximum“ — „FWHM“) в среде чистого CO₂. Временная развертка осциллографа соответствует 250 $\mu\text{sec}/\text{cell}$.

фронте нарастания интенсивности оптического импульса излучения CO₂-лазера.

Для подтверждения этого вывода была исследована осциллограмма напряжения импульса излучения индукционного CO₂-лазера в рабочей смеси, представленной чистым CO₂ (рис. 6). При той же задержке между моментом подачи ВЧ напряжения на индуктор и момен-

том начала формирования оптического импульса лазера амплитуда „пика“ с чистым CO₂ гораздо выше в сравнении с амплитудой основного оптического импульса. К тому же наблюдается существенное отличие по параметру длительности оптического импульса индукционного CO₂-лазера ($t_{\text{puls}} \sim 0.28$ ms (FWHM)), которая была значительно меньше τ . Энергия излучения составила в этом случае 15 mJ.

Для оценки спектра спонтанного излучения индукционного CO₂-лазера в спектральном диапазоне от 200 nm до 1 μm оптические элементы резонатора были заменены на плоскопараллельные пластины из CaF₂, и установлено заднее „плотное“ широкополосное плоское зеркало с напылением алюминия. Замена ZnSe на CaF₂ проведена с целью получения информации о наличии УФ спонтанного излучения N₂ (присутствующего в составе активной среды CO₂-лазера) при возбуждении электронами плазмы. В работе [8] упоминалось, что при возбуждении цилиндрическим индукционным разрядом трехкомпонентной активной среды CO₂-лазера (при использовании импульсной высоковольтной схемы возбуждения) в спонтанном спектре присутствует излучение молекулярного азота в диапазоне от 300 до 400 nm.

Существенным отличием результатов настоящей работы является отсутствие излучения в упомянутом диапазоне, что свидетельствует об отсутствии нежелательных потерь энергии индукционного разряда на возбуждение электронно-колебательных переходов N₂.

Заключение

В результате проведенных исследований впервые создан импульсный индукционный CO₂-лазер с энергией излучения выше 1 J. Результат достигнут посредством импульсно-периодической накачки рабочей газовой смеси состава He:N₂:CO₂ = 8 : 2 : 1 ($p \sim 10$ mbar) в РТ ($\varnothing \sim 42$ mm) при использовании ВЧ источника питания ($f_{\text{mod}} = 27.12$ MHz) с выходной мощностью до 1000 W. Активная длина разряда при этом была равна 1150 mm.

Импульсно-периодический режим работы ВЧ источника питания позволяет регулировать длительность оптического импульса (от долей до десятков ms), что помимо возможности плавной регулировки выходной энергии излучения (от 50 до 1050 mJ) позволяет осуществлять различные режимы работы индукционного CO₂-лазера, расширяя возможности и сферы применения CO₂-лазерной установки.

В настоящей работе впервые продемонстрирована возможность работы индукционного CO₂-лазера со значением КПД более 21%.

Разработанный лазер работает в режиме свободной генерации, спектр излучения которого исследован в спектральном диапазоне от 6 до 16 μm и по результату оценки спектрального состава сосредоточен в диапазоне от 9.8 до 10.6 μm .

Проведена оценка распределения энергии лазерного излучения выходного пучка исследуемого лазера в поперечном сечении, демонстрирующая постепенное увеличение энергии от периферии к оси лазера. Полный угол расходимости лазерного пучка при этом составил 0.52 mrad.

С использованием магнитной индукции подводимая к индуктору лазера мощность ВЧ источника питания передавалась в смесь газов для зажигания и поддержания индукционного разряда. В результате возникновения движения зарядов в переменном магнитном поле индуцировались циркулярные электрические токи, которые способствовали формированию инверсии населенностей колебательно-вращательных уровней молекул CO_2^* .

Таким образом, задача создания индукционно-связанной плазмы с электронными параметрами, эффективно обеспечивающими механизм образования инверсии в активной среде индукционного CO_2 -лазера, была решена.

Благодарности

Авторский коллектив выражает благодарность сотруднику лаборатории „Квантовых оптических технологий“ Междисциплинарного квантового Центра Новосибирского государственного университета, к.ф.-м.н. И.В. Шерстову за предоставление ИК детектора импульсных оптических сигналов „VIGO“ и охлаждаемого фотосопротивления. Также авторский коллектив выражает благодарность сотруднику лаборатории „Импульсных газоразрядных лазеров“ ИЛФ СО РАН, к.ф.-м.н. Д.С. Чуркину за предоставление разрядной трубки и юстировочных узлов, при использовании которых был разработан обсуждаемый в настоящей работе импульсный индукционный CO_2 -лазер.

Финансирование работы

Результаты исследований, публикуемые в настоящей работе, получены в рамках государственного задания № 121033100059-5.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] W.E. Bell. Applied Physics Letters, **7**(7), 190 (1965). DOI: 10.1063/1.1754372.
- [2] J.P. Goldsborough, E.B. Hodges, W.E. Bell. Appl. Phys. Lett., **8**(6), 137 (1966). DOI: 10.1063/1.1754523.
- [3] О.С. Акиртава, А.М. Богус, В.Л. Джикия, Ю.М. Олейник. Квант. электрон., **6**(18), 111 (1973) [O.S. Akirtava, A.M. Bogus, V.L. Dzhikiya, Yu.M. Oleinik. Soviet J. Quantum Electron., **3**(6), 519 (1974). DOI: 10.1070/QE1974v003n06ABEH005653].
- [4] А.М. Ражев, В.М. Мхитарян, Д.С. Чуркин. Письма в ЖЭТФ, **82**(5), 290 (2005) [A.M. Razhev, V.M. Mkhitarian, D.S. Churkin. J. Exper. Theor. Phys. Lett., **82**, 259(2005). DOI: 10.1134/1.2130908].
- [5] А.М. Ражев, Д.С. Чуркин. Письма в ЖЭТФ, **86**(6), 479 (2007) [A.M. Razhev, D.S. Churkin. J. Exper. Theor. Phys. Lett., **86**, 420 (2007). DOI: 10.1134/S0021364007180154].
- [6] А.М. Ражев, Д.С. Чуркин, А.А. Zhupikov. Proc. SPIE, **6346**, 634603-1 (2007). DOI: 10.1117/12.738795
- [7] А.М. Ражев, А.А. Zhupikov, D.S. Churkin. Proc. SPIE, **6938**, 693803-1 (2008). DOI: 10.1117/12.785605
- [8] А.М. Ражев, Д.С. Чуркин. Opt. Commun., **282**, 1354 (2009). DOI: 10.1016/j.optcom.2008.12.035
- [9] А.М. Ражев, Д.С. Чуркин. Optics and Precision Engineering, **19**(2), 237 (2011). DOI: 10.3788/ope.20111902.1021
- [10] А.М. Ражев, Д.С. Чуркин, Е.С. Kargapol'tsev. Electrical & Electronic Systems, **2**(2), 1000112 (2013). DOI: 10.4172/2332-0796.1000112
- [11] А.М. Ражев, Д.С. Чуркин, Е.С. Kargapol'tsev. In: *6th Intern. Symposium on Modern Problems of Laser Physics (MPLP'2013)*. 2013, p. 140.
- [12] А.М. Ражев, Д.С. Чуркин, Е.С. Kargapol'tsev. Laser Physics, **24**(7), 074004 (2014). DOI: 10.1088/1054-660X/24/7/074004
- [13] C.K.N. Patel, W.L. Faust, R.A. McFarlane. Bull. Am. Phys. Soc., **9**, 500 (1964).
- [14] Н.Н. Соболев, В.В. Соковиков. Письма в ЖЭТФ, **4**(8), 303 (1966) [N.N. Sobolev, V.V. Sokovikov. J. Exper. and Theor. Phys. Lett., **4**(8), 204 (1966)].
- [15] А.М. Ражев, Д.С. Чуркин, Р.А. Tkachenko. Applied Physics B (Lasers and Optics), **126**(6), Article id104 (2020). DOI: 10.1007/s00340-020-07459-8
- [16] А.М. Ражев, Д.С. Чуркин, Е.С. Kargapol'tsev. Laser Physics Letters, **10**(7), 075002, 1 (2013). DOI: 10.1088/1612-2011/10/7/075002
- [17] А.М. Ражев, Д.С. Чуркин, Е.С. Каргапольцев, С.В. Демчук. Квант. электрон., **46**(3), 210 (2016) [A.M. Razhev, D.S. Churkin, E.S. Kargapol'tsev, S.V. Demchuk. Quantum Electronics, **46**(3), 210 (2016). DOI: 10.1070/QEL15990].
- [18] А. М. Ражев, Д. С. Чуркин, А.С. Завьялов. Вестник НГУ (Серия: Физика), **4**(3), 12 (2009).
- [19] А.М. Ражев, Д.С. Чуркин, Р.А. Ткаченко. Оптика атмосферы и океана, **33**(3), 169 (2020). DOI: 10.15372/AOO20200302
- [20] А.М. Ражев, Д.С. Чуркин, Е.С. Каргапольцев, Р.А. Ткаченко, И.А. Трунов. Оптика атмосферы и океана, **33**(3), 173 (2020). DOI: 10.15372/AOO20200303
- [21] А.М. Ражев, Д.С. Чуркин, Р.А. Ткаченко. Applied Physics B (Lasers and Optics), **127**(11), Article id152 (2021). DOI: 10.1007/s00340-021-07698-3
- [22] А.М. Ражев, Д.С. Чуркин, Р.А. Ткаченко. Laser Physics Letters, **18**(9), 095001 (2021). DOI: 10.1088/1612-202X/ac1609