

УДК 621.373.826.038.823

А. П. АВЕРИН, Н. Г. БАСОВ, Е. П. ГЛОТОВ, В. А. ДАНИЛЫЧЕВ,
О. М. КЕРИМОВ, И. Н. МАТВЕЕВ, А. М. СОРОКА, Н. Д. УСТИНОВ,
В. И. ЮГОВ и Н. В. ЧЕБУРКИН

УНИВЕРСАЛЬНЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ЭЛЕКТРОИОНИЗАЦИОННЫЙ СО₂-СО-ЛАЗЕР

1. В настоящее время одним из перспективных путей повышения производительности труда является широкое промышленное внедрение лазерной технологии [1, 2]. Обладая наиболее высокой плотностью мощности, лазерный луч является уникальным технологическим инструментом, позволяющим расплавлять и испарять практически любые существующие в природе материалы, обеспечивая при этом минимальные зоны локального нагрева. Основные технологические процессы, в которых применяется и внедряется лазерная обработка, — это сварка, резка, пробивание отверстий, поверхностное и объемное легирование, получение покрытий с заданными свойствами, разметка и маркировка.

Благодаря большим скоростям нагрева и охлаждения при лазерной сварке предельно ограничивается перегрев и разупрочнение околошовной зоны. Размеры типичных участков зоны термического влияния составляют доли миллиметра, что значительно меньше в (10–30 раз), чем при других способах сварки. Это особенно важно для сварки высокопрочных сталей, чувствительных к термическому циклу. Появляется возможность повысить скорость сварки в несколько раз без ущерба для качества сварного шва. В настоящее время на электроионизационных технологических лазерах достигнуты скорости сварки до 120–150 м·ч⁻¹ при глубине проплавления 10–15 мм [3].

Очень эффективным является процесс фигурной газолазерной резки сталей, титана и алюминиевых сплавов по заданной программе в двухкоординатной плоскости. Скорость фигурной резки достигает 120–240 м·ч⁻¹ при высоком качестве реза, позволяющем значительно сократить расходы на дальнейшую обработку деталей [4].

Другой важной областью использования лазерного луча является термообработка (закалка, поверхностное легирование, наплавка), которая позволяет: повысить износостойкость деталей, работающих в условиях повышенного абразивного износа (траки гусеничных машин, лопатки дробометов, детали размольного оборудования и т. п.), в 1,5–2 раза; заменить цементацию и нитроцементацию с присутствием этим процессам вредными условиями труда и загрязнением окружающей среды; заменить дефицитные и дорогостоящие легированные стали на простые за счет их поверхностного легирования, обеспечив при этом высокую жаростойкость и коррозионную стойкость деталей, таких, как лопатки турбин, детали насосов, камеры сгорания и т. п.; создать гетерогенные сплавы с различным сочетанием черных и цветных металлов (например, сталь — алюминий, алюминий — медь и др.).

Еще более перспективными представляются технологические применения лазеров для добычи и обработки природного камня и других строительных материалов, которые обладают значительно меньшей теплопровод-

ностью, чем металлы, что позволяет более эффективно использовать энергию лазерного луча.

Каждый технологический процесс накладывает свои специфические требования на параметры лазерного излучения. Для лазерной сварки, требующей острой фокусировки луча, оптимальными являются непрерывный и импульсно-периодический с малой скважностью S (S — отношение периода следования импульсов к длительности импульса) режимы генерации. Использование более выгодного с точки зрения энергетических характеристик лазера режима возбуждения с большой скважностью для лазерной сварки затруднено интенсивным плазмообразованием из-за большой величины импульсной мощности излучения. В отличие от лазерной сварки для процессов термообработки образование плазмы значительно повышает эффективность использования лазерного излучения, так как металлы на длине волны 10,6 мкм имеют высокий коэффициент отражения, в то время как энергия, переизлучаемая плазмой в видимом и УФ-диапазонах спектра, поглощается значительно лучше. Оптимальные длительности импульса генерации для термоупрочнения составляют несколько десятков микросекунд. Еще более коротких длительностей импульса требует процесс лазерной очистки поверхностей архитектурных сооружений, представляющий значительный практический интерес.

При длительности импульса 2–40 мкс пороговая плотность энергии, необходимая для очистки поверхности декоративного камня с различной степенью загрязненности, лежит в диапазоне 3–10 Дж·см⁻². При КПД лазера 10% стоимость лазерной очистки поверхностей архитектурных сооружений составляет 0,15–0,5 коп. на квадратный метр, а производительность 10 кВт-лазера составляет 360–1200 м² в час [3].

Таким образом, очень актуальной задачей является создание универсального технологического лазера, способного работать как в непрерывном, так и в импульсно-периодическом режимах с широким диапазоном частот и длительностей импульсов генерации.

Важным достоинством электроионизационного метода накачки является возможность оперативного (с характерным временем $\sim 10^{-5}$ с) управления разрядом и соответственно мощностью генерации за счет изменения плотности тока электронного пучка с помощью управляющей сетки электронной пушки. Это делает СО₂-ЭИЛ универсальным технологическим инструментом, способным обеспечить оптимальный для каждого производственного процесса режим генерации.

Одним из основных параметров, определяющих экономическую эффективность процессов лазерной технологии, является технический КПД лазерных установок. В существующих электроионизационных [4] и электро-разрядных [5] СО₂-лазерах величина технического КПД не превосходит 10%. В работе [6] теоретически показано, что использование в качестве рабочего вещества монооксида углерода в установках с турбокомпрессорной схемой охлаждения лазерной смеси до криогенных температур позволит значительно повысить технический КПД и довести его до 30–40%. В настоящее время в импульсных ЭИ-СО-лазерах при сравнительно больших плотностях тока электронного пучка ($j_e \approx 10^{-3}$ А·см⁻²) получены КПД генерации свыше 50% [7]. Вопрос о возможности получения высокого КПД генерации в непрерывных ЭИ-СО-лазерах, где предельно достижимые плотности токов электронного пучка не превосходят в настоящее время 10 мкА·см⁻² (в плоскости анода разрядной камеры) [4], оставался открытым.

В данной работе была проведена модернизация универсального технологического СО₂-лазера «Исеть», описанного в [4, 5, 8], позволившая получить непрерывную генерацию на моноокиси углерода с КПД 37% и удельным энергопотреблением 113 Дж·г⁻¹, что в несколько раз выше, чем в лучших электроионизационных и электро-разрядных СО₂-лазерах.

2. Для эффективного охлаждения лазерной смеси до криогенных температур в газодинамический контур был введен трубчатый теплообменник с перекрестноточной схемой прокачки жидкого азота. Схема ЭИ-СО-лазера представлена на рис. 1.

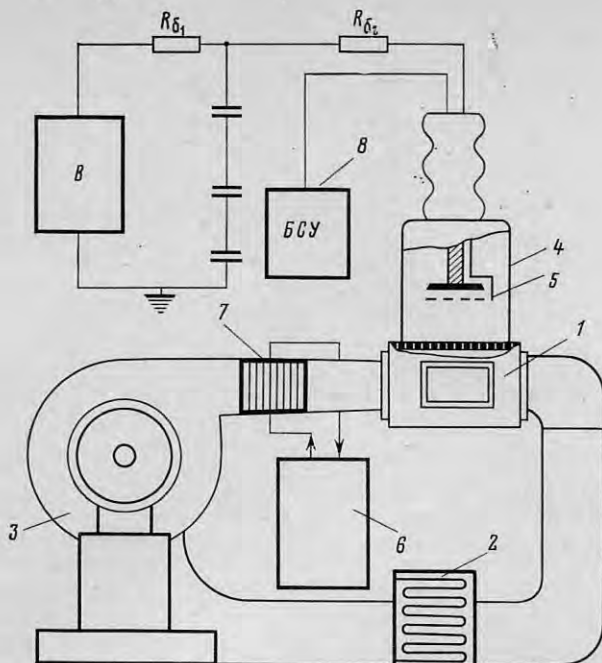


Рис. 1. Схема технологического электроионизационного СО-лазера: 1 — разрядная камера, 2 — водяной теплообменник, 3 — вентилятор, 4 — электронная пушка, 5 — управляющая сетка, 6 — цистерна с жидким азотом, 7 — криогенный теплообменник, 8 — блок сеточного управления электронной пушки

Измерение распределения температуры вдоль оптической оси лазера осуществлялось болометрическим методом с помощью никелевых проволочек, натянутых вертикально на выходе из криогенного теплообменника. Изменение температуры лазерной смеси осуществлялось за счет изменения расхода жидкого азота, максимальная скорость прокачки которого составляла $0,3 \text{ л} \cdot \text{с}^{-1}$. При малых расходах жидкого азота наблюдалась разница температур ($\sim 50\text{--}60 \text{ К}$) лазерной смеси вдоль оптической оси резонатора из-за того, что на входе хладагента в теплообменник охлаждение осуществляется жидким азотом, а на выходе из него газообразным. Это является существенным недостатком перекрестной схемы охлаждения. Измерение разрядного тока и напряжения осуществлялось по методике, описанной в [5].

Выходная мощность излучения измерялась с помощью проходного болометра, калибровка которого осуществлялась через каждые полчаса работы с помощью паспортизованного калориметра ТПИ-2-5 по схеме, приведенной на рис. 2. Необходимость в проведении столь частых калибровок связана с обнаруженным в [9] эффекте изменения чувствительности проходного болометра при длительном воздействии лазерного излучения с уровнем мощности $\sim 10 \text{ кВт}$ (эффект «старения» болометра).

Формирование излучения осуществлялось с помощью трехпроходного телескопического резонатора с прозрачностью 50%. Для вывода излучения использовалась пластина из КС1. Температура лазерной смеси на входе в активную область при фиксированном максимальном расходе жидкого азота определялась величиной рабочего давления и скоростью прокачки лазерной смеси, которая в процессе экспериментов изменялась за счет плавного регулирования числа оборотов вентилятора. Максимальная плотность тока электронного пучка в плоскости анода разрядной камеры составляла $10 \text{ мкА} \cdot \text{см}^{-2}$, энергия электронов изменялась в пределах $180\text{--}200 \text{ кВ}$.

На рис. 3 представлены зависимости КПД генерации η от удельной энергии, вкладываемой в единицу массы прокачиваемого газа для двух

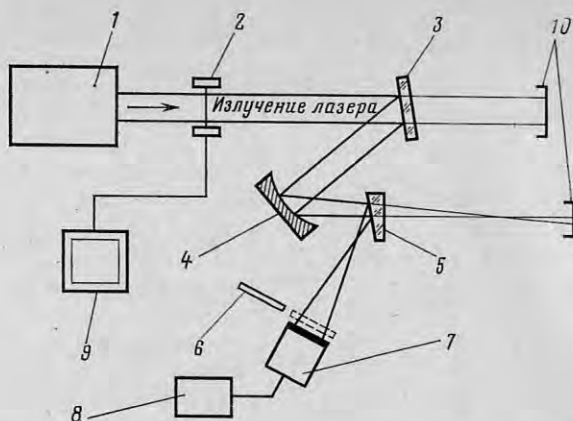


Рис. 2. Схема калибровки проходного болометра: 1 — ЭИ-лазер, 2 — проходной болометр, 3 — пластина из KCl, 4 — собирающее зеркало ($F=2,5$ м): 5 — клин из KCl, 6 — механический затвор, 7 — паспортизованный калориметр ТПИ-2-5, 8 — цифровой вольтметр Щ-1413, 9 — «самонаписец» КСМ4, 10 — асбестовый экран

значений давления лазерной смеси $\text{CO}:\text{N}_2:\text{Ar}:\text{He}$ (1:2:8:9) 75 тор (1) и 40 тор (2) (значения давления соответствуют комнатной температуре) при различных скоростях прокачки. Там же показана зависимость КПД генерации от энерговыклада для лазерной смеси $\text{CO}:\text{N}_2:\text{He}$ (1:5:4) при давлении 50 тор. Видно, что КПД генерации резко возрастает с повышением удельного энерговыклада, величина которого ограничена стриммерным пробоем разрядного промежутка.

Максимальная приведенная напряженность электрического поля E/N на входе в разрядную камеру для смесей $\text{CO}:\text{N}_2:\text{Ar}:\text{He}$ (1:2:8:9) составляла 2,1 кВ/см амага при $p=75$ тор и 3,2 кВ/см амага при 40 тор. Меньше значения предельных напряженностей поля по сравнению с непрерывными ЭИ- CO_2 -лазерами связаны с существенно большим уменьшением плотности лазерной смеси в процессе ее нагрева в разрядной камере, что связано, с одной стороны, с большим энерговыкладом, с другой — с переходом к криогенным температурам (величина $C_p T_0$ при $T_0=100$ К втрое меньше, чем при комнатной температуре):

$$\frac{\rho_0}{\rho} = 1 + \frac{W\delta}{C_p T_0}, \quad (1)$$

где ρ_0 и ρ — плотность газа на входе и выходе из активного объема; C_p и T_0 — теплоемкость ($p=\text{const}$) и начальная температура газа; W — удельный энерговыклад в единицу массы лазерной смеси; δ — доля энерговыклада, идущая на нагрев газа.

В экспериментах каждому давлению соответствовала оптимальная скорость прокачки лазерной смеси, при которой достигалась максимальная мощность генерации. Это связано с ограниченными возможностями криогенного теплообменника, который не обеспечивал достаточного охлаждения газа при больших скоростях прокачки. Оптимальный массовый расход лазерной смеси при всех давлениях в диапазоне 0,053–0,133 амага (при комнатной температуре это соответствует 40–100 тор) был примерно одинаковым. Близкими были и значения максимального энерговыклада с единицы массы прокачиваемого газа.

Зависимости КПД от энерговыклада при давлениях 0,053–0,133 амага слабо отличаются друг от друга, несмотря на то, что приведенные мощности накачки при одном и том же значении W почти вдвое отличаются друг от друга. Это свидетельствует о том, что приведенная мощность релаксационных потерь была значительно меньше мощности накачки, максимальная величина которой составляла 25 кВт/л-амага при $p=0,1$ амага, 45 кВт/

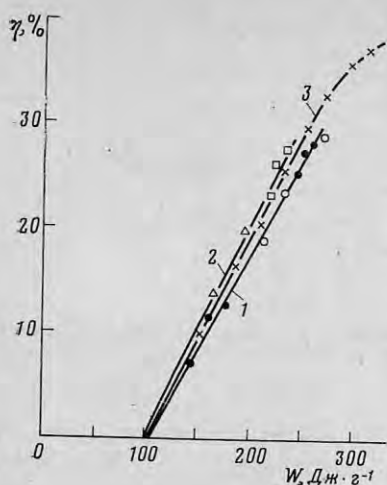


Рис. 3

Рис. 3. Зависимости КПД генерации от энерговклада в единицу массы прокачиваемого газа для лазерных смесей $\text{CO}:\text{N}_2:\text{Ar}:\text{He}$ (1:2:8:9) (кривые 1, 2) и $\text{CO}:\text{N}_2:\text{He}$ (1:9:10) (кривая 3) при различных давлениях: 1 — 75, 2 — 40, 3 — 50 тор. Экспериментальные точки соответствуют различным скоростям прокачки лазерной смеси. Светлые точки — 15 м·с^{-1} , черные точки — 20 м·с^{-1} , квадратики — 30 м·с^{-1} , треугольники — 41 м·с^{-1} , крестики — 24 м·с^{-1} . Температура газа на входе в разрядную камеру T_0 100 К

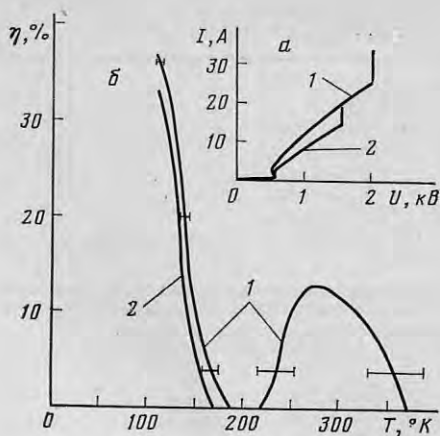


Рис. 4

Рис. 4. а — Вольт-амперные характеристики ЭИ-разряда в смеси $\text{CO}:\text{N}_2:\text{He}$ (1:9:10) при комнатной (кривая 1) и криогенной $T=110 \text{ К}$ (кривая 2) температурах ($p=50$ тор, $j_e=5 \text{ мкА·см}^{-2}$, $p(T)=p(T_0)\frac{T}{T_0}$). б — Зависимости КПД генерации от

температуры для лазерных смесей $\text{CO}:\text{N}_2:\text{He}$ (кривая 1) и $\text{CO}:\text{N}_2:\text{He}:\text{Xe}$ (2:9:10:0,5) (кривая 2)

/л. амага при $p=0,053$ амага. Таким образом, в условиях эксперимента КПД генерации определяется превышением энергии накачки над порогом. При повышении начальной температуры газа наблюдалось резкое снижение КПД. Это может быть связано как с ростом пороговой энергии, так и с увеличением мощности релаксационных потерь за счет спонтанного излучения высоковозбужденных колебательных уровней CO .

На рис. 4, а приведены вольт-амперные характеристики лазерной смеси $\text{CO}:\text{N}_2:\text{He}$ при давлении 50 тор, плотности тока электронного пучка $j_e=5 \text{ мкА·см}^{-2}$ (в плоскости анода разрядной камеры) и скорости прокачки лазерной смеси 24 м·с^{-1} для комнатной (1) и криогенной (2) температур. Видно, что вольт-амперная характеристика, соответствующая криогенной температуре, идет ниже. Это связано с изменением механизма рекомбинации при понижении температуры из-за эффективного образования ионов N_4^+ , для которых скорость диссоциативной рекомбинации $\text{N}_4^++e \rightarrow \text{N}_3+\text{N}$ в 2–3 раза выше, чем для ионов N_2^+ [10].

В таблице приведены основные результаты экспериментов, в которых были достигнуты рекордные для непрерывного режима генерации значения КПД (37%) и энергосъема (113 Дж·г^{-1}). На рис. 4, б показаны зависимости КПД генерации от начальной температуры газа, усредненной по выходному сечению теплообменника для лазерных смесей $\text{CO}:\text{N}_2:\text{He}$ (1:9:10) и $\text{CO}:\text{N}_2:\text{He}:\text{Xe}$ (2:9:10:0,5). Видно, что КПД генерации резко падает с повышением температуры, а при 190 К для первой смеси и при 170 К для второй смеси генерация CO -лазера исчезает совсем. При дальнейшем повышении температуры генерация появляется снова, но уже на длине волны CO_2 -лазера. Это связано с сублимацией углекислого газа, скопленного в криогенном теплообменнике, при повышении температуры. При приготовлении лазерной смеси заполнение газодинамического контура осуществлялось через азотную ловушку, что полностью

Состав лазерной смеси CO : N ₂ : He : Ar : Xe	p, тор	u, м·с ⁻¹	(E/p)*, В·см ⁻¹ ·тор ⁻¹	w _m , Дж·г ⁻¹	КПД генера- ции, %
1 : 9 : 10 : 0 : 0	50	24	3	113	37
1 : 9 : 10 : 0 : 0,1	50	24	2,9	110	34
2 : 9 : 10 : 0 : 0,5	50	24	3,2	93	31
2 : 9 : 10 : 0 : 0,5	50	36	3,3	64	29
1 : 2 : 9 : 8 : 0	100	15	2,1	63	23
1 : 2 : 9 : 8 : 0	40	41	3,6	58	23
1 : 2 : 9 : 8 : 0	75	20	2,8	65	24

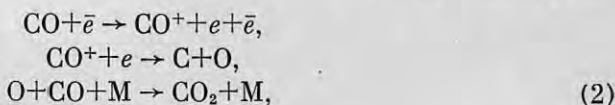
Примечания. p — давление при комнатной температуре, u — скорость лазерной смеси, (E/p)* — максимальная приведенная напряженность электрического поля, w_m — максимальный энергосъем с единицы массы.

исключало попадание в рабочую смесь CO₂. Углекислый газ нарабатывается в результате плазмохимических реакций, имеющих место в ЭИ-разряде, в процессе работы лазера.

Первоначальный рост КПД генерации с увеличением температуры связан с повышением содержания CO₂ в лазерной смеси. При температуре 270 К КПД достигает максимального значения 13%, а затем начинает падать. Снижение КПД генерации с ростом начальной температуры газа связано с резким увеличением мощности релаксационных потерь. При температуре 370 К генерация CO₂-лазера прекращается. При проведении экспериментов мощность накачки поддерживалась постоянной, равной 25 кВт в режиме CO-лазера и 50 кВт при работе установки в режиме CO₂-лазера. Как отмечалось выше, с уменьшением расхода азота, т. е. с повышением температуры лазерной смеси, увеличивался разброс температур по выходному сечению теплообменника. На рис. 4, б характерные значения разброса температур показаны горизонтальными отрезками, где минимальная температура соответствует активной области вблизи переднего блока резонатора, максимальная — области вблизи заднего зеркала.

3. В технических ЭИ-CO₂-лазерах очень важной является проблема деградации лазерной смеси при длительной непрерывной работе установок [11, 12]. Естественно, что эта проблема актуальна и для технологических ЭИ-лазеров на моноокиси углерода. Для того чтобы исключить выпадение в осадок продуктов плазмохимических реакций, протекающих в ЭИ-разряде, эксперименты проводились не при криогенной, а при комнатной температуре. Исследование динамики изменения состава лазерной смеси осуществлялось с помощью лабораторного газового хроматографа ЛХМ-8МД по методике, описанной в [13]. Система автоматического забора проб позволяла отбирать лазерную смесь для хроматографического анализа в заданные моменты времени, не останавливая лазерной установки.

На рис. 5 показаны хроматограммы лазерной смеси, соответствующие различным моментам времени непрерывной работы установки. Видно, что пик, соответствующий углекислому газу, растет с течением времени. Образование CO₂ в ЭИ-разряде может идти в соответствии со следующими реакциями:



где \bar{e} — высокоэнергетический электрон пучка, e — электрон разряда.

Через 5–10 мин после включения установки появлялась генерация, мощность которой росла с течением времени по мере наработки углекислого газа и достигала через 30 мин непрерывной работы 8,5 кВт при плотности тока электронного пучка $j_e = 8 \text{ мкА} \cdot \text{см}^{-2}$. Для того чтобы убедиться в том, что генерация соответствует двуокиси, а не моноокиси углерода, на пути излучения ставилась пластина из LiF, прозрачная на длинах волн CO-лазера и непрозрачная на длине волны 10,6 мкм.

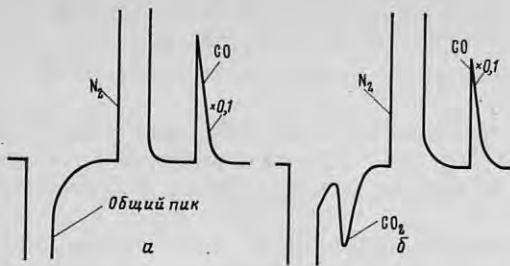


Рис. 5

Рис. 5. Характерные хроматограммы рабочей смеси СО-лазера в различные моменты времени работы установки: а — $t=0$, б — $t=10$ мин

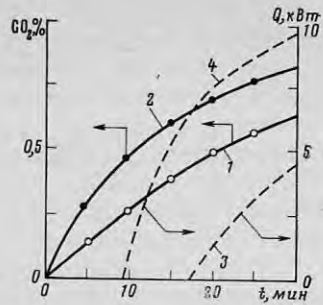


Рис. 6

Рис. 6. Зависимости концентраций углекислого газа в лазерной смеси СО: N₂: He (кривая 1, 2) и мощности генерации (кривые 3, 4) от времени работы установки при различных плотностях тока электронного пучка: 1, 3 — $j_e=4$ мкА·см⁻², 2, 4 — $j_e=8$ мкА·см⁻²

На рис. 6 показаны зависимости концентраций углекислого газа (1, 2) и мощности генерации (3, 4) от времени работы установки для лазерной смеси СО: N₂: He (1:4:5) при различных плотностях тока электронного пучка и давлении рабочей смеси 75 тор. Экспериментальные зависимости мощности генерации Q от времени работы установки, определяющего содержание углекислого газа смеси, качественно хорошо согласуются с формулой

$$Q = w \eta_{\text{кв}} \eta_{\text{в}} \eta_{\text{р}} \eta_{\text{w}} \left\{ 1 - \frac{W \cdot ([\text{CO}_2])}{W} \right\}, \quad (4)$$

где w — мощность накачки; $\eta_{\text{кв}}$, $\eta_{\text{в}}$ и $\eta_{\text{р}}$ — квантовый КПД, эффективность возбуждения и КПД резонатора, определяемый потерями на зеркалах соответственно; $\eta_{\text{w}} = 1 - (w_{\text{р}}/w)$, где $w_{\text{р}}$ — мощность релаксационных потерь;

$$W \cdot ([\text{CO}_2]) = \frac{\varepsilon_2 \ln(1/r_1 r_2)}{2L\sigma} \cdot \frac{[\text{N}_2] + [\text{CO}_2]}{[\text{CO}_2]} - \text{пороговая энергия накачки,}$$

т. е. энергия, выносимая из активного объема (ε_2 — энергия возбуждения верхнего лазерного уровня, L — эффективная (с учетом многопроходности резонатора) длина активной области, σ — эффективное (осредненное по всему активному объему) сечение вынужденных переходов, r_1 и r_2 — коэффициенты отражения зеркал резонатора), W — удельная энергия, вкладываемая в единицу массы прокачиваемого газа.

После проведения экспериментов в разрядной камере и газодинамическом контуре были обнаружены следы сажи. Образование свободного углерода связано с тем, что одна молекула углекислого газа образуется из двух молекул СО и один атом углерода при этом остается свободным.

В связи с тем что лазер на моноокиси углерода может эффективно работать только при криогенных температурах, образующиеся в ЭИ-разряде примеси СО₂ конденсируются в азотном теплообменнике и не могут оказывать влияние на кинетику генерации. Для поддержания постоянной концентрации СО необходимо осуществлять подпитку лазерной смеси моноокисью углерода со скоростью ~ 6 г·ч⁻¹, т. е. за 3 ч непрерывной работы лазера в газодинамический контур необходимо вводить такое же количество СО, какое первоначально содержалось в лазерной смеси.

При использовании предложенной в [6] турбокомпрессорной схемы охлаждения лазерной смеси, в которой отсутствует криогенный теплообменник, необходимо принимать специальные меры для того, чтобы удалить из рабочей смеси примеси углекислого газа, наличие которых в активном объеме может привести к резкому снижению КПД генерации.

Конструкция резонатора электроионизационных технологических СО-лазеров должна предусматривать систему защиты поверхности зеркал от загрязнения графитом, образующимся в ЭИ-разряде.

4. Подведем итог. В данной работе впервые получена непрерывная генерация на моноокиси углерода с уровнем мощности 10 кВт. Исследованы энергетические характеристики ЭИ-СО-лазера и динамика деградации рабочей смеси, обусловленной образованием в разряде двуокиси углерода и графита.

Достигнутые в данной работе рекордные значения КПД генерации 37% и энергосъема $113 \text{ Дж} \cdot \text{г}^{-1}$ показывают, что моноокись углерода является наиболее перспективным рабочим телом для мощных высокоэффективных технологических лазеров.

Полученные результаты не являются предельными: КПД генерации и удельный энергосъем могут быть значительно увеличены за счет использования более эффективной системы охлаждения лазерной смеси.

Физический институт им. П. Н. Лебедева
Академии наук СССР

Литература

1. Алексеев В. А., Бабаев И. К., Багдасаров З. Е., Басов Н. Г., Данилычев В. А. и др. Сварочное производство, 1979, № 9, с. 12.
2. Легозов В. А., Устинов Н. Д. Мощные лазеры и их применение. М.: Сов. радио, 1980.
3. Басов Н. Г., Глогов Е. П., Гуров В. В., Данилычев В. А., Рогатин Н. Н., Смирнов Ю. Н., Сорока А. М., Югов В. И. Proc. 4th Intern. Conf. Lasers and Applications, Лейпциг, ГДР, 1981, с. 38.
4. Басов Н. Г., Глогов Е. П., Данилычев В. А., Сорока А. М., Югов В. И. Proc. 4th Intern. Conf. Lasers and their Applications. Лейпциг, ГДР, 1981, с. 36.
5. Аверин А. П., Глогов Е. П., Данилычев В. А., Сажина Н. Н., Сорока А. М., Югов В. И. Квантовая электроника, 1981, т. 8, с. 2558.
6. Басов Н. Г., Глогов Е. П., Данилычев В. А., Сорока А. М., Урин Б. М., Югов В. И. ДАН СССР, 1981, т. 259, с. 1094.
7. Mann M. M., Rico D. K. IEEE JQE, 1974, v. 10, p. 682.
8. Аверин А. П., Басов Н. Г., Глогов Е. П., Гуров В. В., Данилычев В. А. и др. ДАН СССР, 1982, т. 266, с. 844.
9. Глогов Е. П., Данилычев В. А., Золотайкин А. В., Кузьмичев В. М., Сажина Н. Н. Тр. Всесоюзн. совещ. по применению лазеров в технологии машиностроения. Звенигород, 1982.
10. Хастед Дж. Физика атомных столкновений. М.: Мир, 1965, с. 502.
11. Аверин А. П., Басов Н. Г., Глогов Е. П., Данилычев В. А., Леонов Ю. С., Сажина Н. Н., Сорока А. М., Югов В. И. Письма в ЖТФ, 1981, т. 7, с. 769.
12. Аверин В. П., Глогов Е. П., Данилычев В. А., Леонов Ю. С., Сажина Н. Н., Сорока А. М., Югов В. И. Proc. 4th Intern. Conf. Lasers and their Applications. Лейпциг, ГДР, 1981, с. 224.
13. Джеффери Г. Анализ газов методом газовой хроматографии. М.: Мир, 1976.