

ЭЛЕКТРОИОНИЗАЦИОННЫЙ СО ЛАЗЕР С ОХЛАЖДЕНИЕМ В СВЕРХЗВУКОВОМ ПОТОКЕ

И.И. Горшков, А.А. Ионин, А.А. Котков, Н.Н. Сажина, Д.В. Сеницын, К.К. Фролов

Исследован сверхзвуковой электроионизационный СО лазер, действующий в переходном режиме возбуждения при плотности лазерного газа до 0,5 Амага. Показано, что небольшие добавки H_2 в лазерную смесь $CO:N_2:Ar$ стабилизируют разряд. Получена пиковая мощность генерации 90 кВт и максимальное значение КПД $\sim 20\%$.

В [1] сообщалось об исследовании сверхзвукового (СЗ) электроионизационного (ЭИ) СО лазера, действующего в квазинепрерывном режиме ($\tau_p \sim 700 \text{ мкс} \gg \tau_n$, где τ_p — длительность тока разряда, τ_n — время пролета СЗ потока газа через зону возбуждения) с пиковой мощностью 80 кВт и КПД $\sim 37\%$ в ядре потока. Применение в [2] импульсной накачки ($\tau_p \sim 8 \text{ мкс} \ll \tau_n$) в целях моделирования импульсно-периодического (ИП) режима работы ЭИ СО лазера не позволило реализовать высокие значения энергии излучения и КПД генерации. Это связано, на наш взгляд, с тем, что оптимальной длительностью импульса накачки в импульсном и ИП ЭИ СО лазерах является $\tau_p \sim 10^{-4} \text{ с}$ [3]. При таких длительностях импульса накачки, когда $\tau_p \sim \tau_n$ и режим возбуждения становится переходным от импульсного к квазинепрерывному, СЗ ЭИ СО лазер не исследован. В настоящей работе впервые изучен переходной режим работы СЗ ЭИ СО лазера, действующего при повышенных (до 0,5 Амага) плотностях лазерного газа. Проведено сравнение параметров ЭИ разряда для СЗ потока и покоящегося газа.

СЗ поток создавался за счет расширения газа из камеры высокого (2–6 атм) давления (труба Людвига) через плоское СЗ сопло в камеру низкого давления. Длительность квазинепрерывного режима течения газа, формируемого трубой Людвига длиной 2 м, составляла 6–10 мс в зависимости от состава газа. Ширина СЗ потока 360 мм, межэлектродный зазор на входе в зону возбуждения 41 мм, число Маха в ядре потока равно 3,0.

ЭИ разряд в СЗ потоке возбуждался между двумя электродами. Нижний секционированный электрод с размерами $300 \times 240 \text{ мм}^2$ состоял из 332 медных штырей диаметром 12 мм. Каждый штырь через балластный резистор подключался к источнику питания. Для компенсации роста погранслоев вниз по потоку межэлектродный зазор имел угол раскрытия $\sim 0,5^\circ$. Толщина погранслоев, регистрируемых методом тепловоскопической фотографии, вблизи верхнего электрода, полупрозрачного для электронного пучка, составляла $\sim 10 \text{ мм}$, а вблизи нижнего $\sim 2 \text{ мм}$. ЭИ разряд контролировался электронным пучком с плотностью тока $\sim 1 \text{ мА/см}^2$. Длительность импульса тока разряда $\tau_p \sim 250 \text{ мкс}$ по уровню 0,5 (рис. 1а). Режим работы установки был переходным от импульсного к квазинепрерывному ($\tau_p/\tau_n \sim 0,5$).

В лазере использовался плоско-вогнутый резонатор длиной 50 см, образованный медным зеркалом с радиусом кривизны от 5 до 30 м и выходным диэлектрическим зеркалом с коэффициентом отражения 93% в области длин волн 5,0–5,3 мкм. Ось резонатора смещена относительно оси разрядной области на расстояние $\sim 12 \text{ см}$ вниз по потоку.

Существенное влияние на стабильность ЭИ разряда в СЗ потоке оказывают его неоднородности: косые скачки уплотнения, области пониженной плотности в погранслоях, акустические возмущения, возникающие в результате тепловыделения в разряде и др. Неустойчивость ЭИ разряда в СЗ потоке газа проявляется в снижении предельных значений приведенной напряженности поля E/N и удельного энерговклада $Q_{\text{вкл}}^{\text{уд}}$ по сравнению с покоящимся газом (рис. 1б). Сравнение зависимостей показывает, что неустойчивость разряда (в одной и той же геометрии) снижает предельную напряженность поля более чем в 1,5 раза. Внесение малых (1–2%) добавок H_2 в лазерную смесь позволило значительно стабилизировать ЭИ разряд в СЗ потоке. Стабильность разряда увеличивалась также при очистке применяемых газов и внесении в погранслои веществ, обеспечивающих в них повышенную концентрацию электронов.

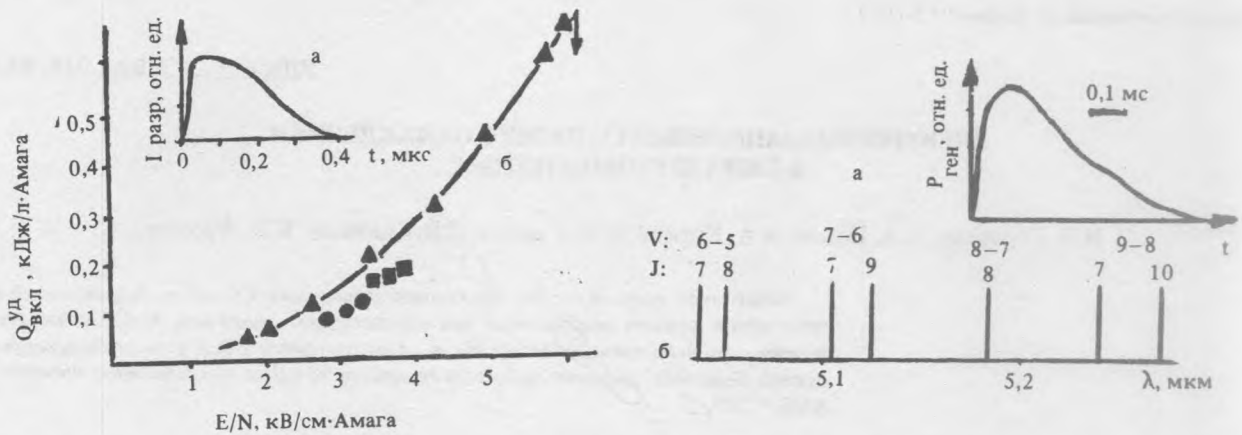


Рис. 1. Осциллограмма тока разряда (а) и удельные энергетические характеристики ЭИ разряда в СЗ потоке газа (б), газовая смесь $\text{CO:N}_2:\text{Ar:H}_2$: 1 : 7 : 2 : 0, $M = 0$, $T = 300 \text{ K}$ (\blacktriangle); 1 : 7 : 2 : 0, $M = 3$, $T = 100 \text{ K}$ (\bullet); 0,9 : 7 : 2 : 0,1, $M = 3$, $T = 100 \text{ K}$ (\blacksquare).

Рис. 2. Осциллограмма импульса генерации (а) и спектр излучения (б) СЗ ЭИ СО лазера.

Генерационные характеристики СЗ ЭИ СО лазера исследованы при различной плотности газа в СЗ потоке и различных составах лазерной смеси. Основные результаты по энергетическим параметрам ЭИ разряда и генерации приведены в табл. 1 (лазерная смесь $\text{CO:N}_2:\text{Ar:H}_2 = 0,9 : 7 : 2 : 0,1$; $T = 100 \text{ K}$). Вкладываемая в ЭИ разряд мощность $P_{\text{вкл}}$ и мощность генерации $P_{\text{ген}}$ представлены своими пиковыми значениями. Удельный энерговклад $Q_{\text{вкл}}^{\text{уд}}$ определялся с учетом возрастания объема возбужденного газа со временем в течение импульса тока разряда. КПД СЗ ЭИ СО лазера определялся как отношение энергии излучения лазера к энергии, вводимой в ЭИ разряд. Небольшие значения КПД, полученные в экспериментах, обусловлены рядом факторов, одним из которых является вынос возбужденной смеси газов за пределы резонатора, размер которого по потоку составлял 60 мм (время пролета $\sim 100 \text{ мкс}$). Этот факт подтверждается наличием генерации в резонаторе, расположенном на 180 мм ниже по потоку от основного резонатора. Форма импульса излучения и спектр генерации лазера приведены на рис. 2. Угловая расходимость излучения определялась геометрией резонатора и составляла $\sim 10^{-2}$ рад. Мощность генерации лазера монотонно увеличивалась с ростом плотности газа в потоке и достигала 90 кВт при $N = 0,5$ Амага.

Эксперименты были направлены на достижение максимальной мощности генерации. В опытах с несекционированным электродом достигнут КПД $\sim 19,7\%$ при $P_{\text{ген}} \sim 22 \text{ кВт}$. Оптимизация режима работы лазера по КПД не проводилась.

Таблица 1

Основные параметры ЭИ разряда и характеристики генерации лазера

N, Амага	$P_{\text{вкл}}$, МВт	$Q_{\text{вкл}}^{\text{уд}}$, Дж/л·Ам	E/N, кВ/см·Ам	$Q_{\text{ген}}$, Дж	$P_{\text{ген}}$, кВт	КПД, %
0,17	0,48	170	3,65	7,1	28	7,7
0,33	0,91	160	2,75	15,8	63	7,7
0,50	1,23	140	2,15	22,5	90	8,1

Таким образом, СЗ ЭИ СО лазер, действующий в переходном режиме возбуждения, обладает достаточно высокой мощностью генерации, сравнимой с мощностью лазеров, работающих в квазинепрерывном режиме. Дальнейшее повышение энергетических параметров СЗ ЭИ СО лазера связано с ухудшением однородности и устойчивости ЭИ разряда, с оптимизацией геометрии резонатора и состава лазерной смеси и снижением температуры газа в СЗ потоке.

Авторы благодарны С.Г. Перлову, А.В. Романову и И.В. Холину за участие в разработке конструкции электроразрядной камеры и трубы Людвиг.

ЛИТЕРАТУРА

1. Klosterman E. L., Byron S. R. J. Appl. Phys., **50**, 5168 (1979).
2. Mayerhofer W. et al. In Gas Flow and Chem. Lasers, Proc. 6th Int. Symp., Yerusalem, 1986, Berlin, 1987, p. 237.
3. Басов Н. Г. и др. Труды ФИАН, **116**, 54 (1980).

Поступила в редакцию 16 января 1989 г.