

Возбуждение быстропротекающих газовых лазеров методами комбинированного разряда

В.П. Зимаков, А.Ю. Кедров, В.А. Кузнецов,
Н.Г. Соловьев, А.Н. Шемякин, М.Ю. Якимов*

*Институт проблем механики РАН
119526, г. Москва, пр. Вернадского, 101, корп. 1*

Поступила в редакцию 27.03.2008 г.

В комбинированном разряде типа РПТ-ЕИР накачка лазерных уровней осуществляется разрядом постоянного тока (РПТ) в распадающейся плазме, создаваемой емкостным импульсно-периодическим разрядом (ЕИР). Плазма РПТ-ЕИР отличается высокой устойчивостью и однородностью. При этом затраты мощности на стабилизацию разряда составляют проценты от мощности РПТ, в то время как при газодинамических методах — десятки процентов.

Экспериментально исследовалась возможность эффективного применения технологии РПТ-ЕИР при разработке мощных газовых лазеров.

Созданы образцы экспериментальных CO_2 -лазеров с быстрой осевой прокачкой с выходной мощностью 1,5 и 3 кВт в непрерывном и импульсно-периодическом режимах и исследованы их рабочие характеристики. В лазерах с двумя (1,5 кВт) и четырьмя (3 кВт) разрядными трубками исследовались характеристики разряда и активной среды. Достигнута выходная мощность на единицу длины активной среды свыше 2 кВт/м при КПД разряда до 20%. Продемонстрирована возможность масштабирования лазера до 6 кВт. Обсуждаются возможности селекции лазерных мод средствами комбинированного разряда.

Ключевые слова: газовый лазер, быстрая осевая прокачка, комбинированный разряд.

Введение

Газоразрядные лазеры с охлаждением активной среды быстрой прокачкой газа вдоль оптической оси резонатора широко используются в промышленности благодаря небольшим размерам и высокому качеству излучения. В таких лазерах для возбуждения активной среды используются либо разряд постоянного тока, либо емкостный ВЧ-разряд. Устойчивость разряда обеспечивается газодинамическими методами [1, 2]. При таком способе стабилизации разряда затраты мощности на прокачку газа могут быть такими же, как и на возбуждение активной среды, что снижает КПД лазера.

Комбинированный разряд постоянного тока с ионизацией емкостным импульсно-периодическим разрядом (РПТ-ЕИР), который позволяет в значительной степени решить эти проблемы, был предложен авторами данной статьи и получил развитие в применении к лазерам с поперечной прокачкой [3]. Разрядная плазма, создаваемая с помощью ЕИР, обеспечивает эффективное и однородное возбуждение

активной среды самостоятельным РПТ, причем затраты энергии на стабилизацию разряда не превышают нескольких процентов от полной мощности РПТ.

Данная статья посвящена исследованию эффективности применения технологии РПТ-ЕИР в лазере с быстрой осевой прокачкой.

1. Основные свойства РПТ-ЕИР

В разрядной трубке лазера с РПТ-ЕИР накачка осуществляется разрядом постоянного тока между штыревыми анодами и кольцевым катодом (рис. 1).

Напряженность электрического поля разряда постоянного тока РПТ-ЕИР ниже, чем требуется для ионизации. Пороговый ток контракции при этом значительно повышается, вследствие чего стабильность и пространственная однородность РПТ-ЕИР могут быть обеспечены без больших дополнительных затрат энергии на генерацию крупных или мелкомасштабных вихрей, как в разрядах других типов. Средняя по времени мощность ЕИР не превышает 5% мощности РПТ, длительность импульсов тока ЕИР составляет 40 нс при частоте следования 10 кГц.

На рис. 1 представлен экспериментальный CO_2 -лазер с быстрой осевой прокачкой, предназначенный для исследования характеристик РПТ-ЕИР. Лазер был создан на базе двухступенчатого радиального

* Владимир Павлович Зимаков (zimakov@lantanlaser.ru); Андрей Юрьевич Кедров (kedrov@lantanlaser.ru); Владимир Алексеевич Кузнецов (kuznetsov@lantanlaser.ru); Николай Германович Соловьев (solovyov@lantanlaser.ru); Андрей Николаевич Шемякин (shemyakin@lantanlaser.ru); Михаил Юрьевич Якимов (yakimov@lantanlaser.ru).

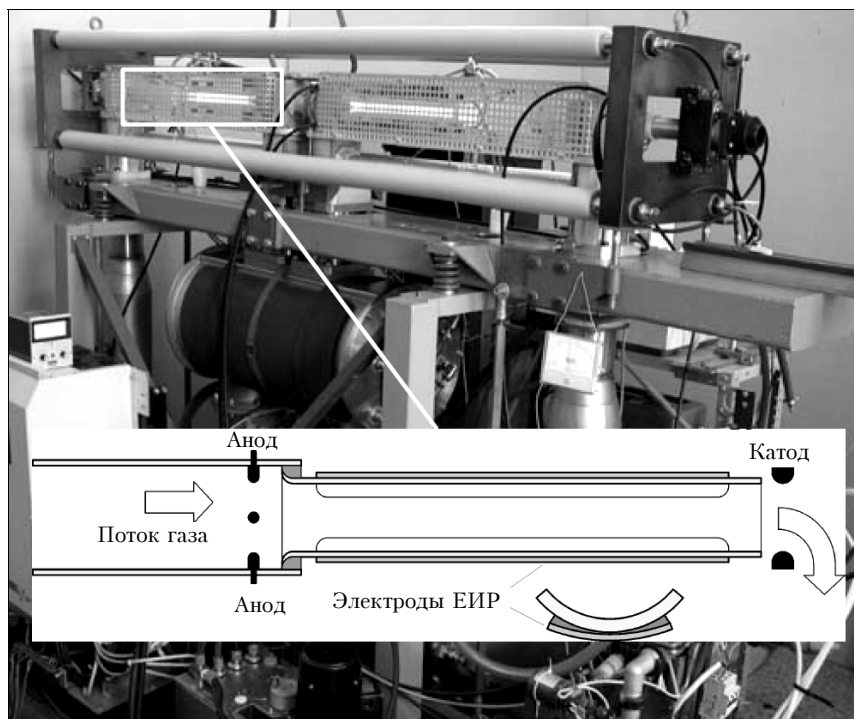


Рис. 1. Экспериментальный CO_2 -лазер с быстрой осевой прокачкой на двух разрядных трубках РПТ-ЕИР. Выходная мощность 1,5 кВт. Фрагмент – схема разрядной трубки. Стрелками показано направление потока газа. Анод и катод – электроды РПТ

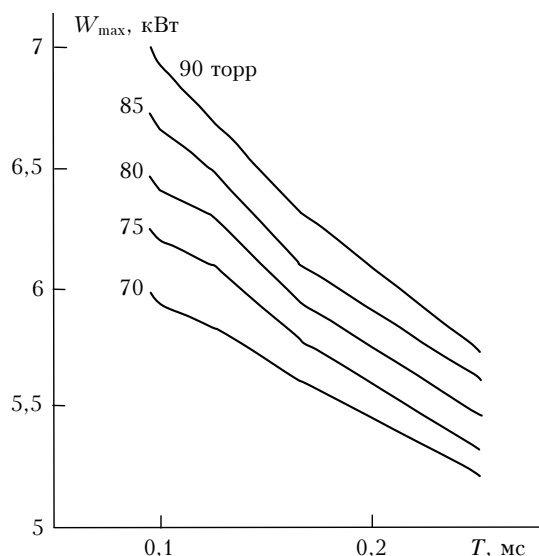


Рис. 2. Предельная мощность РПТ W_{\max} в зависимости от времени между импульсами ЕИР T при различном давлении смеси $1\text{CO}_2:7\text{N}_2:12\text{He}$ p (торр) в разрядной трубке CO_2 -лазера с быстрой осевой прокачкой. Скорость потока 200 м/с

турбокомпрессора, обеспечивавшего перепад давления не более 1,4. Скорость газового потока на входе разрядных трубок с внутренним диаметром 3,5 см составляла 200 м/с при давлении газовой смеси $1\text{CO}_2:7\text{N}_2:12\text{He}$ до 90 торр. В результате оптимизации формы электродов РПТ и ЕИР и характеристик потока была достигнута средняя по объему разрядной трубки плотность мощности РПТ до 15 Вт/см^3 .

На рис. 2 представлены предельные значения мощности РПТ-ЕИР, при достижении и превышении которых наступает контракция объемного разряда. Увеличение предельной мощности с давлением, а также почти линейное ее снижение при увеличении временного интервала между импульсами ЕИР (рис. 2) указывают на ионизационно-перегревный механизм неустойчивости разряда, приводящей к контракции [2, 4]. Поскольку ионизация осуществляется ЕИР, существует возможность выбора напряженности электрического поля РПТ, оптимальной для возбуждения колебаний молекул CO_2 и N_2 [5].

2. Характеристики лазерного излучения

Для изучения лазерной генерации две или четыре разрядные трубки включались последовательно в полуконфокальный устойчивый резонатор (см. рис. 1). Активная длина каждой трубки состояла из 40-см длины разрядного промежутка и 5-см возбужденного газа вниз по потоку от зоны разряда. Эксперименты с излучением проводились для определения оптических характеристик активной среды, необходимых для оценки возможности масштабирования лазера (рис. 3), а также для изучения влияния структуры разряда на лазерную генерацию.

Результаты исследования лазерного излучения показывают высокую оптическую однородность активной среды. Максимальная выходная мощность в непрерывном режиме, полученная в экспериментах с двумя разрядными трубками, достигала 1,5 кВт,

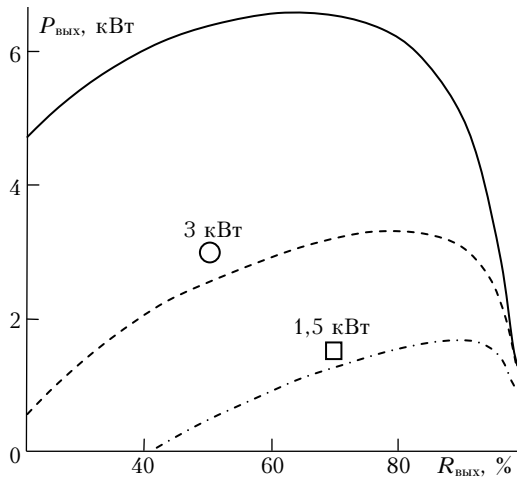


Рис. 3. Выходная мощность лазера $P_{\text{вых}}$ в зависимости от коэффициента отражения выходного зеркала $R_{\text{вых}}$ для лазеров с 2-, 4- и 8-разрядными трубками, вычисленная по формулам Ригрода [7] с измеренными параметрами активной среды. Точки получены экспериментально на лазере с двумя (1,5 кВт) и четырьмя (3 кВт) разрядными трубками с четырьмя – более 3 кВт. Величина M^2 , характеризующая диаграмму направленности излучения [6], примерно равнялась 10 при двух трубках и 6,5 при четырех.

Усредненные по длине активной среды величины коэффициента усиления слабого сигнала G_0 и интенсивности насыщения I_S определялись методом калиброванных потерь как функции средней по объему плотности мощности РПТ $\langle jE \rangle$. При расчете зависимости мощности лазера от коэффициента отражения выходного зеркала по формулам Ригрода [7] для 2-, 4- и 8-разрядных трубок (см. рис. 3) использовались значения $G_0 = 0,5 \text{ м}^{-1}$, $I_S = 1,3 \text{ кВт/см}^2$, соответствующие $\langle jE \rangle = 10 \text{ Вт/см}^3$.

3. Особенности организации комбинированного разряда в схеме с быстрой осевой прокачкой

Важной особенностью лазеров с быстрой осевой прокачкой является цилиндрическая геометрия активной среды, благоприятная для генерации лазерного излучения, но сложная с точки зрения обеспечения однородности ЕИР в поперечном сечении разрядной трубки. Тем не менее вместе со сложностями в такой геометрии возникают и новые возможности управления параметрами лазерного излучения.

Взаимное расположение электродов поперечного ЕИР и продольного РПТ в разрядной трубке лазера показано на рис. 1 и 4.

Режим работы лазера, среднее удельное сопротивление плазмы	Распределение интенсивности излучения по полю $2 \times 2 \text{ см}$	Картина свечения ЕИР. Внутренний диаметр трубки 3,5 см	Распределение плотности тока ЕИР $j = j(x)$ [8]
Без разряда постоянного тока ($\rho \approx 10^5 \text{ Ом} \cdot \text{см}$)	Нет излучения		
Порог генерации ($\rho \approx 10^4 \text{ Ом} \cdot \text{см}$)			
Мощность излучения 0,5 кВт ($\rho \approx 7 \cdot 10^3 \text{ Ом} \cdot \text{см}$)			
Мощность излучения 1,25 кВт ($\rho \approx 5,5 \cdot 10^3 \text{ Ом} \cdot \text{см}$)			

Рис. 4. Изменение структуры свечения разряда, конфигурации пятна лазерного излучения и распределения плотности тока ЕИР $j(x)$ при увеличении мощности РПТ и сопутствующем уменьшении удельного электрического сопротивления плазмы разряда. Данные получены на установке с двумя разрядными трубками РПТ

При неизменной форме электродов импульсного разряда невозможно одновременно обеспечить однородность импульсно-периодического разряда в отсутствие и при наличии электрического поля РПТ из-за того, что проводимость плазмы к моменту начала очередного импульса сильно зависит от напряжения РПТ. На рис. 4, в частности, приведена картина свечения ЕИР в отсутствие постоянного электрического поля. При низкой начальной концентрации электронов в начале очередного импульса пробой развивается в виде поверхностного разряда вдоль стенок трубки, так что середина трубки остается темной. Картина меняется при приложении постоянного напряжения вдоль оси трубки, так как при этом резко уменьшается скорость рекомбинации свободных электронов и проводимость плазмы к началу очередного импульса значительно возрастает.

На рис. 4 также показано, как меняются конфигурация выходного пучка лазера, картина свечения разряда и распределение импульсного тока $j(x)$ при увеличении мощности излучения и соответствующем уменьшении среднего удельного электрического сопротивления среды ρ . Можно вывести соотношение, связывающее длительность нарастания импульсного напряжения с геометрическими характеристиками электродов и разрядной трубки при условии однородности распределения плотности тока ЕИР по сечению трубки [8]. Это соотношение может быть использовано при проектировании лазеров и других устройств с РПТ-ЕИР.

4. Обсуждение результатов

Объем, занятый излучением в активной среде, в проведенных экспериментах составлял не более 50% полного объема активной среды и был ограничен диафрагмой в оптическом резонаторе. Такое соотношение объема моды к объему активной среды выбиралось как характерное для резонатора, предназначенного для генерации небольшого числа поперечных мод. Таким образом, данные, полученные на коротких резонаторах, работающих в многомодовом режиме, можно применять и к длинным резонаторам, работающим в режиме двух-трех поперечных мод.

На рис. 3 представлен результат расчета по формулам Ригрода [7] с измеренными параметрами активной среды (см. рис. 4) для случаев 2-, 4- и 8-разрядных трубок. Экспериментальные данные для 2- (1,5 кВт) и 4-разрядных трубок (3 кВт) нанесены в виде точек. Представленные данные позволяют утверждать, что выходная мощность более 6 кВт может быть получена с восьмью разрядными трубками и выходным зеркалом с коэффициентом отражения 50%. При этом большая длина резонатора для трубок благоприятна для генерации поперечных мод низкого порядка, что обеспечивает качество излучения на уровне $M^2 = 2 \pm 2,5$ при максимальном кпд разряда 20% и более.

Относительно высокий кпд генерации, полученный в экспериментах при заполнении активной среды излучением менее 50%, может быть обусловлен

двумя причинами. Известно, что в присутствии лазерного излучения при мощности накачки в несколько раз выше порога генерации концентрация возбужденных частиц в объеме, занятом излучением, значительно ниже, чем в окружающем активном объеме [9, 10]. Авторы проанализировали механизм, при котором возбужденные молекулы переносятся в зону, заполненную излучением, из окружающего объема за счет турбулентной диффузии. Как показали расчеты, турбулентной диффузией можно объяснить примерно половину наблюдаемого увеличения кпд.

Другим возможным механизмом, избирательно увеличивающим мощность накачки в области, занятой излучением, может быть взаимодействие между РПТ и ЕИР. Как показано на рис. 4, при низком напряжении и мощности РПТ плазма ЕИР концентрируется у стенок трубки. Ток РПТ протекает в этом случае также неоднородно, что приводит к сильной эллиптичности лазерного луча вблизи порога генерации. При повышении мощности РПТ возрастает проводимость плазмы, вследствие чего ток ЕИР распределяется более однородно и даже стягивается к оси трубки при максимальной мощности, что также отражается в изменении конфигурации пятна лазерного излучения. Ток РПТ, следуя за ЕИР, может, таким образом, обеспечивать повышение мощности накачки в объеме, занятом излучением.

Перераспределение тока по сечению трубки с увеличением мощности генерации, на первый взгляд, выглядит вредным для лазера, так как приводит к нарушению осевой симметрии пучка при изменении мощности. Тем не менее осевую симметрию можно восстановить, поворачивая внешние электроды импульсного разряда на некоторый угол вокруг оптической оси при переходе от трубки к трубке. Концентрация ЕИР и РПТ к оси при увеличении мощности будет способствовать сохранению модового состава излучения. Таким образом, выбор формы внешних электродов ЕИР может способствовать сохранению высокого качества излучения при увеличении мощности РПТ. Форма электродов ЕИР может быть оптимизирована таким образом, чтобы обеспечить увеличение накачки в зоне, занятой излучением, в возможно более широком диапазоне мощности, что важно для повышения кпд лазера при генерации небольшого числа поперечных мод.

1. Habich U., Loosen P., Hertzler C., Wollermann-Windgasse R. Industrial 30-kW CO₂ laser with fast axial flow and RF excitation // Gas and Chemical Lasers / Robert C. Sze, Ed.: Proc. SPIE. 1996. V. 2702. P. 374–384.
2. Wiegand W.J., Nighan W.L. Influence of fluid-dynamic phenomena on the occurrence of constriction in CW convection laser discharges // Appl. Phys. Lett. 1975. V. 26. N 10. P. 554–557.
3. Generalov N.A., Gorbulyenko M.I., Solov'gov N.G., Yakimov M.Yu., Zimakov V.P. High-power industrial CO₂ lasers excited by a non-self sustained glow discharge // Gas Lasers – Recent Developments and Future Prospects / W.J. Witteman, V.N. Ochkin, Eds. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands, 1996. P. 323–341.
4. Паицер Ю.П. Физика газового разряда. М.: Наука, 1987. 592 с.

5. *Lowke J.J., Phelps A.V., Irwin B.W.* Predicted electron transport coefficients and operating characteristics of CO₂N₂He laser mixtures // *J. Appl. Phys.* 1973. V. 44. N 10. P. 4664–4671.
6. *International standard ISO 11146-1:2005.* Lasers and laser related equipment. Test methods for laser beam widths, divergence angles and beam propagation ratios. Part 1: Stigmatic and simple astigmatic beams. 2005.
7. *Rigrod W.W.* Homogeneously broadened CW lasers with uniform distributed loss // *IEEE J. Quant. Electron.* 1978. V. 14. N 5. P. 377–381.
8. *Yakimov M.Yu., Kuznetsov V.A., Solov'yov N.G., Kedrov A.Yu.* Conditions for homogeneity of transverse capacitive periodic-pulsed discharge applied to combined DC-CPD discharge in fast-axial-flow laser // *Int. Conf. on the Methods of Aerophys. Res.: Proc. Part II* / V.M. Fomin, Ed. Novosibirsk: Parallel, 2007. P. 217–223.
9. *Лосев С.А.* Газодинамические лазеры. М.: Наука, 1977. 336 с.
10. *Виттеман В.* CO₂-лазер. М.: Мир, 1990. 360 с.

V.P. Zimakov, A.Yu. Kedrov, V.A. Kuznetsov, N.G. Solov'yov, A.N. Shemyakin, M.Yu. Yakimov.
Combined discharge excitation of fast-flow gas lasers.

In DC-CPD scheme nonself-sustained DC discharge in recombining plasma is used for laser excitation and capacitively coupled periodic-pulsed discharge (CPD) is used to maintain electric conductivity of the active medium. Stability and homogeneity of the discharge plasma provided by CPD are favorable for more efficient DC excitation with respect to self-sustained DC discharge. Time average power of CPD power supply is less than several per cent of DC power supply. Authors have experimentally tested the possibility of efficient application of the DC-CPD method to the development of high power CO₂ lasers. Experimental fast-axial-flow lasers of 1.5 and 3 kW CW and periodic-pulsed output power were built and investigated. Discharge and active medium properties were studied with two (1.5 kW) and four (3 kW) discharge tubes. Lasers demonstrate linear output power 2 kW/m with 20% discharge efficiency. Power scaling up to 6 kW is possible. The influence of CPD arrangement on laser mode selection is discussed.