

А.А. Кузнецов, М.З. Новгородов, В.Н. Очкин, В.М. Тихонов

## КОМПАКТНЫЙ ЩЕЛЕВОЙ CO<sub>2</sub>-ЛАЗЕР, ВОЗБУЖДАЕМЫЙ РАЗРЯДОМ ПОСТОЯННОГО ТОКА С ПРЕДЫОНИЗАЦИЕЙ КОРОТКИМИ ИМПУЛЬСАМИ

Разработан и исследован щелевой CO<sub>2</sub>-лазер с диффузионным охлаждением, возбуждаемый разрядом постоянного тока с предыонизацией высоковольтными импульсами. Измерены вольт-амперные характеристики разряда при различных условиях предыонизации, уровнях энергозатрат, составе и давлении рабочей смеси. Исследованы зависимости мощности лазерной генерации при различных параметрах резонатора и условиях в активной среде.

Получена выходная мощность лазерной генерации, равная 27 Вт, при длине активной среды 22 см, ширине резонатора 14 мм и высоте щели 4 мм. Это соответствует мощности с единицы используемой площади активной среды  $S_A \sim 0,9$  Вт/см<sup>2</sup> и мощности в единицах  $S_A/d \sim 3,5$  Вт/(см<sup>2</sup>/мм). Такие характеристики соизмеримы с лучшими опубликованными данными для щелевых CO<sub>2</sub>-лазеров с ВЧ-возбуждением.

### 1. Введение

В последнее время одно из основных направлений разработок CO<sub>2</sub>-лазеров – увеличение удельных энергетических параметров при компактизации активной среды. Прогресс последних лет связан, с одной стороны, с использованием волноводного принципа и, с другой стороны, с отказом от линейной геометрии разрядного канала.

Наиболее высокие параметры достигнуты при использовании щелевой (планарной) геометрии. При этом практически все исследования и разработки базируются на использовании поперечной ВЧ-накачки, поскольку возбуждение постоянным током не обеспечивает однородности. Для щелевых систем принято характеризовать удельные параметры, отнесенные к единице площади электродов. Из опубликованных данных лучшими по мощности генерации являются результаты [1] 2 Вт/см<sup>2</sup> при энергозатратах  $\sim 13$  Вт/см<sup>2</sup> и величине зазора 2,25 мм. С участием одного из соавторов достигнуты рекордные результаты – 2,1 Вт/см<sup>2</sup> [2], и, по видимому, возможен дальнейший прогресс.

При несомненной перспективности дальнейшей проработки этого метода с ним связаны и определенные трудности. Это, в первую очередь, сложность и дороговизна генераторов в области частот 10<sup>8</sup> Гц и согласование генератора с нагрузкой. Поэтому поиск альтернативных схем возбуждения весьма актуален.

Одна из возможностей рассматривается авторами [3] и связана с использованием постоянного тока, стабилизированного магнитным полем.

Обратим внимание на другую возможность, отмеченную в [4, 5], где было предложено возбуждение активной среды CO<sub>2</sub>-лазеров несамостоятельным разрядом постоянного тока с помощью предыонизации короткими высоковольтными импульсами. В последующих работах этот способ с успехом применялся к крупногабаритным технологическим лазерам с охлаждением газа конвекцией в [6] и диффузией к стенкам коаксиальной камеры в [7]. При этом удельные параметры по лазерной генерации и энергозатратам были заметно улучшены по сравнению с [4, 5]. Остается, однако, неясным вопрос о масштабировании этих параметров при переходе к малогабаритным щелевым системам.

Целью настоящей работы является создание экспериментальной модели компактного щелевого CO<sub>2</sub>-лазера с возбуждением несамостоятельным разрядом постоянного тока, поддерживаемым короткими импульсами, и исследование его удельных энергетических параметров.

### 2. Конструкция лазера

Активная среда создается в разрядной камере между двумя алюмооксидными керамическими пластинами толщиной 1 мм, длиной 22 см, шириной 2,4 см, расстояние между пластинами 4 мм. Разряд постоянного тока протекает между медными электродами, являющимися

одновременно боковыми стенками разрядной камеры. Один из электродов заземлен, к другому подключается источник постоянного тока с напряжением до 1000 В и током до 1 А. Балластное сопротивление в цепи постоянного тока отсутствует, что позволяет избежать традиционных для разрядов постоянного тока потерь мощности. Высоковольтные импульсы предыонизации подаются на внешние диалектовые электроды, прижатые к диэлектрическим пластинам с внешней стороны и имеющие общий контур водяного охлаждения с электродами постоянного тока.

Схема формирования импульсов предыонизации в принципиальном отношении аналогична схемам в [6–8]. Она построена на основе генератора импульсов с емкостным накопителем энергии, работающим в режиме полного разряда. В качестве такого накопителя использовался конденсатор, емкость которого можно менять от 1 до 3 нФ. Разряд конденсатора осуществлялся через тиратрон (ТГИ1-100/8), на управляющий электрод которого подавались импульсы с частотой задающего генератора (1–30 кГц), длительностью 1 мкс и напряжением порядка 200 В. Подведение импульсов к разрядной камере осуществлялось с помощью повышающего импульсного трансформатора. В результате на электроды вспомогательного разряда подавались импульсы напряжением до 10 кВ, частотой следования до 30 кГц и длительностью по основанию порядка 100 нс с длительностью переднего фронта около 20 нс.

Для получения генерации использовался устойчивый оптический резонатор, состоящий из глухого вогнутого зеркала с радиусом кривизны 4 м и плоского выходного зеркала, расположенных на расстоянии 25 см друг от друга. Абсолютные значения мощности генерации измерялись калориметрически. Приемник из Ge–Au фиксировал временное поведение интенсивности с разрешением порядка 1 мкс.

### 3. Условия эксперимента

Варьировались параметры разряда, и регистрировались выходные лазерные характеристики при различных условиях предыонизации, уровнях энерговклада, составе и давлении рабочей смеси. Частота следования предыонизационных импульсов изменялась в пределах от 5 до 30 кГц, при этом амплитуда тока импульсов варьировалась от 4 до 12 А. Максимальная мощность, вкладываемая в разряд источником постоянного тока, составляла около 500 Вт. Энерговклад от импульсного генератора изменялся от 20 до 50 Вт. Охлаждение газовой смеси осуществлялось за счет диффузии к стенкам разрядной камеры. Измерения проводились в слабом протоке газа. Диапазон исследуемых давлений равнялся 20–80 Торр. Использовались газовые смеси с различным содержанием гелия:  $(\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He}) = (1:1:M)$ , где  $M = 4, 5$  и  $8$ . Параметры выходных зеркал, с помощью которых получена лазерная генерация, следующие: рабочая апертура от 10 до 24 мм; коэффициент пропускания от 3 до 28%.

### 4. Результаты и их обсуждение

На рис. 1 показаны вольт-амперные характеристики разряда при различной частоте следования предыонизационных импульсов. Средние по времени напряжение и ток измерялись в цепи источника постоянного тока. Различные зависимости соответствуют различным частотам инициирования 10–30 кГц. Амплитуда импульсов одинакова для всех зависимостей и равняется 8 А, состав рабочей смеси  $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He} = 1:1:8$ , давление газа –  $P = 57$  Торр. Видно, что характер кривых типичен для несамостоятельного разряда: с ростом напряжения растет и ток. Из рис. 1 также следует, что с увеличением частоты повторения импульсов проводимость разрядного промежутка растет.

На рис. 2 приведены экспериментальные зависимости средней мощности лазерной генерации, измеряемой калориметром, от уровня мощности, вкладываемой в разряд при тех же параметрах, что на рис. 1. Видно, что при фиксированном энерговкладе с ростом частоты следования импульсов выходная мощность лазера падает. Это, по-видимому, связано с тем, что для разрядов с меньшей проводимостью заданный уровень вкладываемой мощности достигается при больших значениях приведенной напряженности электрического поля  $E/N$ . Величина напряженности электрического поля  $E$  определялась делением среднего значения напряжения между электродами разряда постоянного тока на расстояние между ними. При оценке плотности частиц  $N$  учитывалось изменение температуры газа в зависимости от энерговклада согласно [9].

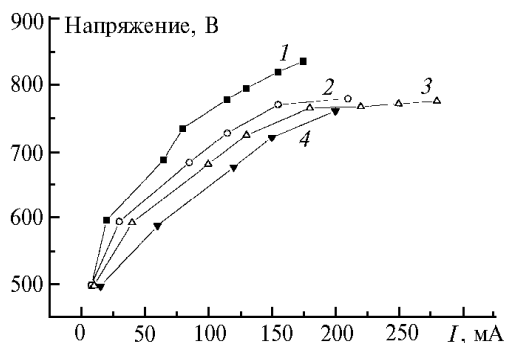


Рис. 1. Вольт-амперные характеристики разряда при различной частоте следования предыонизационных импульсов. Зависимость 1 –  $f=10$ ; 2 –  $f=15$ ; 3 –  $f=20$ ; 4 –  $f=30$  кГц

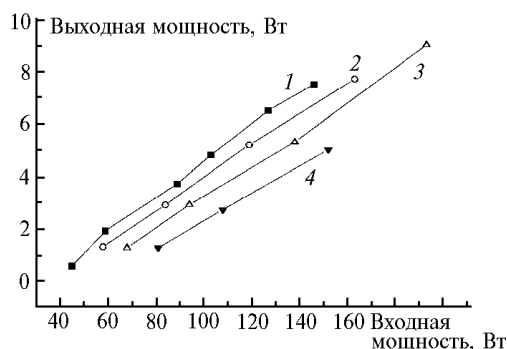


Рис. 2. Зависимость мощности лазерной генерации от мощности, вкладываемой в разряд. Обозначения те же, что на рис. 1

На рис. 3 показаны зависимости выходной мощности, измеряемой калориметрически, от параметра  $E/N$  для двух значений вкладываемой в разряд мощности 80 и 120 Вт. Вариация  $E/N$  достигалась изменением частоты следования импульсов предыонизации. Видно, что для повышения мощности лазерной генерации следует увеличивать значение приведенной напряженности электрического поля, что достигается в данном случае изменением скважности импульсов.

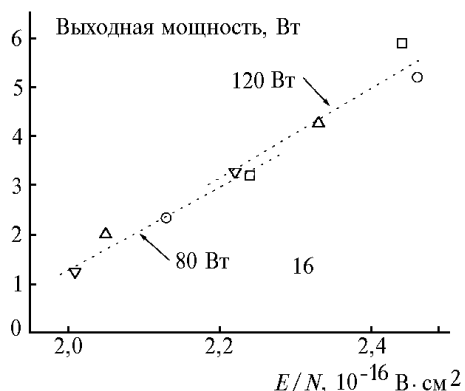


Рис. 3. Зависимость выходной мощности от приведенной напряженности электрического поля. □ –  $f=10$ ; ○ –  $f=15$ ; △ –  $f=20$ ; ▽ –  $f=30$  кГц

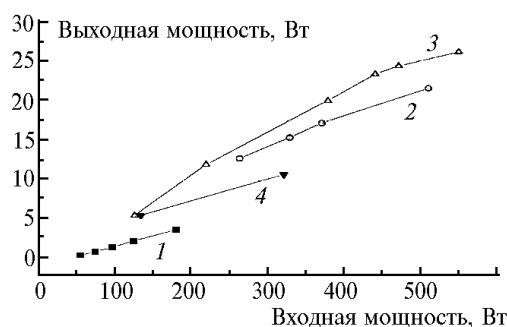


Рис. 4. Зависимости выходной лазерной мощности от электрической мощности, вкладываемой в разряд при различных давлениях газа

Влияние давления рабочей смеси показано на рис. 4, где приведены результаты измерений средней выходной мощности в зависимости от уровня мощности, вкладываемой в разряд при различных давлениях газа. Зависимость 1 получена при давлении  $P=23$  Торр, 2 – 30, 3 – 38, 4 – 57 Торр. Условия предыонизации одинаковы для всех зависимостей: амплитуда импульсов равняется 8 А, частота повторения –  $f=20$  кГц. Состав смеси  $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He} = 1:1:8$ . Из рис. 4 следует, что при таких параметрах величина давления, оптимального по выходной мощности, лежит в области 40 Торр.

В результате проведенных исследований влияния параметров импульсов предыонизации на мощности лазерной генерации было установлено, что величина амплитуды импульсов, обеспечивающая максимальный энергоотъем, зависит как от давления рабочей смеси, так и от уровня мощности, вкладываемой в разряд.

Максимальная величина мощности лазерной генерации 27 Вт получена с помощью зеркала шириной 14 мм, имеющего коэффициент пропускания 6%. Это соответствует следующим удельным параметрам: погонная мощность (с единицы длины активной среды) составляет около 1,2 Вт/см; мощность с единицы площади используемой активной среды  $S_A \sim 0,9$  Вт/см<sup>2</sup>; мощность в единицах  $S_A/d$  ( $d$  – высота щели), введенных в [10] из соображений масштабирования для ВЧ-разрядов, равна 3,5 Вт/(см<sup>2</sup>/мм). Параметры разряда соответствуют рис. 4, из которого видно, что зависимость мощности лазерной генерации от уровня энергозатрат не достигала насыщения. В наших экспериментах ограничение энергозатрат  $\sim 550$  Вт было связано

с техническими причинами. Вместе с тем эти характеристики, несмотря на их предварительность, соизмеримы с лучшими опубликованными данными для щелевых CO<sub>2</sub>-лазеров с ВЧ-возбуждением. Можно надеяться, что оптимизация условий эксперимента, в том числе параметров резонатора, позволит улучшить абсолютные и удельные энергетические характеристики.

Исследование временных зависимостей мощности лазера показывает, что излучение модулировано с частотой следования импульсов предыонизации. Величина глубины модуляции  $m$ , определяемая как отношение наибольшего спада мощности к ее максимальному значению  $m = (P_{\max} - P_{\min})/P_{\max}$ , зависит от частоты, изменяясь от 100% при 7 кГц до 20% при 30 кГц, т.е. режим при высоких частотах близок к стационарному. По-видимому, простота перехода от стационарного режима к импульсно-периодическому представляет интерес для технологических применений.

## 5. Заключение

Разработан и исследован щелевой CO<sub>2</sub>-лазер, возбуждаемый разрядом постоянного тока с предыонизацией короткими высоковольтными импульсами. Измеренные вольт-амперные характеристики разряда при различных условиях предыонизации, уровнях энерговклада, составе и давлении рабочей смеси говорят о несамостоятельности разряда. Исследованы зависимости мощности лазерной генерации при различных параметрах резонатора и условиях в активной среде.

Получена выходная мощность лазерной генерации, равная 27 Вт при длине активной среды 22 см, ширине резонатора 14 мм и высоте щели 4 мм. Это соответствует мощности с единицы используемой площади активной среды  $S_A \sim 0,9$  Вт/см<sup>2</sup> и мощности в единицах  $S_A/d \sim 3,5$  Вт/(см<sup>2</sup>/мм). Такие характеристики соизмеримы с лучшими опубликованными данными для щелевых CO<sub>2</sub>-лазеров с ВЧ-возбуждением. Можно надеяться, что оптимизация параметров резонатора и усовершенствование параметров схемы возбуждения позволят улучшить абсолютные и удельные энергетические характеристики. При этом система возбуждения активной среды представляется существенно более простой по сравнению с ВЧ-возбуждением.

Представляется целесообразным дальнейшее многопараметрическое исследование такого лазера. В частности, интересны дальнейшие поиски режимов с более гибким управлением параметром  $E/N$ . Важным было бы прямое сопоставление результатов при ВЧ-накачке и исследуемой схеме в идентичных условиях. Отдельного внимания заслуживает исследование отпаянного режима работы.

Авторы глубоко признательны Н.А. Генералову и М.Ю. Якимову за подробные консультации при постановке и выполнении работы.

Работа поддержана грантом РФФИ № 96-02-16442-а.

1. Abramski K.M., Colley A.D., Baker H.J., Hall D.R. // Appl. Phys. Lett. 1989. V. 54. N 19. P. 1833–1835.
2. Tskhai S.N., Wittman W.J., Udalov Yu.B., Peters P.J.M., Ochkin V.N. // The catalytic activity of gold plated electrodes in a slab geometry CO<sub>2</sub>-laser. (Subm. to Appl. Phys. B.).
3. Macken J. // Proc. Laser Advanced Materials Processing (LAMP'92). 1992. V. 1. P. 67–72.
4. Raily J.P. // J. Appl. Phys. 1972. V. 43. N 8. P. 3411–3416.
5. Hill A.E. // Appl. Lett. 1973. V. 22. N 12. P. 670–673.
6. Генералов Н.А., Зимаков В.П., Косынкин В.Д., Райзер Ю.П., Соловьев Н.Г. // Квантовая электроника. 1982. Т. 9. № 8. С. 1549–1557.
7. Колесников Н.Ю., Орлов Б.В., Польский Ю.Е., Хохлов Ю.М. // Квантовая электроника. 1984. Т. 11. № 5. С. 957–961.
8. Айбатов Л.Р., Орлов Б.В., Польский Ю.Е., Хохлов Ю.М. // Радиоэлектроника и электроника. 1986. Т. 7. № 7. С. 1352–1357.
9. Жеенбаев Н.Ж., Оторбаев Д.К., Очкин В.Н. Спектроскопические исследования плазмы капиллярного разряда волноводного CO<sub>2</sub>-лазера. М., 1990. 20 с. (Препринт/Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, № 119).
10. Nowak R., Opower H., Wessel K., Kruger H., Haas W. // Laser und Optoelectronik. 1991. V. 23. № 3. P. 68–81.

A. A. Kuznetsov, M. Z. Novgorodov, V. N. Ochkin, V. M. Tikhonov. **Small-size Slab CO<sub>2</sub>-Laser Excited by DC Discharge with High-Pulse preionization.**

Slab  $\tilde{N}_2$ -laser with diffusion cooling excited by DC discharge sustained by high voltage high repetition rate pulses preionization is developed and investigated. Voltcurrent characteristics of discharge are measured under different conditions of preionization, energy deposit, pressure, and composition of gas mixture. Dependences of output power on the cavity various parameters and active medium conditions are investigated.

At length of active medium of 22 cm, resonator width of 14 mm and slab height  $d = 4$  mm the output power is equal to 27 W. This value corresponds to specific power per 1 cm<sup>2</sup> of active medium  $S_A \sim 0,9$  W/cm<sup>2</sup> and power in units  $S_A/d \sim 3,5$  W/(cm<sup>2</sup>/mm). These characteristics are comparable with the best ones available for HF-excited slab CO<sub>2</sub>-laser.