

# Планарный CO<sub>2</sub>-лазер с импульсно-периодической СВЧ накачкой

А.П.Минеев, С.М.Нефедов, П.П.Пашинин

*Экспериментально исследован планарный CO<sub>2</sub>-лазер с импульсно-периодической СВЧ накачкой и длинами разрядного канала 250 и 470 мм. Достигнута средняя мощность генерации 60 Вт на длине волны излучения 10.6 мкм. В импульсно-периодическом режиме получена пиковая мощность 1300 Вт. Исследованы форма и энергия импульса излучения CO<sub>2</sub>-лазера в зависимости от вкладываемой мощности, состава рабочей смеси и ее давления, частоты следования и длительности импульсов накачки.*

**Ключевые слова:** планарный волноводный CO<sub>2</sub>-лазер, СВЧ разряд, магнетрон, пиковая мощность.

## 1. Введение

Важной задачей современных исследований планарных волноводных CO<sub>2</sub>-лазеров, возбуждаемых ВЧ и СВЧ разрядами в импульсно-периодическом режиме, является повышение пиковой мощности и уменьшение длительности импульсов лазерной генерации. Так, в экспериментах с ВЧ/СВЧ накачкой CO<sub>2</sub>-лазеров была получена последовательность лазерных импульсов длительностью 10–50 мкс при пиковой мощности ~1 кВт и частотах следования, лежащих в килогерцевом диапазоне. Средняя мощность лазерного излучения составляла в этом случае 10–100 Вт [1–5].

Для многих технологических применений, например для скрайбирования поверхности или прошивки отверстий, необходимы CO<sub>2</sub>-лазеры, работающие в режиме одиночных или периодических импульсов. При этом сочетание высокой пиковой и небольшой средней мощностей имеет свои преимущества, поскольку из-за небольшого прогрева зоны воздействия происходит меньшее обугливание, в частности органических материалов. Изменяя главным образом частоту следования, а также длительность и пиковую мощность импульсов, можно эффективно регулировать тепловложение в материал и достигать высокого качества резки

При использовании контролируемого импульсного режима генерации лазера в медицине эффект рассечения биотканей достигается за счет серии микровзрывов в их поверхностном слое. Для данного режима характерны минимальные термические повреждения, вплоть до их полного отсутствия. В отличие от ТЕА CO<sub>2</sub>-лазера, длительность импульса которого определяется физическими процессами, а средняя мощность может изменяться только за счет варьирования частоты, применение магнетрона в качестве мощного СВЧ генератора (частота

2.45 ГГц) позволяет достаточно просто изменять частоту следования и длительность импульсов накачки. В наших экспериментах использовался магнетрон 2М-130 с импульсной мощностью до 8 кВт и усредненной мощностью до 1.8 кВт (в ВЧ генераторах амплитуда выходного сигнала практически одинакова как в импульсном, так и в непрерывном режиме работы, а стоимость ВЧ генератора с выходной мощностью 10 кВт высока).

Исследованию компактных планарных волноводных CO<sub>2</sub>-лазеров с импульсной ВЧ накачкой посвящено несколько работ [6–8]. В связи с этим представляет интерес CO<sub>2</sub>-лазер с СВЧ накачкой, работающий в импульсно-периодическом режиме.

Целью настоящей работы было изучение выходных характеристик планарного волноводного лазера с накачкой импульсно-периодическим СВЧ разрядом. Проведены эксперименты по исследованию зависимости импульсных характеристик CO<sub>2</sub>-лазера от вкладываемой в СВЧ разряд мощности, состава рабочей смеси и ее давления, частоты следования и длительности импульсов накачки. Характерные времена, форма выходного импульса лазерного излучения и ее эволюция изучены и зарегистрированы при различных условиях эксперимента.

## 2. Условия эксперимента

Блок-схема экспериментальной установки для исследования CO<sub>2</sub>-лазера с СВЧ накачкой активной среды, представлена на рис.1.

СВЧ-резонатор, представляющий собой волновод 1 размером 90 × 45 × 800 мм с прямоугольным сечением, настраивается с одной стороны короткозамыкающим поршнем 2. Со стороны магнетрона 3 настройка резонатора осуществляется с помощью согласующего E–H трансформатора 4, выполненного на базе двойного волноводного тройника. Источником СВЧ накачки лазера служит импульсный блок питания типа РМ-740Т 5 с магнетроном 2М-130 3. Активный объем лазерного излучателя 6 представляет собой полость, образованную двумя профилированными алюминиевыми пластинами, которые сжимают кварцевую пластинку 13 размером 2 × 30 × 300 (500) мм, расположенную длинной боковой стороной

А.П.Минеев, С.М.Нефедов, П.П.Пашинин. Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: mineev@kapella.gpi.ru

Поступила в редакцию 14 июля 2010 г., после доработки – 5 октября 2010 г.

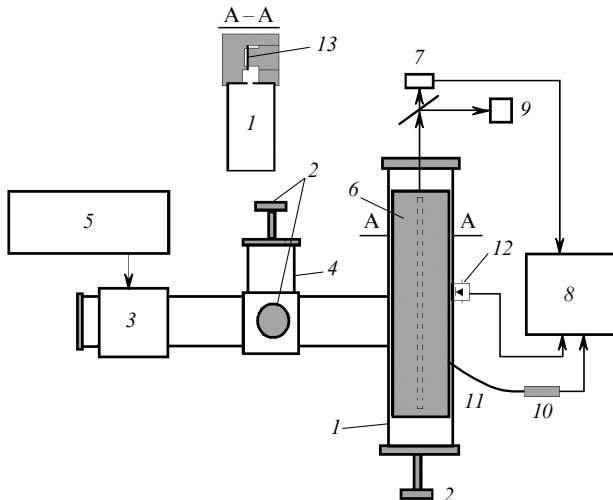


Рис.1. Блок-схема экспериментальной установки: 1 – волновод; 2 – короткозамыкающие поршни; 3 – магнетрон; 4 – согласующий  $E-H$ -трансформатор; 5 – блок питания; 6 – лазерный излучатель; 7 – пироприемник; 8 – осциллограф; 9 – измеритель мощности; 10 – фотоэлектронный умножитель; 11 – световод; 12 – СВЧ детектор; 13 – разрядный канал.

вдоль щели СВЧ резонатора. Диэлектрическая пластина используется в качестве распределенного реактивного балластного сопротивления (на котором не происходит потерь мощности), стабилизирующего разряд. Разрядный канал размером  $2 \times 25 \times 250$  мм (лазерный излучатель А) или  $2 \times 25 \times 470$  мм (лазерный излучатель Б) образован зазором между отполированными алюминиевой и кварцевой пластинами. В конструкции предусмотрено водяное охлаждение лазерного излучателя. Применение планарного разряда обеспечивает ряд преимуществ: эффективный отвод тепла от стенок, компактность излучателя, невысокое напряжение пробоя, хорошее качество выходного пучка и высокая удельная выходная мощность лазерного излучения.

Для подвода СВЧ мощности к разряду использовалась излучающая щель (аналог щелевой антенны) в полом резонаторе, настроенном на частоту генерации магнетрона, а сама разрядная структура и оптический резонатор находились вне СВЧ резонатора [3].

Исследования проводились для газовой смеси различного состава при давлениях 10–50 Тор, длительностях импульсов СВЧ накачки 20–50 мкс и частотах следования 0.4–10 кГц. Форма импульса лазерного излучения контролировалась пироприемником БП-10 7 с временным разрешением  $10^{-8}$  с и двухканальным цифровым осциллографом LeCroy-432 8 с полосой пропускания 350 МГц. Мощность лазерного излучения измерялась прибором NOVA-2 9 (OPHIR) с термоэлектрической головкой (апертура 29 мм), свечение разряда в диапазоне длин волн 160–600 нм контролировалось фотоэлектронным умножителем ФЭУ-39А 10, связанным с разрядным промежутком волоконным световодом 11. Огибающая радиоимпульса накачки регистрировалась детекторной СВЧ головкой 12.

Лазерный резонатор образован двумя зеркалами: глухим сферическим медным зеркалом с радиусом кривизны 5 м и коэффициентом отражения 98.8% и выходным плоскопараллельным германиевым зеркалом с коэффициентами пропускания 5% либо 10%. Зеркала расположены на расстояниях 5 мм от разрядного канала,

что несколько предохраняет их от воздействия плазмы газового разряда.

Длина волны СВЧ излучения в волноводе отличается от длины волны  $\lambda_{\text{mag}}$  излучения, генерируемого магнетроном. При размере широкой стенки волновода 9 см и  $\lambda_{\text{mag}} = 12.24$  см длина волны в волноводе будет равна  $\sim 16.7$  см.

Простейшим типом колебаний в прямоугольном резонаторе являются колебания  $H_{101}$ , соответствующие стоячим волнам  $H_{10}$  волновода с длиной, равной половине длины волны в волноводе. Длительности разрядного канала 250 мм будут соответствовать три полуволны распределения электрического поля стоячей волны. Таким образом, распределение напряженности поля вдоль разрядного промежутка имеет три максимума и, следовательно, является существенно неоднородным. Экспериментальное исследование свечения разряда показало, что при увеличении вкладываемой мощности или при уменьшении давления газа происходит значительное уменьшение размеров темных пятен вдоль разрядного канала, вплоть до полного их исчезновения.

### 3. Результаты эксперимента

Эффективность и мощность генерации лазера существенно зависят от состава газовой смеси. На рис.2 представлены осциллограммы импульсов лазерного излучения для обычной рабочей смеси газов и для смеси без азота, а также форма огибающей импульса СВЧ накачки. Следует отметить некоторое различие в форме лазерных импульсов для этих смесей. Проведенные ранее измерения [3] показали, что добавка азота увеличивает выходную мощность лазерного излучения в два раза.

Рост мощности генерации с увеличением мощности, вводимой в разряд, ограничивается ростом температуры рабочей смеси. Изменение формы и длительности импульса лазерного излучения при изменении длительности импульса накачки в диапазоне 20–45 мкс показано на рис.3. Видно, что увеличение длительности импульса накачки свыше 30 мкс приводит к уменьшению как амплитуды, так и длительности лазерного импульса из-за перегрева активной среды.

На рис.4 приведены зависимости средней выходной мощности лазера от средней мощности накачки для нескольких частот следования импульсов накачки. При этом средняя мощность варьировалась за счет измене-

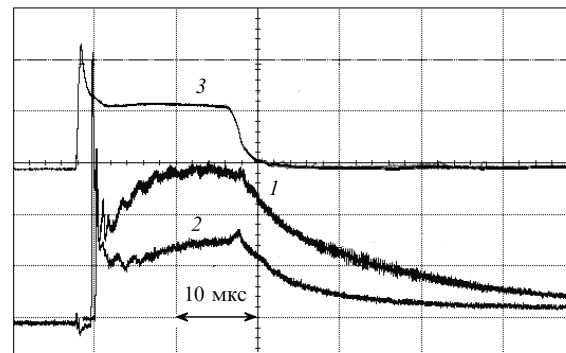


Рис.2. Осциллограммы импульсов лазерного излучения для рабочей смеси  $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He}:\text{Xe} = 3:3:13:1$  (1) и смеси без азота  $\text{CO}_2:\text{He}:\text{Xe} = 4:15:1$  (2), а также огибающая импульса накачки (3). Давление смеси 30 Тор, частота следования импульсов накачки 1000 Гц.



Рис.3. Зависимость длительности импульса лазерного излучения (по попувысоте) от длительности импульса накачки. На вставке – осциллограммы импульсов лазерного излучения (1) и огибающие радиоимпульсов СВЧ накачки (2). Давление газа 30 Тор, частота следования импульсов 500 Гц.

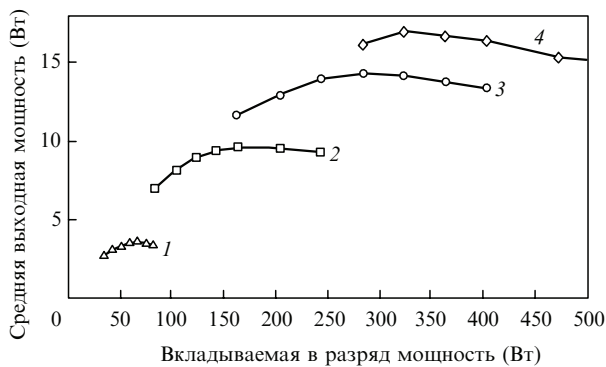


Рис.4. Зависимости средней выходной мощности лазера (лазерный излучатель А) от мощности накачки при частотах следования импульсов накачки 400 (1), 1000 (2), 2000 (3) и 3300 Гц (4). Смесь CO<sub>2</sub>:N<sub>2</sub>:He:Xe = 3:3:12:2 при давлении 30 Тор.

ния длительности СВЧ импульсов в диапазоне 20–50 мкс. Импульсная мощность накачки составляла 4 кВт. Из рис.4 видно, что при одинаковой вкладываемой СВЧ мощности, но при разных частотах следования импульсов мы получаем различные выходные мощности лазерного излучения. Отсюда следует вывод о том, что предпочтительным является режим накачки импульсами меньшей длительности при большей частоте их следования.

На рис.5 представлены зависимости длительности лазерного импульса (по попувысоте) и эволюция формы импульса от давления рабочего газа. Длительность импульса в значительной степени определяется временем релаксации возбужденных молекул. С ростом давления это время уменьшается, поэтому от давления зависит также и длительность импульса: при повышении давления мы получаем более короткие импульсы с более высокими энергией и пиковой мощностью. Отсюда следует необходимость работы при максимально высоком давлении, однако в этом случае нужно учитывать, что с увеличением давления разряд становится неустойчивым.

На рис.6,а показана зависимость времени задержки τ лазерного импульса от средней мощности СВЧ накачки. Резкий пик на переднем фронте импульса лазерного излучения (рис.6,б) похож на форму выходного импульса ТЕА лазера при так называемом режиме включения усиления. Этот пик появляется при достаточном крутом переднем фронте импульса накачки [9]. Из осциллограмм

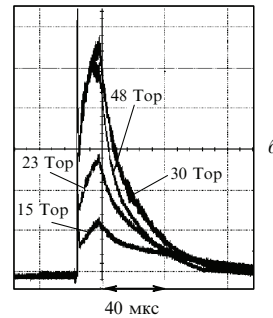
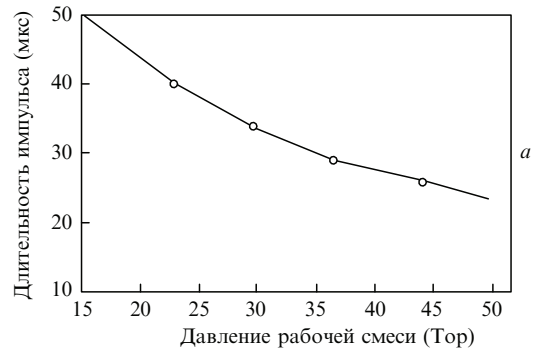


Рис.5. Зависимости длительности (по попувысоте) (а) и формы (б) импульса лазерного излучения от давления смеси CO<sub>2</sub>:N<sub>2</sub>:He:Xe = 3:3:13:1. Длительность импульсов накачки 20 мкс, частота их следования 1000 Гц.

рис.6,в видно, что с увеличением вкладываемой в разряд мощности форма лазерного импульса изменяется от практически пологой (кривые 1, 2) (как при непрерывной накачке) до формы с характерным «горбом» (кривая 3).

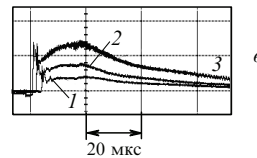
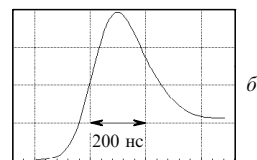


Рис.6. Время задержки τ лазерного импульса в зависимости от вкладываемой в разряд СВЧ мощности (а), а также форма переднего фронта (б) и эволюция формы лазерного импульса при СВЧ мощности накачки 50 (1), 70 (2) и 90 Вт (3) (в). Длительность импульсов накачки 20 мкс, частота их следования 1000 Гц. Смесь CO<sub>2</sub>:N<sub>2</sub>:He:Xe = 3:3:13:1 при давлении 23 Тор. На вставке – осциллограмма лазерного импульса (1) и огибающая импульса накачки (2).



Рис.7. Зависимость выходной импульсной мощности лазера от импульсной мощности СВЧ накачки (лазерный излучатель Б). Смесь  $\text{CO}_2 : \text{N}_2 : \text{He} : \text{Xe} = 3 : 3 : 13 : 1$  при давлении 50 Тор, скорость прокачки рабочей смеси газа  $\sim 0.1$  л/с. Длительность импульсов накачки 20 мкс, частота их следования 400 Гц.

Время задержки импульса лазерной генерации относительно импульса накачки составляет 4–10 мкс.

На рис.7 представлена зависимость выходной импульсной мощности  $\text{CO}_2$ -лазера от импульсной мощности СВЧ накачки. Видно, что для данных состава смеси, давления и объема активной среды (лазерный излучатель Б) еще нет насыщения, и поэтому существует возможность получения мощности, превышающей 1.3 кВт.

Зависимости средней выходной мощности лазера с СВЧ возбуждением от частоты следования импульсов накачки при различных давлениях рабочего газа приведены на рис.8. Видно, что максимальные мощности лазерной генерации получены при частотах следования импульсов накачки 3–5 кГц.

Для рассматриваемого случая оценим время температурной релаксации смеси газов  $\tau_T$  для межэлектродного зазора  $h = 2$  мм по формуле  $\tau_T = A^2/\chi$  [10], где  $A = h/\pi$  – диффузионная длина;  $\chi$  – температуропроводность газа, равная  $20 \text{ см}^2/\text{с}$  для давления  $p = 30$  Тор. При этом для обратного времени диффузионного теплопровода  $1/\tau_T$  получим следующие значения: 4.9 кГц при  $p = 30$  Тор, 3.9 кГц при  $p = 37$  Тор и 3.2 кГц при  $p = 45$  Тор. Эти значения практически совпадают с частотой накачки, при превышении которой мощность лазерного излучения начинает быстро падать. При уменьшении давления макси-

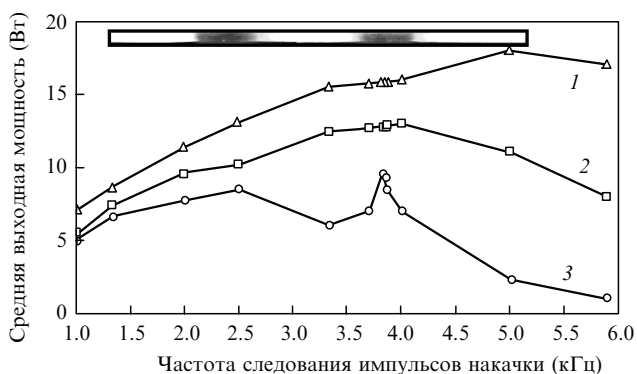


Рис.8. Зависимости средней выходной мощности лазера с СВЧ возбуждением (лазерный излучатель А) от частоты следования импульсов накачки при давлениях рабочего газа 30 (1), 37 (2) и 45 Тор (3). Импульсная мощность и длительность импульса накачки 3 кВт и 20 мкс соответственно. Смесь  $\text{CO}_2 : \text{N}_2 : \text{He} : \text{Xe} = 3 : 3 : 13 : 1$ . Вверху – фотография свечения плазмы вдоль разрядного канала при давлении газа 30 Тор, частоте следования импульсов 1 кГц и средней мощности накачки 50 Вт.

мум выходной мощности сдвигается в сторону больших частот следования импульсов накачки, что связано с увеличением температуропроводности газа.

При увеличении давления газа (кривая 3 на рис.8) на частоте накачки 3.8 кГц появляется нехарактерный пик выходной мощности. Этот эффект, по-видимому, связан с акустическим резонансом в излучателе лазера. Причиной возникновения акустического воздействия является изменение температуры газа вследствие импульсно-периодического режима модуляции мощности СВЧ накачки. Как сказано выше, для рассматриваемой конструкции распределение напряженности электрического поля вдоль разрядного канала является неравномерным. С увеличением давления смеси неравномерность горения разряда проявляется сильнее (см. фотографию свечения плазмы вдоль разрядного канала на рис.8). Оценка длины волны звука для частоты возбуждения 3.8 кГц дает значение, кратное длине СВЧ резонатора. Возможно, что наличие акустического резонанса приводит к улучшению равномерности горения разряда. Следует учитывать, что увеличение мощности накачки может привести к переходу разряда в так называемую  $\gamma$ -фазу, нежелательную для эффективной работы  $\text{CO}_2$ -лазера [10].

Для нахождения оптимальных по выходной мощности условий работы планарного  $\text{CO}_2$ -лазера с импульсно-периодической СВЧ накачкой был проведен ряд экспериментов, в которых изменялись режим накачки, состав и давление рабочей смеси газов. На основе результатов этих экспериментов можно сделать вывод о том, что для увеличения выходной мощности наших излучателей необходимы более короткие импульсы накачки. К сожалению, существующий блок питания магнетрона не позволяет получать импульсы накачки длительностью менее 20 мкс.

Максимальная выходная мощность для лазерного излучателя А составила 25 Вт, а для излучателя Б – 43 Вт, при давлении рабочей смеси 30 Тор без ее прокачки. Таким образом, можно говорить о хорошей масштабируемости такого типа лазеров с СВЧ накачкой. При скорости прокачки газа  $\sim 0.1$  л/с получена выходная мощность лазерного излучения для первого и второго излучателей 37 и 51 Вт соответственно при давлении рабочей смеси 30 Тор. Дальнейшие эксперименты показали, что

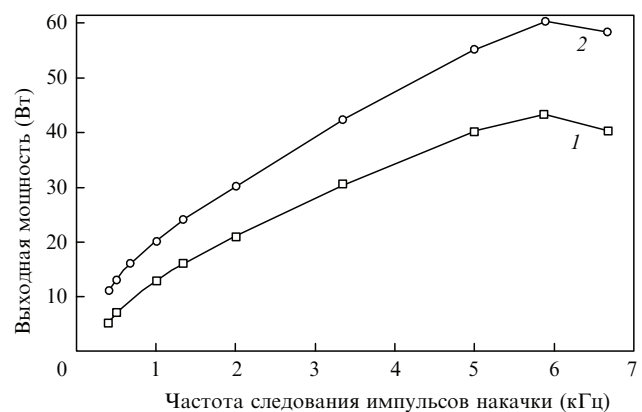


Рис.9. Выходная мощность лазера в зависимости от частоты следования импульсов СВЧ накачки (лазерный излучатель Б). Смесь  $\text{CO}_2 : \text{N}_2 : \text{He} : \text{Xe} = 3 : 3 : 13 : 1$  при давлении 30 Тор без прокачки газа (1) и при давлении 50 Тор со скоростью прокачки  $\sim 0.1$  л/с (2). Длительность импульса накачки 20 мкс, пропускание выходного зеркала 10 %.

Табл.1.

Давление смеси (Тор)		Мощность лазера (Вт)	
Без прокачки газа	С прокачкой	Излучатель А	Излучатель Б
30		25	43
50		22	38
	30	37	51
	50	41	61

при прокачке рабочей смеси оптимальное давление меняется и максимальная мощность лазерного излучения достигается при давлении 50 Тор (рис.9).

В табл.1 приведены выходные характеристики двух типов лазерных излучателей.

Таким образом, даже небольшая скорость прокачки рабочей смеси газов позволяет увеличить максимальную выходную мощность лазера на 40 % – 50 %.

#### 4. Заключение

В настоящей работе проведены исследования планарного CO<sub>2</sub>-лазера с импульсно-периодической СВЧ накачкой и двумя вариантами конструкции лазерного излучателя. Плотность импульсной мощности накачки достигала 400 Вт/см<sup>3</sup>. Форма выходного импульса лазерного излучения и ее эволюция изучены при различных условиях эксперимента. Характерное время задержки импульса лазерной генерации относительно импульса накачки составило 4–10 мкс. При уменьшении давления смеси максимум выходной мощности лазерного излучения сдвигался в сторону больших частот следования импульсов накачки. Экспериментально подтверждена пред-

почтительность режима накачки импульсами меньшей длительности при большей частоте их следования. Установлена возможность получения высокой пиковой мощности излучения планарного CO<sub>2</sub>-лазера. В экспериментах импульсная выходная мощность в случае медленной прокачки рабочей смеси достигала 1300 Вт при длительности импульсов накачки 20 мкс и частоте их следования 400 Гц (лазерный излучатель Б). Максимальная средняя мощность генерации составила 60 Вт. Сравнение двух вариантов лазерных излучателей, различающихся длиной разрядного канала, показывает возможность масштабирования такого типа лазеров. Небольшая скорость прокачки рабочей смеси газов позволяет увеличить максимальную выходную мощность лазера на 40 % – 50 %.

1. Nishimae J., Yoshizawa K. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **1225**, 340 (1990).
2. Shahadi A., Sintov Y., Jerby E. *Microwave Opt. Technol. Lett.*, **36** (2), 115 (2003).
3. Минеев А.П., Нефедов С.М., Пашинин П.П. *Квантовая электроника*, **37**, 950 (2007).
4. Wester R., Seiwert S. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **24**, 1102 (1991).
5. Mineev A.P., Nefedov S.M., Pashinin P.P. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **5137**, 288 (2003).
6. Lapucci A., Mascacchi S., Rossetti F. *Opt. Laser Technol.*, **28** (3), 187 (1996).
7. Plinski E.F., Witkowski J.S., Majewski B.W., Abramski K.M. *Appl. Phys. B*, **76**, 375 (2003).
8. Дутов А.И., Евстратов И.Ю., Иванова В.Н., Кулешова А.А., Мотовилов С.А., Новоселов Н.А., Семенов В.Е., Соколов В.Н., Юрьев М.С. *Квантовая электроника*, **23**, 499 (1996).
9. Виттеман В. *CO<sub>2</sub>-лазер* (М.: Мир, 1990).
10. Райзер Ю.П., Шнейдер М.Н., Яценко Н.А. *Высокочастотный емкостной разряд* (М.: Наука, 1995).