

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

А.П.Минеев, С.М.Нефедов, П.П.Пашинин

*Исследованы характеристики излучения компактного планарного CO<sub>2</sub>-лазера с диффузионным охлаждением, возбуждаемого СВЧ разрядом на частоте 2.45 ГГц. В качестве источника накачки был применен магнетрон от бытовой микроволновой печи. Получена средняя мощность генерации 25 Вт и КПД ~13% на длине волны излучения  $\lambda = 10.6$  мкм. В импульсно-периодическом режиме достигнута пиковая мощность лазерного излучения 580 Вт при длительности импульса накачки 20 мкс и частоте следования 400 Гц. Проведены эксперименты по исследованию параметров CO<sub>2</sub>-лазера в зависимости от вкладываемой импульсной мощности в диапазоне 0.8–8 кВт, а также от состава рабочей смеси, давления, частоты повторения и длительности импульса накачки. Для данной конструкции лазера определены оптимальные соотношения этих параметров.*

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

## 1. Введение

В настоящее время быстрыми темпами развиваются лазерные системы на основе нового поколения газоразрядных молекулярных лазеров – планарных волноводных CO<sub>2</sub>-лазеров, возбуждаемых разрядами высокой частоты, с гибридным волноводно-неустойчивым резонатором. Лазеры с диффузионным охлаждением (без громоздкой системы прокачки рабочего газа) широко используются при создании компактных, мощных устройств непрерывного и импульсно-периодического действия, имеющих повышенные удельные характеристики и высокое качество оптического излучения [1–8]. При диффузионном охлаждении разряда экспериментально достигнут удельный энергоём с единицы площади активной среды планарных структур до 20 кВт/м<sup>2</sup>.

В последние годы наметился повышенный интерес к применению СВЧ разряда для накачки CO<sub>2</sub>-лазеров [9–12], связанный, в первую очередь, с доступностью магнетронов на частоте 2.45 ГГц (они широко используются в СВЧ печах). Кроме того, применение СВЧ разряда в диапазоне частот 2–10 ГГц для накачки лазеров имеет также ряд достоинств и преимуществ перед разрядами постоянного и ВЧ тока, а именно: высокий КПД (более 70 %) и киловаттный уровень мощности магнетронов – СВЧ источников; компактность магнетронов, низкая их стоимость и возможность работы в импульсном режиме; отсутствие активного балластного сопротивления и приэлектродного падения потенциала, обеспечивающее эффективный энергоклад в плазму СВЧ разряда; возможность организации безэлектродного разряда, что облегчает проблемы, связанные с распылением материала электродов, плазмохимией и долговечностью рабочей лазерной смеси газов; отсутствие высокого напряжения на

разряде и, следовательно, безопасность и надежность конструкции. Кроме того, следует отметить повышенную механическую прочность оболочки полностью металлической СВЧ разрядной структуры.

Достигнутый уровень усредненной выходной лазерной мощности более 100 Вт в импульсно-периодическом режиме генерации [9] указывает на перспективность подобных систем при создании нового поколения мощных, компактных, отпаянных, дешевых, простых по конструкции CO<sub>2</sub>-лазеров, исключая громоздкую систему прокачки рабочего газа. В связи с этим исследования планарных волноводных CO<sub>2</sub>-лазеров с СВЧ накачкой и диффузионным охлаждением, несомненно, актуальны.

Целью настоящей работы является обсуждение проблем и путей решения задач, которые возникают при использовании СВЧ разряда для возбуждения планарных CO<sub>2</sub>-лазеров. Наиболее важны следующие задачи: а) поиск новых и совершенствование существующих схем волноводных систем планарного типа, а также нахождение конструкционных материалов для них; б) изучение процессов согласования и схем подвода СВЧ мощности от магнетрона к разрядной системе с учетом величины и формы электромагнитного поля в ней; в) исследование механизмов протекания тока, энергоклада, пространственной структуры, стабильности, устойчивости и масштабируемости мощных широкоапертурных СВЧ разрядов; г) изучение параметров и условий поддержания низкотемпературной плазмы СВЧ разряда, обеспечивающей эффективное преобразование энергии разряда в когерентное оптическое излучение в молекулярных CO<sub>2</sub>-лазерных смесях при давлениях вплоть до атмосферного.

На сегодняшний день существуют следующие подходы к решению этих задач:

1. В работах [9, 10] использовались как полностью диэлектрические, так и металлодиэлектрические планарные CO<sub>2</sub>-лазерные структуры, изготовленные из традиционных для ВЧ способа накачки материалов, которые обладают хорошей теплопроводностью и низкими распределенными волноводными потерями. Нам представ-

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 31 мая 2007 г., после доработки – 13 июля 2007 г.

ляется перспективным применение полностью металлических планарных структур, изготовленных из алюминия, на поверхность которого методом оксидирования нанесен тонкий (порядка 10 мкм) слой Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

2. Для подвода СВЧ мощности к разряду использовалась излучающая щель в объемном резонаторе, в котором возбуждалась стоячая волна, а сама разрядная структура и оптический резонатор находились вне СВЧ резонатора [9, 10]. В схеме подвода энергии (магнетрон – объемный резонатор – разрядная структура) неизбежно возникают потери на переизлучение и согласование, поэтому для уменьшения этих потерь и упрощения схемы доставки СВЧ мощности целесообразно совмещение объемного СВЧ резонатора и разряда.

3. Для организации широкоапертурного и однородного разряда важно применение импульсно-периодического режима генерации СВЧ мощности на более высоком уровне мощности в импульсе.

4. Для повышения эффективности преобразования СВЧ мощности в лазерное излучение требуется импульсное возбуждение активной среды лазера с длительностями импульсов 10–100 микросекунд и частотой повторения до 60 кГц.

## 2. Схема лазера с СВЧ возбуждением

Схема планарного CO<sub>2</sub>-лазера с СВЧ накачкой представлена на рис. 1. В качестве источника управления магнетроном 1 использовался импульсный блок питания типа РМ-740Т с эффективностью преобразования сетевого напряжения в напряжение питания магнетрона, превышающей 90%. В наших экспериментах мы использовали магнетрон 2М-130 от микроволновой печи, имеющий импульсную мощность до 8 кВт и усредненную – до 1.8 кВт.

Прямоугольный волновод размерами 90 × 45 × 500 мм образует объемный СВЧ резонатор 6, который с одной стороны ограничивается и настраивается короткозамыкающим плунжером 2. Со стороны ввода СВЧ мощности согласование магнетрона с резонатором осуществляется с помощью трансформатора полных сопротивлений, выполненного на базе двойного волноводного тройника 5 с двумя такими же подвижными плунжерами 2. СВЧ мощ-

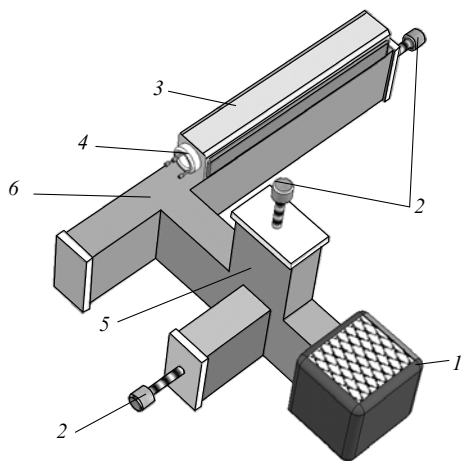


Рис. 1. Схема планарного CO<sub>2</sub>-лазера: 1 – магнетрон; 2 – короткозамыкающие плунжеры; 3 – лазерная головка; 4 – выходное зеркало; 5 – двойной волноводный тройник; 6 – СВЧ резонатор.

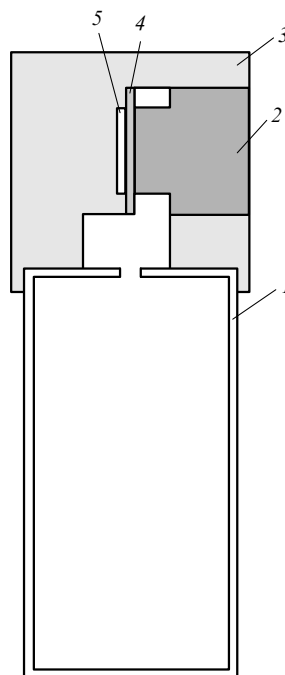


Рис. 2. Разрез лазерной головки планарного CO<sub>2</sub>-лазера: 1 – прямоугольный волновод сечением 90 × 45 мм; 2, 3 – профилированные алюминиевые пластины; 4 – кварцевая пластина; 5 – разрядный канал 2 × 25 × 250 мм.

ность выводится из объемного резонатора через протяженную щель в узкой стенке волновода (аналог щелевой антенны) и поступает в лазерную головку 3.

Поперечное сечение лазерной головки (рис. 2) представляет собой газоразрядную структуру, образованную двумя профилированными алюминиевыми пластинами 2, 3, которые прижимают расположенную боковой стороной к щели СВЧ резонатора кварцевую пластинку 4 размером 2 × 30 × 300 мм. Разрядный канал 5 размером 2 × 25 × 250 мм образован зазором между отполированными алюминиевой и кварцевой пластинами. В конструкции предусмотрено водяное охлаждение алюминиевых пластин. Использование планарного разряда дает преимущества в эффективности отвода тепла со стенок, компактности, невысокому напряжению пробоя, хорошему качеству выходного пучка и высокой выходной мощности лазерного излучения, снимаемой с единицы объема.

В этой конструкции электрическое поле в разрядной области оказывается перпендикулярным поверхности диэлектрической пластинки. Так как СВЧ мощность приходит в разрядную область только с одной стороны, разрядный ток замыкается через алюминиевую пластину с другой стороны. Поэтому СВЧ разряд не сосредоточен только вблизи поверхности диэлектрической пластинки, а распределен равномерно по всей толщине разрядной области. Объем активной среды составляет 12.5 см<sup>3</sup> и, следовательно, плотность вкладываемой средней мощности достигает 160 Вт/см<sup>3</sup>.

## 3. Условия эксперимента

Применение описанной конструкции лазерной головки позволило создать компактный CO<sub>2</sub>-лазер с диффузионным охлаждением. Эксперименты проводились с различными газовыми смесями в диапазоне давлений рабо-

чего газа 10–50 Тор при длительности импульсов СВЧ накачки 20–100 мкс и частоте повторения 0.4–10 кГц. Форма импульса лазерного излучения контролировалась пироприемником БП-10 с временным разрешением  $10^{-8}$  с и двухканальным цифровым осциллографом LeCroy-432 с полосой пропускания 350 МГц. Мощность лазерного излучения измерялась прибором NOVA-2 (OPHIR) с термоэлектрической головкой (апертура 29 мм), откалиброванной на длину волны 10.6 мкм. Свечение плазмы в разряде регистрировалось фотоэлектронным умножителем ФЭУ-39А (спектральный диапазон 160–600 нм), связанным с разрядным промежутком волоконным световодом.

В планарном лазере структура поля излучения – гибридная. В направлении, перпендикулярном щели, излучение распространяется, как в волноводе, а вдоль щели формируется мода, соответствующая выбранному резонатору.

В экспериментах мы использовали обычную схему устойчивого оптического резонатора, состоящего из двух зеркал: глухого сферического медного зеркала с золотым покрытием (радиус кривизны 5 м, коэффициент отражения 98.8 %) и выходного просветленного плоскопараллельного германиевого зеркала (коэффициент пропускания 5 % или 10 %). Зеркала расположены на расстоянии 5 мм от разрядного промежутка, что несколько предохраняет их от воздействия плазмы газового разряда. Структура поля лазерного излучения соответствовала генерации в многомодовом режиме.

Длина волны СВЧ излучения в волноводе для основного типа колебаний  $H_{10}$  зависит от размера  $a$  широкой стенки прямоугольного волновода. Известно, что длина волны в волноводе отличается от длины волны, генерируемой магнетроном. При  $a = 9$  см и  $\lambda_0 = 12.24$  см длина волны в волноводе  $\lambda_w$  будет равна 16.7 см. Следует учесть, что условием распространения волн в волноводе является неравенство  $\lambda < \lambda_{cr}$ , где  $\lambda_{cr} = 2a$  для волны типа  $H_{10}$ .

На рис.3 представлено экспериментально снятое распределение мощности электромагнитного поля вдоль щели настроенного объемного резонатора в отсутствие разряда. Для получения более равномерного распределения мощности вдоль разрядного промежутка необходимо уменьшить размер широкой стенки волновода с 90 мм до примерно 62 мм. В этом случае длина волны в волноводе

$$\lambda_w = \lambda_0 \left[ 1 - \left( \frac{\lambda_0}{2a} \right)^2 \right]^{-1/2} \tag{1}$$

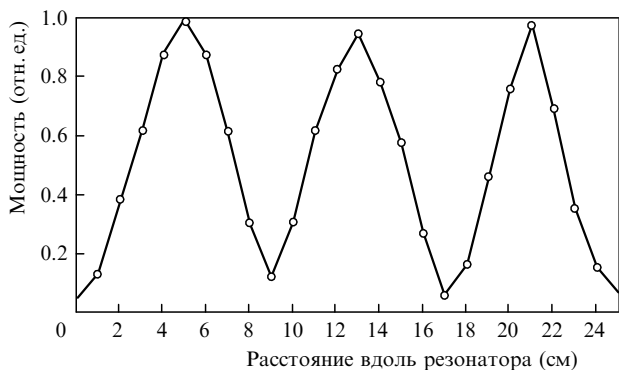


Рис.3. Распределение мощности электромагнитного поля (в отсутствие разряда) вдоль щели настроенного объемного резонатора.

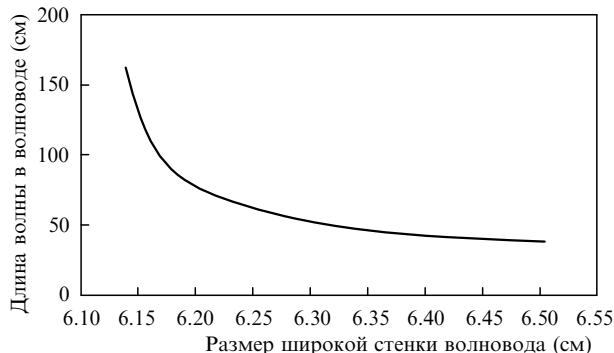


Рис.4. Зависимость длины волны в волноводе от размера широкой стенки волновода; частота генерации магнетрона 2.45 ГГц.

составит около 80 см и в СВЧ резонаторе уложится половина длины волны, это будет так называемый полуволновой резонатор. На рис.4 представлена зависимость длины волны в волноводе от размера широкой стенки волновода [13].

#### 4. Результаты эксперимента

Эффективность и мощность генерации лазера существенно зависят от общего давления, что связано с увеличением концентрации рабочих молекул в газовой смеси.

На рис.5 представлена зависимость выходной мощности лазера с СВЧ накачкой от давления рабочей смеси газов. Уменьшение выходной мощности с повышением давления связано как с ухудшением однородности горения разряда, так и с ростом температуры газа. В СВЧ резонаторе формируется стоячая волна, и наличие минимумов напряженности электрического поля приводит к увеличению неоднородности горения плазмы вдоль разрядного канала с ростом давления. При простом повышении мощности СВЧ накачки можно «зажечь» разряд в минимумах напряженности, но это может привести к существенному перегреву в областях с максимальными значениями напряженности СВЧ поля и вызвать контррацию разряда.

Скорость рождения электронов резко зависит от средней энергии (температуры) электронного газа, которая определяется параметром  $E/N$  ( $E$  – напряженность поля,  $N$  – плотность молекул газа). Этот параметр (приведенное электрическое поле) пропорционален средней длине свободного пробега, и чем она больше, тем большую энергию получит электрон. Отсюда следует, что скорость ионизации резко возрастает с ростом параметра

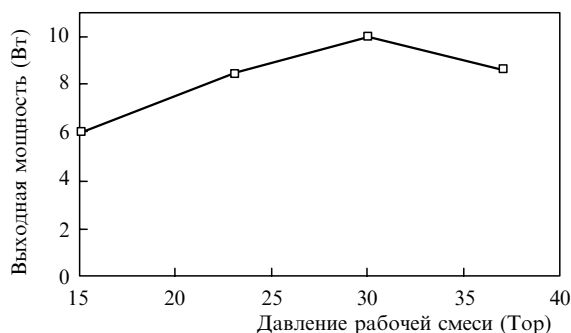


Рис.5. Зависимость выходной мощности лазера от давления рабочей смеси; состав газа  $CO_2 : N_2 : He : Xe = 3 : 3 : 13 : 1$ , средняя вкладываемая мощность 80 Вт, длительность импульса накачки 20 мкс, частота повторения импульсов 1000 Гц.

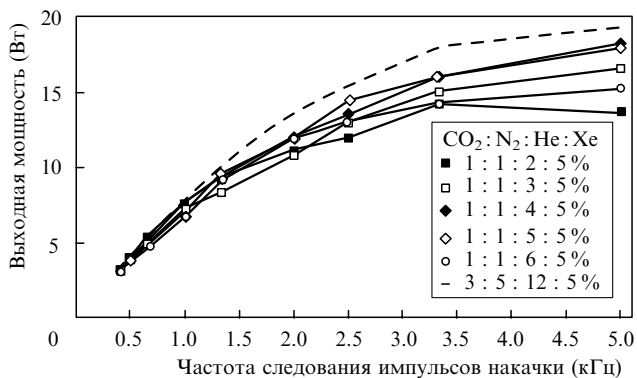


Рис.6. Зависимости выходной мощности CO<sub>2</sub> лазера от частоты следования импульсов накачки при различных составах смеси рабочего газа CO<sub>2</sub>:N<sub>2</sub>:He:Xe; импульсная мощность СВЧ накачки 4 кВт, длительность импульса накачки 20 мкс, давление газа 30 Тор.

$E/N$  (уменьшением  $N$  с ростом температуры газа  $T$ ), при этом скорость потерь электронов слабее зависит от  $E/N$ . Возникает ионизационно-перегревная неустойчивость, что, в свою очередь, приводит к термическому заселению нижнего уровня и, как следствие, к падению мощности лазерного излучения. Таким образом, для данного состава газа и параметров импульсов СВЧ накачки существует оптимальное значение давления.

Графики на рис.6 отражают зависимости выходной мощности CO<sub>2</sub>-лазера от частоты следования импульсов накачки при различных составах смеси рабочего газа. Выходная мощность растет с увеличением частоты повторения импульсов накачки (растет средняя вкладываемая мощность). Для первой смеси (с наименьшим содержанием He) уменьшение выходной мощности лазера происходит раньше других, это, возможно, связано с ее перегревом из-за меньшей парциальной доли гелия.

Влияние добавки ксенона на выходную мощность лазерного излучения показано на рис.7. Видно, что 10%-ная добавка ксенона увеличивает выходную мощность лазера практически на 40%, а 5%-ная добавка ксенона дает прибавку ~21% (похожие результаты получены в работе [14]). Хорошо известно, что одним из основных механизмов, ограничивающих выходную мощность отпаянных лазеров, является неизбежная диссоциация двуокиси углерода CO<sub>2</sub> электронным ударом в плазме газового разряда. Увеличение выходной мощности связано с уменьшением приведенного поля  $E/N$  в плазме раз-

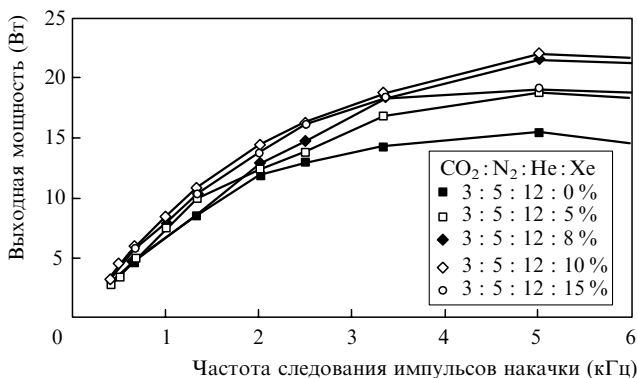


Рис.7. Зависимости выходной мощности CO<sub>2</sub> лазера от частоты следования импульсов накачки при изменении процентной добавки ксенона в смеси рабочего газа CO<sub>2</sub>:N<sub>2</sub>:He:Xe; параметры те же, что и для рис.6.

ряда, а также с увеличением парциального давления CO<sub>2</sub> в результате замедления процесса диссоциации молекул CO<sub>2</sub>, поскольку с уменьшением  $E/N$  падает и средняя энергия электронов, что также увеличивает скорость колебательного возбуждения CO<sub>2</sub> и N<sub>2</sub>. Низкий потенциал ионизации ксенона способствует образованию новых электронов для поддержания разряда.

На рис.8 показаны осциллограммы огибающей импульса СВЧ накачки и импульса сигнала с ФЭУ, соответствующего свечению плазмы в газоразрядном промежутке. Видно, что свечение плазмы начинается практически сразу при включении СВЧ генератора. Спад импульса огибающей СВЧ накачки соответствует времени формирования разряда. Начало лазерной генерации отстает от момента включения импульса накачки на несколько микросекунд, а длительность лазерного импульса превышает длительность импульса накачки.

Эффективность лазера зависит от параметров активной среды и оптического резонатора и, в частности, от коэффициента пропускания выходного зеркала. На рис.9 представлены зависимости выходной мощности лазера с СВЧ возбуждением от частоты следования импульсов накачки для коэффициентов пропускания выходного зеркала 5% и 10%. В простейшем случае показатель усиления для CO<sub>2</sub>-лазера можно определить, используя экспериментальные зависимости мощности излучения от прозрачности выходного зеркала.

Измерив выходную мощность лазерного излучения для двух значений пропускания выходного зеркала и используя формулу Ригрода [15]

$$P = P_s \frac{t_1 \sqrt{r_2} + t_2 \sqrt{r_1}}{(\sqrt{r_1} + \sqrt{r_2})(1 - \sqrt{r_1 r_2})} (Lg_0 + \ln \sqrt{r_1 r_2}) \quad (2)$$

(здесь  $t_1$ ,  $t_2$  и  $r_1$ ,  $r_2$  – коэффициенты пропускания и отражения зеркал резонатора соответственно;  $L$  – активная длина лазера;  $P_s$  – мощность насыщения), можно оценить коэффициент ненасыщенного усиления  $g_0$  (без учета распределенных потерь и потерь на согласование волноводных мод и мод свободного пространства, считая разряд однородным). Оценка дает значение  $g_0 \sim 1.2 - 1.3 \text{ м}^{-1}$  при частоте накачки 5 кГц.

В отличие от импульсного (импульсно-периодического) режима возбуждения активной среды лазера, в непрерывном режиме (при ВЧ накачке) коэффициент усиления меньше и составляет  $0.5 - 0.7 \text{ м}^{-1}$  [16]. Это связано с перегревом рабочей среды, приводящим, с одной стороны, к снижению инверсии за счет столкновительной релакса-



Рис.8. Осциллограммы огибающей импульса СВЧ накачки (1), импульса сигнала с ФЭУ, соответствующего свечению плазмы в газоразрядном промежутке (2), и лазерного импульса (3).

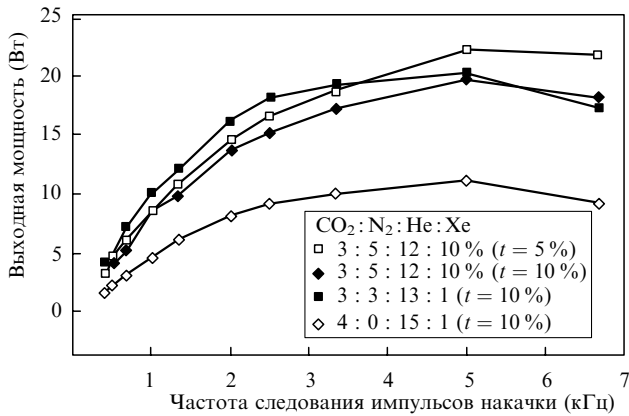


Рис.9. Выходная мощность лазера для смеси состава  $\text{CO}_2 : \text{N}_2 : \text{He} : \text{Xe} = 3 : 5 : 12 : 10\%$  при коэффициентах пропускания выходного зеркала 5% и 10%, а также смесей составов  $\text{CO}_2 : \text{N}_2 : \text{He} : \text{Xe} = 3 : 3 : 13 : 1$  и  $\text{CO}_2 : \text{He} : \text{Xe} = 4 : 15 : 1$  при коэффициенте пропускания 10% в зависимости от частоты следования импульсов накачки; параметры те же, что и для рис.6. 7.

ции, а с другой – к резкому уменьшению концентраций молекул  $\text{CO}_2$  в результате плазмохимических реакций. В импульсном режиме при тех же средних мощностях накачки, отбираемых от источника питания, коэффициент усиления среды почти вдвое выше, поскольку вкладываемая импульсная мощность также вдвое выше, а между импульсами накачки происходит, по-видимому, восстановление части продиссоциировавших молекул  $\text{CO}_2$ .

Практически во всех  $\text{CO}_2$ -лазерах в качестве дополнительного канала для перекачки энергии в рабочую моду колебаний  $\text{CO}_2$  используются молекулы азота. На рис.9 показаны зависимости выходной мощности  $\text{CO}_2$ -лазера от наличия  $\text{N}_2$  в составе рабочей смеси газов. Видно, что добавка азота увеличивает выходную мощность лазерного излучения в два раза. Осциллограммы формы лазерных импульсов в этих случаях похожи, и возможно, что функцию азота в этом случае берут на себя молекулы  $\text{CO}$ , которые образуются в результате диссоциации  $\text{CO}_2$ . Сечение колебательного возбуждения молекулы  $\text{CO}$  довольно велико, а дефект энергии между колебательными уровнями  $\text{CO}$  и  $\text{CO}_2$  меньше средней кинетической энергии  $kT$ . В результате этого возможно возбуждение рабочей моды молекулы  $\text{CO}_2$ , хотя это не столь эффективно, так как молекула  $\text{CO}$  в отличие от  $\text{N}_2$  обладает способностью спонтанного радиационного распада.

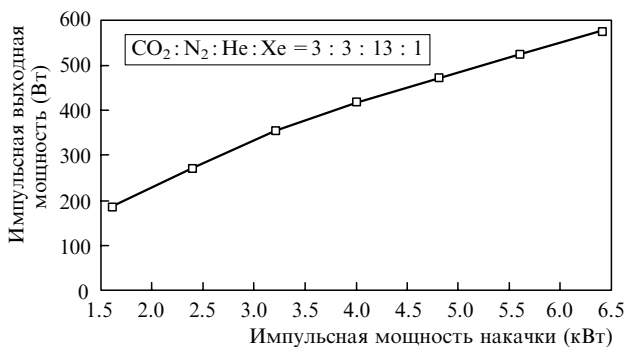


Рис.10. Зависимость импульсной выходной мощности лазера от импульсной мощности СВЧ накачки; состав газа  $\text{CO}_2 : \text{N}_2 : \text{He} : \text{Xe} = 3 : 3 : 13 : 1$ , длительность импульса накачки 20 мкс, частота повторения импульсов накачки 400 Гц, давление газа 30 Тор, пропускание выходного зеркала 10%.

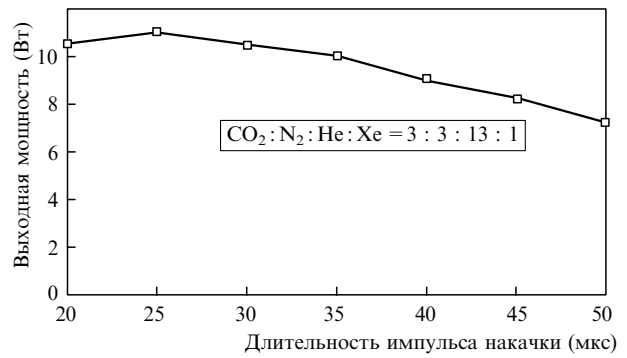


Рис.11. Зависимость выходной мощности лазера от длительности импульса накачки; состав газа  $\text{CO}_2 : \text{N}_2 : \text{He} : \text{Xe} = 3 : 3 : 13 : 1$ , давление 30 Тор, импульсная мощность накачки 4 кВт, частота повторения импульсов 1000 Гц, пропускание выходного зеркала 10%.

Важное направление современных исследований и развития планарных волноводных  $\text{CO}_2$ -лазеров связано с повышением пиковой мощности и уменьшением длительности импульса генерации. На рис.10 представлена зависимость импульсной выходной мощности лазера от импульсной мощности СВЧ накачки. График построен с учетом формы и длительности импульса лазерного излучения. Видно, что для данного состава смеси газа, давления и объема активной среды ( $12.5 \text{ см}^3$ ) насыщения выходной мощности не наблюдается, и таким образом у этой конструкции  $\text{CO}_2$ -лазера есть возможность выхода на киловаттный уровень пиковой мощности.

Рост мощности генерации с увеличением мощности, вводимой в разряд, ограничивается возрастанием температуры рабочей смеси. На рис.11 показана зависимость выходной мощности лазера от длительности импульса накачки и, следовательно, от вкладываемой в разряд средней мощности. Видно, что увеличение длительности импульса накачки свыше 25 мкс (для данного режима работы лазера) приводит к уменьшению выходной лазерной мощности. Это, по-видимому, происходит из-за перегрева активной среды, что приводит к заселению нижнего лазерного уровня и, следовательно, к падению выходной мощности.

На рис.12 представлена зависимость эффективности работы лазера с СВЧ накачкой от частоты следования импульсов. Эффективность определялась без учета преобразования сетевого напряжения в СВЧ сигнал. С увеличением частоты следования импульсов накачки происходит рост средней вкладываемой в разряд микроволно-

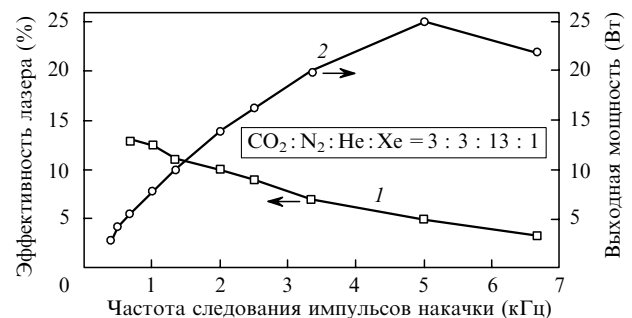


Рис.12. Зависимости эффективности работы (1) и выходной мощности (2) лазера от частоты следования импульсов накачки; состав газа  $\text{CO}_2 : \text{N}_2 : \text{He} : \text{Xe} = 3 : 3 : 13 : 1$ , давление 30 Тор, импульсная мощность накачки 4.8 кВт, длительность импульса накачки 20 мкс.

вой мощности, растет и степень диссоциации и температура газа, что в результате ведет к снижению эффективности лазера. На рис.12 показана также зависимость выходной мощности лазера с СВЧ возбуждением от частоты следования импульсов накачки. Максимальная выходная мощность, полученная при таких параметрах накачки и парциального состава газа, равна 25.2 Вт.

## 5. Заключение

В настоящей работе изучено поведение планарного CO<sub>2</sub>-лазера с СВЧ накачкой. Проведены эксперименты по исследованию характеристик лазера в зависимости от вкладываемой мощности, состава рабочей смеси, давления, частоты повторения и длительности импульса накачки. Все эксперименты проводились без прокачки рабочей смеси газа. Экспериментально достигнутый удельный энергоём с единицы площади активной среды составил около 0.4 Вт/см<sup>2</sup>. Получена средняя мощность генерации 25 Вт и эффективность около 13 % на длине волны излучения  $\lambda = 10.6$  мкм. Пиковая мощность лазерного излучения в импульсно-периодическом режиме составила 580 Вт. В конструкции CO<sub>2</sub>-лазера заложена возможность выхода на киловаттный уровень пиковой мощности. В целях уменьшения потерь и упрощения схемы доставки СВЧ мощности целесообразно совмещение объемного СВЧ резонатора и лазерной головки. Для улучшения качества выходного пучка целесообразно перейти к оптической схеме с использованием конфокального, гибридного волноводно-неустойчивого резонатора как положительной, так и отрицательной ветви диаграммы устойчивости.

Результаты данной работы могут быть использованы при разработке и создании CO<sub>2</sub>-лазеров со средней выходной мощностью до 100 Вт с длительностью лазерных импульсов 10–100 мкс при частотах повторения до 10 кГц и с пиковой мощностью  $\sim 1$  кВт.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты № 05-02-17624 и 06-02-08269).

1. Jackson P.E., Baker H.J., Hall D.R. *Appl. Phys. Lett.*, **54**, 1950 (1989).
2. Colley A.D., Baker H.J., Hall D.R. *Appl. Phys. Lett.*, **61** (2), 136 (1992).
3. Kuznetsov A.A., Ochkin V.N., Udalov Yu.B., Witteman W.J. *Laser Phys.*, **4** (6), 1106 (1994).
4. Леонтьев В.Г., Мольков С.И., Суханова Н.П., Шишканов Е.Ф. *Квантовая электроника*, **21**, 931 (1994).
5. Mineev A.P., Nefedov S.M., Pashinin P.P. *CLEO/Europe'96* (Hamburg, 1996) paper CTuN6.
6. Lapucci A., Labate A., Rossetti F., Mascalchi S. *Appl. Opt.*, **35**, 3185 (1996).
7. Mineev A.P., Nefedov S.M., Pashinin P.P. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **3686**, 35 (1999).
8. Минеев А.П., Неведов С.М., Пашинин П.П. *Квантовая электроника*, **36**, 656 (2006).
9. Nishimae J., Yoshizawa K. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **1225**, 340 (1990).
10. Shahadi A., Sintov Y., Jerby E. *Microw. Opt. Techn. Letts*, **36** (2), 115 (2003).
11. Mineev A.P., Nefedov S.M., Pashinin P.P. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **5137**, 288 (2003).
12. Wester R., Seiwert S. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **24**, 1102 (1991).
13. Лебедев И.В. *Техника и приборы СВЧ* (М.: Высшая школа, 1970).
14. Grudszus S., Marz M. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **26**, 1980 (1993).
15. Rigrod W.W. *Appl. Phys.*, **36**, 2487 (1965).
16. Дутов А.И., Евстратов И.Ю., Иванова В.Н., Кулешов А.А., Мотовилов С.А., Новоселов Н.А., Семенов В.Е., Соколов В.Н., Юрьев М.С. *Квантовая электроника*, **23**, 499 (1996).