

Применение деформируемых зеркал в технологических CO₂-лазерах. II. Внутррезонаторное управление мощностью и импульсно-периодическая модуляция выходного излучения

Б.С.Виневич, Л.Н.Евдокимович, А.Г.Сафронов, С.Н.Смирнов

Экспериментально исследованы промышленные CO₂-лазеры различных типов с устойчивыми резонаторами, содержащими деформируемые зеркала с управляемой кривизной отражающей поверхности. Получено стабильное повторяемое управление мощностью выходного излучения технологических CO₂-лазеров как в одномодовом, так и в многомодовом режиме вплоть до полного гашения генерации. В непрерывных CO₂-лазерах реализованы устойчивые импульсно-периодические режимы излучения с частотой повторения импульсов от единиц до сотен герц. Исследованы форма импульсов выходного излучения и зависимость его средней мощности от частотно-временных параметров управляющего напряжения на внутррезонаторном деформируемом зеркале.

Ключевые слова: технологические CO₂-лазеры, управление мощностью выходного излучения, импульсно-периодическая модуляция, деформируемые зеркала с управляемой кривизной.

1. Введение. Импульсно-периодический режим излучения в непрерывных лазерах

Одноканальные деформируемые зеркала с управляемой кривизной отражающей поверхности, детально рассмотренные в первой части статьи (см. работу [1]), являются простыми, надежными и удобными элементами адаптивной оптики. Их применение внутри лазерных резонаторов позволяет:

1. Компенсировать в реальном времени параболическую составляющую термооптических искажений, возникающих внутри лазера [2, 3].

2. Управлять в реальном времени мощностью выходного излучения лазеров вплоть до полного гашения генерации.

3. Реализовать импульсно-периодические режимы генерации в непрерывных лазерах, в том числе режим с превышением импульсной (пиковой) мощности излучения над мощностью в непрерывном режиме.

При управлении мощностью и импульсно-периодической модуляции выходного излучения лазера изменяют геометрию резонатора путем управления кривизной отражающей поверхности одного или нескольких его зеркал. В результате этого изменяется добротность резонатора и, следовательно, мощность выходного лазерного излучения, что при динамическом управлении на некоторой частоте приводит к импульсно-периодическому режиму работы непрерывного лазера.

Внутррезонаторная модуляция выходного излучения CO₂-лазеров рассматривалась в нескольких работах. В [4] для непрерывного CO₂-лазера мощностью 1 кВт при статическом изменении напряжения на деформируемом зеркале был получен ограниченный диапазон управления

мощностью выходного излучения (менее чем в два раза по отношению к номинальному уровню). Даже на резонансных частотах зеркала (3.8 и 7.6 кГц) при его максимальных деформациях генерацию в лазере погасить не удалось; глубина модуляции излучения на резонансных частотах составила 50 % – 75 %. В работе [5] аналогичное зеркало было использовано в неустойчивом резонаторе непрерывного CO₂-лазера мощностью 5 кВт. Вблизи тех же резонансных частот деформируемого зеркала был получен импульсно-периодический режим излучения. Статическое и низкочастотное управление не рассматривались.

Таким образом, к настоящему времени за счет деформируемой оптики импульсно-периодический режим излучения в непрерывных CO₂-лазерах реализован лишь на резонансных частотах и, по сути дела, только в неустойчивом резонаторе. Между тем в подавляющем большинстве как отечественных, так и зарубежных технологических лазеров малой и средней мощности (до 5 кВт) используются как раз устойчивые резонаторы [6], так что надежная реализация импульсно-периодического режима особенно интересна именно в них. Причем в первую очередь не на отдельных фиксированных частотах, а во всем возможном спектре: от статического и низкочастотного (десятки герц) управления до высокочастотного (десятки килогерц), естественно, с возможностью перестройки частоты модуляции. Именно в последнем случае обрабатываемый комплекс на базе такого лазера приобретает новые, технологически значимые возможности: обработка новых материалов, расширение сортамента обрабатываемых материалов, новые технологические операции, повышение их качества и т. п.

Возможность низкочастотной импульсно-периодической модуляции излучения в конкретном лазере однозначно и достоверно определяется возможностью гашения генерации за счет управления деформируемым зеркалом в статическом режиме. Действительно, если деформации зеркала в этом режиме достаточны для управления мощностью выходного излучения во всем воз-

Б.С.Виневич, Л.Н.Евдокимович, А.Г.Сафронов, С.Н.Смирнов. НПО «Композит», Россия, 141070 Королев, Московская обл., тел: (095) 513 22 22, факс: (095) 516 06 17.

Поступила в редакцию 28 мая 2003 г, после доработки – 3 ноября 2003 г.

можном диапазоне (от нуля до номинального значения), то, управляя кривизной зеркала на низкой частоте в тех же пределах, мы получим импульсно-периодическую модуляцию излучения. Это справедливо для частотного диапазона с постоянной чувствительностью, в котором деформации зеркала те же, что и в статическом режиме [7]. Например, для неохлаждаемых одноканальных деформируемых зеркал с управляемой кривизной этот диапазон составляет 0–1 кГц [7]. Таким образом, статическое гашение генерации в лазере с помощью деформируемых зеркал является принципиально важным для получения импульсно-периодических режимов с низкими частотами модуляции.

В дополнении к этому при модуляции добротности большое значение имеет превышение импульсной (пиковой) мощности над мощностью в непрерывном режиме излучения. При включении добротности резонатора в начальный момент импульса излучения высвечивается энергия, запасенная в резонаторе за время, пока добротность выключена. Этот первоначальный выброс мощности может существенно (в несколько раз) превышать номинальную выходную мощность в непрерывном режиме. При этом пиковая мощность определяется не только скоростью включения добротности (быстродействием зеркала), но и величиной остаточной мощности при выключенной добротности, когда резонатор недостаточно закрыт. Понятно, что чем больше остаточная мощность излучения при выключенной добротности, тем меньше при прочих равных условиях будет пиковая мощность в импульсе излучения.

В настоящей работе представлены результаты экспериментальных исследований статического управления мощностью выходного излучения и импульсно-периодических режимов генерации в промышленных CO_2 -лазерах с типовыми устойчивыми резонаторами. В экспериментах использовались охлаждаемые одноканальные деформируемые зеркала с управляемой кривизной отражающей поверхности, детально рассмотренные в [1, 8].

Для полноты картины необходимо отметить, что импульсно-периодическая модуляция излучения в CO_2 -лазерах может быть реализована и без применения деформируемой оптики. Например, путем управления током разряда или за счет управления пропусканием выходного зеркала резонатора. Однако указанные методы имеют свои ограничения: первый – по быстродействию, второй – по мощности лазерного излучения.

2. CO_2 -лазер с аксиальной прокачкой и выходной мощностью 2.5 кВт

В экспериментах использовался промышленный газоразрядный CO_2 -лазер «Гарпун-2000» (СНПП «Исток-Лазер», Фрязино, Московская обл.) с быстрой аксиальной прокачкой рабочей смеси ($\text{CO}_2 - \text{N}_2 - \text{He}$) и непрерывным выходным излучением. Основные характеристики лазера представлены в табл.1.

Устойчивый резонатор лазера образован концевым вогнутым зеркалом с радиусом кривизны –30 м и выходным полупрозрачным (50 %) зеркалом с радиусом кривизны –30 м (для многомодового режима генерации) либо –15 м (для одномодового режима). В состав резонатора входят также шесть плоских поворотных зеркал. Вся оптика резонатора является охлаждаемой и вакуумно-плотно устанавливается в его корпус; диаметр концев

Табл.1. Параметры CO_2 -лазера «Гарпун-2000».

Длина волны излучения	10.6 мкм
Максимальная мощность излучения:	
многомодовый режим	2500 Вт
одномодовый режим	1000 Вт
Диапазон регулирования мощности	200–2000 Вт
Относительная нестабильность мощности излучения	$\leq 5\%$
Максимальный диаметр выходного пучка:	
многомодовый режим	45 мм
одномодовый режим	20 мм
Расходимость излучения (одномодовый режим)	2 мрад
Температура воды на входе системы охлаждения	25 °С
Избыточное давление в системе водяного охлаждения	0.15–0.2 МПа

вого и выходного зеркал составляет 60 мм. Общая длина резонатора равна 6.5 м.

В резонатор лазера вместо концевого зеркала устанавливалось охлаждаемое одноканальное деформируемое зеркало с управляемой кривизной отражающей поверхности. Подробные характеристики зеркала приведены в табл.1 из работы [1]. В данных экспериментах использовалось управляемое зеркало с плоской исходной формой оптической поверхности. Схема резонатора лазера «Гарпун-2000» с управляемым по кривизне зеркалом показана на рис.1.

При установке управляемого зеркала 4 в лазер, последующей откачке резонатора и наполнении его рабочей газовой смесью зеркало деформируется под действием внешнего атмосферного давления. При давлении 1 атм прогиб используемого деформируемого зеркала составляет 3.1 ± 0.1 мкм, что соответствует изменению формы зеркала от плоской до выпуклой с радиусом кривизны 71 ± 2 м. Данные измерения были выполнены с помощью коллиматора от оптической скамьи ОСК-2ЦЛ. Указанные деформации зеркала являются полностью упругими; при снятии давления форма отражающей поверхности возвращается к исходной.

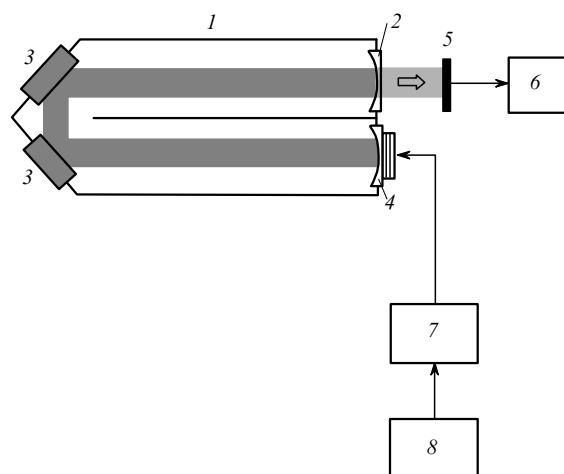


Рис.1. CO_2 -лазер «Гарпун-2000» с управляемым по кривизне зеркалом в резонаторе:

1 – корпус резонатора; 2 – выходное полупрозрачное зеркало; 3 – поворотные зеркала (всего 6 шт.); 4 – одноканальное деформируемое зеркало с управляемой кривизной отражающей поверхности; 5 – термозлектрический датчик выходной мощности лазера ТИ-4; 6 – вольтметр В7-38; 7 – электронный блок управления деформируемым зеркалом; 8 – управляющий компьютер.

При изменении управляющего напряжения от -300 до $+210$ В радиус кривизны деформируемого зеркала 4, вакуумно-плотно установленного в откачанный объем, изменяется от $+9.7$ м (выпуклая форма) до -23.6 м (вогнутая форма).

2.1. Управление мощностью выходного излучения в статическом режиме

Эксперименты проводились как в одномодовом, так и в многомодовом режиме генерации. При этом с помощью термоэлектрического датчика 5 и вольтметра 6 регистрировалась мощность непрерывного выходного излучения лазера в зависимости от управляющего напряжения на деформируемом зеркале 4. Последнее формировалось электронным блоком 7 по командам управляющего компьютера 8. Измерения были выполнены при номинальной выходной мощности лазера $P_{nom} = 200 - 2100$ Вт (под номинальной понимается мощность выходного излучения лазера в пределах диапазона регулирования (см. табл.1) при использовании в резонаторе плоского концевого зеркала). Величина сигнала 1 мВ на выходе термоэлектрического датчика 5 соответствует выходной мощности 680 Вт. Погрешность датчика ТИ-4 составляет $\pm 5\%$, постоянная времени – 1 мин.

Типичные результаты измерений приведены на рис.2. Во всех экспериментах получено стабильное повторяемое управление мощностью выходного излучения лазера при номинальной мощности 200–1900 Вт как в одномодовом, так и в многомодовом режиме генерации. При выходной мощности лазера около 2 кВт (кривые 7 и 8) зависимости $P(U)$ полностью снять не удалось из-за шнурования электрического разряда внутри резонатора [12]. При работе в одномодовом режиме генерации (кри-

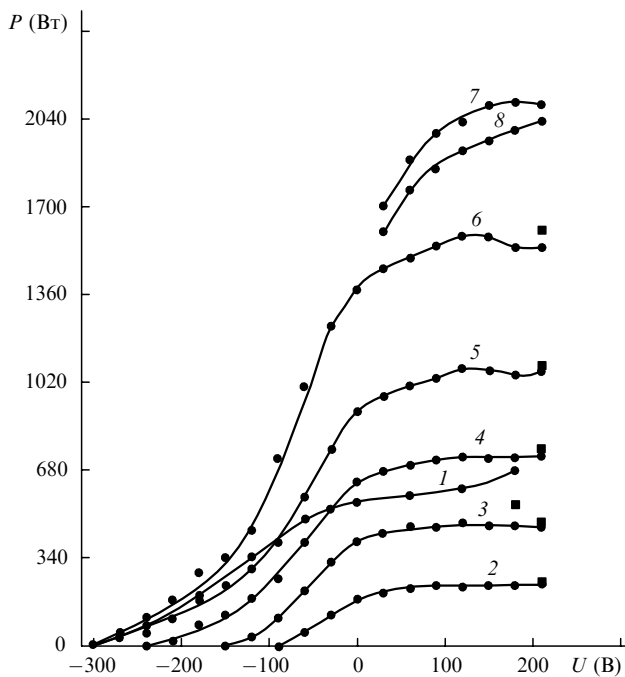


Рис.2. Зависимости мощности выходного излучения P лазера «Гарпун-2000» от электрического напряжения U на внутрирезонаторном деформируемом зеркале с управляемой кривизной отражающей поверхности в одномодовом режиме генерации при номинальной мощности излучения $P_{nom} = 680$ Вт (1) и в многомодовом режиме при $P_{nom} = 240$ (2), 470 (3), 750 (4), 1070 (5), 1580 (6), 2100 (7) и 2000 Вт (8); ■ – возврат управляемого зеркала в исходное состояние (переход -300 В \rightarrow $+210$ В).

вая 1) по чисто техническим причинам использовалась охлаждающая жидкость повышенной температуры (около 30°C).

Полученные зависимости имеют небольшой, но устойчивый максимум в диапазоне напряжений $120 - 150$ В. На рис.2 он четко виден при $P_{nom} \geq 750$ Вт. Этот максимум, очевидно, соответствует оптимальной геометрии резонатора. Действительно, при изменении управляющего напряжения от 150 до 120 В радиус кривизны данного деформируемого зеркала, вакуумно-плотно установленного в резонатор, изменяется от -29.7 до -38.2 м. Это хорошо согласуется с кривизной штатного зеркала резонатора (-30 м).

Из приведенных на рис.2 результатов видно, что при $P_{nom} \leq 1.6$ кВт амплитуда управляемых деформаций зеркала достаточна для полного запираания резонатора. При большей выходной мощности генерация полностью не гасится, остаточная мощность излучения не превышает 100 Вт. В этом случае для полного гашения генерации можно воспользоваться следующим. Как видно из рис.2, для всех полученных зависимостей участок $120 - 210$ В является несущественным для управления выходной мощностью лазера; на участке $-300 \dots +120$ В выходная мощность изменяется от нуля до возможного максимума. Выбором подходящей исходной кривизны деформируемого зеркала можно добиться смещения максимума кривых $P(U)$ в точку 210 В. Тогда максимум выходной мощности лазера будет приходиться на крайнее положительное значение управляющего напряжения (210 В), которое будет соответствовать оптимальной кривизне деформируемого зеркала (-30 м). В то же время при максимальном отрицательном напряжении кривизна зеркала будет больше, чем в проведенных экспериментах с исходно плоским зеркалом. Это позволит полностью погасить генерацию в резонаторе при $P_{nom} > 1.6$ кВт. Используя результаты, полученные в первой части статьи (см. табл.1 и рис.2 в [1]), и несложные алгебраические вычисления, можно показать, что искомая форма деформируемого зеркала является выпуклой с радиусом кривизны приблизительно 270 м.

2.2. Импульсно-периодическая модуляция выходного излучения

Данные эксперименты проводились в многомодовом режиме генерации. При этом регистрировались средняя и импульсная мощность импульсно-периодического излучения. Измерения средней мощности выполнялись так же, как и в непрерывном режиме генерации, и с помощью той же аппаратуры (см. рис.1). При измерениях импульсной мощности вместо датчика 5 использовалось фотоспротивление Ge – Au (ФСГ-22-3А1, постоянная времени не более 10^{-7} с), охлаждаемое жидким азотом, вместо вольтметра 6 – двухлучевой осциллограф С1-98. С помощью последнего не только регистрировался сигнал с фотоспротивления, но и осуществлялся контроль импульсного управляющего напряжения на деформируемом зеркале 4. Это напряжение формировалось электронным блоком 7, для управления которым вместо компьютера 8 использовался генератор импульсов Г5-54. Тарировка фотоспротивления Ge – Au производилась с помощью датчика ТИ-4 и модулятора.

Эксперименты выполнялись при номинальной выходной мощности лазера от 470 до 1020 Вт. При подаче прямоугольного импульсного напряжения на деформи-

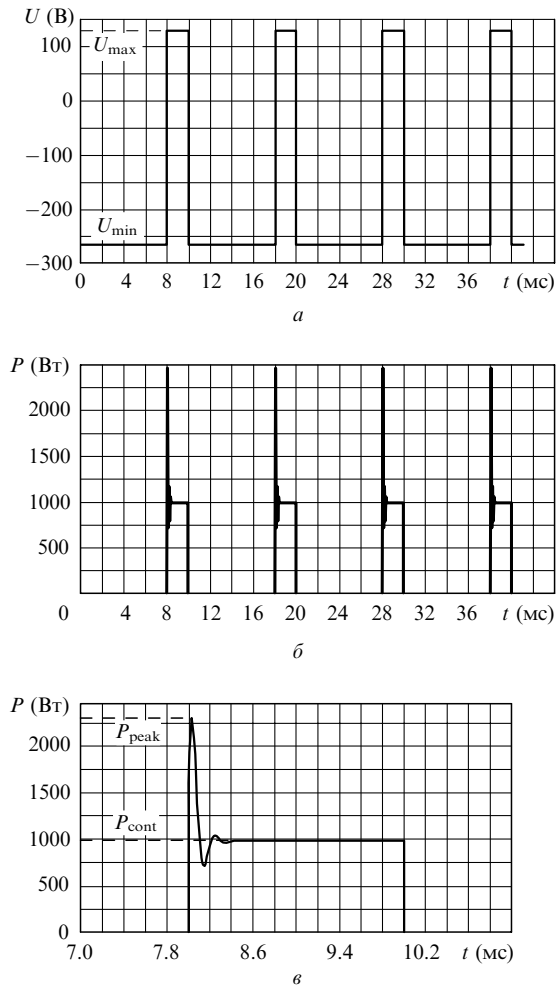


Рис.3. Зависимости управляющего напряжения U на внутрирезонаторном деформируемом зеркале (а) и мощности P выходного излучения лазера (б) от времени t , а также форма импульсов выходного излучения (в) в импульсно-периодическом режиме работы непрерывного CO_2 -лазера «Гарпун-2000» при номинальной выходной мощности $P_{\text{ном}} = 990$ Вт, частоте повторения импульсов $f = 100$ Гц, длительности импульса $\tau_p = 2$ мс.

руемое зеркало 4 (рис.1) лазер переходил из непрерывного режима излучения в импульсно-периодический. Типичные результаты измерений схематично приведены на рис.3. При различных импульсных управляющих напряжениях на зеркале получены импульсно-периодические режимы работы лазера с частотой следования импульсов f от 10 до 400 Гц и длительностью импульсов излучения τ_p от 0.6 до 50 мс. Таким образом, частотно-временные параметры импульсного излучения CO_2 -лазера определяются частотно-временными характеристиками управляющего напряжения на деформируемом зеркале. Во всех проведенных испытаниях работа зеркала с управляемой кривизной была стабильной, полученные результаты полностью воспроизводимы.

Как видно из рис.3, форма импульсов излучения лазера не является строго прямоугольной. При изменении управляющего напряжения на деформируемом зеркале с -265 В на $+130$ В происходит выброс мощности, соответствующий включению добротности резонатора в начале каждого импульса за счет изменения кривизны отражающей поверхности зеркала. После высвечивания энергии, запасенной в активной среде за период выключенной добротности, происходит обычная генерация из-

лучения в квазинепрерывном режиме – до тех пор, пока добротность снова не выключается управляемым зеркалом. Измерения амплитуды выброса, т. е. пиковой мощности P_{peak} (рис.3,в), при разных импульсно-периодических режимах работы лазера (в среднем по 20 измерениям) показали, что

$$P_{\text{peak}}/P_{\text{cont}} = 2.5 \pm 0.2,$$

где P_{cont} – соответствующее значение мощности в непрерывном режиме. Погрешность полученного результата обусловлена, главным образом, нестабильностью излучения лазера и, как можно видеть, составляет не более 10 % с мерой надежности 0.99.

Другим эффектом, также определяющим форму импульсов излучения, являются затухающие колебания отражающей поверхности деформируемого зеркала после скачка управляющего напряжения, что, в свою очередь, приводит к колебаниям мощности в импульсе излучения (рис.3,в). Наиболее отчетливо эти колебания наблюдаются на осциллографе при коротких, запирающих резонатор импульсах. Частота колебаний мощности соответствует собственной частоте деформируемого зеркала как диссипативной колебательной системы [11]. Собственная частота данного зеркала составляет 4.7 кГц, и это значение прекрасно согласуется с периодом затухающих колебаний мощности в импульсе излучения, равным чуть более 0.2 мс (рис.3,в). При этом общая длительность затухающих колебаний не превышает 0.4 мс, что составляет не более двух периодов колебаний.

Зная период затухающих колебаний мощности в импульсе излучения, можно оценить скорость (время) включения добротности лазера «Гарпун-2000» с помощью данного деформируемого зеркала. Из рис.3,в видно, что мощность излучения в импульсе возрастает от нуля до пикового значения за четверть периода затухающих колебаний, что составляет около 50 мкс. Это и есть максимальное время включения добротности. Как и следовало ожидать, оно существенно меньше времени жизни активной среды в данном лазере ($\sim 10^{-3}$ с).

Для полученных импульсно-периодических режимов излучения были исследованы зависимости средней мощности выходного излучения лазера от частотно-временных параметров прямоугольного импульсного напряжения на внутрирезонаторном деформируемом зеркале. При этом амплитудные значения управляющего напряжения оставались неизменными: $U_{\text{max}} = 130$ В, $U_{\text{min}} = -265$ В (см. рис.3,а). На рис.4 и 5 для различных импульсно-периодических режимов работы лазера показаны зависимости средней мощности выходного излучения от абсолютной и относительной длительностей запирающего импульса. Видно, что все экспериментальные зависимости являются линейными, и с увеличением длительности запирающего резонатор импульса средняя мощность излучения падает. Полученные зависимости $P(\tau_{\text{cl}}/T)$ практически совпадают для разных частот следования импульсов (рис.5), во всяком случае в пределах погрешности измерений. Данные измерения были выполнены при одной и той же номинальной мощности излучения в непрерывном режиме генерации ($P_{\text{ном}} = 1020 \pm 50$ Вт). На рис.4 и 5 указанная мощность соответствует точке пересечения полученных прямых с осью ординат; приведенная погрешность соответствует погрешности термоэлектрического датчика ТИ-4.

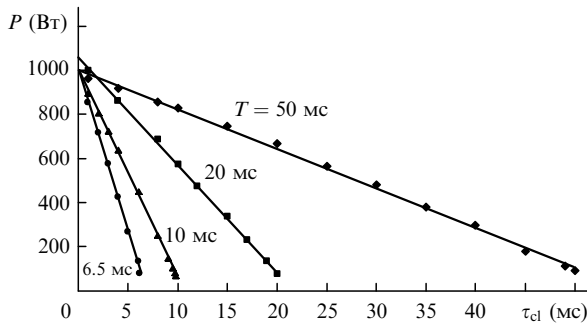


Рис.4. Зависимости средней мощности P импульсно-периодического излучения CO₂-лазера «Гарпун-2000» от длительности запирающего резонатор импульса τ_{cl} при разных периодах следования импульсов T .

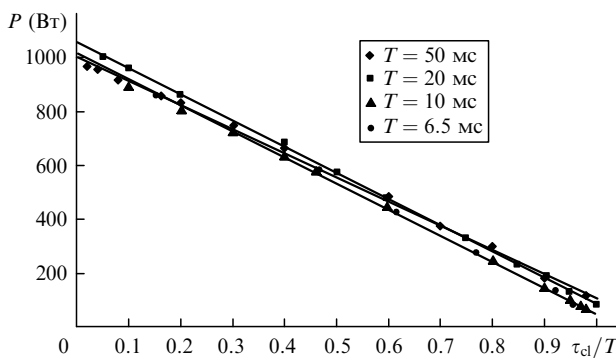


Рис.5. Зависимости средней мощности P импульсно-периодического излучения CO₂-лазера «Гарпун-2000» от относительной длительности запирающего резонатор импульса τ_{cl}/T при разных периодах следования импульсов T .

Таким образом, при заданной $P_{ном}$ в непрерывном режиме генерации средняя мощность импульсно-периодического излучения однозначно определяется относительной длительностью (или скважностью) импульсов, запирающих или открывающих резонатор лазера. Изменяя длительность импульсов управляющего напряжения на внутррезонаторном деформируемом зеркале, можно управлять средней мощностью выходного излучения лазера, причем линейно; подбор частоты напряжения позволяет изменять крутизну управляющих характеристик (рис.4).

3. CO₂-лазер с поперечной прокачкой и выходной мощностью 1 кВт

В данных экспериментах использовался промышленный газоразрядный CO₂-лазер «Хебър-1А» (Болгария) с быстрой поперечной прокачкой рабочей смеси и непрерывным выходным излучением. Основные характеристики этого лазера представлены в табл.2.

Устойчивый резонатор лазера (рис.6), образован концевым вогнутым зеркалом с радиусом кривизны –30 м и

Табл.2. Параметры CO₂-лазера «Хебър-1А».

Длина волны излучения	10.6 мкм
Число мод в пучке	2
Максимальная мощность излучения	1000 Вт
Диапазон регулирования мощности	200–1000 Вт
Диаметр выходного пучка	не более 28 мм
Расходимость излучения	не более 3 мрад

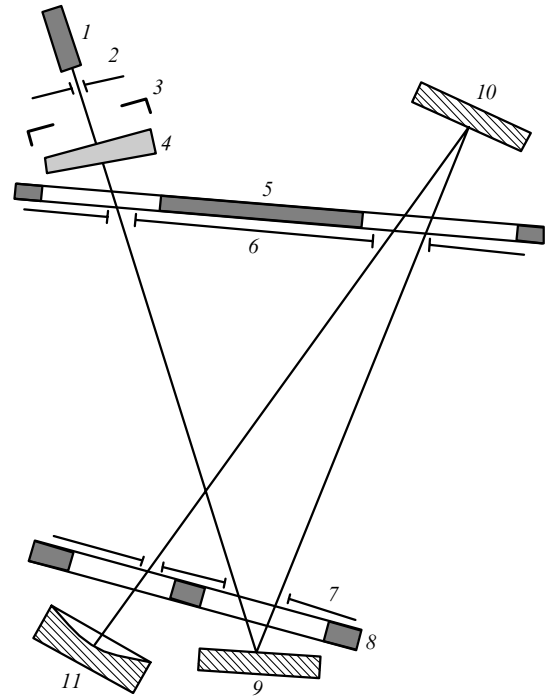


Рис.6. Оптическая схема резонатора CO₂-лазера «Хебър-1А»: 1 – юстировочный He–Ne-лазер; 2 – экран; 3, 5, 8 – диафрагмы; 4 – выходное зеркало; 6, 7 – сменные диафрагменные пластины для юстировки; 9, 10 – поворотные зеркала; 11 – концевое зеркало (заменялось деформируемым зеркалом с управляемой кривизной).

выходным полупрозрачным (пропускание 45 %) плоским зеркалом. В состав резонатора входят также два плоских поворотных зеркала и четыре диафрагмы. Концевое и поворотные зеркала резонатора выполнены из кремния с медным или золотым отражающим покрытием, выходное зеркало – из селенида цинка. Вся оптика резонатора размещена на охлаждаемых водой подложках. Диаметр концевого и выходного зеркал составляет 28 мм, поворотных – 50 мм. Общая длина резонатора равна 3 м.

Как и в предыдущих экспериментах, в резонатор лазера «Хебър-1А» вместо концевого зеркала 11 (рис.6) вакуумно-плотно устанавливалось деформируемое зеркало с управляемой кривизной, аналогичное описанному ранее (см. [1]). Используемое управляемое зеркало также имело плоскую исходную форму оптической поверхности и близкую чувствительность (45 мкм/кВ против 46 мкм/кВ в диапазоне ±100 В, см. табл.1 в [1]). Кроме того, управляющее напряжение данного зеркала было инвертировано по отношению к предыдущему: [–200 В, 300 В] вместо [–300 В, 200 В]; при отрицательном напряжении форма зеркала была вогнутой, при положительном – выпуклой. Для охлаждения деформируемого зеркала использовалась штатная система охлаждения лазера.

Отличие схемы экспериментов с лазером «Хебър-1А» от приведенной на рис.1 состоит в следующем. Число поворотных зеркал в резонаторе – 2 шт. Вместо вольтметра используется измеритель выходной мощности лазера (штатный прибор комплекса «Хебър-1А»), в котором датчиком служит болометр на медной проволоке. Эксперименты проводились при номинальной выходной мощности лазера от 490 до 940 Вт. Как и в предыдущем случае, регистрировалась мощность излучения на выходе лазера в зависимости от управляющего напряжения на деформируемом зеркале.

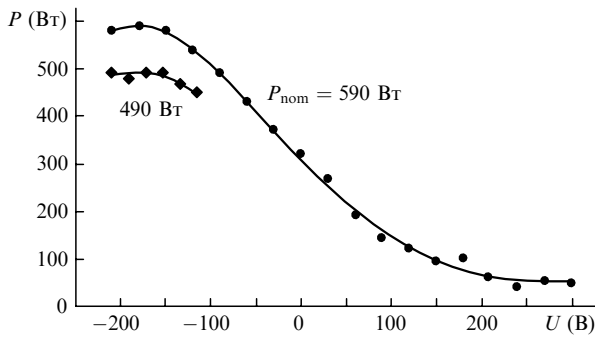


Рис.7. Зависимости выходной мощности P технологического лазера «Хебър-1А» от электрического напряжения U на внутрирезонаторном деформируемом зеркале с управляемой кривизной отражающей поверхности при разных $P_{\text{ном}}$.

Типичные результаты измерений представлены на рис.7. Как и ранее, во всех экспериментах получено стабильное повторяемое управление мощностью выходного излучения лазера. Например, для режима с $P_{\text{ном}} = 590$ Вт повторяемость результатов (предельных значений мощности) характеризуется данными, приведенными в табл.3. Необходимо сказать, что значение мощности, отмеченное в табл.3 звездочкой, по-видимому, не совсем достоверно, поскольку оно было зафиксировано в эксперименте только один раз, и даже при наибольшей номинальной мощности лазера (см. ниже) остаточная мощность излучения не превышала 30 Вт.

Полученные зависимости $P(U)$ имеют максимум при управляющем напряжении около -180 В, что, очевидно, соответствует оптимальной геометрии резонатора. Для данного деформируемого зеркала, вакуумно-плотно установленного в откачанный резонатор лазера, управляющее напряжение -180 В соответствует радиусу кривизны зеркала -31 м. Это практически совпадает с радиусом кривизны штатного зеркала лазера (-30 м).

Проведенные статические испытания показали, что при положительном (запирающем) напряжении на управляемом зеркале генерация в лазере «Хебър-1А» полностью не гасится; остаточная мощность излучения составляет 20–30 Вт. Например, при оптимальной юстировке лазера, соответствующей максимальной выходной мощности 940 Вт (при этом управляющее напряжение на зеркале равно -210 В), остаточная мощность излучения при напряжении $+300$ В не превысила 30 Вт. Очевидно, величина остаточной мощности излучения (при запирающем напряжении на зеркале) тем меньше, чем меньше номинальная мощность выходного излучения лазера. Рассуждая так же, как и в предыдущем разделе, и учитывая одинаковую кривизну (-30 м) штатных концевых зеркал обоих резонаторов, можно полагать, что гашение генерации в лазере «Хебър-1А» будет достигаться при той же исходно выпуклой форме деформируемого зеркала, а именно с радиусом кривизны 270 м.

Таким образом, результаты экспериментов по стати-

ческому управлению мощностью выходного излучения лазеров «Хебър-1А» и «Гарпун-2000» в целом совпадают. Вместе с тем существуют и некоторые различия. В частности зависимость $P(U)$ для лазера «Хебър-1А» при открытом резонаторе (отрицательные управляющие напряжения) не имеет горизонтального участка. Кроме того, на участке максимальной чувствительности резонатора зависимость $P(U)$ для этого лазера является более полой при той же номинальной мощности излучения (2.0 Вт/В против 3.9 Вт/В). Это хорошо видно из сравнения рис.2 и 7. Имеющиеся различия зависимостей $P(U)$ обусловлены, вероятно, геометрией лазерных резонаторов, в частности их разной длиной и различной кривизной выходных зеркал, а также различным соотношением между усилением и потерями в данных лазерах.

Импульсно-периодическая модуляция выходного излучения лазера «Хебър-1А» выполнялась так же, как и для лазера «Гарпун-2000», с той лишь разницей, что амплитудные (U_{max} , U_{min}) и частотно-временные (f , τ) параметры управляющего напряжения (см. рис.3,а) задавались программным образом на компьютере δ (см. рис.1). Результаты экспериментов полностью соответствуют приведенным в п.2.2. Кроме того, эксперименты в импульсно-периодическом режиме показали, что при прочих равных условиях пространственное распределение интенсивности излучения по выходной апертуре улучшается (становится более гладким) по сравнению с распределением для лазера «Хебър-1А» в непрерывном режиме генерации. Это наблюдалось визуально по следу пятна излучения на пластине из оргстекла, которую располагали непосредственно на выходе лазера.

Возможной причиной, объясняющей этот эффект, является перераспределение излучения и разрядного тока в резонаторе при деформациях управляемого зеркала 4 (рис.1) и, как следствие, изменение соотношения между модами в выходном пучке лазера. Поскольку в комплексе «Хебър-1А» излучение состоит из двух мод (TEM_{00} и TEM_{01}), то, вероятно, при импульсном режиме работы этого лазера осуществляется перекачка мощности излучения из более высокой моды в нулевую. Или, другими словами, происходит подавление моды TEM_{01} , что и приводит к более гладкому распределению интенсивности излучения по выходной апертуре.

Другая возможная причина улучшения пространственного распределения интенсивности, по-видимому, заключается в уменьшении термодформаций внутрирезонаторной оптики лазера при импульсно-периодическом режиме генерации. Действительно, термодформации зеркал при прочих равных условиях определяются средним значением мощности падающего на них излучения. При некоторой номинальной мощности лазера переход из непрерывного режима генерации в импульсно-периодический означает снижение средней мощности излучения на зеркале примерно в Q раз, где Q – скважность импульсов излучения (для выходного пучка это видно из рис.5). Следовательно, термодформации внутрирезонаторной оптики в импульсно-периодическом режиме будут меньше, чем при непрерывной генерации, что в результате может привести к улучшению пространственного распределения интенсивности излучения в выходном пучке. Принимая во внимание малые значения реальных термодформаций оптики, по-видимому, можно полагать, что из двух названных причин влияние первой является преобладающим.

Табл.3.

Управляющее напряжение (В)	Выходная мощность (Вт)
-210	580
+300	40–50*
-210	580
+300	20–30
-210	560–570

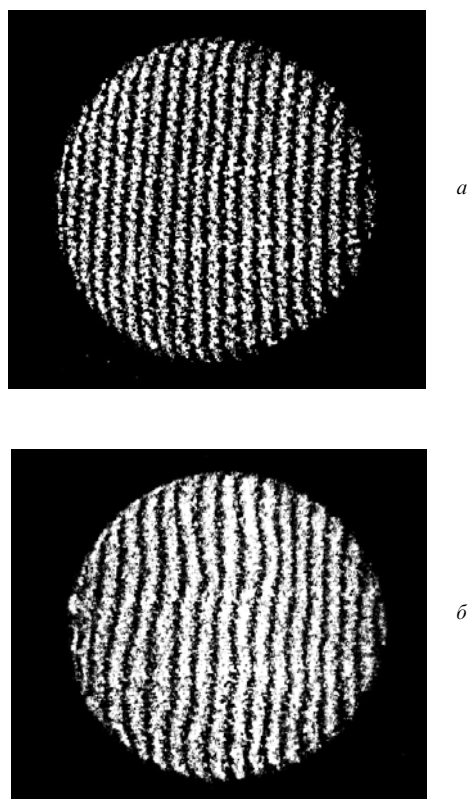


Рис.8. Интерферограммы исходной формы поверхности деформируемого зеркала с управляемой кривизной (световой диаметр 42 мм) до испытаний (а) и после многократных испытаний в резонаторе CO₂-лазера мощностью свыше 2 кВт (б). Длина волны интерферометра 632.8 нм.

Рассмотренные испытания лазеров «Гарпун-2000» и «Хебър-1А» с управляемыми резонаторами были выполнены многократно как при статическом управлении мощностью выходного излучения, так и в импульсно-периодических режимах генерации. Во всех экспериментах деформируемые зеркала в составе резонаторов стабильно работали под лучевой нагрузкой, мощность в непрерывном режиме излучения достигала 4.2 кВт, пиковая мощность в импульсно-периодическом режиме – 6 кВт. Сравнительные интерферометрические измерения зеркал до и после испытаний показали, что их оптические характеристики практически не изменились даже при экспериментах в неблагоприятных термических условиях (охлаждение теплой водой). Для примера на рис.8 показаны интерферограммы зеркала с управляемой кривизной до и после испытаний в лазере «Гарпун-2000». Видно, что максимальные искажения оптической поверхности не превышают четверти длины волны интерферометра ($\lambda = 632.8$ нм), что для ИК оптики ($\lambda = 10.6$ мкм) несущественно

4. Заключение

С помощью рассмотренных ранее зеркал с управляемой кривизной отражающей поверхности [1] во всех выполненных экспериментах получено стабильное повторяемое управление выходной мощностью излучения промышленных технологических CO₂-лазеров с устойчивыми резонаторами и различной прокачкой рабочей смеси как в одномодовом, так и в многомодовом режиме, вплоть до полного гашения генерации. Это позволяет использо-

вать одноканальные биморфные зеркала в качестве своеобразного выключателя лазерного излучения [9] с быстродействием не хуже 0.5 мс. Например, подобный выключатель полезен в лазерном комплексе средней мощности при частой и быстрой смене обрабатываемых заготовок, когда требуется гасить излучение на время отсутствия детали в рабочей зоне или на время перехода лазерной обрабатывающей головки от одной детали (операции) к другой.

Полученные зависимости $P(U)$ позволяют использовать рассмотренные одноканальные деформируемые зеркала внутри резонатора для стабилизации выходной мощности лазера, когда она случайным образом изменяется по каким-либо причинам. Вследствие этого внутрирезонаторные зеркала с управляемой кривизной отражающей поверхности могут применяться также для стабилизации энергетических характеристик фокального пятна в лазерном комплексе при любых технологических операциях за счет управления выходной мощностью лазера. Например, их можно использовать при лазерной сварке для стабилизации температуры в фокальном пятне, которая может изменяться в результате флуктуаций той же выходной мощности лазера, из-за неоднородностей на поверхности и внутри обрабатываемых материалов-заготовок, зазоров между пластинами-заготовками и т. п.

В рассмотренных непрерывных CO₂-лазерах с устойчивыми резонаторами получены импульсно-периодические режимы излучения с частотой повторения импульсов от единиц до сотен герц. При этом экспериментально установлено:

1. Частотно-временные параметры импульсного излучения определяются частотно-временными характеристиками управляющего напряжения на внутрирезонаторном деформируемом зеркале; вначале каждого импульса излучения имеют место затухающие колебания мощности, частота которых соответствует собственной частоте колебаний деформируемого зеркала.

2. Вначале каждого импульса излучения происходит выброс мощности, обусловленный включением добротности лазера; его амплитуда в 2.5 раза превышает мощность в непрерывном режиме генерации.

3. Время включения добротности лазера ограничено временем затухания колебаний отражающей поверхности деформируемого зеркала после скачка управляющего напряжения и составляет около 50 мкс (общая длительность затухающих колебаний не превышает 0.4 мс).

4. Средняя мощность импульсно-периодического излучения однозначно определяется относительной длительностью τ/T (или скважностью) импульсов, запирающих или открывающих резонатор лазера, причем зависимость $P(\tau)$ является линейной, по крайней мере в рассмотренном диапазоне, а ее наклон определяется частотой повторения импульсов f .

5. При импульсно-периодической генерации распределение интенсивности излучения по выходной апертуре становится более гладким по сравнению с распределением при работе лазера в непрерывном режиме.

В проведенных экспериментах частота импульсно-периодической модуляции была ограничена сверху возможностями управляющей электроники. Очевидно, что при использовании более мощной электроники внутрирезонаторное применение рассмотренных зеркал позволит реализовать в непрерывных CO₂-лазерах импульсно-

периодические режимы с более высокими частотами, вплоть до резонансной частоты управляемого зеркала ($F_{\text{res}} = 4.7$ кГц, ширина резонансного пика $\Delta F = 0.42$ кГц по уровню $1/\sqrt{2}$). Тем более, что амплитуда деформаций управляемых зеркал на резонансной частоте существенно превышает их деформации в статике [7]. Принимая во внимание типовой характер оптических схем рассмотренных устойчивых резонаторов и стабильную воспроизводимость результатов, можно полагать, что использование данных зеркал в других CO_2 -лазерах приведет к таким же результатам.

Что касается маломощных CO_2 -лазеров, то в них можно использовать неохлаждаемые деформируемые зеркала аналогичного типа и конструкции [7], чувствительность которых больше, чем у охлаждаемых (ср. численные данные из работ [7] и [8]). Следовательно, при прочих равных условиях их применение обеспечит большую эффективность внутррезонаторного управления излучением и импульсно-периодическую модуляцию при меньших амплитудах напряжения на деформируемом зеркале.

В проведенных экспериментах зеркало с управляемой кривизной отражающей поверхности устанавливалось в резонатор вместо концевое зеркала. Однако при необходимости любое поворотное зеркало резонатора можно заменить деформируемым (с учетом компенсации возможного астигматизма). Тем более, что данные управляемые зеркала легко позволяют сделать это благодаря своим массогабаритным характеристикам (см. работу [1]). Например, в резонаторе лазера «Хебър1А» (рис.6) деформируемые зеркала могут быть установлены вместо поворотных зеркал 9 и 10, что вместе с заменой концевое зеркала приведет к образованию управляемого резонатора с несколькими деформируемыми зеркалами

[10]. Понятно, что эффективность управления излучением в таком резонаторе возрастет. Кроме того, при наличии в резонаторе нескольких зеркал с управляемой кривизной появляются и другие возможности, например снижение выходного напряжения управляющей электроники и, следовательно, ее упрощение, компенсация электромеханического гистерезиса одного деформируемого зеркала за счет другого и т.п. Работа в импульсно-периодическом режиме открывает возможность расширения частотного диапазона модуляции за счет подбора и комбинирования частотных режимов отдельных деформируемых зеркал.

1. Выскубенко О.Б., Капустин П.И., Колоколов И.С., Масычев В.И., Сафронов А.Г. *Квантовая электроника*, **33**, 547 (2003).
2. Аполлонов В.В., Вдовин Г.В., Островская Л.М., Родин В.Н., Четкин С.А. *Квантовая электроника*, **18**, 128 (1991).
3. Белуга И.Ш., Виневич Б.С., Колосовская Л.А. *Оптика и спектроскопия*, **50**, 541 (1981).
4. Гнедой С.А., Кудряшов А.В., Самаркин В.В., Якунин В.П. *Квантовая электроника*, **16**, 1839 (1989).
5. Kudryashov A.V., Samarkin V.V. *Opt. Commun.*, **118**, 317 (1995).
6. Абильситов Г.А., Голубев В.С., Гонтарь В.Г. и др. *Технологические лазеры: Справочник. Расчет, проектирование и эксплуатация*. Под ред. Г.А.Абильситова (М.: Машиностроение, 1991, т. 1).
7. Сафронов А.Г. *Квантовая электроника*, **22**, 1113 (1995).
8. Виневич Б.С., Жариков В.М., Сафронов А.Г. *Квантовая электроника*, **25**, 377 (1998).
9. Виневич Б.С., Сафронов А.Г. *Патент РФ по заявке № 2001126886 от 4 октября 2001*.
10. Сафронов А.Г. *Патент РФ по заявке № 2001133684 от 17 декабря 2001 г.*
11. Яворский Б.М., Детлаф А.А. *Справочник по физике* (М.: Наука, 1968, с. 117–121).
12. *Физическая энциклопедия*. Гл. ред. А.М.Прохоров (М.: Сов. энциклопедия, 1990, т. 2, с. 448-449).