

Фазовая коррекция излучения мощного технологического лазера с селекцией высших мод

М.Г.Галушкин*, П.В.Короленко**, В.Г.Макаров**, А.Т.Полоско**, В.П.Якунин*

Теоретически и экспериментально исследованы особенности работы мощного технологического CO₂-лазера с селекцией и коррекцией фазы высших поперечных мод. Впервые сообщается об эффективном преобразовании с помощью фазового корректора поля высшего типа колебаний в узконаправленный пучок с синфазными световыми колебаниями при выходной мощности до 1 кВт. Достигнуто трехкратное уменьшение угловой расходимости по сравнению с расходимостью многомодового пучка. Проанализирована физическая природа внутрирезонаторных аберраций, негативно влияющих на качество пучка. Показано, что наиболее значительным оказывается влияние аберрации типа оптического клина, возникающей из-за использования поперечной прокачки активной среды и поперечного разряда. Обсуждается перспектива применения рассмотренного метода получения узконаправленного излучения при более высоких выходных мощностях.

Ключевые слова: технологический лазер, оптический резонатор, качество излучения.

1. Введение

В настоящее время проблема улучшения качества излучения и повышения эффективности съема энергии с активной среды мощных технологических лазеров сохраняет актуальность. При использовании устойчивых резонаторов возможности решения указанной проблемы ограничены переходом лазера в многомодовый режим генерации при увеличении апертуры резонатора. Предложенные альтернативные схемы оптических резонаторов наряду с определенными преимуществами, как правило, обладают и рядом трудно устранимых недостатков. Так, классическая схема неустойчивого резонатора [1] часто оказывается неэффективной в мощных газовых лазерах из-за относительно невысоких коэффициентов усиления активной среды. Достаточно популярная в настоящее время схема устойчиво-неустойчивого резонатора [2, 3] не дает возможности формировать на выходе аксиально-симметричную структуру излучения. Заметно улучшить характеристики неустойчивого резонатора позволяет его модификация [4], в которой полупрозрачное выходное зеркало обладает периферийной слабо отражающей зоной. Однако большие поперечные размеры выходящего из подобного резонатора пучка усугубляют его критичность к влиянию аберраций последующей передающей и формирующей оптики.

Среди иных типов резонаторов для технологических лазеров можно отметить резонаторы с пространственной фильтрацией излучения [5, 6]. При хорошем качестве излучения они, являясь многоэлементными устройствами, сложнее в настройке и эксплуатации. Ограниченные

возможности альтернативных схем резонаторов стимулируют попытки улучшить характеристики резонаторов с устойчивой геометрией. Один из способов улучшения свойств устойчивых резонаторов состоит в пространственно-неоднородном выводе энергии возбуждаемых в них высших (в том числе и многоходовых) мод [7–9]. Однако при его практической реализации следует считать с тем, что в мощных лазерах плотность выводимой мощности излучения может превысить порог радиационной прочности зеркал.

Существует еще один способ улучшения качества формируемого в резонаторе лазерного пучка и его согласования с профилем усиления активной среды, основанный на селективном возбуждении в резонаторе определенной моды высокого порядка и последующем преобразовании ее поля с помощью специального фазового корректора в пучок с синфазными световыми колебаниями [10–13]. Этот способ был реализован в лазерах с невысокой выходной мощностью. Однако его применимость для мощных лазеров в литературе не обсуждалась. Между тем использование такого способа в мощных технологических лазерах позволило бы при весьма простой модификации оптического тракта существенно улучшить качество излучения. В настоящей работе рассмотрена физическая модель, описывающая генерацию мощного технологического CO₂-лазера с селекцией и коррекцией фазы высших поперечных мод, и приведены экспериментальные данные, характеризующие особенности его генерации.

2. Основные характеристики лазера

Эксперименты проводились на электроразрядном CO₂-лазере ТЛ-2.5 с длиной волны излучения 10.6 мкм, поперечной прокачкой рабочей смеси и поперечным разрядом. Соотношение компонентов рабочей смеси Ne: N₂: CO₂: O₂ = 15: 4: 1: 0.2 при общем давлении в разрядной камере 25–30 Тор. Скорость прокачки активной среды через зону резонатора составляла 50–60 м/с. Для

*Институт проблем лазерных и информационных технологий РАН, Россия, 140700 Шатура, Московская обл., ул. Святоозерская, 1

**Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова, физический факультет, Россия, 119992 Москва, Воробьевы горы; e-mail: korolenko@optics.npi.msu.ru

формирования поперечного разряда использовался секционированный анод, соединенный с системой балластных сопротивлений. Катод был выполнен в виде медного цилиндра малого диаметра, охлаждаемого проточной водой. Длины анода и катода были равны 1 м при расстоянии между ними 39 мм. Ток разряда мог варьироваться от 3 до 15 А.

Схема применяемого в лазере устойчивого оптического резонатора показана на рис. 1, а. Резонатор, построенный по многопроходной схеме, образован сферическим (1) и плоским (4) зеркалами, а также двумя поворотными зеркалами 2 и 3. Полное число проходов излучения через активную среду равно пяти при общей длине резонатора 8 м. Ось резонатора располагалась на расстоянии 22 мм от анода.

Приведенные на рис. 1, а оси x и y определяют соответственно направление электрического разряда и потока газовой смеси. Используемое в качестве выходного плоское зеркало 4 наносилось на цинк-селеновую подложку, прозрачную в ИК области, и имело коэффициент пропускания 50%. Вблизи отражающей поверхности зеркала находилась амплитудная маска 5 для селекции определенной моды резонатора, а вблизи тыльной – фазовый корректор 6. Маска представляла собой устанавливаемый вблизи выходного зеркала непрозрачный экран, в котором выполнены отверстия определенной конфигурации. Внутренние непрозрачные элементы маски располагались в области узлов поперечного распределения поля селектируемой моды.

В ряде экспериментов применялось выходное зеркало, с которым были технологически совмещены селектирующая маска и фазовый корректор. В этом случае форма и положение отверстий маски соответствовали зонам на отражающей поверхности, обеспечивающим оптимальные с точки зрения получения максимальной выходной мощности коэффициенты пропускания и отражения. Остальная (селекторная) часть поверхности зеркала выполнялась при этом полностью пропускающей. Совмещение с зеркалом корректора фазы достигалось тем, что на тыльную грань подложки наносились соответствующим образом расположенные прозрачные для излучения покрытия с оптической толщиной, равной половине длины волны.

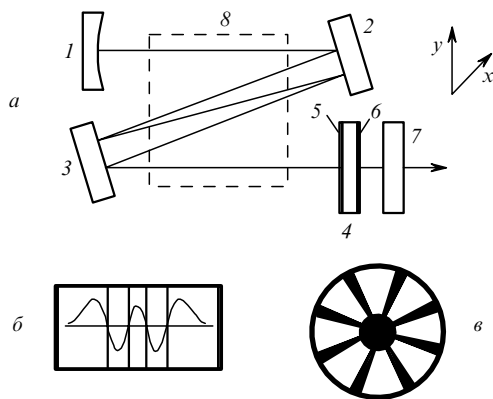


Рис. 1. Схема оптического резонатора (а) и конфигурации селектирующих масок (б, в):

1 – глухое сферическое зеркало; 2, 3 – поворотные зеркала; 4 – выходное плоское зеркало; 5 – маска; 6 – фазовый корректор; 7 – выходное окно; 8 – активная среда; кривая на рис. 1, б – пространственное распределение селектируемой моды.

При малых токах разряда (до 8 А) лазер обычно генерировал суперпозицию мод TEM_{00} и TEM_{01} , причем узловая линия моды TEM_{01} совпадала с осью y (направлением потока). Последнее обстоятельство указывает на то, что эффективный размер моды TEM_{00} , определяющий ее взаимодействие с активной средой, в направлении оси y заметно превышает за счет движения среды размер в направлении оси x . С увеличением тока разряда и при соответствующем повышении выходной мощности излучение представляло собой более сложную суперпозицию высших мод.

Для анализа поперечной структуры выходного излучения лазера использовалась диагностическая система Mode Analysis Computer-2. На входное отверстие этой системы излучение подавалось после уменьшения его мощности, осуществляемого с помощью дифракционного ответвителя.

3. Расчет резонатора с селекцией высших мод

В основу расчетной модели резонатора с селекцией моды высшего порядка были положены требования, сводящиеся к обеспечению:

- наилучшего согласования объемов селектируемой моды и активной зоны резонатора;
- необходимой селектирующей способности амплитудной маски при минимальных дополнительных потерях;
- технологичности изготовления и радиационной прочности элементов резонатора и фазового корректора;
- устойчивости характеристик селектируемой моды и компенсатора фазы к оптическим aberrациям внутри резонатора.

Исходными параметрами при расчете оптимальной конфигурации селектирующей маски были размеры ограничивающих диафрагм, штатно устанавливаемых вблизи выходного плоского зеркала резонатора, а также радиус кривизны глухого сферического зеркала. Одна из используемых в экспериментах диафрагм имела прямоугольную форму (размер в направлении оси x составлял 39 мм, в направлении оси y – 19 мм), другая была круглой (с радиусом 12 мм). Для прямоугольной диафрагмы проводился расчет оптимальной конфигурации эрмит-гауссовой моды, а для круглой – лаггер-гауссовой моды. Радиус кривизны глухого сферического зеркала $R = 30$ м. Последний параметр при известной длине резонатора ($L = 8$ м) и длине волны $\lambda = 10.6$ мкм однозначно задает радиус пучка основной моды w_0 на выходном зеркале:

$$w_0 = (\lambda/\pi)^{1/2} [L(R-L)]^{1/4} = 6.7 \text{ мм}. \quad (1)$$

Оценка дифракционных потерь на внутрирезонаторной диафрагме и на элементах маски проводилась по формулам работы [8], полученным в приближении заданного поля. В этом приближении можно считать, что падающая на выходное зеркало волна соответствует в прямоугольной системе координат «чистой» селектируемой моде $\Psi_{mn}(x, y, z)$. В пренебрежении потерями энергии на глухом зеркале потери δ_{mn} этой моды определяются следующим выражением [8]:

$$\delta_{mn} = 1 - r_{mn}, \quad (2)$$

где

$$r_{mn} = (\rho_1 A_1 + \rho_2 A_2)^2 \quad (3)$$

– коэффициент отражения от системы селектор – выходное зеркало в селектируемую моду; ρ_1 и ρ_2 – коэффициенты отражения по амплитуде соответственно от рабочей поверхности зеркала и от элементов селектора (отражение от ограничивающей диафрагмы также будем считать равным ρ_2 , рассматривая тем самым диафрагму как элемент селектирующей маски);

$$A_1 = \int_{S_1} |\Psi_{mm}^2| dx dy; \quad (4)$$

$$A_2 = \int_{S_2} |\Psi_{mm}^2| dx dy; \quad (5)$$

S_1 – площадь рабочей поверхности зеркала; S_2 – площадь непрозрачных участков маски (считается, что мощность селектируемой моды равна единице).

Определяемые формулой (2) потери складываются из потерь на пропускание выходного зеркала, потерь, обусловленных поглощением в зеркале и элементах маски, а также потерь, связанных с рассеянием энергии искаженной селектором рабочей моды в моды резонатора с другими поперечными индексами.

С помощью соотношений (1)–(5) и с учетом сформулированных выше требований была проведена многопараметрическая оптимизация параметров селективного резонатора, в ходе которой варьировались индексы возбуждаемых в резонаторе мод, а также форма и размеры элементов селектирующих масок. Распределения амплитуд различных мод рассчитывались, исходя из теории «холодного» резонатора [14]. В результате расчетов было установлено, что для заданных размеров внутрирезонаторных диафрагм оптимальной является селекция эрмит-гауссовой моды TEM_{40} (для прямоугольной диафрагмы) и лаггер-гауссовой моды TEM'_{04} (для круглой диафрагмы). Конфигурации масок, используемых для селекции этих мод, приведены на рис.1,б и в. Размеры внутренних апертур масок соответствуют размерам внутрирезонаторных ограничивающих диафрагм, что гарантирует наилучшее заполнение излучением активной зоны резонатора. Ширина внутренних перетяжек прямоугольной маски $2d = 0.54$ мм (d – расстояние от края перетяжки до узловой линии селектируемой моды). Угловой размер радиальных перетяжек круглой маски $2\varphi_0 = 0.16$ рад при диаметре внутренней непрозрачной круглой зоны 8 мм.

Селектирующую способность прямоугольной маски характеризуют кривые, приведенные на рис.2,а. Они определяют зависимость потерь σ_{m0} при отражении волны от системы зеркало – селектор от индексов m возбуждаемых в резонаторе мод TEM_{m0} при разных ширинах перетяжек. Видно, что выбранная в качестве оптимальной ширина перетяжки $2d = 0.54$ мм (0.08 в единицах w_0) обеспечивает без заметного увеличения внутрирезонаторных потерь селективность, определяемую разностью потерь между выбранной и другими модами резонатора, не хуже 10%. Селектирующую способность круглой маски определяют кривые на рис.2,б, которые характеризуют соотношение потерь в системе зеркало – селектор мод TEM'_{0l} , различающихся индексом l . Как видно из хода кривых, использованный при изготовлении круглой маски азимутальный размер радиальных перетяжек ($2\varphi_0 = 0.16$ рад) обеспечивает селективность $\sim 15\%$, лишь незначительно увеличивая общие потери.

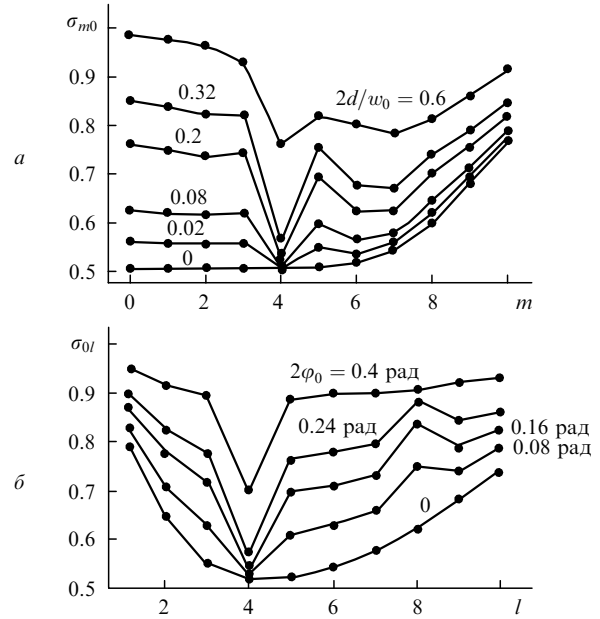


Рис.2. Потери эрмит-гауссовых мод TEM_{m0} (а) и лаггер-гауссовых мод TEM'_{0l} (б) при настройке селектора соответственно на моду TEM_{40} и TEM'_{04} для разных шириных перетяжек $2d/w_0$ и азимутальных размеров радиальных перетяжек $2\varphi_0$.

Исходя из практики применения пространственной селекции возбуждаемых в резонаторе CO_2 -лазера мод [8], указанные селективности можно считать приемлемыми. Поскольку критичность механизма конкуренции мод к соотношению их потерь высока, окончательный вывод о достаточности селектирующей способности выбранной маски для получения одномодового режима может дать лишь эксперимент (см. ниже).

С целью проверки использованной для оценки потерь модели, основанной на приближении заданного поля, был проведен с помощью итерационного метода [15] расчет структуры внутрирезонаторного поля при оптимальных конфигурации и положении селекторной маски.

Расчитанные распределения интенсивности и фазы волны, падающей на плоское зеркало, для прямоугольной маски с приведенной выше оптимальной шириной перетяжки показаны на рис.3,а,б. На указанных распределениях видны слабые возмущения, обусловленные дифракцией лазерного пучка на элементах маски. Тем не менее они весьма близки соответствующим распределениям для мод «пустого» резонатора, что подтверждает корректность использованной расчетной модели. На рис.3,в приведено распределение в дальней зоне интенсивности светового пучка, сформировавшегося в резонаторе и прошедшего затем фазовый компенсатор. Из сравнения этого распределения с профилем интенсивности при генерации лазера на основной моде (штриховая кривая) хорошо видно сужение диаграммы направленности излучения при фазовой компенсации изменений фазы в соседних сегментах поперечной структуры селектируемой высшей моды.

С помощью итерационного метода исследовалась также критичность селекции моды резонатора к отклонению размеров перетяжек внутрирезонаторных масок от оптимального значения. Расчеты показали, что селектирующая способность масок не очень критична к размерам перетяжек. Так, их увеличение в два-три раза по сравнению с оптимальным значением не сказывалось

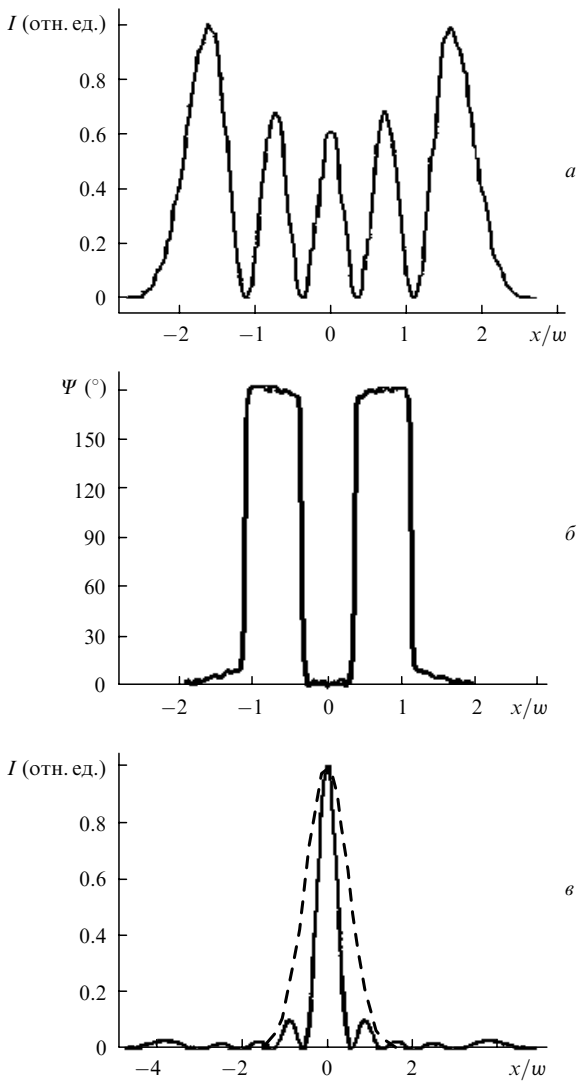


Рис.3. Распределения интенсивности I (а, в) и фазы Ψ (б) вблизи выходного зеркала (а, б) и в дальней зоне (в). Штриховая кривая – излучение на основной моде; w – радиус пучка основной моды.

существенно на характеристиках селектуемого внутриврезонаторного поля.

4. Влияние оптических aberrаций и погрешностей компенсации изменений фазы на качество лазерного пучка

Приведенные выше результаты расчета селектуемой способности масок были выполнены в пренебрежении влиянием разнообразных оптических aberrаций, искажающих амплитудно-фазовый профиль волны, падающей на селектор. Среди факторов, вызывающих aberrации, следует выделить (с точки зрения значимости) эффекты, обусловленные тепловым самовоздействием излучения в активной среде и пространственной неоднородностью энерговклада в разряд [16]. Указанные факторы вызывают появление aberrаций типа оптического клина, приводящих к наклону оси резонатора. Выполненные измерения угла наклона оси резонатора [16] показали, что в технологическом CO_2 -лазере с поперечной прокачкой рабочей смеси при выходной мощности 5 кВт угловые смещения $\Delta\varphi$ могут достигать 1.6×10^{-4} рад. Угловое смещение приводит к поперечному смещению

оси резонатора в плоскости маски Δx , которое можно приближенно оценить по формуле $\Delta x = (R - L)\Delta\varphi$. Если $\Delta\varphi = 1.6 \times 10^{-4}$ рад, то $\Delta x = 3.5$ мм. Тем самым поперечные смещения оси при высокой мощности оказываются сопоставимыми с радиусом пучка основной моды.

Поперечное смещение оси резонатора может приводить к весьма существенному ухудшению селектуемой способности маски и искажению структуры излучения внутри резонатора и в дальней зоне. Это хорошо видно из рис.4, на котором показаны рассчитанные итерационным методом распределения интенсивности и фазы излучения на выходе лазера в ближней и дальней зонах для случая, когда при селекции моды TEM_{40} ось

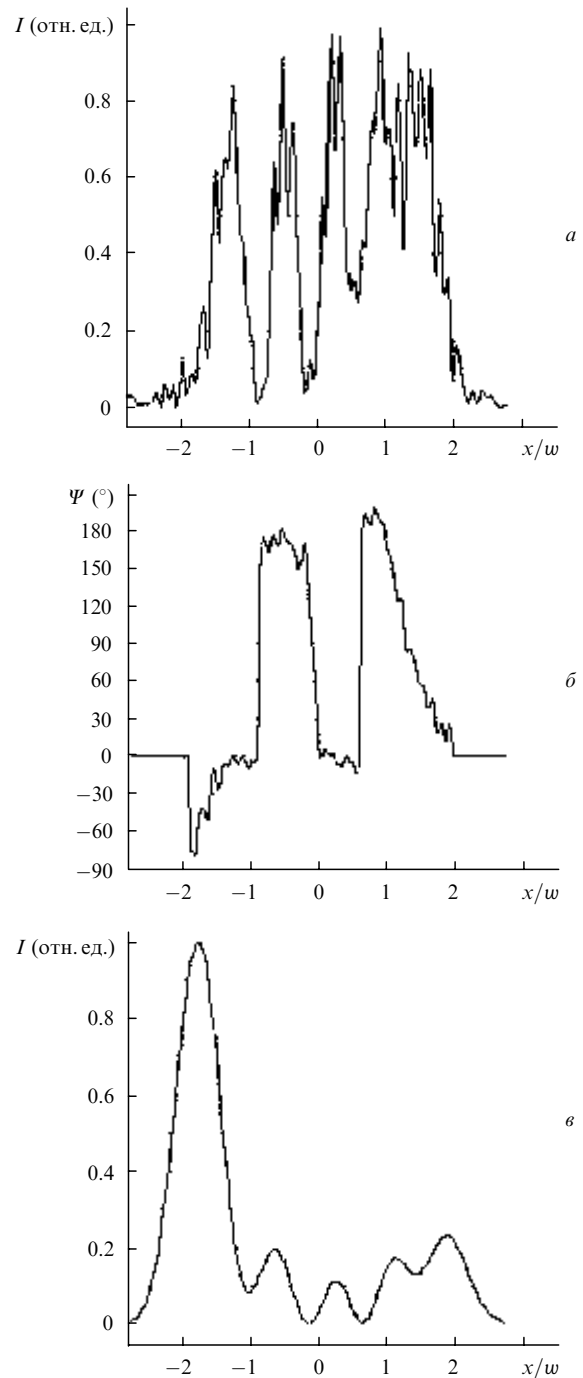


Рис.4. Распределения интенсивности I (а, в) и фазы Ψ (б) при смещении маски вблизи выходного зеркала (а, б) и в дальней зоне (в) при $\Delta x/2d = 4$.

резонатора сдвинута в плоскости селективирующей маски на величину, в четыре раза превышающую ширину ее перетяжек. Смещение пучка относительно маски приводит не только к искажению профиля интенсивности, но и к существенным фазовым aberrациям. Последний же фактор мешает выровнять распределение фазы с помощью фазового компенсатора. Расчеты показали, что при смещении оси резонатора в направлении оси x характеристики внутррезонаторного поля резко ухудшаются при $\Delta x = (0.15 - 0.2)\omega_0$. Следует отметить, что смещение оси в направлении y не влияет существенно на селективирующую способность прямоугольной маски, вызывая лишь некоторое увеличение общих потерь.

Аналогичные расчеты с целью оценки влияния смещения оси были проведены для круглой маски. Они показали, что круглая маска теряет селективирующие свойства при смещениях $\Delta r = (0.15 - 0.3)\omega_0$. При этом смещение оси в направлении узловой линии оказывает более сильное влияние.

Оценки влияния на характеристики выходного пучка неточностей выравнивания фазы световых колебаний в выходной плоскости лазера показывают, что качественное преобразование поля селективируемой моды можно осуществить, когда погрешность компенсации фазы δ для моды TEM_{40} не превышает 20–25%. Критичность к δ корректировки фазы цилиндрических лаггер-гауссовых мод выражена сильнее: допустимые значения δ не должны превышать 10%. Различие в приведенных оценках объясняется тем, что корректировка фазового распределения моды TEM_{40} проводится в сегментах с меньшей относительной площадью.

5. Результаты экспериментов и их обсуждение

В экспериментах с селекцией моды TEM_{40} маска сначала располагалась так, что ее перетяжки были ориентированы по направлению потока. Было установлено, что при таком положении маски оптическая схема обеспечивала эффективное преобразование моды TEM_{40} в пучок с синфазными колебаниями при выходной мощности 700–800 Вт. Помещение в резонатор селективирующей маски при неизменной апертуре резонатора уменьшало выходную мощность примерно на 10%. Однако это уменьшение сопровождалось резким увеличением (почти в два раза) интенсивности в приосевой области и могло быть легко скомпенсировано увеличением тока накачки. Сказанное подтверждают зарегистрированные на экране монитора диагностической системы распределения интенсивности излучения, приведенные на рис.5. Распределения на рис.5,а,б зарегистрированы на выходе резонатора, а распределения на рис.5,в,г – в фокальной плоскости собирающей линзы (дальняя зона) при выходной мощности 700 Вт. Из сравнения этих рисунков хорошо видно улучшение расходимости излучения при компенсации изменений фазы.

Размер пятна в фокальной плоскости линзы в направлении оси x оказывается меньше размера в направлении оси y , поскольку на выходе лазера эффективный размер пучка в направлении оси x больше. Анализ профиля пучка, изображенного на рис.5,г, показывает, что его угловая расходимость в направлении оси x примерно вдвое меньше угловой расходимости основной моды. Угловая ширина пучка по уровню половинной интенсивности

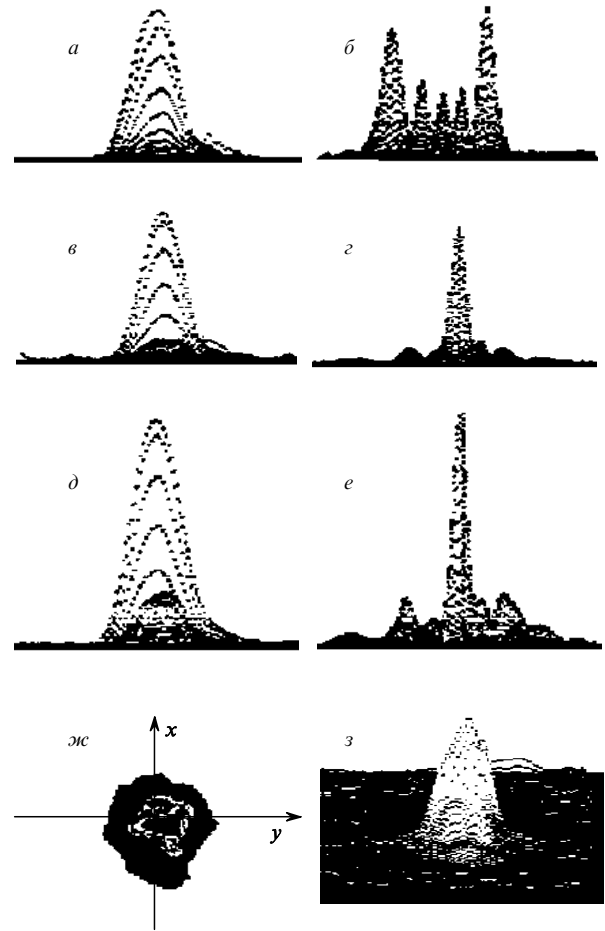


Рис.5. Структура излучения лазера с фазовым корректором при селекции эрмит-гауссовой моды TEM_{40} (а–е) и лаггер-гауссовой моды TEM'_{04} в плоскостном (ж) и объемном (з) представлениях, полученная вдоль оси y (а, в, д) и вдоль оси x (б, г, е) вблизи выходного зеркала (а, б) и в фокальной плоскости линзы (в–з) при выходной мощности 700 (а–г), 1000 (д, е) и 800 Вт (ж, з).

$\theta = 4 \times 10^{-4}$ рад. Такая угловая расходимость совпадает с приведенными теоретическими оценками (см. рис.3,в). Если характеризовать расходимость излучения в плоскости xz угловой шириной области, содержащей определенную долю полной мощности, то по уровню 0.5 от полной мощности расходимость преобразованной моды TEM_{40} $\theta = 1.7 \times 10^{-4}$, что составляет 0.55 от расходимости моды TEM_{00} ; по уровню 0.8 расходимости указанных мод становятся одинаковыми и равными 6×10^{-4} . Выравнивание расходимостей происходит из-за наличия боковых максимумов в пучке скорректированной моды TEM_{40} . Отметим, что последнее из приведенных значений расходимости примерно в три раза меньше расходимости многомодового пучка ($\theta = 2 \times 10^{-3}$), сформированного в резонаторе в отсутствие маски.

Дальнейшее повышение выходной мощности ухудшало качество излучения. На рис.5,д,е показана структура лазерного пучка в фокальной плоскости фокусирующей линзы при мощности ~ 1 кВт. Видно, что при такой мощности начинают проявляться заметные искажения профиля пучка. Дальнейшее повышение мощности приводило к уширению пятна в фокальной плоскости, что указывает на отсутствие фазовой синхронизации на выходе лазера. Важным с точки зрения интерпретации экс-

периментальных данных является тот факт, что при резком уменьшении тока накачки и соответственно уменьшении выходной мощности структура излучения быстро улучшалась. Это свидетельствует о том, что основные aberrации, влияющие на селекцию в резонаторе определенного типа колебаний и фазовую компенсацию, в меньшей степени обусловлены нагревом элементов резонатора, а связаны в основном с самовоздействием излучения в активной среде и пространственной неоднородностью энерговклада в разряде.

При расположении перетяжек маски перпендикулярно потоку активной среды обеспечение селекции моды TEM_{04} и соответственно получение на выходе лазера узконаправленного излучения оказались невозможными из-за появления примеси моды TEM_{14} , значительно искажающей структуру внутрирезонаторного поля. Не удалось получить приближающегося к теоретической оценке качества излучения и при селекции с помощью круглой маски моды TEM'_{04} , если мощность излучения превышала 700–800 Вт. Несмотря на близость регистрируемых распределений интенсивности к «классическому» распределению моды TEM'_{04} , ее волновой фронт при указанных мощностях приобретал существенные фазовые искажения. Эти искажения не позволяли сформировать в дальней зоне профиль интенсивности пучка более узкий, чем профиль основной моды, хотя устойчиво наблюдалось существенное повышение интенсивности пучка в приосевой области (см. рис.5,ж,з).

Выявленное в проведенных экспериментах снижение эффективности преобразования моды высокого порядка в узконаправленное излучение при большой выходной мощности можно однозначно связать с негативным влиянием внутрирезонаторных неоднородностей. Теоретические оценки показывают [4, 16], что светоиндуцированные оптические неоднородности в движущейся активной среде могут вызывать при мощности 1 кВт угловое смещение оси порядка 10^{-4} рад. Такие наклоны оси применительно к используемой геометрии резонатора приводят к ее смещению в плоскости селекционной маски, близкому к критическому с точки зрения проявления селектирующих свойств маски. К несколько меньшим (примерно вдвое) наклонам оси приводят эффекты, связанные с неоднородностью энерговклада в разряд [4, 16]. Теоретические оценки [4, 16] нашли подтверждение при измерении углового смещения оси выходного пучка с увеличением мощности исследуемого лазера, в котором устойчивый резонатор был заменен телескопическим резонатором неустойчивой конфигурации.

6. Заключение

Основной вывод, который можно сделать, обобщая результаты расчетов и экспериментов, состоит в том, что использованные в данной работе методы расчета и оптимизации оптического тракта CO_2 -лазеров с поперечной прокачкой активной среды, а также существующие в настоящее время технологические возможности изготовления их оптических элементов позволяют при хорошем заполнении излучением активной среды получать путем коррекции волнового фронта высших мод узконаправленное излучение мощностью до 1 кВт.

Наиболее существенным препятствием для улучшения выходных характеристик лазеров при более высокой

мощности излучения являются возрастающие с увеличением тока накачки внутрирезонаторные aberrации типа оптического клина. Их физическая природа в значительной степени обусловлена поперечной прокачкой активной среды и поперечным разрядом. Aberrации указанного типа, с одной стороны, отрицательно сказываются на селектирующей способности внутрирезонаторной маски из-за смещения оси резонатора, а с другой стороны, вызывают из-за увеличения роли дифракции излучения на элементах маски возмущения волнового фронта, которые не могут быть скомпенсированы фазовым корректором.

Как численное моделирование, так и результаты экспериментов показывают, что негативное влияние aberrаций на структуру излучения выше при селекции лаггергауссовых мод, чем при селекции эрмит-гауссовых. В значительной степени это связано с большей чувствительностью к возмущениям волнового фронта фазового компенсатора, настроенного на моды цилиндрической геометрии.

Таким образом, эффективное преобразование излучения мод высокого порядка в узконаправленный пучок при выходной мощности, превышающей 1 кВт, возможно лишь при подстройке в рабочем режиме положений маски и корректора фазы для заданной выходной мощности. Организация такой подстройки в типовых технологических лазерах потребует более существенной модификации оптического тракта и системы управления его параметрами.

Наконец, следует указать на перспективность использования метода коррекции фазового профиля высших мод в мощных технологических газовых лазерах с быстрой аксиальной прокачкой рабочей смеси, поскольку в таких лазерах практически отсутствуют причины для возникновения aberrаций типа оптического клина.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке научной программы «Университеты России» (проекты 015.01.02.031 и УР.01.03.007).

1. Ананьев Ю.А. *Оптические резонаторы и проблема расходимости лазерного излучения* (М.: Наука, 1979).
2. Borghese A., Ganevari R. *Appl. Opt.*, **20**, 3547 (1981).
3. Забелин А.М. *Программа и аннотации докл. VII Междунар. конф. «Лазерные и лазерно-информационные технологии: фундаментальные проблемы и приложения»* (Суздаль, 2001, с. 51).
4. Galushkin M.G., Yakunin V.P., Samarkin V.V., Zavalova V.Ye. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **3686**, 10 (1999).
5. Джиджоев М.С., Кудинов И.А., Платоненко В.Т., Попов В.К. *Квантовая электроника*, **13**, 224 (1986).
6. D'Amato F., Giorgi M., Marchetti S. *Opt. Commun.*, **76**, 121 (1990).
7. Троицкий Ю.В. *Квантовая электроника*, **1**, 124 (1974).
8. Абросимов Г.В., Королев Ф.А., Короленко П.В., Одинцов А.И., Саркаров Н.Э., Шарков В.Ф. *ЖПС*, **25**, 52 (1976).
9. Короленко П.В., Шарков В.Ф., Федотов Н.Н. *Квантовая электроника*, **22**, 562 (1995).
10. Casperson Lee W., Kincheloe N.K., Stafsudd O.M. *Opt. Commun.*, **21**, 1 (1977).
11. Casperson Lee W. *Opt. Quant. Electron.*, **8**, 537 (1976).
12. Casperson Lee W. *Opt. Quant. Electron.*, **9**, 499 (1977).
13. Casperson Lee W. *Laser Focus World*, № 5, 223 (1994).
14. Kogelnik H., Li T. *Proc. IEEE*, **54**, 1312 (1966).
15. Fox A.G., Li T. *Bell Syst. Techn. J.*, **40**, 453 (1961).
16. Акиртава Д.О., Голубев В.С., Галушкин М.Г., Забелин А.М., Панченко В.Я. *Сб. препринтов НИЦТЛ АН СССР* (Шатура, 1991, с. 91).