

О возможности применения кубического зеркального отражателя в резонаторах мощных импульсно-периодических лазеров

В.Д.Булаев, В.С.Гусев, С.Л.Лысенко, Ю.Б.Морозов, А.Н.Познышев

Исследован оптический резонатор, в котором в качестве глухого зеркала использован полый кубический зеркальный отражатель (КЗО) из плоских металлических неохлаждаемых зеркал, обеспечивающий в совокупности с плоским полупрозрачным выходным зеркалом сплошное заполнение апертуры выходного лазерного пучка. Показано, что в мощных импульсно-периодических лазерах дальнего и среднего ИК диапазонов может быть достигнута расходимость излучения, близкая к дифракционному пределу (с учётом «блуждания» оси диаграммы направленности) как в импульсном, так и в импульсно-периодическом режиме, зависящая только от качества поверхностей и точности сведения зеркал полого КЗО и юстировки резонатора.

Ключевые слова: кубический зеркальный отражатель, мощный лазер, расходимость излучения.

1. Введение

Тепловое самовоздействие излучения [1], приводящее к значительному ухудшению расходимости лазеров с неустойчивыми телескопическими резонаторами, является одним из основных факторов, сдерживающих развитие мощных импульсно-периодических газовых лазеров. Нелинейная коррекция волнового фронта в мощных газовых лазерах [2, 3] приближает расходимость излучения к дифракционному пределу, но из-за сложности применяемых оптических схем она не получила пока широкого распространения. Расходимость излучения, близкая к дифракционной, была получена с помощью самофильтрующегося неустойчивого резонатора (СФНР) в мощном электроионизационном (ЭИ) импульсно-периодическом CO_2 -лазере, который использовался как задающий генератор (ЗГ) в работах [4, 5]. В этом лазере СФНР с увеличением $M = 2$ при апертуре излучения ~ 53 мм обеспечивал практически дифракционное качество излучения в моноимпульсном режиме ($\sim 1.6\theta_{\text{dif}}$ для полной апертуры). Как показали теоретические [6] и экспериментальные [7, 8] исследования, расходимость излучения лазера с СФНР как в импульсно-периодическом, так и в моноимпульсном режиме близка к дифракционной и в случае слабонеоднородной среды (не превышает $(2-2.6)\theta_{\text{dif}}$).

Однако при наличии значительных оптических неоднородностей дифракционное качество излучения в СФНР может не сохраняться, т.к. после внутррезонаторной пространственной фильтрации излучение дважды проходит по активной среде [9].

В работе [10] рассмотрены схемы неустойчивых резонаторов с трёхгранными уголковыми отражателями, обе-

спечающими стабилизацию оси диаграммы направленности (ОДН). По мнению автора [10], если в таком резонаторе оптическая ось проходит через вершину трипель-призмы и центры кривизны зеркал, то может проявляться тенденция к самостоятельной генерации в отдельных областях апертуры резонатора, что способно привести к ухудшению пространственной когерентности излучения. В работе [11] для устранения этой тенденции авторы использовали схему двухпроходного неустойчивого резонатора с увеличением $M = 3$, в которой поворотным зеркалом служила трипель-призма из металлических зеркал. В резонаторе излучение падало на грани трипель-призмы, последовательно обходя её в одном направлении. Однако авторы [11] ограничились изучением процессов поляризации лазерного излучения в резонаторе.

Как показано в [12], резонатор, составленный из кубического зеркального отражателя (КЗО) с плоскими гранями и плоского выходного зеркала, эквивалентен обычному плоскопараллельному резонатору и имеет сходные с ним лучевые матрицы. Если КЗО не имеет больших отклонений в качестве поверхности зеркал и их юстировке (или если он изготовлен из единого блока), то резонатор с КЗО может обеспечить не только высокое качество излучения, но и стабильность ОДН при любом числе проходов резонатора.

В работах [13, 14] аналитически и экспериментально показано, что в призмном уголково отражателе с металлизированными гранями, работающем на полном внутреннем отражении, элементарные волны, отражённые различными секторами отражателя, остаются практически синфазными. При этом дифракционная картина Фраунгофера соответствует классическому распределению Эйри, а диаметр ядра равен диаметру кружка Эйри для дифракции на круглом отверстии с диаметром, равным диаметру окружности, вписанной в переднюю грань отражателя.

В связи с этим представляет несомненный интерес исследование резонатора лазера с полым КЗО, составленным из трёх плоских металлических зеркал, и полупрозрачной пластиной в качестве выходного зеркала с целью

В.Д.Булаев, В.С.Гусев, С.Л.Лысенко, Ю.Б.Морозов, А.Н.Познышев. ФКП «Государственный лазерный полигон РФ "Радуга"», Россия, Владимирская обл., 600910 Радужный, а/я 771; e-mail: raduga@trassa.org.

Поступила в редакцию 24 апреля 2012 г., после доработки – 27 июня 2012 г.

изучения условий формирования лазерного пучка с расходимостью излучения, близкой к дифракционной.

2. Экспериментальная установка

Эксперименты по изучению влияния КЗО на расходимость лазерного излучения выполнялись на двух лазерных установках. Первая из них, схема которой представлена на рис.1, ранее была всесторонне исследована в качестве ЗГ в [4, 5, 7–9] и представляет собой мощный импульсно-периодический ЭИ CO_2 -лазер, работающий при атмосферном давлении лазерной смеси.

Для исследований резонатора с КЗО в этом лазере СФНР был заменён близким ему по эффективности и занимаемому объёму накачки двухпроходным резонатором. В этом резонаторе исследуемый полый КЗО (рис.2), составленный из трёх медных плоских неохлаждаемых зеркал, служил глухим зеркалом 6, а клин 9 из монокристалла ZnSe – плоским выходным зеркалом. Поскольку апертуры поворотных зеркал 7, 8, клина 9 и выводного окна 10 значительно превышали апертуру КЗО, объём резонатора (~ 7.5 л) вычислялся как произведение площади апертуры КЗО (площадь шестигранника со стороной ~ 36 мм, оценённая по ожогу на светочувствительной бумаге) и суммарной длины активной среды вдоль оптической оси (~ 3000 мм). При расчёте объёма резонатора учитывалось частичное перекрытие пучков у зеркала 7. Зеркала резонатора закреплялись в юстировочных механизмах и устанавливались в герметичных корпусах, соединённых с торцами разрядных камер.

Лазерная установка выполнена как классическая аэродинамическая труба 3 с замкнутым циклом прокачки лазерной смеси, в рабочих частях которой установлены две идентичные лазерные камеры 2, соединённые между собой вдоль оптической оси тубусом. Лазерная смесь продувается (указано стрелками) со средней скоростью 60 м/с сквозь разрядные объёмы 1 в противоположных направлениях при помощи вентиляторов 4, расположенных в углах газодинамического тракта. Постоянство тем-

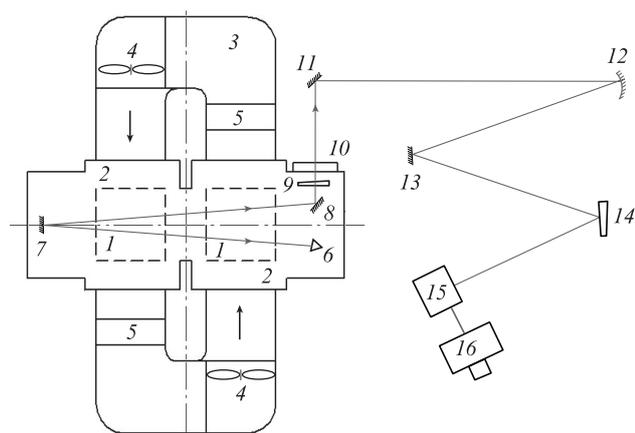


Рис.1. Схема лазерной установки:

1 – объёмы, в которых осуществляется накачка смеси; 2 – лазерные камеры; 3 – газодинамический тракт; 4 – центробежные вентиляторы; 5 – водяные теплообменники; 6 – полый КЗО, 7, 8 – плоские поворотные зеркала резонатора; 9 – клин из кристалла ZnSe ; 10 – выводное окно из кристалла KCl ; 11–13 – зеркала схемы измерения расходимости излучения; 14 – клин из кристалла KCl ; 15 – болометрический измеритель расходимости излучения; 16 – двухлучевой осциллограф С8-11 с фоторегистратором осциллограмм ФОР-2.

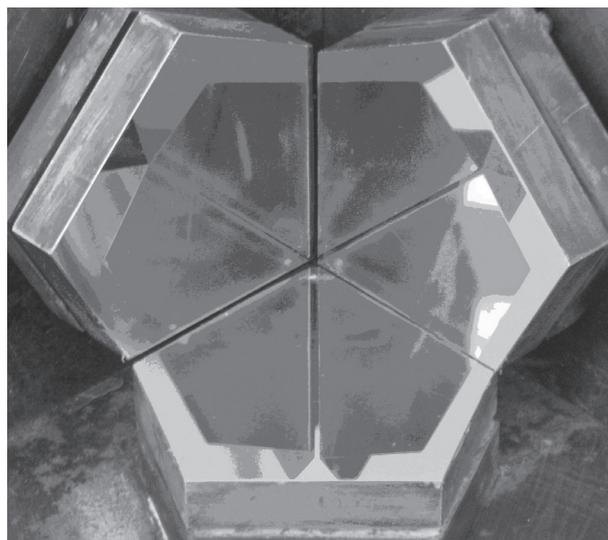


Рис.2. Фото кубического зеркального отражателя в сборе.

пературы лазерной смеси поддерживается водоохлаждаемыми теплообменниками 5, размещёнными на выходах лазерных камер. В каждой лазерной камере установлено по два электрода, причём верхний электрод (катод) пронизан для пучка быстрых электронов, генерируемых электронной пушкой, которая расположена сверху лазерной камеры (пушка на схеме не показана). Размеры электронного пучка 150×650 мм (поперёк и вдоль оптической оси соответственно).

Нижний электрод (анод) был выполнен в виде профиля Роговского с размером плоской части вдоль потока 140 мм и с закруглениями радиусом 100 мм на краях. Длина электродов вдоль оптической оси (с учётом закруглений) была равна 800 мм, а межэлектродное расстояние составляло 100 мм. На анод лазера подавалось постоянное напряжение, а длительность импульса тока накачки, равная во всех экспериментах 45 мкс, достигалась модуляцией ускоряющего напряжения электронной пушки. Объём активной среды, в который вкладывалось $\sim 80\%$ энергии, оценивался в ~ 22.5 л, напряжённость электрического поля разряда варьировалась в диапазоне $3 - 5.5$ $\text{кВ} \cdot \text{см}^{-1} \cdot \text{атм}^{-1}$, причём лазер мог работать на частотах от 1 до 200 Гц в пусках длительностью десятки секунд.

Во всех экспериментах КЗО в резонаторе был установлен так, чтобы ось излучения проходила через точку сопряжения трёх граней и центр передней плоскости отражателя. Длина резонатора с КЗО равнялась длине СФНР [7, 8] и составляла 9.6 м. Юстировка КЗО и резонатора с точностью не хуже $2 \cdot 10^{-5}$ рад выполнялась автоколлимационным методом в лабораторных условиях. Лазерное излучение выводилось из резонатора через плоскопараллельную пластину 10 из монокристалла KCl . Для исключения паразитной генерации пластина 10 была установлена под небольшим углом к оси резонатора.

Расходимость излучения измерялась методом диафрагм, а также проволочным многоканальным болометрическим измерителем (БИ) с угловым разрешением ~ 0.02 мрад, приёмная апертура которого размещалась в фокусе зеркала 12 с фокусным расстоянием 40 м. Приёмная апертура БИ диаметром 65 мм была выполнена из двух рядов тонких никелевых нитей.

В каждом ряду с шагом 1 мм размещены 64 нити. Нити первого ряда взаимно перпендикулярны нитям второ-

го, причём каждая нить подключена к своей ячейке быстродействующего запоминающего устройства (ЗУ). БИ позволяет одновременно регистрировать распределение излучения в дальней зоне по двум взаимно перпендикулярным координатам и блуждание центра ОДН как в импульсном, так и в импульсно-периодическом режиме генерации излучения. Сигналы с ЗУ записывались двухлучевым осциллографом С8-11, экран которого фотографировался регистратором ФОР-2. Для расчёта дифракционной расходимости данного резонатора за апертуру пучка принимался круг с диаметром вписанной в шестиугольник окружности, равным в нашем случае ~ 62 мм.

На втором этапе исследования проводились на нецепном электроразрядном HF-лазере, конструкция которого подробно описана в [15]. В отличие от первой установки резонатор был составлен из двух зеркал, и при неизменной длине резонатора (3.5 м) глухое зеркало было заменено КЗО, а выводное окно одновременно служило вторым зеркалом резонатора. КЗО и резонатор юстировались с помощью автоколлиматора, точность юстировки зеркал отражателя на этом этапе была не хуже $(2-5) \times 10^{-5}$ рад. Для согласования выходной апертуры лазера с апертурами измерительных средств (калориметры ТПИ-2М и ИМО-2Н) перед выводным окном резонатора устанавливалась круглая диафрагма диаметром 50 мм.

3. Результаты экспериментов и их обсуждение

1. Исследования резонатора с КЗО на первой установке проводились в диапазоне частот следования импульсов накачки 1–100 Гц при удельных энергоскладах в импульсе 50–200 Дж·л⁻¹·атм⁻¹. В опытах использовались лазерные смеси следующих составов: CO₂ : N₂ : He = 1 : 2 : 4, 1 : 3 : 4 и 1 : 5 : 2. Энергия лазерного излучения изменялась в диапазоне 20–150 Дж; в пересчёте на объём резонатора (~ 7.5 л) удельные энергии излучения составляли 3–20 Дж·л⁻¹·атм⁻¹. Было установлено, что в случае резонатора с КЗО порог генерации остаётся тем же, что и при использовании неустойчивых телескопических резонаторов, а эффективность резонатора соответствует расчётной. В ожогах на светочувствительной бумаге, полученных как в ближней, так и в дальней зоне, не наблюдалось какого-либо разделения лазерного пучка на отдельные пятна, а

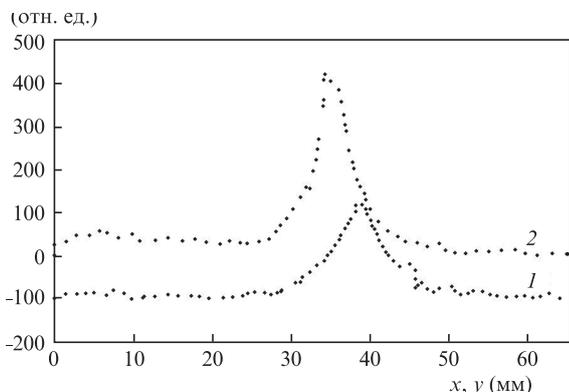


Рис.3. Распределение интенсивности лазерного излучения в фокальном пятне, зарегистрированные БИ: 1 – распределение интенсивности по горизонтальной оси (для наглядности: сдвиг кривых равен -100); 2 – распределение интенсивности по вертикальной оси.

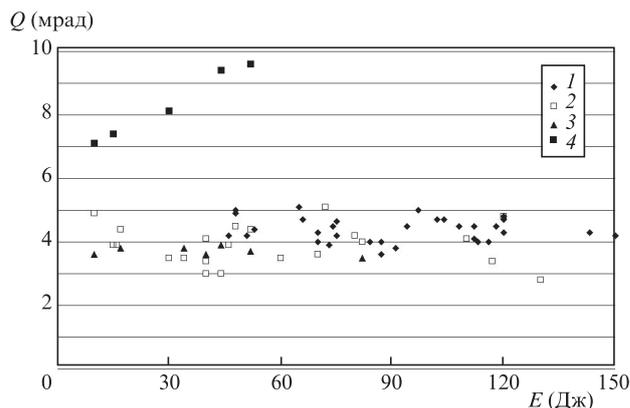


Рис.4. Зависимости расходимости (по уровню $0.5 E$) от энергии излучения E : 1 – резонатор с КЗО (моноимпульс); 2 – резонатор с КЗО ($f = 100$ Гц); 3 – СФНР (моноимпульс); 4 – СФНР ($f = 100$ Гц).

это означает, что волновой фронт излучения близок к синфазному [13, 14]. На рис.3 представлено типичное распределение интенсивности лазерного излучения в фокальном пятне, зарегистрированное БИ. В опытах по изучению СФНР соответствующие распределения были аналогичными.

На рис.4 представлены зависимости расходимости излучения, измеренной по уровню $0.5 E$ от полной энергии, от энергии излучения в однократных и частотных пусках. Расходимость излучения лазера с резонатором с КЗО остаётся практически неизменной (в пределах погрешности измерений) как в импульсном, так и в импульсно-периодическом режиме генерации излучения и не зависит от энергии излучения в импульсе. Не обнаружено также влияния на расходимость излучения состава применявшихся лазерных смесей. На этом же рисунке для сравнения приведены результаты измерений расходимости для СФНР, полученные в работах [4, 5, 7–9]. Если в однократных пусках расходимость излучения для обоих типов резонаторов была практически одинакова, то в частотных пусках наблюдается более чем двукратный рост расходимости излучения лазера с СФНР при энергиях излучения, превышающих 20 Дж.

На рис.5 представлены расчётные и экспериментальные данные для доли энергии (в относительных едини-

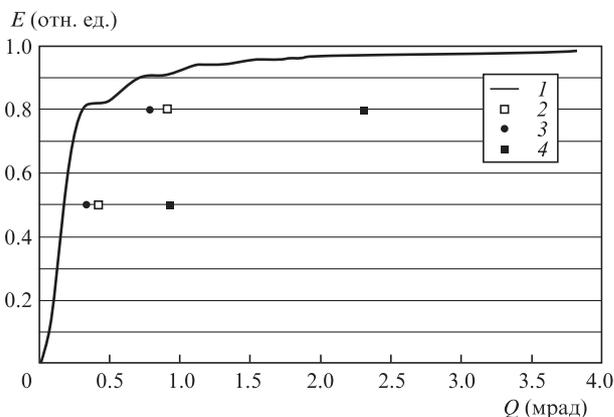


Рис.5. Угловая расходимость излучения лазера с резонатором КЗО и с СФНР: 1 – расчёт для $D = 53$ мм; 2 – резонатор с КЗО (моноимпульс и $f = 100$ Гц); 3 – СФНР (моноимпульс); 4 – СФНР ($f = 100$ Гц).

цах), содержащейся в конусе с углом при вершине θ . Расчёт выполнен для дифракции лазерного излучения с длиной волны 10.6 мкм на круглом отверстии диаметром 53 мм (апертура СФНР), точки – усреднённые по большому числу опытов экспериментальные данные.

2. Исследования резонатора с КЗО в составе HF-лазера проводились в однократных пусках на смесях ($C_3H_8 + C_4H_{10}$) – SF_6 и $C_2H_6 - SF_6$. Во всех опытах давление лазерной смеси составляло 55 Тор, а расходимость излучения измерялась при удельных энергиях накачки от 10 до 150 Дж/л методом калиброванных диафрагм приборами ТПИ-2М и ИМО-2Н, которые размещались в фокальной плоскости зеркала с радиусом 14 м.

Резонатор с КЗО с общей ошибкой сведения зеркал $(2-5) \times 10^{-5}$ рад в составе HF-лазера вносил искажения в структуру волнового фронта не менее $\lambda/2$. При этих искажениях, как и ожидалось, измеренная расходимость излучения значительно превышала дифракционный предел, рассчитанный для апертуры лазерного пучка диаметром 50 мм. Было установлено, что в наших опытах расходимость излучения не зависит от состава смеси и в среднем составляет по уровню 0.5 от полной энергии $\sim 1.5 \times 10^{-3}$ рад, а по уровню 0.8 – примерно 2.3×10^{-3} рад. На рис.6 демонстрируется ожог на светочувствительной бумаге, размещённой в фокусе зеркала радиусом 14 м. Даже при относительно «плохом» для HF-лазера сведении зеркал КЗО отпечаток сохраняет круглую форму и не имеет видимых разрывов.

3. Известно, что на расходимость излучения лазеров влияют многие факторы, приводящие к тому, что реальная расходимость излучения, особенно в импульсно-периодическом режиме накачки, зачастую далека от дифракционной.

В нашем случае основное влияние на расходимость излучения оказывали статические aberrации – точность сведения зеркал КЗО и качество поверхностей граней. Динамические aberrации в виде мелкомасштабных оптических неоднородностей (МОН), возникающих в активной среде и в неактивных зонах резонатора, по нашему мнению, менее значимы, т. к. в резонаторе с КЗО не должно быть сильной корреляции между структурой фронта излучения и расположением МОН. В связи с этим мы оце-

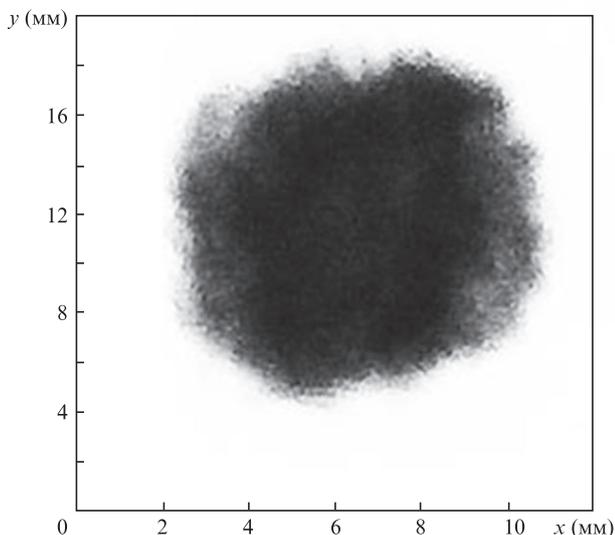


Рис.6. Отпечаток излучения HF-лазера в фокальной плоскости зеркала радиусом 14 м.

ним влияние лишь статических aberrаций и определим пределы разумного применения КЗО в лазерах ИК диапазона.

Поскольку измеренная в наших опытах расходимость излучения в CO_2 - и HF-лазерах более чем в два раза превышала дифракционный предел, то для расчёта расходимости лазера с резонатором с КЗО можно ограничиться «полугеометрическим» приближением, воспользовавшись соотношением [10]

$$\Theta = \sqrt{\frac{2\Delta L}{L}}, \quad (1)$$

где $\Delta L = \varepsilon D$; D – диаметр окружности, вписанной в фронтальную поверхность КЗО; ε – общая угловая ошибка сведения граней КЗО; L – длина резонатора.

Рассчитанная по формуле (1) расходимость Θ для CO_2 -лазера равна $\sim 5 \times 10^{-4}$ рад, а для HF-лазера – около 1.4×10^{-3} рад. Экспериментальные значения расходимости излучения по уровню 0.8 от полной энергии для CO_2 -лазера составили $\sim 9 \times 10^{-4}$ рад, а для HF-лазера – около 2.3×10^{-3} рад.

Представляет интерес оценка максимальных апертур резонаторов с КЗО, которые могут быть использованы в мощных широкоапертурных лазерах различного спектрального диапазона и для которых расходимость излучения, рассчитанная по формуле (1), не должна превышать дифракционной расходимости:

$$2.44\lambda/D \geq \sqrt{\frac{2\Delta L}{L}}. \quad (2)$$

После некоторых преобразований получим

$$D \leq \left(3 \frac{L}{\varepsilon}\right)^{1/3} \lambda^{2/3}. \quad (3)$$

Найдём зависимость максимального диаметра апертуры резонатора с КЗО от длины волны. Выполним расчёты для длин резонатора $L = 1, 5$ и 10 м и примем практически достижимую общую ошибку сведения граней КЗО ε равной 5×10^{-7} рад. Результаты расчётов приведены на рис.7; из них следуют два очевидных вывода: во-первых, резонаторы с КЗО предпочтительнее применять в мощных длинноволновых лазерах, т. к. в них слабее статические aberrации, а во-вторых, прямая степенная зависимость максимальных значений D от L позволяет осуще-

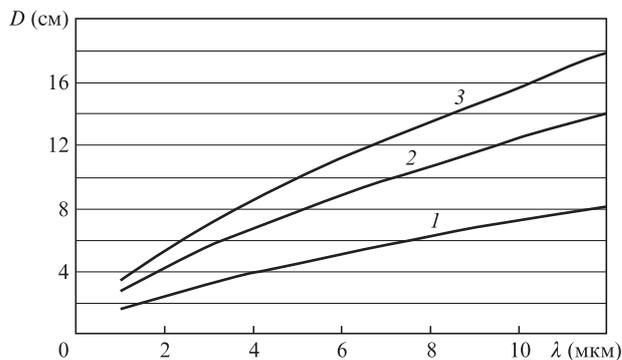


Рис.7. Зависимости диаметра апертуры резонатора с КЗО от длины волны лазерного излучения при ошибке сведения зеркал КЗО $\varepsilon = 5 \times 10^{-7}$ рад для $L = 1$ (1), 5 (2) и 10 м (3).

ствить классическую схему самонаведения излучения мощных лазеров на удалённые объекты, подобную схемам с нелинейными элементами (ОВФ-зеркалами). Например, если объект находится на расстоянии $\sim 10^5$ м и подсвечивается CO_2 -лазером, то с помощью мощного широкоапертурного CO_2 -усилителя с оконечным зеркалом в виде КЗО с апертурой 0.2 м [4] можно получить схему самонаведения с расходимостью излучения, близкой к дифракционной при $\epsilon \gg 5 \times 10^{-5}$ рад.

4. Выводы

Исследования мощных CO_2 - и НФ-лазеров показали, что резонаторы с КЗО из металлических зеркал позволяют достичь расходимости излучения, близкой к дифракционной (не более двух дифракционных углов) для равномерно засвеченной апертуры. При удельных энергиях излучения $3-20 \text{ Дж} \cdot \text{л}^{-1} \cdot \text{атм}^{-1}$ в резонаторах с КЗО основное влияние на расходимость оказывают статические aberrации. Использование таких резонаторов перспективно в технологических лазерах, в лазерных комплексах, применяемых для запуска спутников Земли, а также в мощных лазерах для доставки излучения на большие расстояния.

1. Димаков С.А., Пельменев А.Г., Петров В.Ф. и др. *Квантовая электроника*, **12** (6), 1285 (1985).
2. Sherstobitov V.E., Ageichik A.A., Bulaev V.D., et al. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **1841**, 135 (1992).
3. Булаев В.Д., Видавский Э.А., Ковалёв В.И. и др. *Квантовая электроника*, **25** (3), 243 (1998).
4. Бабаев И.К., Бардаковский С.В., Блинов Н.А. и др. *Квантовая электроника*, **18** (1), 6 (1991).
5. Бабаев И.К., Бардаковский С.В., Блинов Н.А. и др. *Квантовая электроника*, **18** (1), 12 (1991).
6. Блинов Н.А., Котеров В.Н., Красновский А.Г. и др. *Квантовая электроника*, **17** (7), 844 (1990).
7. Бабаев И.К., Бардаковский С.В., Блинов Н.А. и др. *Письма в ЖТФ*, **15** (19), 14 (1989).
8. Бардаковский С.В., Блинов Н.А., Золотков В.Н. и др. *Квантовая электроника*, **18** (4), 456 (1991).
9. Бабаев И.К., Бардаковский С.В., Блинов Н.А. и др. *Письма в ЖТФ*, **5** (9), 14 (1989).
10. Ананьев Ю.А. *Оптические резонаторы и проблема расходимости лазерного излучения* (М.: Наука, 1979).
11. Антонюк С.В., Куценко А.И., Наумов В.Г. и др. *Квантовая электроника*, **25** (4), 315 (1998).
12. Мэйтлэнд А., Данн М. *Введение в физику лазеров* (М.: Наука, 1978, с.122).
13. Денисюк Г.В., Корнеев В.И. *Письма в ЖТФ*, **7** (10), 635 (1981).
14. Денисюк Г.В., Корнеев В.И. *Опт.-мех. пром.*, №12, 1 (1982).
15. Булаев В.Д., Гусев В.С., Казанцев С.Ю. и др. *Квантовая электроника*, **40** (7), 615 (2010).