

С. Ю. СТРАХОВ

ПРИМЕНЕНИЕ КОМПЛЕКСНЫХ КРИТЕРИЕВ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИ РАЗРАБОТКЕ И ЭКСПЛУАТАЦИИ ЛАЗЕРОВ

Рассматриваются вопросы применения комплексных критериев эффективности при проектировании и эксплуатации мощных лазеров. Одним из возможных критериев является интенсивность излучения лазера в дальней зоне. В качестве практических примеров использования этого критерия рассматриваются структурно-параметрическая оптимизация неустойчивого резонатора мощного газодинамического лазера и оптимальные режимные параметры для импульсного твердотельного лазера.

Ключевые слова: критерий эффективности, неустойчивый резонатор, дальняя зона, угол расходимости, газодинамический лазер, твердотельный лазер.

Современная лазерная система является сложным техническим объектом, эффективность которого определяется рядом выходных параметров и эксплуатационных характеристик. Для количественного определения эффективности используются специальные критерии. Критерием эффективности может быть как один наиболее важный выходной параметр или эксплуатационная характеристика объекта, так и совокупность нескольких значимых выходных параметров и (или) эксплуатационных характеристик. В последнем случае следует говорить о комплексном критерии эффективности.

В настоящей статье рассматривается вопрос использования комплексного критерия эффективности при разработке и эксплуатации мощных лазеров для силового (термического, эрозионного) воздействия на объект. Основная задача этих лазеров — создание максимальной интенсивности на объекте воздействия. Отсюда понятно, что интенсивность излучения (или величина, ей пропорциональная) может являться критерием эффективности.

В ряде случаев задача фокусировки излучения решается совместно с задачей его транспортировки на значительные расстояния. Взаимодействие излучения с объектом происходит в дальней зоне (зоне дифракции Фраунгофера), где интенсивность определяется двумя выходными параметрами лазера — мощностью P (или энергией) излучения и углом расходимости θ — и количественно характеризуется комплексным критерием вида P/θ^2 . Угол расходимости определяется длиной волны излучения, формой и размером апертуры оптического резонатора или системы формирования излучения, внутрирезонаторными aberrациями и aberrациями формирующей оптики.

Критерий P/θ^2 имеет смысл использовать для оценки эффективности лазеров с неустойчивым резонатором (НР) или с устойчивым резонатором, число Френеля которого $N_F < 10$. Для лазеров с устойчивым резонатором при больших числах Френеля в качестве критерия эффективности обычно следует использовать мощность излучения, не учитывая угол расходимости. Это обусловлено тем, что подобные резонаторы в составе лазерных систем высокой мощности могут применяться лишь при отладке и оптимизации энергетических характеристик активной среды (АС) и не применяются в задачах, требующих малой угловой расходимости.

Рассмотрим пример практического использования критерия эффективности P/θ^2 при разработке неустойчивого резонатора для мощного газодинамического CO_2 -лазера (ГДЛ), активная среда которого образуется при сгорании твердого или жидкого топлива и последующем прохождении продуктов сгорания толуола в воздухе через блок плоских сопел [1].

Суммарный расход продуктов сгорания 16 кг/с. Размер критического сечения сопла 0,35 мм, степень расширения 32. Вывод рабочего тела осуществлялся через прямоугольный диффузор в атмосферу. Размер поперечного сечения АС определялся длиной соплового блока и распределением коэффициента усиления вниз по газовому потоку: 1200×120×120 мм. С учетом суммарного расхода продуктов сгорания и характерного для таких ГДЛ энергосъема, составляющего примерно 5 Дж/г, мощность излучения составляет около 80 кВт.

На стадии разработки лазера рассматривались три варианта неустойчивого резонатора: однопроходный, двухпроходный и трехпроходный (z -образный). Резонаторы с большим числом проходов не рассматривались, так как их использование связано с усложнением конструкции юстировочных узлов, уменьшением апертуры зеркал и, как следствие, с возрастанием интенсивности излучения на них. На рис. 1, a — $в$ представлены схемы компоновки однопроходного (a), двухпроходного ($б$) и трехпроходного ($в$) резонаторов; здесь 1 — выпуклое (выходное) сферическое зеркало (радиус кривизны R_1), 2 — вогнутое сферическое зеркало (радиус кривизны R_2), 3 — плоское зеркало, 4 — уголкового отражателя. Значения основных параметров резонаторов приведены в таблице, где L_p — длина резонатора (расстояние между конечными зеркалами вдоль оптической оси), L_{AC} — протяженность активной среды вдоль оси резонатора, β — суммарные относительные потери мощности излучения в резонаторе за полный проход.

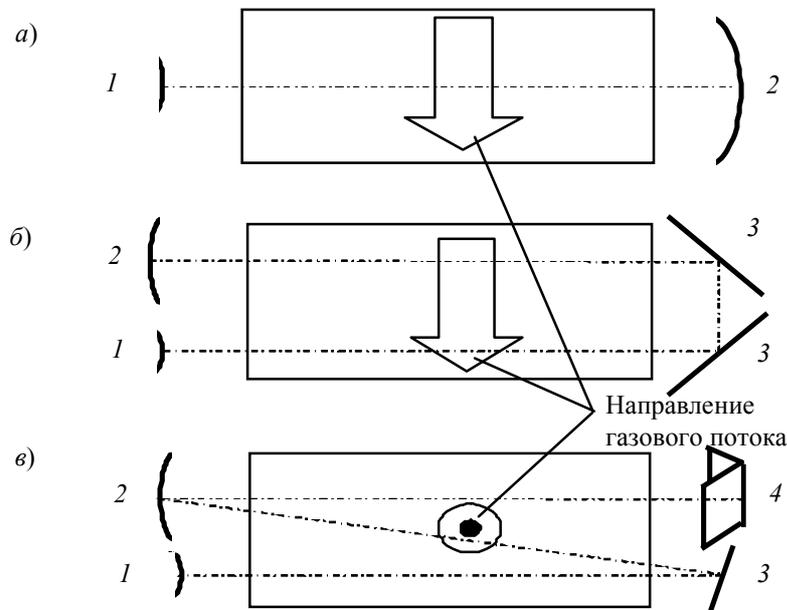


Рис. 1

Тип резонатора	Размер апертуры, мм	L_{AC} , мм	L_p , мм	β
Однопроходный	150×110	1200	1700	0,03
Двухпроходный	60×110	2400	3400	0,09
Трехпроходный	60×110	3000	5100	0,12

Все три возможных варианта резонатора относятся к конфокальным неустойчивым резонаторам, лазерные пучки внутри которых не имеют перетяжки, и соответственно отсутствует область высокой плотности излучения, что важно для мощных лазеров.

Вследствие особенностей формирования АС ГДЛ возникает неравномерное распределение коэффициента усиления слабого сигнала вниз по газовому потоку: за срезом соплового блока коэффициент усиления максимальный, а вниз по потоку он снижается [2]. Для компен-

сацией такой неравномерности в конфокальных резонаторах можно использовать так называемые резонаторы с вращением электромагнитного поля [2].

Реализация вращения электромагнитного поля на 180° в однопроходном резонаторе связана с использованием прозрачной в спектральном диапазоне работы лазера призмы-крыши со сферическим основанием, которая одновременно выполняет роль вогнутого зеркала резонатора [2]. Однако применение таких призм в мощных ГДЛ связано с рядом трудностей: во-первых, изготовление крупногабаритной призмы (со световой апертурой 150×110 мм) из селенида цинка или другого материала, прозрачного при излучении с длиной волны $10,6$ мкм, технологически сложно и дорого; во-вторых, при высокой мощности излучения в призме будут возникать тепловые деформации, что может привести к разрушению призмы. В этой связи реализация в однопроходном резонаторе вращения электромагнитного поля нецелесообразна, и поэтому рассматривался классический однопроходный резонатор.

В двухпроходном резонаторе для ГДЛ реализовать вращение электромагнитного поля можно с помощью уголкового отражателя (двух плоских зеркал, расположенных под углом 90°), каждая из граней которого является отдельным плоским зеркалом резонатора (см. рис. 1, б). В этом случае двухпроходная схема также представляет собой классический телескопический резонатор со сферическими концевыми зеркалами.

Для однопроходной и двухпроходной схем радиусы кривизны концевых зеркал определяются соотношениями

$$R_1 = \frac{2L_p}{M-1}; \quad R_2 = \frac{2ML_p}{M-1},$$

где M — коэффициент увеличения резонатора.

В трехпроходной схеме вращение электромагнитного поля также реализуется с помощью уголкового отражателя. Ось резонатора проходит через ребро уголкового отражателя, которое разделяет апертуру лазерного пучка на две симметричные части. В такой схеме уголкового отражателя является концевым зеркалом резонатора, а вогнутое сферическое зеркало, обеспечивающее параллельность пучка на выходе из резонатора, занимает промежуточное положение. По сути данный резонатор эквивалентен конфокальному телескопическому резонатору. Радиусы кривизны зеркал такого резонатора определяются из соотношений, которые можно вывести, записав лучевую матрицу резонатора [2] и условия параллельности лучей на выходе из него:

$$R_1(M+1) - R_2 + 4L_p = 0, \quad 4LR_2 + 4L_pMR_1 - R_1R_2(M-1) = 0.$$

Расчет резонатора осуществлялся на основе известного соотношения [3]

$$P = \frac{I_s t S}{2} \frac{2k_0 L_{AC} + \ln(1-t-\beta)}{-\ln(1-t-\beta)}, \quad (1)$$

где k_0 — средний по объему среды коэффициент усиления слабого сигнала; t — коэффициент пропускания выходного сигнала; S — площадь поперечного сечения лазерного пучка внутри резонатора перед выходным зеркалом; I_s — интенсивность насыщения АС.

Значение коэффициента k_0 определялось экспериментально по усилению излучения вспомогательного электроразрядного CO_2 -лазера, прошедшего через АС, и составило примерно $0,5 \text{ м}^{-1}$. Значение I_s определялось из соотношения (1) по данным эксперимента, в котором в качестве выходного использовалось зеркало из селенида цинка; в этом эксперименте все параметры, входящие в формулу (1), кроме I_s , были известны, в результате получено: $I_s \approx 1 \text{ кВт/см}^2$.

Протяженность L_{AC} АС вдоль оси резонатора зависит от его схемы и для однопроходного и двухпроходного резонаторов равняется соответственно одной и двум длинам соплового блока. Для трехпроходного резонатора величина L_{AC} принималась равной 3000 мм, так как в процессе третьего прохода через резонатор излучение распространяется по уже „обедненной“ предыдущими проходами активной среде.

Суммарные внутрирезонаторные потери β определялись как произведение потерь мощности при однократном отражении от зеркала (для медных зеркал эта величина составляет 0,015 или 1,5 %) на число отражений в процессе полного прохода через резонатор (в обе стороны). Значения β для разных схем резонаторов представлены в таблице.

Для определения коэффициента t использовалась формула, учитывающая его связь с коэффициентом увеличения M :

$$t = 1 - \frac{1}{M^2}.$$

Угол расходимости излучения лазера оценивался с помощью выражения [4]

$$\theta = 2 \frac{\lambda}{D} \frac{M}{M-1}, \quad (2)$$

где D — размер излучающей апертуры, $\lambda = 10,6$ мкм — длина волны излучения.

Тогда критерий эффективности — средняя интенсивность излучения в дальней зоне (при фокусном расстоянии f фокусирующей системы) — будет определяться выражением

$$I = \frac{4P}{\pi[f\theta]^2} = - \frac{I_s \left(1 - \frac{1}{M^2}\right) S \cdot 2k_0 L_{AC} + \ln\left(\frac{1}{M^2} - \beta\right)}{2 \left(\frac{M}{M-1}\right)^2 \ln\left(\frac{1}{M^2} - \beta\right)} \frac{D^2}{\pi(f\lambda)^2}.$$

Величины f и D определяются системой формирования и фокусировки излучения на объекте воздействия и могут варьироваться вне зависимости от резонатора. Поэтому в целевой функции для оптимизации резонатора эти параметры, а также неизменные величины — длину волны излучения и интенсивность насыщения АС — можно исключить, т.е. в качестве целевой функции следует рассматривать величину

$$I' = - \left(1 - \frac{1}{M^2}\right) S \frac{2k_0 L_{AC} + \ln\left(\frac{1}{M^2} - \beta\right)}{\left(\frac{M}{M-1}\right)^2 \ln\left(\frac{1}{M^2} - \beta\right)}.$$

На рис. 2, а, б представлены графики зависимости мощности излучения и критерия эффективности от коэффициента увеличения для одно-, двух- и трехпроходного резонаторов (кривые 1—3 соответственно). Как видно из графиков, оптимальной по мощности является однопроходная схема при $M=1,1$. В этом случае мощность излучения достигает 110 кВт. Очевидно, что такой коэффициент увеличения для неустойчивого резонатора неприемлем вследствие сильной чувствительности к абберациям и высокой угловой расходимости излучения. Для оптимизации по критерию I' , учитывающему как мощность, так и расходимость лазерного излучения, наилучшим вариантом является трехпроходный резонатор, имеющий коэффициент увеличения $M=1,6 \dots 1,8$.

В результате эксперимента была выбрана схема трехпроходного резонатора с уголко-вым отражателем для вращения электромагнитного поля и с коэффициентом увеличения 1,8. В экспериментах использовался также устойчивый резонатор (УР), построенный по трехпро-

ходной схеме, в котором в качестве выходного использовалось полупрозрачное зеркало из селенида цинка ($t=0,5$), концевое полностью отражающее зеркало было вогнутым сферическим с радиусом кривизны $R=25$ м (вместо уголкового отражателя в НР), а диагональные зеркала — плоскими.

На рис. 2, а представлены данные экспериментов по выбранному неустойчивому резонатору, а также на графике нанесены точки, соответствующие измеренной мощности излучения устойчивого резонатора. В ходе экспериментов средняя мощность излучения определялась при пуске лазера (продолжительностью 2—4 с) с помощью водоохлаждаемого калориметра. Как видно из рисунка, результаты эксперимента достаточно хорошо согласуются с расчетными данными.

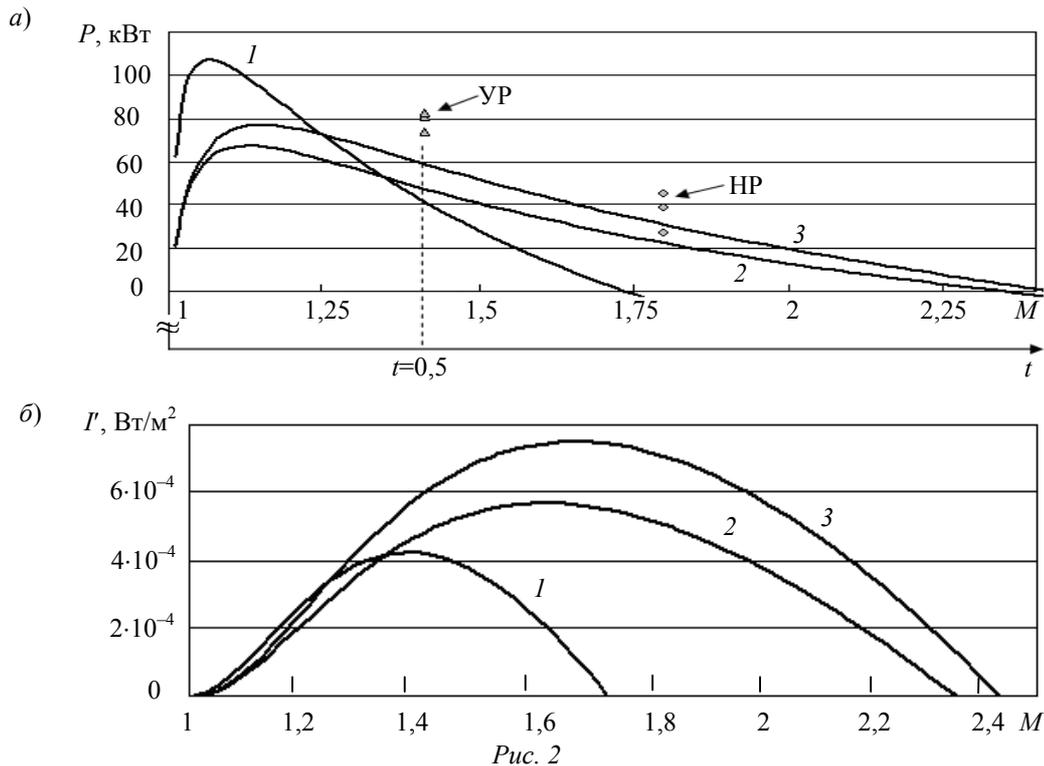


Рис. 2

Для экспериментального измерения угла расходимости излучения часть мощности лазерного пучка (порядка 4 %) отводилась с помощью делительного клина на сферическое зеркало ($f=1000$ мм), фокусирующее излучение на металлическую пластину. По отношению диаметра отверстия прожога в пластине к фокусному расстоянию зеркала определялся угол расходимости излучения. Измеренный таким образом угол расходимости излучения НР составил порядка 1—2 мрад, что примерно в 2—3 раза больше дифракционной расходимости, определяемой по формуле (2). Это отличие связано с внутррезонаторными aberrациями, возникающими при работе лазера, — термдеформацией зеркал и неоднородностью показателя преломления АС. В этой связи выбор НР с максимальным коэффициентом увеличения является еще более оправданным, так как при этом снижается чувствительность резонатора к aberrациям.

Другим примером использования критерия эффективности P/θ^2 является режимно-параметрическая оптимизация импульсного твердотельного лазера. В состав конструкции лазера входят активный элемент из неодимового стекла ГЛС-22 $\varnothing 45 \times 913$ мм, четырехламповый осветитель и неустойчивый конфокальный резонатор с коэффициентом увеличения 2. Основной режимный параметр работы лазера — энергия накачки E_n , которая регулировалась напряжением зарядки конденсаторных батарей, питающих импульсные лампы накачки. При изменении энергии накачки пропорционально меняется и энергия излучения $E_{из}$.

Достижение максимальной яркости и интенсивности излучения в дальней зоне обеспечивается при максимуме критерия E_n/θ^2 . В процессе экспериментальной оптимизации одновременно с измерением энергии импульсов лазерного излучения с помощью прибора ИМО-3 проводилось измерение угла расходимости излучения. Для этого часть энергии излучения с помощью светоделителя отводилась на вогнутое зеркало с фокусным расстоянием 5000 мм. В фокусе зеркала последовательно устанавливались калиброванные диафрагмы различного диаметра, за которыми находился измеритель энергии излучения. По экспериментальному графику зависимости энергии излучения (измеряемой за диафрагмой) от диаметра диафрагмы определялась угловая расходимость излучения.

На рис. 3 представлены зависимости угла расходимости θ (кривая 1), энергии излучения E_n (кривая 2) и критерия эффективности E_n/θ^2 (кривая 3) от энергии накачки E_n . Как видно из графика, расходимость излучения на порядок превышает дифракционную, что связано с существенными термооптическими aberrациями АС лазера [5]. Причем с увеличением энергии накачки уровень таких aberrаций, а следовательно, и угол расходимости возрастает. Из графика также следует, что существует оптимальная энергия накачки, при которой интенсивность излучения в дальней зоне будет максимальна. Высокое значение E_n объясняется тем, что в данном случае в составе резонатора использовался активный элемент из фосфатного стекла ГЛС-22 с улучшенными термооптическими характеристиками.

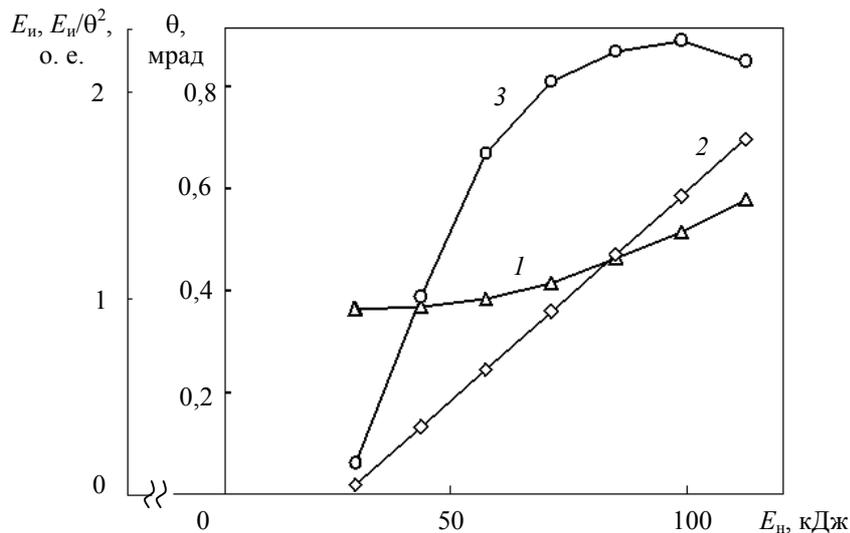


Рис. 3

Таким образом, использование комплексных критериев эффективности позволяет осуществлять структурную и режимно-параметрическую оптимизацию лазерных систем как на стадии проектирования, так и в процессе их эксплуатации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Борейшо А. С., Леонов А. Ф., Страхов С. Ю., Трилис А. В. Особенности формирования излучения в резонаторах с перфорированными зеркалами // Квантовая электроника. 2003. Т. 33, № 2. С. 177—180.
2. Ананьев Ю. А. Оптические резонаторы и проблема расходимости лазерного излучения. М.: Наука, 1979.
3. Лосев С. А. Газодинамические лазеры. М.: Наука, 1977.
4. Технологические лазеры. Справочник / Под ред. Г. А. Абельситова. М.: Машиностроение, 1991.
5. Лобачев В. В., Страхов С. Ю. Оптимальные режимы функционирования цилиндрических активных элементов в лазерах на неодимовом стекле // Изв. вузов. Приборостроение. 1999. Т. 42, № 5—6. С. 48—54.

Сергей Юрьевич Страхов

Сведения об авторе

— канд. физ.-мат. наук, доцент; Балтийский государственный технический университет „Военмех“ им. Д. Ф. Устинова, кафедра лазерной техники; E-mail: Strakhov_s@mail.ru

Рекомендована кафедрой
лазерной техники

Поступила в редакцию
16.02.09 г.