

Зеркало с изменяемым амплитудно-фазовым коэффициентом отражения. 2. Моделирование лазерного резонатора с активным выходным зеркалом

В.В.Кийко, В.И.Кислов, Е.Н.Офицеров

Представлена операторная модель лазерного резонатора с активным выходным зеркалом на основе интерферометра Фабри–Перо с неплоскими (сферическими и асферическими) зеркалами и регулируемой базой. Приведены результаты численного моделирования микрочип-лазера с тепловой линзой и активным выходным зеркалом-интерферометром. Показано, что использование активного интерферометра в качестве выходного резонаторного зеркала позволяет контролировать число поперечных мод лазерного излучения и его мощность; при этом расходимость излучения может быть уменьшена в 1.5–2.5 раза.

Ключевые слова: лазерный резонатор с активным выходным зеркалом, расходимость излучения и поперечные моды.

1. Введение

Одно из перспективных направлений лазерной техники связано с разработкой и созданием микрочип-лазеров [1, 2]. Возможности управления временными и пространственными характеристиками излучения микрочип-лазеров ограничены. Так, управление временными характеристиками излучения (частотой следования, длительностью импульсов) микрочип-лазера с пассивным затвором, работающим в высокочастотном режиме, осуществляется путем изменения мощности накачки. При этом изменяются оптическая сила тепловой линзы в активном элементе [3] и пространственно-временные характеристики выходного излучения, возрастает его расходимость [4].

Один из способов контроля выходных параметров микрочип-лазеров основан на использовании активного зеркала с управляемым коэффициентом отражения на основе интерферометра Фабри–Перо в качестве выходного [5–7]. Однако в указанных работах возможности системы, состоящей из лазерного резонатора и зеркала-интерферометра, не рассматривались. В настоящей работе исследовано влияние активного зеркала на модовый состав, мощность и расходимость выходного излучения микрочип-лазера.

2. Модель системы

Схема рассмотренной в работе системы лазерный резонатор + активное зеркало представлена на рис.1. При моделировании рассматриваемой системы дальнейшее развитие получила операторная модель [6], которая была предложена для интерферометра Фабри–Перо с неплоскими зеркалами и изменяемой базой. В рамках этой мо-

дели собственные значения γ и собственные функции U рассматриваемой системы находятся из уравнения

$$R_0 H_{\text{res}} R_{\text{int}} U = \gamma U, \quad (1)$$

где U – распределение поля на выходном отражателе резонатора; $R_0 = 1$ – коэффициент отражения по амплитуде поля для зеркала 30; H_{res} – оператор кругового обхода лазерного резонатора [8]; R_{int} – операторный коэффициент отражения интерферометра [6, 7]. Ниже используются соотношения для операторов, полученные применительно к системе с бесконечно тонкими непоглощающими отражателями. Амплитудные (по полю) коэффициенты отражения для зеркал 31, 32 есть R_1, R_2 соответственно. Они определены для поля внутри интерферометра и считаются независимыми от координат точек на апертурах отражателей. Коэффициенты пропускания T_j ($j = 0, 1, 2$) связаны с R_j законом сохранения энергии: $|R_j|^2 + |T_j|^2 = 1$. При этом коэффициенты отражения и пропускания для поля, падающего на зеркало 31 со стороны резонатора, есть $-R_1^* \exp(i\Psi)$ и $T_1^* \times \exp(i\Psi)$ соответственно (Ψ – фазовая добавка (константа)) [9]. Апертурные ограничения и форма отражающей поверхности каждого из зеркал учитываются с помощью операторов $M_j = A_j \exp(i\alpha_j)$. Здесь A_j опреде-

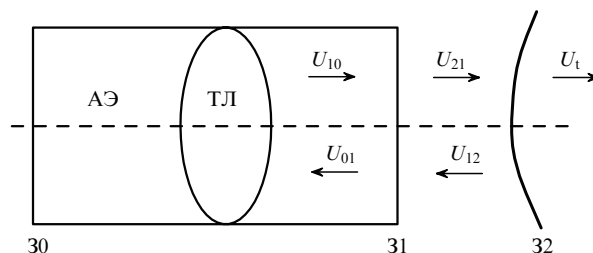


Рис.1. Схема лазерной системы с активным зеркалом: АЭ – активный элемент; ТЛ – тепловая линза; 30, 31 – выходное и заднее зеркала резонатора; 32 – выходное зеркало интерферометра; U_t – распределение поля на выходе лазерной системы; $U_{01}, U_{10}, U_{12}, U_{21}$ – распределения полей в плоскости апертуры 31; U_{01} и U_{10} (U_{12} и U_{21}) – отраженное от 31 и падающее на него поля внутри лазерного резонатора (внутри интерферометра).

В.В.Кийко, В.И.Кислов, Е.Н.Офицеров. Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: hkww@gan.gpi.ru, oficerov@gan.gpi.ru

Поступила в редакцию 28 июля 2010 года, после доработки – 13 января 2011 г.

ляется апертурой j -го зеркала (в пределах апертуры $A_j = 1$, за пределами $- A_j = 0$); $\alpha_j = 2ks_j$; $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число; λ – длина волны излучения; s_j – коэффициент, учитывающий отклонение формы отражателя от плоской. Прохождение поля через полупрозрачный отражатель сводится к умножению поля на соответствующий коэффициент пропускания. Распространение излучения от плоскости апертуры n -го зеркала к m -му описывается оператором K_{mn} . С учетом принятых допущений и обозначений

$$R_{\text{int}} = \exp(i\Psi)(-R_1^*A_1E + R_2H_{\text{int}})(E - R_1R_2H_{\text{int}})^{-1}, \quad (2)$$

где $H_{\text{int}} = \sqrt{M_1}K_{12}M_2K_{21}\sqrt{M_1}$ – оператор кругового обхода интерферометра с учетом отражений от зеркал 1 и 2; E – единичный оператор.

В уравнении (1) $H_{\text{res}} = \sqrt{M_1^*}K_{10}M_0K_{01}\sqrt{M_1^*}$. Если принять коэффициент R_1 или R_2 равным нулю, что эквивалентно отсутствию интерферометра в системе, уравнение (1) трансформируется в уравнение для лазерного резонатора.

Входящее в (1) поле

$$U = \sqrt{M_1^*}U_{10}, \quad (3)$$

а поле на выходе системы

$$U_t = T_2A_2K_{21}A_1U_{21}. \quad (4)$$

Распределения полей U_{01} и U_{21} определяются из системы уравнений

$$\begin{aligned} U_{10} &= \exp(k_a)K_{10}R_0M_0K_{01}A_1U_{01}, \\ U_{12} &= K_{12}M_2R_2K_{21}A_1U_{21}, \end{aligned} \quad (5)$$

$$U_{01} = T_1A_1U_{12} - \exp(i\Psi)R_1^*M_1^*U_{10},$$

$$U_{21} = \exp(i\Psi)T_1^*A_1U_{10} + R_1M_1U_{12}.$$

В первом уравнении системы присутствует сомножитель $\exp(k_a)$, где k_a – комплексный коэффициент усиления, учитывающий также набег фазы излучения за круговой обход лазерного резонатора.

Поясним физический смысл уравнений системы (5). Первое уравнение описывает с учетом усиления круговой обход излучением лазерного резонатора, второе уравнение – круговой обход зеркала-интерферометра, третье – формирование лазерного поля с учетом излучения, поступающего в лазерный резонатор со стороны интерферометра, а четвертое – формирование поля в интерферометре с учетом излучения, поступающего из лазерного резонатора. Решение системы несложно получить путем алгебраических преобразований с заменой $\exp(-k_a)$ на γ .

С учетом системы (5) поле (4) на выходе системы после прохода через полупрозрачный отражатель 2 рассчитывается по формуле

$$U_t = \exp(i\Psi)T_1^*T_2A_2K_{21}\sqrt{M_1}(E - R_1R_2H_{\text{int}})^{-1}U. \quad (6)$$

Уравнение (1) справедливо как в геометрическом, так и в дифракционном приближении. В общем случае последний оператор-сомножитель в формуле (2) может быть задан в виде разложения в ряд:

$$(E - R_1R_2H_{\text{int}})^{-1} = \sum_{n=0}^{\infty} (R_1R_2H_{\text{int}})^n.$$

Такое представление соответствует суммированию полей, которые формируются при переотражениях внутри зеркала-интерферометра. Если распространение излучения описывается с помощью дифракционного интеграла Френеля – Кирхгофа, то распределение поля каждого следующего из суммирующихся пучков можно получить путем интегрирования, исходя из распределения поля в предыдущем пучке: $(R_1R_2H_{\text{int}})^{n+1} = (R_1R_2H_{\text{int}})(R_1R_2H_{\text{int}})^n$.

В настоящей работе при расчетах использовалось матричное описание операторов, связанное с заменой интегрирования (в дифракционном приближении) дискретным суммированием [6]. При этом оператор $(E - R_1R_2H_{\text{int}})^{-1}$ определяется как обратный оператору $(E - R_1R_2H_{\text{int}})$.

Модель позволяет оптимизировать характеристики системы резонатор + зеркало-интерферометр с учетом ТЛ и требований к характеристикам выходного излучения. Ниже обсуждаются результаты численных исследований системы микрочип-лазер + активное зеркало.

3. Результаты численных исследований

Результаты расчетов основных характеристик лазерной системы, рассматривавшейся в [7], представлены на рис.2–4. Данные рис.2, 3 относятся к полосковой геометрии, данные рис.4 – к цилиндрически-симметричной системе (круглые зеркала).

Исходный резонатор составлен плоскими зеркалами 1 и 3, а интерферометр – выходным зеркалом 1 резонатора и сферическим зеркалом 2. Ниже в соответствии с терминологией, используемой при описании оптических резонаторов, интерферометр называется устойчивым или неустойчивым.

На рис.2 даны зависимости $|\gamma|^2$ от номера моды микрочип-лазера. Распределенная по длине лазерного резонатора тепловая линза моделировалась бесконечно тонкой линзой, расположенной посередине резонатора. Параметры системы: радиус кривизны выходного зеркала ± 0.06 м; $\lambda = 1.064$ мкм; длина интерферометра $l = l_0 + \Delta l$ ($l_0 = 100\lambda$, Δl – расстройка интерферометра, находящаяся в пределах $0 - \lambda/2$); диаметр выходной апертуры резона-

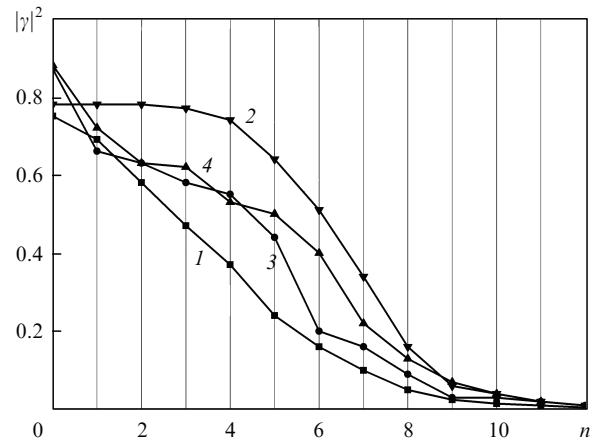


Рис.2. Зависимости $|\gamma|^2$ от номера моды n : плоскопараллельный резонатор без ТЛ (1), резонатор с ТЛ (2), резонатор с устойчивым интерферометром и ТЛ (3) и резонатор с неустойчивым интерферометром и ТЛ (4).

тора $d = 200$ мкм; $R_1 = R_2 = 0.8$; фокусное расстояние ТЛ 6 мм; длина резонатора $l_r = 5.5$ мм; показатель преломления активного элемента 1.82. Из анализа результатов расчетов и рис.2 следует, что при наличии ТЛ (кривая 2) резонатор становится многомодовым. Оценка расходимости излучения выполнена исходя из представленных на рис.2 данных с учетом числа мод [10], попадающих в область $|\gamma|^2 > |\gamma_s|^2$, где $|\gamma_s|^2 = 0.2 - 0.6$ – пороговое значение, соответствующее усилению излучения в микрочип-лазере с активной средой Nd:YAG ($|\gamma_s|^2 = \exp(-k_a)$, $k_a = 2l_r k_u$, коэффициент усиления $k_u = 0.5 - 1.5 \text{ см}^{-1}$). При этом расходимость выходного излучения резонатора с ТЛ в 2–2.5 раза превышает расходимость излучения резонатора без ТЛ. Использование интерферометра в качестве выходного зеркала (кривые 3, 4) переводит систему в близкий к одномодовому режим работы.

Характеристики системы резонатор + зеркало-интерферометр существенно зависят от контролируемой расстройки интерферометра Δl (рис.3). На рис.3 $|\gamma|^2$ – квадрат модуля собственных значений для доминирующей моды; $\Delta|\gamma|^2$ – разность между квадратами модуля собственных значений для доминирующей моды и ближайшей к ней; параметр ω пропорционален расходимости Θ выходного излучения в дальней зоне по уровню 0.5 (от полной мощности) для доминирующей моды: $\Theta = 2\lambda\omega/(\pi d)$. Данные рис.3 относятся к неустойчивому интерферометру. В области расстроек $(0.22 - 0.45)\lambda$ доминирующей является мода TEM_0 , в области расстроек $(0.18 - 0.22)\lambda$ – мода TEM_1 . Разрывы в зависимости ω на рис.3 обусловлены изменением номера доминирующей моды при изменении расстройки интерферометра. Величина $|\gamma|^2$ существенно зависит от расстройки интерферометра. Так, $|\gamma|^2$ для моды TEM_0 варьируется от 0.58 до 0.9, что дает возможность контролировать мощность выходного излучения. Расходимость излучения в этом случае изменяется не более чем на 25%.

На рис.4 представлены результаты численных исследований практически важного случая системы с цилиндрически-симметричной геометрией (круглые зеркала) со сферическим или асферическим отражателем 2. Для классификации мод этих систем допустимо обозначение TEM_{nm} , такое же, как и для мод [8] сферических лазерных резонаторов ($n, m = 0, 1, 2, \dots$ – азимутальный и радиальный индексы соответственно). В системе со сферическим интерферометром $\Delta l = 0.32\lambda$, радиус кривизны выходного зеркала интерферометра составляет 0.02 м, осталь-

ные параметры те же, что и для рассмотренного выше полоскового резонатора. В случае асферического интерферометра $\Delta l = 0.49\lambda$ и форма отражателя задается супергауссовой функцией $s_2(\mathbf{r}) = (-\lambda/2) \exp[-(2r/a)^6]$ (\mathbf{r} – радиус-вектор точки в плоскости апертуры в цилиндрической системе координат с осью z , совпадающей с оптической осью системы).

В проведенном вычислительном эксперименте учет ТЛ приводит к увеличению расходимости излучения опорного плоскопараллельного резонатора в 4–6 раз. Использование в составе резонатора сферического зеркала-интерферометра сопровождается уменьшением расходимости в 1.5–2.5 раза. В этом случае расстройка Δl , при которой доминирующей является мода TEM_{00} , составляет $(0.28 - 0.38)\lambda$. Из сравнительного анализа зависимостей 1, 2 (рис.4,а) и 3, 4 (рис.4,б) следует, что применение асферического зеркала-интерферометра приближает расходимость излучения к расходимости излучения системы без ТЛ. Воздействие активного зеркала на селективность системы более выражено по радиальному индексу (рис.4). Меньшая селективность по азимутальному индексу связана с цилиндрической симметрией зеркала-интерферометра. В сравнении с полосковой система с круглыми зеркалами (при сравнимых технических параметрах) характеризуется в 1.5–2 раза большей расходимостью, что согласуется с результатами [10] для сферических резонаторов.

Следует отметить, что цель проведенных исследований лазерной системы с асферическим отражателем –

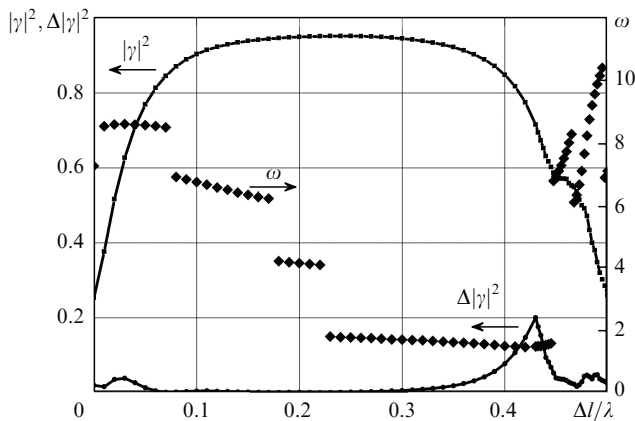


Рис.3. Зависимости $|\gamma|^2$, $\Delta|\gamma|^2$ и ω от расстройки $\Delta l/\lambda$.

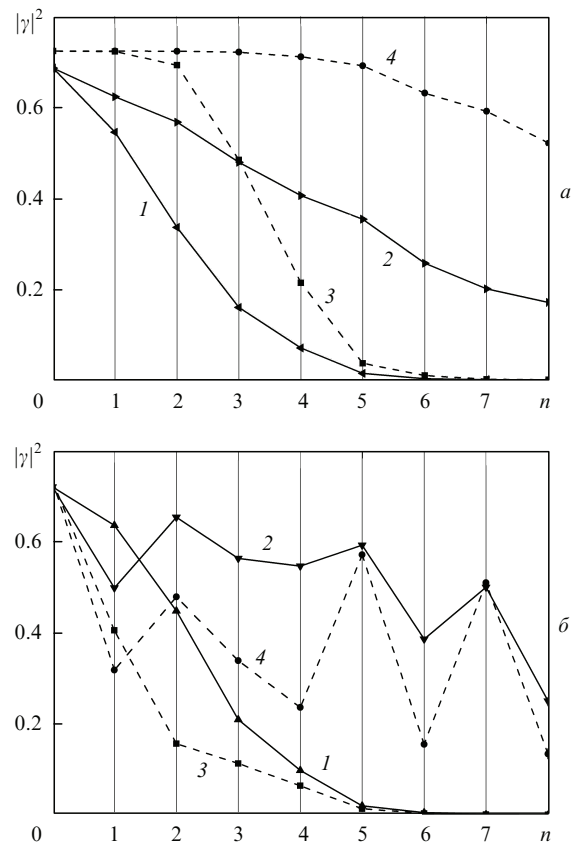


Рис.4. Зависимости $|\gamma|^2$ от индекса моды n в случае опорного плоскопараллельного резонатора без ТЛ (1, 2) и с ТЛ (3, 4) (а) и в случае системы резонатор с ТЛ + неустойчивый сферический интерферометр (1, 2) и системы резонатор с ТЛ + асферический интерферометр (3, 4) (б). Кривые 1, 3 относятся к модам TEM_{0n} ; 2, 4 – к модам TEM_{10} .

оценка потенциальной эффективности ее применения. При оптимальном подборе параметров асферический интерферометр, используемый как выходной отражатель лазерного резонатора, обеспечивает меньшие потери мощности и меньшую расходимость выходного лазерного излучения в сравнении с системой со сферическим интерферометром. Использование в качестве асферического отражателя активного деформируемого (адаптивного) зеркала значительно расширяет возможности системы с точки зрения формирования функции распределения коэффициента отражения посредством изменения формы поверхности активного отражателя. В качестве активного деформируемого зеркала могут быть использованы отражатели [11] с изгибающим моментом. Важное достоинство рассматриваемой системы – возможность управления коэффициентом отражения активного зеркала с частотой ~ 100 Гц и более.

Исходя из полученных результатов, представляется целесообразным более подробное изучение эффективности применения зеркала-интерферометра с асферическими или деформируемыми отражателями с учетом реальных ограничений на формообразование. При этом поиск оптимальной формы отражающей поверхности зеркала может основываться, в частности, на методах теории обратных оптических задач.

4. Заключение

Проведенные численные исследования системы микрочип-лазера с тепловой линзой показали, что использование активного выходного резонаторного зеркала на

основе интерферометра Фабри – Перо позволяет контролировать модовый состав и расходимость выходного лазерного излучения. При оптимальных расстройке и радиусах кривизны зеркал интерферометра расходимость излучения может быть уменьшена в 1.5–2.5 раза. Перспективный путь улучшения характеристик системы и расширения ее возможностей связан с использованием асферического (или активного, адаптивного) зеркала в составе зеркала-интерферометра или лазерного резонатора.

Настоящая работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 09-02-00343).

1. Molva E. *Opt. Mater.*, **11**, 289 (1999).
2. Zayhowski J.J. *Laser Focus World*, **32** (4), 73 (1996).
3. Кийко В.В., Офицеров Е.Н. *Квантовая электроника*, **36** (5), 483 (2006).
4. Кравцов Н.В., Наний О.Е. *Квантовая электроника*, **20** (4), 322 (1993).
5. De Silvestri S., Laporta P., Magni V., Svelto O. *Opt. Lett.*, **12**, 84 (1987).
6. Кийко В.В., Кислов В.И., Офицеров Е.Н. *Квантовая электроника*, **40** (6), 556 (2010).
7. Kiyko V.V., Kislov V.I., Ofitserov E.N. *Techn. Progr. 14th Intern. Conf. on Laser Optics 'Laser Optics-2010'* (С.-Петербург. 2010, ThR4-p08, p.72).
8. Ананьев Ю.А. *Оптические резонаторы и лазерные пучки* (М.: Наука, 1990).
9. Троицкий Ю.В. *Многочувствительные интерферометры отраженного света* (Новосибирск: Наука, 1985).
10. Голяев Ю.Д., Зверев Г.М. *Лазеры на кристаллах и их применение* (М.: Радио и связь, 1994).
11. Тараненко В.Г., Шанин О.И. *Адаптивная оптика в приборах и устройствах* (М.: ФГУП «ЦНИИАтоминформ», 2005).