

07

Устойчивость лазерного резонатора с двухзеркальной многопроходной системой

© М.Ю. Кантор

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург

Поступило в Редакцию 7 июня 1999 г.

В работе исследуется устойчивость лазерного резонатора, у которого роль одного глухого зеркала выполняет многопроходная система, состоящая из двух сферических зеркал. Устойчивость резонатора в сильной степени зависит от числа проходов луча в многопроходной системе, расположения ее зеркал и перетяжки входящего в него пучка. Устойчивая конфигурация резонатора обеспечивает в нем низкие дифракционные потери излучения и эффективную лазерную генерацию.

Резонаторы с многопроходной системой широко используются в лазерной технике. Они, в частности, позволяют создать существенную разницу в энергии излучения, циркулирующей в многопроходной системе и проходящей через активный элемент лазера, что значительно повышает возможности диагностик, основанных на рассеянии лазерного излучения [1]. Низкие потери излучения в резонаторе, необходимые для работы лазера, возможны при его устойчивости. В работе исследуется устойчивость резонатора с двухзеркальной многопроходной системой (рис. 1). Он состоит из двух сферических зеркал (0) и (1) с радиусами кривизны $R_{0,1}$, образующих многопроходную систему, фокусирующего объектива (2) и глухого зеркала (4). Активный элемент лазера (3) размещается между объективом и глухим зеркалом резонатора.

В устойчивом резонаторе распространяются собственные моды колебаний, т.е. пучки излучения, сохраняющие свои поперечные размеры, форму и кривизну волнового фронта после полного обхода резонатора. Для рассмактриваемого резонатора это свойство выполняется в любом общем сечении входящего и выходящего из многопроходной системы пучков.

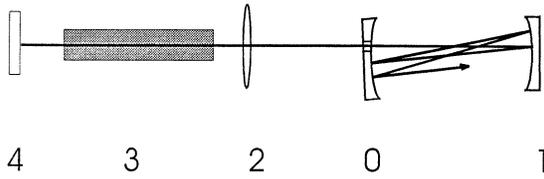


Рис. 1.

Пусть многопроходная система съюстирована так, что после N проходов выходящий из нее луч направляется к зеркалу (4). Для определения устойчивости резонатора необходимо найти связь между поперечными размерами входящего и выходящего из многопроходной системы пучков. В параксиальном приближении поперечные координаты и углы наклона лучей в любых сечениях линейно связаны между собой с помощью лучевой матрицы (см., например, [2]).

Для вычисления этой матрицы введем систему координат, начало которой совпадает с центром многопроходной системы, а ось z направлена вдоль оси резонатора от глухого зеркала. Центром многопроходной системы назовем положение перетяжки собственных мод устойчивого резонатора, составленного из ее зеркал (0) и (1), находящуюся от них на расстояниях $L(1 \pm \delta)/2$ соответственно. Здесь L — расстояние между зеркалами, $\delta = (R_1 - R_0)/(R_1 + R_0 - 2L)$ [2]. Это определение удобно оставить и для положения зеркал неустойчивого резонатора, хотя в этом случае оно не имеет столь ясного смысла. Матрица прохода луча от центра многопроходной системы и обратно при однократном отражении от каждого зеркала имеет вид:

$$M = \begin{pmatrix} 2\eta - 1 & 2R\eta(1 - \eta) \\ -\frac{2}{R} & 2\eta - 1 \end{pmatrix}, \quad (1)$$

$$R = R_0R_1/(R_0 + R_1 - 2L), \quad \eta = (1 - L/R_0)/(1 - L/R_1).$$

Матрица n таких проходов есть произведение n матриц (1). При $0 < 2\eta - 1 < 1$ она находится по теореме Сильвестра [2]:

$$M'' = \begin{pmatrix} \cos 2n\phi & \frac{R}{2} \sin 2\phi \sin 2n\phi \\ -\frac{2 \sin 2n\phi}{R \sin 2\phi} & \cos 2n\phi \end{pmatrix}. \quad (2)$$

Здесь $\cos 2\phi = 2\eta - 1$, $0 \leq \phi \leq \pi$. Заменой $\phi = i\Phi$ и $\phi = i\Phi + \pi/2$ (2) обобщается соответственно на случаи $\eta > 1$ и $\eta < 0$:

$$M'' = \sigma'' \begin{pmatrix} \operatorname{ch} 2n\Phi & \sigma \frac{R}{2} \sin 2\Phi \operatorname{sh} 2n\Phi \\ -\sigma \frac{2 \operatorname{sh} 2n\Phi}{R \operatorname{sh} 2\Phi} & \operatorname{ch} 2n\Phi \end{pmatrix}. \quad (2a)$$

Здесь $\sigma = \pm 1$, $\sigma\eta > 0$, $2\Phi = \operatorname{arch}(|2\eta - 1|)$. На основе (2) вычисляется матрица прохождения луча от точки z_0 до z после $N = 2n + 2$ проходов между зеркалами:

$$P = \begin{pmatrix} AB \\ CD \end{pmatrix} = \sigma'' \begin{pmatrix} (c + \Delta s) & -\sigma\rho[(\Delta_0 + \Delta)c + (\Delta\Delta_0 \pm 1)s] \\ -\sigma s/\rho & (c + \Delta_0 s) \end{pmatrix}, \quad (3)$$

$$\Delta = z/\rho, \quad \Delta_0 = z_0/\rho.$$

Знак (+) соответствует случаям $\eta > 1$ и $\eta < 0$, для которых c , s и ρ имеют вид:

$$c = (\sigma R_0 \operatorname{ch} N\Phi + R_1 \operatorname{ch}(N-2)\Phi)/(R_0 + R_1 - 2L),$$

$$s = (\sigma R_0 \operatorname{sh} N\Phi + R_1 \operatorname{sh}(N-2)\Phi)/(R_0 + R_1 - 2L),$$

$$\rho = 0.5\sigma R \operatorname{sh} 2\Phi.$$

Для случая $0 < \eta < 1$ гиперболические функции в этих выражениях заменяются на круговые от ϕ . Если в точке z_0 расположена перетяжка пучка, то радиус ω_0 основной моды излучения на длине волны λ определяется с помощью закона ABCD [2] $\pi\omega_0^2 = \lambda\sqrt{-B/C}$, где элементы матрицы (3) берутся при $z = z_0$. Отсюда находим:

$$\left(\frac{\pi\omega_0^2}{\lambda\rho}\right)^2 = \pm 1 - \Delta_0^2 - 2\Delta_0 \frac{c}{s}. \quad (4)$$

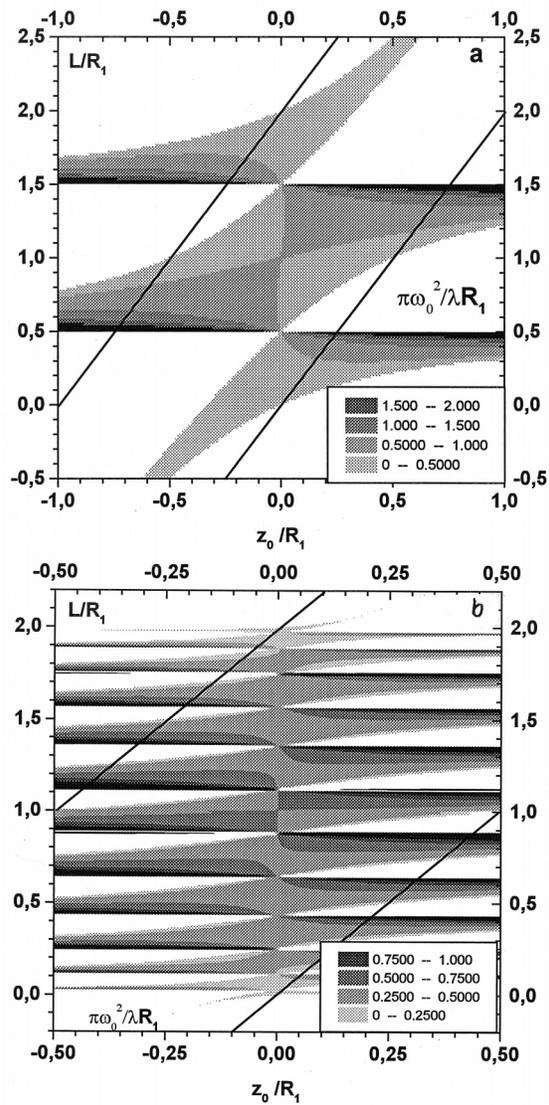


Рис. 2.

Здесь (+) соответствует $0 \leq \eta \leq 1$. Положительность правой части (4) является основным необходимым условием устойчивости резонатора. Дополнительное условие, состоящее в том, чтобы кривизна волнового фронта, выходящего из многопроходной системы пучка, совпадала на зеркале (4) с кривизной отражающей поверхности этого зеркала, легко выполняется при правильном выборе объектива и глухого зеркала. Так, для резонатора с плоским зеркалом (4) и объективом с фокусным расстоянием f радиус пятна основной моды ω_a на заднем зеркале равен:

$$\omega_a = \omega_0 \sqrt{\frac{(S_a - f)}{(S_c - f)}}. \quad (5)$$

Здесь S_a и S_c — расстояния от линзы до зеркала (4) и перетяжки входящего в многопроходную систему пучка. В данном случае дополнительное условие устойчивости резонатора состоит в положительности подкоренного выражения (5).

Представим (4) графически в виде зависимости $a_0 = \pi\omega_0^2/\lambda R_1$ от L/R_1 и $z_0(R_1)$. При $a_0 \ll 1$ эта величина равна отношению размеров входного пучка в перетяжке z_0 и на зеркале (1) для всех поперечных мод резонатора. На рис. 2 показана величина a_0 в области устойчивости резонатора для $R_0 = R_1$, $N = 4$ (a) и $N = 14$ (b). Область устойчивости (4) при двух проходах лежит между двух наклонных линий. Из рисунка видно, насколько сильно устойчивость резонатора, а следовательно и мода генерации, зависит от N , L и z_0 . При заданном расположении элементов резонатора лазерная генерация определяется конкуренцией мод, отличающихся положением перетяжки входного пучка. Значительное влияние на селекцию мод оказывает активный элемент лазера, особенно в том случае, если его оптическое качество ограничивает расходимость выходящего из него излучения. Оставляя эти важные вопросы за рамками настоящей работы, укажем лишь, что при оптимальной настройке резонатор с многопроходной системой обеспечивает низкие потери излучения при большом числе проходов [3] и способен более чем на два порядка увеличить энергию зондирования объекта, расположенного между зеркалами многопроходной системы, по сравнению с тем же лазером без многопроходной системы.

Работа была поддержана грантом РФФИ 97-02-18084.

Список литературы

- [1] Кантор М.Ю., Куприенко Д.В. // Письма в ЖТФ. 1997. Т. 23. В. 8. С. 65–72.
- [2] Kogelnik H., Li T. // Appl. Optics. 1966. V. 5. N 10. P. 1550–1567.
- [3] Kantor M.Yu., Kouprienko D.V. // Rev. Sci. Instr. 1999. V. 70. N 1. P. 780–782.