

давления в самом разряде. Как видно из рис. 2, это соотношение не меняется с давлением, что говорит в пользу диссоциативного заселения отмеченных уровней криптона в послесвечении при давлениях ≥ 2 тор.

Литература

- [1] J. N. Bardsley, M. A. Biondi. In: Advances in Atomic and Molecular Physics, vol. 6, Ed. D. R. Bates and I. Esterman. N. Y., 1971, p. 1—57.
 [2] R. E. Huffman, D. H. Katayama. J. Chem. Phys., 45, 138, 1966.
 [3] Г. Н. Герасимов, А. В. Куприянов, Ю. А. Снегирев, М. С. Фриш. Ж. прикл. спектр., 15, 131, 1971.

Поступило в Редакцию 22 апреля 1977 г.

УДК 621.373 : 535

ОПТИЧЕСКАЯ [ОСЬ И УСТОЙЧИВОСТЬ КОЛЬЦЕВОГО РЕЗОНАТОРА С РАЗЪЮСТИРОВАННОЙ СРЕДОЙ

В. Ф. Бойцов

1. В целом ряде практических приложений кольцевых лазеров и в особенности при изучении частотной не взаимности встречных волн необходимо знать положение оптической оси резонатора, когда внутри него находится среда, в общем случае неоднородная по своим физическим свойствам. Если ось симметрии среды проходит по оптической оси пустого резонатора, то имеем съюстированную систему. Во всех других случаях среда разъюстирована, следствием чего является изменение положения оптической оси по сравнению с осью пустого резонатора.

Рассмотрим кольцевой резонатор, образованный из двух плоских и одного цилиндрического зеркала радиуса R . Пусть оптическая ось на цилиндрическом зеркале составляет с нормалью к нему угол α . На рисунке показана «развертка» резонатора в элемент эквивалентного волновода [1]. Ось резонатора совпадает с центральной осью O_1O_4 элемента волновода. Лучу, покинувшему цилиндрическое зеркало и возвратившемуся на него после обхода резонатора, соответствует луч, имеющий начало на одном зеркале элемента волновода и конец — на другом.

2. Обозначим длину оптической оси резонатора $O_1O_4 = L$. Среда P имеет длину $l < L$ и плоские параллельные границы. Показатель преломления $n(y)$ среды P изменяется в поперечном направлении y по «квадратичному» закону

$$\left. \begin{aligned} n(y) &= \frac{k(y)}{k} = 1 + \frac{\chi^{(1)}(y)}{k} = \left(1 + \frac{\chi^{(1)}}{k}\right) - \frac{\chi^{(1)}y^2}{ka_p^2} \equiv n_0 - \frac{\alpha^{(1)}N_p y'^2}{l'}, \\ k &\equiv k(0), \chi^{(1)} \equiv \chi^{(1)}(0) = \chi_1^{(1)} + i\chi_2^{(1)}, \alpha^{(1)} = \chi^{(1)}l, N_p = \frac{L}{ka_p^2}; \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

здесь $y = 0$ на оси O_2O_3 (см. рисунок), $k(y)$ — волновое число в среде, вещественные величины $\chi_1^{(1)}$ и $\chi_2^{(1)}$ определяют линейную дисперсию и усиление (затухание) на единицу длины в среде, $y' = y/L$ и $l' = l/L$.

3. Рассмотрим малые разъюстировки в системе, вызванные поворотом оси симметрии O_2O_3 среды P на угол $\beta_0 \ll 1$ и смещением ее центра O на расстояние $X_0 \ll L$ ($X_0 \perp Z$) относительно оси O_1O_4 пустого резонатора. Положительные направления отсчета углов и расстояний показаны на рисунке стрелками. Ниже используем парааксиальное приближение.

Если произвольный луч на левом зеркале задан вектором-столбцом A_1 с составляющими ($y'_1 \equiv y_1/L$, $\alpha - \alpha_1$), то его распространение в системе можно описать с помощью уравнений

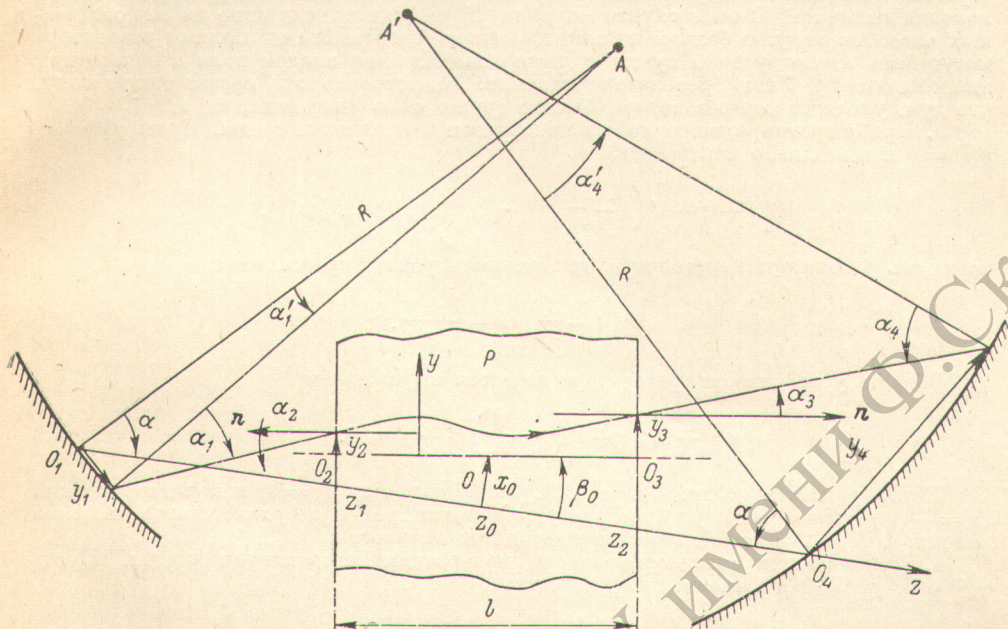
$$A_{m+1} = U_{m+1, m} A_m + B_{m+1} \quad (m = 1, 2, 3), \quad (2)$$

где векторы A_m и B_{m+1} и матрицы передачи $U_{m+1, m}$ луча имеют вид

$$\left. \begin{aligned} A_2 &= \begin{pmatrix} y'_2 \\ \alpha_2 \end{pmatrix}, A_3 = \begin{pmatrix} y'_3 \\ \alpha_3 \end{pmatrix}, A_4 = \begin{pmatrix} y'_4 \\ \alpha - \alpha_4 \end{pmatrix}, B_2 = \begin{pmatrix} \frac{l'\beta_0}{2} - X'_0 \\ -\beta_0 \end{pmatrix}, \\ B_3 &= 0, B_4 = \begin{pmatrix} \frac{(1 - z'_0)\beta_0 + X'_0}{\cos \alpha} \\ [(1 - z'_0)\beta_0 + X'_0](1 - g) - \beta_0 \end{pmatrix}, g = 1 - \frac{L}{R \cos \alpha}, \\ & X'_0 = X_0/L, z' = z/L, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

$$U_{21} = \begin{pmatrix} \frac{z'_1 L}{R} - \cos \alpha & z'_1 \\ \frac{L}{R} & 1 \end{pmatrix}, U_{32} = \begin{pmatrix} 1 & \frac{l'}{n_0} \\ -2x^{(1)} N_p & 1 \end{pmatrix}, U_{43} = \begin{pmatrix} 1 & \frac{1-z'_2}{\cos \alpha} \\ \cos \alpha & 1-g(1-z'_2)(1-g)-1 \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Введенные обозначения ясны из рисунка. Матрица U_{32} для модели «квадратичной» среды (1) в приближении $|\sqrt{x^{(1)} N_p l'}| \ll 1$ заимствована из работы [2].



Элемент волновода, эквивалентный кольцевому резонатору с разъюстированной средой P .

Для вектора \bar{A}_1 осевого луча на цилиндрическом зеркале должно выполняться равенство $A_1 = A_4$. На основании системы уравнений (2) и формул (3), (4) имеем

$$\bar{A}_1 = (I - U)^{-1} B_1, \quad U \equiv U_{43} U_{32} U_{21}, \quad B_1 \equiv U_{43} U_{32} B_2 + B_4, \quad (5)$$

где I — единичная матрица. Матрица U имеет инварианты

$$\det U = 1, \quad \text{Sp } U = -2 \left[g + l' \left(1 - \frac{1}{n_0} \right) (1-g) - x^{(1)} N_p p_0^2 (z'_0) \right], \quad (6)$$

$$p_0^2 (z'_0) = 1 - 2z'_0 (1 - z'_0) (1-g).$$

Решение уравнения (5) запишем в виде

$$\bar{A}_1 = \frac{2}{\Delta \cos \alpha} \begin{pmatrix} x^{(1)} N_p (1 - 2z'_0) X'_0 + l' \left(1 - \frac{1}{n_0} \right) p_0 \\ -x^{(1)} N_p (1 + g) X'_0 \cos \alpha \end{pmatrix}, \quad (7)$$

$$\Delta \equiv \det (I - U) = 2 - \text{Sp } U.$$

С помощью векторов B_{m+1} и матриц $U_{m+1, m}$ (3), (4) по известному вектору \bar{A}_1 можно определить векторы \bar{A}_2 и \bar{A}_3 осевых лучей, а также осевой луч внутри среды P .

4. Как видно из решения (7), в параксиальном приближении оптическая ось становится неустойчивой по отношению к разъюстировке среды, если

$$\det (I - U) = 0. \quad (8)$$

При условии $\chi_1^{(1)} \neq 0$, $\chi_2^{(1)} \neq 0$ или $\chi_1^{(1)} = 0$, $\chi_2^{(1)} \neq 0$ решение этого уравнения имеет вид

$$g = -1, \quad \frac{a_p}{L} = \sqrt{\frac{1 - 4z'_0 (1 - z'_0)}{2}}. \quad (9)$$

Будем называть резонатор устойчивым, если его собственные поля имеют каустические поверхности. Пусть $\chi^{(1)}$ — вещественно, тогда условие устойчивости резонатора выражается следующим образом [2]:

$$-1 \leq -\frac{1}{2} \text{Sp } U \leq 1 \quad (10)$$

(равенства определяют границы устойчивости), когда же $\text{Sp } U$ лежит вне этого интервала, то резонатор неустойчив. Ситуация становится сложнее, если $\chi^{(1)}$ — комплексная величина. В этом случае матрица U не унитарна и одно из ее собственных чисел по модулю больше единицы. Однако собственными полями резонатора могут быть квазигaussian пучки с экспоненциальным спадом поля в поперечном направлении [3]. Такой резонатор устойчив. Качественно это соответствует тому, что луч, уходя от оси резонатора, быстро теряет свою «интенсивность».

5. Приближение «однородной» в поперечном направлении среды. Пусть $\chi_1^{(1)} \neq 0$, $\chi_2^{(1)} = 0$ и выполнено неравенство

$$\left| 1 + g + l' \left(1 - \frac{1}{n_0} \right) (1 - g) \right| \gg |x^{(1)} N_p p_0^2(z'_0)|, \quad (11)$$

тогда ось резонатора неустойчива при разъюстировках среды, если

$$l' \left(1 - \frac{1}{n_0} \right) = -\frac{1+g}{1-g}. \quad (12)$$

Область устойчивости резонатора задается выражением

$$-1 \leq g + l' \left(1 - \frac{1}{n_0} \right) (1 - g) \leq 1. \quad (13)$$

Левое равенство совпадает с (12). Конфокальный ($g=0$) и концентрический ($g=-1$) резонаторы могут быть как устойчивыми, так и не устойчивыми, плоский резонатор ($g=1$) всегда лежит на границе устойчивости.

6. Приближение «неоднородной» в поперечном направлении среды. Пусть $\chi_1^{(1)} \neq 0$, $\chi_2^{(1)} = 0$ и выполнено неравенство

$$\left| l' \left(1 - \frac{1}{n_0} \right) \right| \ll |1 + g - x^{(1)} N_p p_0^2(z'_0)|. \quad (14)$$

Ось резонатора неустойчива относительно разъюстировки среды, если

$$g^{(1)} = \frac{x_1^{(1)} N_p (1 - 2z'_0(1 - z'_0)) - 1}{1 - 2x_1^{(1)} N_p z'_0(1 - z'_0)}, \quad x_1^{(1)} \equiv \chi_1^{(1)} l. \quad (15)$$

Область устойчивости резонатора определяется выражением

$$-1 \leq g - x_1^{(1)} N_p p_0^2(z'_0) \leq 1. \quad (16)$$

Одна из границ устойчивости совпадает с условием (15), а другая определяется формулой

$$g^{(2)} = \frac{x_1^{(1)} N_p (1 - 2z'_0(1 - z'_0)) + 1}{1 - 2x_1^{(1)} N_p z'_0(1 - z'_0)}. \quad (17)$$

Плоский и конфокальный резонаторы могут быть как устойчивыми, так и не устойчивыми при разных значениях $x_1^{(1)} N_p$ и $2z'_0(1 - z'_0)$. Концентрический резонатор в области изменения $x_1^{(1)} N_p \geq 0$ всегда неустойчив или лежит на границе устойчивости.

7. Таким образом, в выбранных приближениях, оптическая ось резонатора состоит из отрезков прямых линий, преломляющихся на границах раздела. Углы преломления зависят от параметров разъюстировки. В кольцевых лазерах ($\chi_2^{(1)} \neq 0$) следует воздерживаться от применения концентрического резонатора, ось которого, как следует из (9), неустойчива при разъюстировках.

Авторы благодарны Н. И. Калитеевскому за ценные советы и постоянную поддержку при выполнении работы и И. Л. Берштейну за полезные дискуссии и обсуждения.

Литература

- [1] В. Ф. Бойцов, Т. В. Гусева. Опт. и спектр., 28, 141, 1975.
 [2] Н. Kogelnik, Т. Li. Proc. IEEE, 54, 1312, 1966.
 [3] В. Ф. Бойцов, Т. А. Мурина. Опт. и спектр., 34, 572, 1973.

Поступило в Редакцию 12 мая 1977 г.