

含热透镜多元件谐振腔的动态工作特性

吕百达 李铁平

(四川大学物理系)

提要: 由于光泵浦热效应, 高功率固体激光器的输出参数如光束远场发散角、输出功率等会发生变化。本文使用 g^* -参数等价腔详细研究了各种类型稳定腔、临界腔的动态工作特性, 例如 g^* -参数图上工作点的运动规律、临界光焦度、临界 g^* 参数以及光斑半径、远场发散角等。文中还对理论的实验验证和应用进行了讨论。

Dynamic characteristics of multi-element resonators with an internal thermal lens

Lü Baida, Li Tieping

(Department of Physics, Sichuan University, Chengdu)

Abstract: The output parameters such as beam divergence angle in far-field output power of high power solid state lasers are variable due to thermal effect of optical pumping. In this paper the dynamic characteristics of various stable and critical resonator configurations, for example, moving rule of working point in the g^* -parameter diagram, critical refractive power, critical g^* -parameter, beam radius and external far-field divergence angle are investigated in detail using equivalent g^* -parameter resonator. The experimental verification and their application are discussed.

对于在激光加工、激光医学等应用中广泛使用的高功率固体激光器, 因光泵浦热效应会使其输出参数(例如光束远场发散角、输出功率等)发生变化。不少作者已对这一问题进行了深入的研究^[1~4], 给出了理论分析方法并报道了有关的实验结果。本文用 g^* -参数等价腔方法具体研究了各种类型稳定腔、临界腔的动态工作特性, 例如 g^* -参数图上工作点的运动规律、临界光焦度 D_I-D_{IV} 、临界 g^* 参数, 以及临界状态时镜面上的基模

光斑半径 W_i 和远场发散角 θ_{oi} ($i=1, 2$) 等, 最后还对有关研究方法及结果的实验验证和应用问题进行了讨论。

众所周知, 光泵浦高功率固体激光腔等效为一个含有可变焦距热透镜的多元件腔, 已用多种等效腔方法对这类腔型进行了研究^[2,5]。使用 g^* -参数等价腔, 可以方便地得出多元件腔的模参数公式, 而 g^* 参数随热焦距(常用其倒数光焦度 D) 的变化规律可用

收稿日期: 1986年4月11日。

g^* -参数图上工作点的直线运动方程来表征^[2]

$$g_2^* - g_2 = (g_1^* - g_1) \frac{d_1/d_2 + g_2}{d_2/d_1 + g_1} \quad (1)$$

式中

$$g_i^* = g_i - Dd_j \left(1 - \frac{g_i}{\rho_i}\right) \quad (2)$$

$$g_i = 1 - \frac{d_1 + d_2}{\rho_i} \quad i, j = 1, 2 \quad (3)$$

ρ_i 为二反射镜 S_i 的曲率半径, d_1 、 d_2 分别为镜 S_1 、 S_2 至热透镜二主面距离, 见图 1。

由(1)式易求得直线斜率为

$$K = \frac{d_1/d_2 + g_2}{d_2/d_1 + g_1} \quad (4)$$

临界 g^* 参数由方程

$$g_1^* \cdot g_2^* = 1 \quad (5)$$

或

$$g_1^* \cdot g_2^* = 0 \quad (6)$$

决定。将(1)式分别与(5)、(6)式联立, 可求出直线(1)与双曲线二支和坐标轴 $g_1^* = 0$ 、 $g_2^* = 0$ 的四个点坐标 $g_{i,I}^*$ 、 $g_{i,IV}^*$ (临界 g^* 参数), 再将 $g_{i,I}^*$ 、 $g_{i,IV}^*$ 代入(2)式便可求出临界光焦度 D_I 、 D_{IV} 。

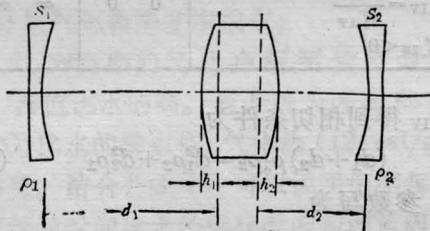


图 1 热透镜腔

下面, 我们就使用这一方法具体进行分析, 研究对象为 $D=0$ 时在稳定图上属于稳定腔或临界腔的各类腔型。

一、凸凹腔

$D=0$ 时的凸凹稳定腔位于稳定图第一象限的部分区域内。为确定起见, 设 $\rho_1 > 0$ 、 $\rho_2 < 0$, 所得结果总结于表 1。

由表 1 可知: (1) 依赖于腔参数, 直线斜率 K 可大于、小于或等于 g_2/g_1 , 也可为零或趋于无穷大, 分别如图中 1、2、3、4、5 所示。由

$D_{II} = D_{III}$ 得到直线过原点条件为(直线 3)。

$$(d_1 - d_2) \rho_2 \rho_1 = d_1^2 \rho_2 - d_2^2 \rho_1 \quad (7)$$

或用 q 参数表为

$$g_2/g_1 = (d_1/d_2)^2 \quad (8)$$

但对 $D=0$ 时的凸凹稳定腔, K 不能取负值。直线 1 和 2 的区别在于当激光介质为正热透镜时, 随着泵浦功率的增加, 工作点沿直线 1 运动时是先与 g_1^* 轴相交(对应 D_{III} 值)后进入不稳区, 再与 g_2^* 轴相交(对应 D_{II} 值), 然后经第四象限的稳定区而与 $g_1^* \cdot g_2^* = 1$ 的负支双曲线相交(对应 D_{IV} 值)。当工作点沿直线 2 运动时, 历经 D_{III} 、 D_{II} 值的次序恰巧相反。

(2) 由临界光焦度的公式可知, 这类类似于几何光学中焦距 $f=1/D$ 的薄透镜成像公式, 共轭的物、像点分别为镜 S_1 、 S_2 的曲率中心或顶点。由此可将在临界状态时凸凹腔内光束分布情况示意作于图 2。

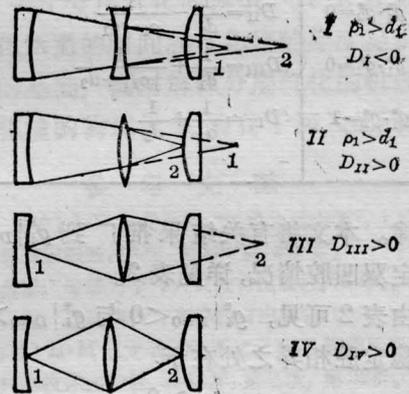


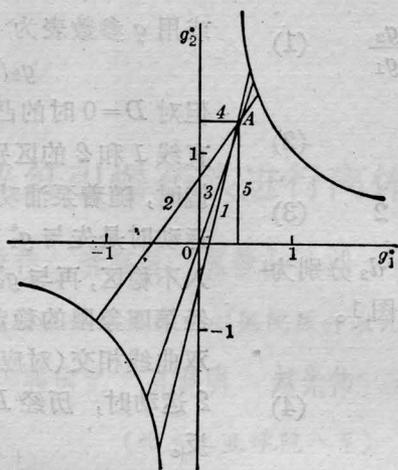
图 2

(3) 在临界点, 按高斯光束公式的计算值 $W_c \rightarrow 0$ 或 ∞ , $\theta_{0c} \rightarrow \infty$, 这与实际情况不符合, 原因是高斯光束近似已不能正确描述临界腔的模式分布。实验中观察到当工作点由稳定区趋近临界点时, 激光输出由大变小最后终止的现象。

二、双凹腔

双凹腔在稳定图中占有相当多的位置。文献[2]研究了 $g_i^* > 0$ 时双凹腔工作点的运

表 1



$$K = \frac{d_1/d_2 + g_2}{d_2/d_1 + g_1} \geq 0, \rightarrow \infty$$

| 临界类型 | 临界光焦度 D | 临界 g^* 参数 | W_1 W_2 | θ_{01} θ_{02} |
|------------------------------|--|---|-------------------|-----------------------------|
| I. $g_1^* \cdot g_2^* = 1$ | $D_I = -\frac{1}{\rho_1 - d_1} + \frac{1}{ \rho_2 + d_2}$ | $g_{1,I}^* = \frac{1 - d_1/\rho_1}{1 + d_2/ \rho_2 }, g_{2,I}^* = \frac{1}{g_{1,I}^*}$ $g_{i,I}^* > 0$ | ∞ ∞ | ∞ ∞ |
| II. $g_1^* \cdot g_2^* = 0$ | $D_{II} = \frac{1}{d_2} - \frac{1}{\rho_1 - d_1}$ | $g_{1,II}^* = 0, g_{2,II} = g_2 - g_1 \frac{d_1}{d_2} \cdot \frac{1 + d_2/ \rho_2 }{1 - d_1/\rho_1}$ | ∞ 0 | ∞ ∞ |
| III. $g_1^* \cdot g_2^* = 0$ | $D_{III} = \frac{1}{d_1} + \frac{1}{ \rho_2 + d_2}$ | $g_{1,III}^* = g_1 - g_2 \frac{d_2}{d_1} \cdot \frac{1 - d_1/\rho_1}{1 + d_2/ \rho_2 }, g_{2,III}^* = 0$ | 0 ∞ | ∞ ∞ |
| IV. $g_1^* \cdot g_2^* = 1$ | $D_{IV} = \frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2}$ | $g_{1,IV}^* = -\frac{d_2}{d_1}, g_{2,IV}^* = \frac{1}{g_{1,IV}^*}$ $g_{i,IV}^* < 0$ | 0 0 | ∞ ∞ |

动规律。本文将有关结果推广到 $g_i^*|_{D=0} < 0$ 的稳定双凹腔情况, 详见表 2。

由表 2 可见, $g_i^*|_{D=0} < 0$ 与 $g_i^*|_{D=0} > 0$ 的双凹稳定腔相异之处在于:

$$(1) \quad K|_{g_i^*(D=0) < 0} \begin{cases} > 0, \\ < 0, \\ = 0, \rightarrow \infty \end{cases}$$

而 $K|_{g_i^*(D=0) > 0} \geq 0, \rightarrow \infty$ 。(2) $g_i^*|_{D=0} < 0, K < 0$ 双凹腔的 $g_{1,I}^*$ 和 $g_{1,IV}^*$ 的对应点都在 $g_1^* \cdot g_2^* = 1$ 的负支双曲线上, 而 $g_i^*|_{D=0} > 0$ 双凹腔的 $g_{1,I}^*$ 和 $g_{1,IV}^*$ 的对应点则分别在 $g_1^* \cdot g_2^* = 1$ 的正支和负支双曲线上。(3) $g_i^*|_{D=0} > 0$ 双凹腔的工作直线与 $g_1^* \cdot g_2^* = 1$ 正支和负支双曲线相交, 而 $g_i^*|_{D=0} < 0, K < 0$ 双凹腔的工作直线则仅与 $g_1^* \cdot g_2^* = 1$ 负支双曲线相交或相切。由

$D_I = D_{IV}$ 得到相切条件为

$$(d_1 + d_2) \rho_1 \rho_2 = d_1^2 \rho_2 + d_2^2 \rho_1 \quad (9)$$

或用 g 参数写为

$$d_1^2 g_1 + d_2^2 g_2 + 2d_1 d_2 = 0 \quad (10)$$

图 3 为在临界状态时双凹腔内光束分布示意图, 由 II 交换参数下标可得出 III, 故从略。

三、平凹腔

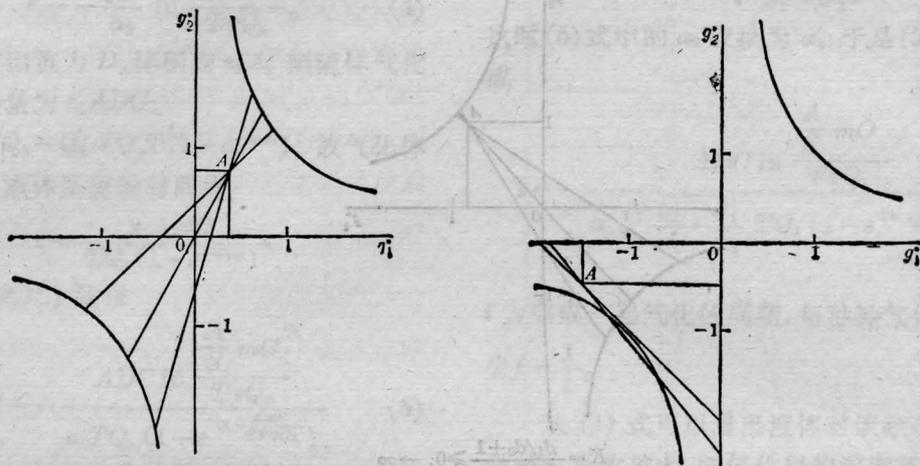
为确定起见, 设 $\rho_2 \rightarrow \infty$, 有关结果列于表 3。在临界状态时, 腔内光束分布图可仿前作出, 限于篇幅从略。

平凹腔中一典型例为半共焦腔, $\rho_1 = 2(d_1 + d_2)$ 有关结果见表 4。

四、共焦腔

满足广义共焦条件 $g_1 + g_2 = 2g_1 g_2$ 的腔

表 2



$$g_{iD=0}^* > 0, K = \frac{d_1/d_2 + g_2}{d_2/d_1 + g_1} \geq 0, \rightarrow \infty$$

$$g_{iD=0}^* < 0, K = \frac{d_1/d_2 + g_2}{d_2/d_1 + g_1}$$

$$\begin{cases} > 0, & \begin{cases} 0 > g_1 > -d_2/d_1 \\ 0 > g_2 > -d_1/d_2 \end{cases} \\ < 0 < & \begin{cases} 0 > g_1 > -d_2/d_1 \\ g_2 < -d_1/d_2 \\ g_1 < -d_2/d_1 \\ 0 > g_2 > -d_1/d_2 \end{cases} \\ = 0, \rightarrow \infty & d_1=0, d_2=0 \end{cases}$$

| 临界类型 | 临界光焦度 D | 临界 g^* 参数 | W_1, W_2 | θ_{01}, θ_{02} |
|------------------------------|--|--|-----------------|----------------------------|
| I. $g_1^* \cdot g_2^* = 1$ | $D_I = -\frac{1}{\rho_1 - d_1} - \frac{1}{\rho_2 - d_2}$ | $g_{1,I}^* = \frac{1 - d_1/\rho_1}{1 - d_2/\rho_2}, g_{2,I}^* = \frac{1}{g_{1,I}^*}$ | $\infty \infty$ | $\infty \infty$ |
| II. $g_1^* \cdot g_2^* = 0$ | $D_{II} = \frac{1}{d_2} - \frac{1}{\rho_1 - d_1}$ | $g_{1,II}^* = 0, g_{2,II}^* = g_2 - g_1 \frac{d_1}{d_2} \cdot \frac{1 - d_2/\rho_2}{1 - d_1/\rho_1}$ | $\infty 0$ | $\infty \infty$ |
| III. $g_1^* \cdot g_2^* = 0$ | $D_{III} = \frac{1}{d_1} - \frac{1}{\rho_2 - d_2}$ | $g_{1,III}^* = g_1 - g_2 \frac{d_2}{d_1} \cdot \frac{1 - d_1/\rho_1}{1 - d_2/\rho_2}, g_{2,III}^* = 0$ | 0∞ | $\infty \infty$ |
| IV. $g_1^* \cdot g_2^* = 1$ | $D_{IV} = \frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2}$ | $g_{1,IV}^* = -\frac{d_2}{d_1}, g_{2,IV}^* = \frac{1}{g_{1,IV}^*}$ $g_{1,IV}^* < 0$ | $0 0$ | $\infty \infty$ |

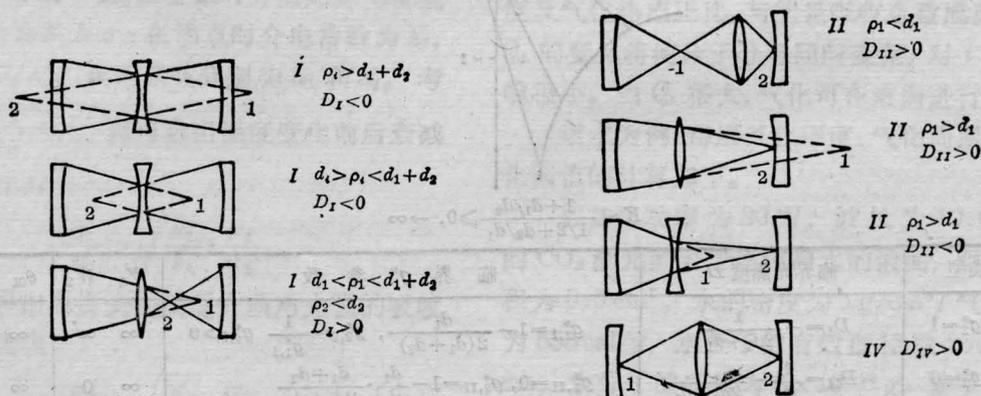
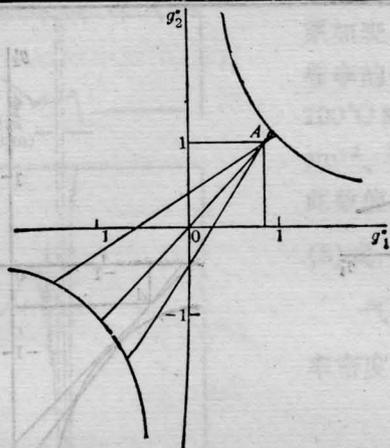


图 3

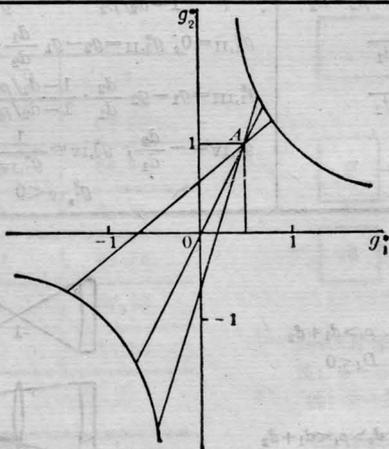
表 3



$$K = \frac{d_1/d_2 + 1}{d_2/d_1 + g_1} \geq 0, \rightarrow \infty$$

| 临界类型 | 临界光焦度 D | 临界 g^* 参数 | W_1 | W_2 | θ_{01} | θ_{02} |
|------------------------------|---|--|----------|----------|---------------|---------------|
| I. $g_1^* \cdot g_2^* = 1$ | $D_I = -\frac{1}{\rho_1 - d_1}$ | $g_{1,I}^* = 1 - d_1/\rho_1, g_{2,I}^* = \frac{1}{g_{1,I}^*}, g_{i,I}^* > 0$ | ∞ | ∞ | ∞ | 0 |
| II. $g_1^* \cdot g_2^* = 0$ | $D_{II} = \frac{1}{d_2} - \frac{1}{\rho_1 - d_1}$ | $g_{1,II}^* = 0, g_{2,II}^* = 1 - g_1 \frac{d_1}{d_2} \cdot \frac{1}{1 - d_1/\rho_1}$ | ∞ | 0 | ∞ | ∞ |
| III. $g_1^* \cdot g_2^* = 0$ | $D_{III} = \frac{1}{d_1}$ | $g_{1,III}^* = g_1 - \frac{d_2}{d_1} \left(1 - \frac{d_1}{\rho_1}\right), g_{2,III}^* = 0$ | 0 | ∞ | ∞ | 0 |
| IV. $g_1^* \cdot g_2^* = 1$ | $D_{IV} = \frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2}$ | $g_{1,IV}^* = -\frac{d_2}{d_1}, g_{2,IV}^* = \frac{1}{g_{1,IV}^*}, g_{i,IV}^* < 0$ | 0 | 0 | ∞ | ∞ |

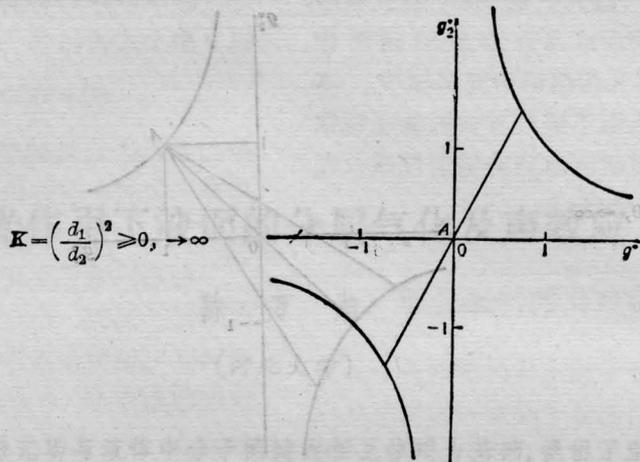
表 4



$$K = \frac{1 + d_1/d_2}{1/2 + d_2/d_1} \geq 0, \rightarrow \infty$$

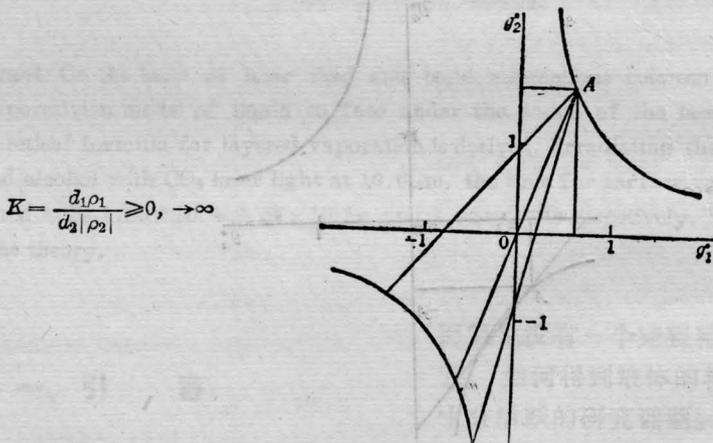
| 临界类型 | 临界光焦度 D | 临界 g^* 参数 | W_1 | W_2 | θ_{01} | θ_{02} |
|------------------------------|---|--|----------|----------|---------------|---------------|
| I. $g_1^* \cdot g_2^* = 1$ | $D_I = -\frac{1}{2d_2 + d_1}$ | $g_{1,I}^* = 1 - \frac{d_1}{2(d_1 + d_2)}, g_{2,I}^* = \frac{1}{g_{1,I}^*}, g_{i,I}^* > 0$ | ∞ | ∞ | ∞ | 0 |
| II. $g_1^* \cdot g_2^* = 0$ | $D_{II} = \frac{1}{d_2} - \frac{1}{2d_2 + d_1}$ | $g_{1,II}^* = 0, g_{2,II}^* = 1 - \frac{d_1}{d_2} \cdot \frac{d_1 + d_2}{2d_2 + d_1}$ | ∞ | 0 | ∞ | ∞ |
| III. $g_1^* \cdot g_2^* = 0$ | $D_{III} = \frac{1}{d_1}$ | $g_{1,III}^* = \frac{1}{2} - \frac{d_2}{2d_1} \cdot \frac{2d_2 + d_1}{d_1 + d_2}, g_{2,III}^* = 0$ | 0 | ∞ | ∞ | 0 |
| IV. $g_1^* \cdot g_2^* = 1$ | $D_{IV} = \frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2}$ | $g_{1,IV}^* = -\frac{d_2}{d_1}, g_{2,IV}^* = \frac{1}{g_{1,IV}^*}, g_{i,IV}^* < 0$ | 0 | 0 | ∞ | ∞ |

表 5



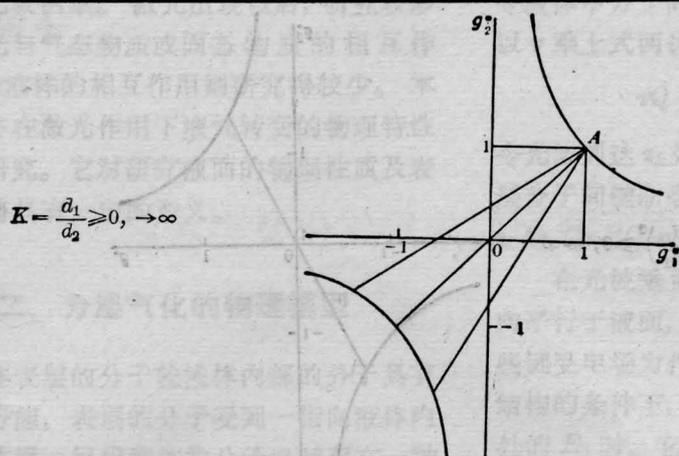
| 临界类型 | 临界光焦度 D | 临界 g^* 参数 | W_1, W_2 | θ_{01}, θ_{02} |
|------------------------------|--|--|---|---|
| I. $g_1^* \cdot g_2^* = 1$ | $D_I = -\frac{1}{d_1} - \frac{1}{d_2}$ | $g_{1,I}^* = \frac{d_2}{d_1}, g_{2,I}^* = \frac{1}{g_{1,I}^*}, g_{i,I}^* > 0$ | $\infty \quad \infty$ | $\infty \quad \infty$ |
| II. $g_1^* \cdot g_2^* = 0$ | $D_{II} = 0$ | $g_{1,II}^* = g_{2,II}^* = 0$ | $\sqrt{\frac{\lambda(d_1+d_2)}{\sigma}} \sqrt{\frac{\lambda(d_1+d_2)}{\sigma}}$ | $\sqrt{\frac{\lambda(1+\eta^2)}{\sigma(d_1+d_2)}} \sqrt{\frac{\lambda(1+\eta^2)}{\sigma(d_1+d_2)}}$ |
| III. $g_1^* \cdot g_2^* = 0$ | $D_{III} = 0$ | $g_{1,III}^* = g_{2,III}^* = 0$ | $\sqrt{\frac{\lambda(d_1+d_2)}{\sigma}} \sqrt{\frac{\lambda(d_1+d_2)}{\sigma}}$ | $\sqrt{\frac{\lambda(1+\eta^2)}{\sigma(d_1+d_2)}} \sqrt{\frac{\lambda(1+\eta^2)}{\sigma(d_1+d_2)}}$ |
| IV. $g_1^* \cdot g_2^* = 1$ | $D_{IV} = \frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2}$ | $g_{1,IV}^* = -\frac{d_2}{d_1}, g_{2,IV}^* = \frac{1}{g_{1,IV}^*}, g_{i,IV}^* < 0$ | $0 \quad 0$ | $\infty \quad \infty$ |

表 6



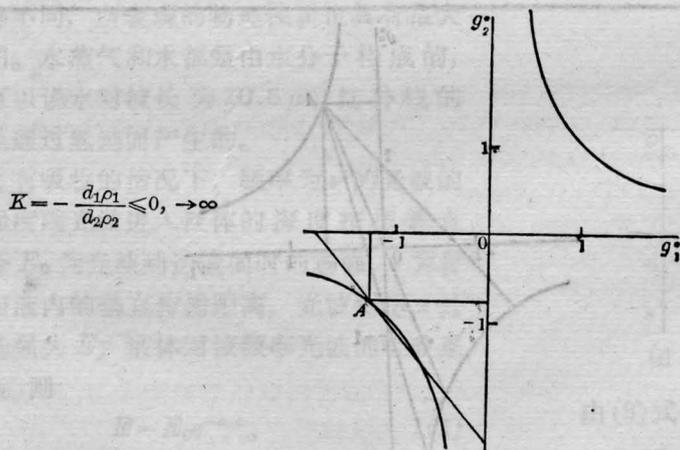
| 临界类型 | 临界光焦度 D | 临界 g^* 参数 | W_1, W_2 | θ_{01}, θ_{02} |
|------------------------------|--|---|-----------------------|----------------------------|
| I. $g_1^* \cdot g_2^* = 1$ | $D_I = 0$ | $g_{1,I}^* = \frac{1-d_1/ \rho_2 +d_1+d_2}{1+d_2/ \rho_2 }, g_{2,I}^* = \frac{1}{g_{1,I}^*}, g_{i,I}^* > 0$ | $\infty \quad \infty$ | $\infty \quad \infty$ |
| II. $g_1^* \cdot g_2^* = 0$ | $D_{II} = \frac{1}{d_2} - \frac{1}{ \rho_2 +d_2}$ | $g_{1,II}^* = 0, g_{2,II}^* = \frac{1-g_1 \frac{d_1}{d_2} \cdot \frac{1+d_2/ \rho_2 }{1-d_1/ \rho_2 +d_1+d_2}}$ | $\infty \quad 0$ | $\infty \quad \infty$ |
| III. $g_1^* \cdot g_2^* = 0$ | $D_{III} = \frac{1}{d_1} + \frac{1}{ \rho_2 +d_2}$ | $g_{1,III}^* = g_1 - \frac{d_2}{g_1 d_1} \cdot \frac{1-d_1/ \rho_2 +d_1+d_2}{1+d_2/ \rho_2 }, g_{2,III}^* = 0$ | $0 \quad \infty$ | $\infty \quad \infty$ |
| IV. $g_1^* \cdot g_2^* = 1$ | $D_{IV} = \frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2}$ | $g_{1,IV}^* = \frac{-d_2}{d_1}, g_{2,IV}^* = \frac{1}{g_{1,IV}^*}, g_{i,IV}^* < 0$ | $0 \quad 0$ | $\infty \quad \infty$ |

表 7



| 临界类型 | 临界光焦度 D | 临界 g^* 参数 | W_1, W_2 | θ_{01}, θ_{02} |
|------------------------------|--|--|-----------------------|----------------------------|
| I. $g_1^* \cdot g_2^* = 1$ | $D_I = 0$ | $g_{1,I}^* = g_{2,I}^* = 1$ | $\infty \quad \infty$ | $0 \quad 0$ |
| II. $g_1^* \cdot g_2^* = 0$ | $D_{II} = \frac{1}{d_2}$ | $g_{1,II}^* = 0, g_{2,II}^* = 1 - \frac{d_1}{d_2}$ | $\infty \quad 0$ | $0 \quad \infty$ |
| III. $g_1^* \cdot g_2^* = 0$ | $D_{III} = \frac{1}{d_1}$ | $g_{1,III}^* = 1 - \frac{d_2}{d_1}, g_{2,III}^* = 0$ | $0 \quad \infty$ | $\infty \quad 0$ |
| IV. $g_1^* \cdot g_2^* = 1$ | $D_{IV} = \frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2}$ | $g_{1,IV}^* = -\frac{d_2}{d_1}, g_{2,IV}^* = \frac{1}{g_{1,IV}^*}, g_{1,IV}^* < 0$ | $0 \quad 0$ | $\infty \quad \infty$ |

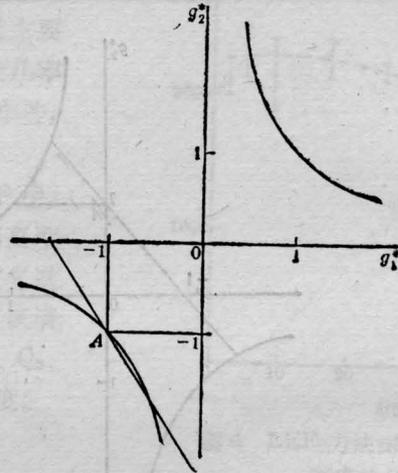
表 8



| 临界类型 | 临界光焦度 D | 临界 g^* 参数 | W_1, W_2 | θ_{01}, θ_{02} |
|------------------------------|--|--|-----------------------|----------------------------|
| I. $g_1^* \cdot g_2^* = 1$ | $D_I = 0$ | $g_{1,I}^* = \frac{1 - d_1/d_1 + d_2 - \rho_2}{1 - d_2/\rho_2}, g_{2,I}^* = \frac{1}{g_{1,I}^*}, g_{1,I}^* < 0$ | $\infty \quad \infty$ | $\infty \quad \infty$ |
| II. $g_1^* \cdot g_2^* = 0$ | $D_{II} = \frac{1}{d_2} + \frac{1}{\rho_2 - d_2}$ | $g_{1,II}^* = 0, g_{2,II}^* = \frac{1}{g_1} - g_1 \frac{d_1}{d_2} \cdot \frac{1 - d_2/\rho_2}{1 - d_1/d_1 + d_2 - \rho_2}$ | $\infty \quad 0$ | $\infty \quad \infty$ |
| III. $g_1^* \cdot g_2^* = 0$ | $D_{III} = \frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2 - \rho_2}$ | $g_{1,III}^* = g_1 - \frac{d_2}{g_1 d_1} \cdot \frac{1 - d_1/d_1 + d_2 - \rho_2}{1 - d_2/\rho_2}, g_{2,III}^* = 0$ | $0 \quad \infty$ | $\infty \quad \infty$ |
| IV. $g_1^* \cdot g_2^* = 1$ | $D_{IV} = \frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2}$ | $g_{1,IV}^* = -\frac{d_2}{d_1}, g_{2,IV}^* = \frac{1}{g_{1,IV}^*}, g_{1,IV}^* < 0$ | $0 \quad 0$ | $\infty \quad \infty$ |

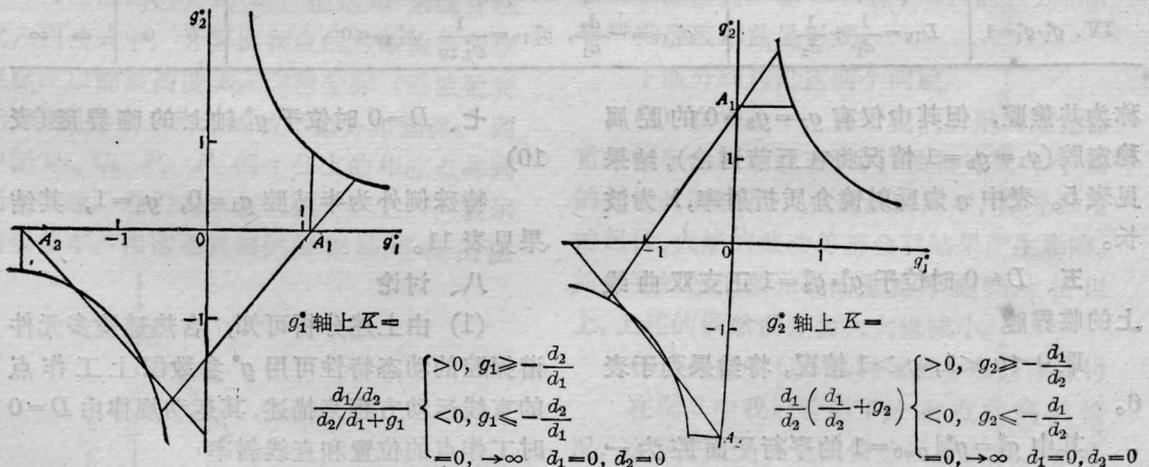
表 9

$$K = -\frac{d_1}{d_2} \leq 0, \rightarrow \infty$$



| 临界类型 | 临界光焦度 D | 临界 \$g^*\$ 参数 | \$W_1, W_2\$ | \$\theta_{01}, \theta_{02}\$ |
|--------------------------------|--|--|-------------------|------------------------------|
| I. \$g_1^* \cdot g_2^* = 1\$ | \$D_I = 0\$ | \$g_{1,I}^* = g_{2,I}^* = -1\$ | \$\infty \infty\$ | \$\infty \infty\$ |
| II. \$g_1^* \cdot g_2^* = 0\$ | \$D_{II} = \frac{d_1 + d_2}{d_2(d_1 - d_2)}\$ | \$g_{1,II}^* = 0, g_{2,II}^* = -1 - \frac{d_1}{d_2}\$ | \$\infty 0\$ | \$\infty \infty\$ |
| III. \$g_1^* \cdot g_2^* = 0\$ | \$D_{III} = \frac{d_1 + d_2}{d_1(d_2 - d_1)}\$ | \$g_{1,III}^* = -1 - \frac{d_2}{d_1}, g_{2,III}^* = 0\$ | \$0 \infty\$ | \$\infty \infty\$ |
| IV. \$g_1^* \cdot g_2^* = 1\$ | \$D_{IV} = \frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2}\$ | \$g_{1,IV}^* = -\frac{d_2}{d_1}, g_{2,IV}^* = \frac{1}{g_{1,IV}^*}, g_{i,IV}^* < 0\$ | \$0 0\$ | \$\infty \infty\$ |

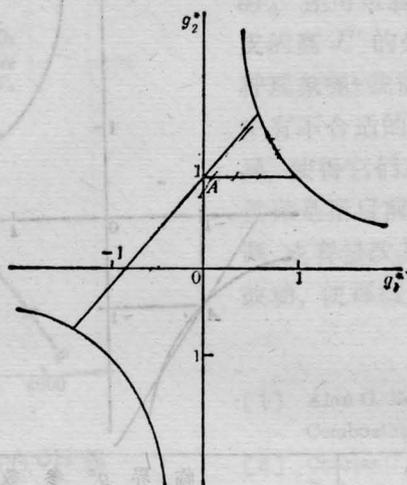
表 10



(a) 以 \$g_2^*\$ 轴上点为例

| 临界类型 | 临界光焦度 D | 临界 \$g^*\$ 参数 | \$W_1, W_2\$ | \$\theta_{01}, \theta_{02}\$ |
|--------------------------------|--|---|-------------------|------------------------------|
| I. \$g_1^* \cdot g_2^* = 1\$ | \$D_I = -\frac{1}{d_2} - \frac{1}{\rho_2 - d_2}\$ | \$g_{1,I}^* = \frac{1 - d_1/d_1 + d_2}{1 - d_2/\rho_2}, g_{2,I}^* = \frac{1}{g_{1,I}^*}\$ | \$\infty \infty\$ | \$\infty \infty\$ |
| II. \$g_1^* \cdot g_2^* = 0\$ | \$D_{II} = 0\$ | \$g_{1,II}^* = 0, g_{2,II}^* = 1 - \frac{d_1 + d_2}{\rho_2}\$ | \$\infty 0\$ | \$\infty \infty\$ |
| III. \$g_1^* \cdot g_2^* = 0\$ | \$D_{III} = \frac{1}{d_1} - \frac{1}{\rho_2 - d_2}\$ | \$g_{1,III}^* = -g_2 \cdot \frac{1 - d_1/d_1 + d_2}{1 - d_2/\rho_2}, g_{2,III}^* = 0\$ | \$0 \infty\$ | \$\infty \infty\$ |
| IV. \$g_1^* \cdot g_2^* = 1\$ | \$D_{IV} = \frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2}\$ | \$g_{1,IV}^* = -\frac{d_2}{d_1}, g_{2,IV}^* = \frac{1}{g_{1,IV}^*}, g_{i,IV}^* < 0\$ | \$0 0\$ | \$\infty \infty\$ |

表 11



$$K = \frac{d_1}{d_2} \left(\frac{d_1}{d_2} + 1 \right) \geq 0, \rightarrow \infty$$

| 临界类型 | 临界光焦度 D | 临界 g^* 参数 | W_1, W_2 | θ_{01}, θ_{02} |
|------------------------------|--|--|-----------------------|----------------------------|
| I. $g_1^* \cdot g_2^* = 1$ | $D_I = -\frac{1}{d_2}$ | $g_{1,I}^* = \frac{1}{1+d_1/d_2}, g_{2,I}^* = \frac{1}{g_{1,I}^*}, g_{1,I}^* > 0$ | $\infty \quad \infty$ | $\infty \quad 0$ |
| II. $g_1^* \cdot g_2^* = 0$ | $D_{II} = 0$ | $g_{1,II}^* = 0, g_{2,II}^* = 1$ | $\infty \quad 0$ | $\infty \quad \infty$ |
| III. $g_1^* \cdot g_2^* = 0$ | $D_{III} = \frac{1}{d_1}$ | $g_{1,III}^* = -\frac{d_2}{d_1} \cdot \frac{1}{1+d_1/d_2}, g_{2,III}^* = 0$ | $0 \quad \infty$ | $\infty \quad 0$ |
| IV. $g_1^* \cdot g_2^* = 1$ | $D_{IV} = \frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2}$ | $g_{1,IV}^* = -\frac{d_2}{d_1}, g_{2,IV}^* = \frac{1}{g_{1,IV}^*}, g_{1,IV}^* < 0$ | $0 \quad 0$ | $\infty \quad \infty$ |

称为共焦腔，但其中仅有 $g_1 = g_2 = 0$ 的腔属稳定腔 ($g_1 = g_2 = 1$ 情况将在五节讨论)，结果见表 5。表中 η 为反射镜介质折射率， λ 为波长。

五、 $D=0$ 时位于 $g_1^* \cdot g_2^* = 1$ 正支双曲线上的临界腔

取 $0 < g_1 < 1, g_2 > 1$ 情况，将结果列于表 6。

其中 $g_1^* = g_2^* |_{D=0} = 1$ 的平行平面腔为一例外，其结果见表 7。

六、 $D=0$ 时位于 $g_1^* \cdot g_2^* = 1$ 负支双曲线上的临界腔

取 $g_1 < -1, -1 < g_2 < 0$ 情况，其结果见表 8。

特例——对称共心腔 $\rho_1 = \rho_2 = \frac{d_1 + d_2}{2}$ ，结果见表 9。

七、 $D=0$ 时位于 g_1^* 轴上的临界腔 (表 10)

特殊例外为半球腔 $g_1 = 0, g_2 = 1$ ，其结果见表 11。

八、讨论

(1) 由上述分析可知，含热透镜多元件谐振腔的动态特性可用 g^* 参数图上工作点的直线运动方程来描述，其运动规律由 $D=0$ 时工作点的位置和直线斜率

$$K = \frac{d_1/d_2 + g_2}{d_2/d_1 + g_1}$$

(依赖于腔参数) 来决定。直线过原点必要条件为 $D_{II} = D_{III}$ ，直线与 $g_1^* \cdot g_2^* = 1$ 负支双曲线相切必要条件为 $D_I = D_{IV}$ 。

(2) $g_{1,IV}^*$ 恒小于零，即不存在与 $g_1^* \cdot g_2^* = 1$ 正支双曲线有两个交点或相切的运动直线。
(下转第 354 页)

沿着管的轴向逐渐增大。当泵浦功率密度减少到阈值 P_{th} 时, 泵浦能量转换为远红外激光能量的过程便停止了。之后, 远红外激光的功率密度由于工作气体的吸收开始下降。理论计算表明, 在理想情况下(无损耗情况下), 泵浦功率密度下降到初始值的 5% 左右就是 P_{th} 值。激光管中泵浦功率密度减少到 P_{th} 值时的管内位置离输入端的距离, 称为管的最优长度 Z_{opt} 。如果激光管的长度刚好等于 Z_{opt} , 就可获得远红外激光的最大输出。 Z_{opt} 的大小主要取决于泵浦功率密度的大小及其在激光管内的衰减情况。当工作气体压强增大时, 泵浦功率密度衰减得快, Z_{opt} 减少; 当 Z_{opt} 等于工作气体盒长度 L 时, 远红外激光输出最大, 这就是最佳工作压强的实质。如果泵浦频偏 $|\delta_p|$ 增大, 则工作气体对泵浦功率的吸收减少, Z_{opt} 便增大了, 这时我们可以增加压强 P 使 Z_{opt} 减少。又可以达到 $Z_{opt} = L$ 的目的。相反地,

(上接第 336 页)

(3) 对含热透镜多元件腔的实验研究结果^[4,6]证明了上述分析方法是正确的。动态特性图的一个应用实例是激光介质热焦距的测量。[7] 讨论了有关的测量原理和实验结果, 并建议作为常规测量热焦距方法使用。

(4) 在高功率固体激光器的设计中, 模式结构(TEM₀₀ 模或是多模)、输出功率、远场发散角、抗热扰动性能和在一定泵浦水平范围内的动态工作特性(是否进入临界线上或不稳区内)等都是要考虑的重要因素, 最好能在实验提供必要数据基础上, 用计算机求数值解和曲线组, 以选取满足设计要求的最佳参数。各类腔型的动态工作特性图可为选取腔型、初始工作点位置和动态工作范围等提供必要的参考数据。在设计时, 由腔参数决定工作点在 g^* -参数图上 $D=0$ 时的位置和直线斜率(它们与泵浦参数无关), 而激光器的动态工作范围则依赖于光焦度, 因此与泵浦参数有关。

当泵浦频偏 $|\delta_p|$ 小时, 工作气体对泵浦功率吸收增大, 可以减少压强 P 使 Z_{opt} 增大, 以满足 $Z_{opt} = L$ 的条件, 这便是泵浦频偏 $|\delta_p|$ 增加, 最佳压强 P_{opt} 也随之增加的原因。实验结果给出的最佳压强发生在泵浦功率密度下降到初始值的 10%, 而理论计算值是 5%, 其差别是由于理论计算未计及远红外信号的衍射损耗及泵浦能量在管壁产生的损耗。

参 考 文 献

- [1] F. Strumia *et al.*; 7th Int. IR-MM Waves Conf. Digest. 1983, 225.
- [2] K. Walzer; "Infrared and Millimeter Waves", (Ed. by K. J. Button), 7, Academic Press 1983, Chap. 3. B. Walker *et al.*; *Opt. Commun.*, 1977, 23, 8.
- [3] T. Yoshida *et al.*; *Opt. Commun.*, 1978, 26, 410.
- [4] T. Y. Chang; "Nonlinear Infrared Generation", Ed. by Y-R Shen. Springer-Verlag, 1977, Chap. 6.
- [5] 林贻堃, 丘秉生; (待发表)。

(5) g^* -参数图上工作点平行于 g^* 轴的运动是一类重要特殊情况。[8] 讨论了可用来设计“多模热不灵敏腔”的原理和实验结果。

(6) 腔内含有多个热透镜的多元件腔的问题实质上可以归结为单透镜问题来处理^[9], 故不难将本文有关结果推广于多透镜情况。

对 H. Weber 教授的讨论表示感谢。

参 考 文 献

- [1] H. Kogelnik; *BSTJ*, 1965, 44, 455.
- [2] H. Weber; “激光谐振腔”, 华中工学院出版社, 1983, p. 111.
- [3] 金德运; 《中国激光》, 1984, 11, No. 3, 159.
- [4] H. P. Kortz; Dissertation Uni. Kaiserslautern 1980.
- [5] 吕百达, 魏光辉; 《四川大学学报》, 1985, No. 4, 48.
- [6] H. Weber, 吕百达; “Dynamische Eigenschaften Von Linsenresonatoren”, Bericht Uni. Kaiserslautern, 1982.
- [7] 金德运, 茹华一; 《激光与红外》, 1981, No. 3, 37.
- [8] 吕百达, H. Weber; 《光学学报》, 1986, 6, No. 7, 577.
- [9] 金德运; 《四川激光》, 1982 No. 1, 39.