

Ar⁺ 泵浦连续波染料激光器 谐振腔的设计与分析

张国轩 刘玉璞 张影华 刘进军*

(中国科学院上海光机所)

提要: 本文叙述了三镜折迭腔和四镜环形腔的设计, 着重分析了腔的调整对谐振腔的一些特性的影响。

Design and analysis of resonators for the CW dye laser pumped by an Ar⁺ laser

Zhang Guoxuan, Liu Yupu, Zhang Yinghua, Liu Jinjun

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica)

Abstract: The design of the folded threemirror cavity and four-mirror ring cavity is described. The effects of the cavity adjustment on the properties of laser resonators have been emphasized. The analyses are important for the correct design and alignment of the cavity.

在 Ar⁺ 泵浦连续波染料激光器中, 由于泵浦功率一般都较低(几瓦至几十瓦), 所以染料激光器的腔一般都设计成腔内有较小光腰的所谓折迭腔。图 1 是由 H. W. Kogelnik^[1] 等人最早提出的像散补偿折迭腔。

由于倍频和锁模等技术的发展和运用, 染料激光器也出现了多镜腔及环形腔等结构, K. K. Li^[2, 3] 等人对这些腔也曾进行过分析和讨论。

在实际应用中, 不仅需要计算出各反射镜的参数和那些表征腔的性质的基本参数(如稳定区、光腰位置和直径)的关系, 而且也希望了解腔的基本参数与腔的可调量(如反射镜的间距等)的数量关系。下面就我们工

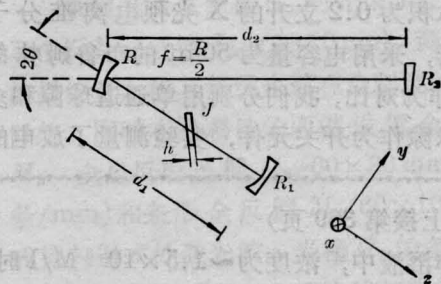


图 1 三镜折迭腔光路图
(J 为布儒斯特角放置的喷流)

作中常采用的三镜折迭腔和四镜环形腔(图 1、2)进行分析和讨论。

收稿日期: 1984年3月6日。

* 天津大学毕业生。

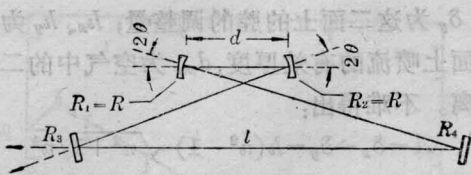


图2 四镜环形腔光路图
(总腔长 $l+d=3000\text{ mm}$, $R=100\text{ mm}$, $R_3, R_4=\infty$)

一、三镜折叠腔

关于三镜折叠腔, 文献 [1] 已有详细的讨论, 为了与下面将要讨论的四镜环形腔进行比较, 我们仅由 [1] 写出最后结果, 并用图来表示。

1. 当不考虑腔元件像散时的空腔情况

a) 稳定区

由 [1] 的分析可知, 三镜折叠腔的短臂 d_1 是影响腔特性的很灵敏的参数。设 $d_1 = R_1 + f + \delta$, 其中 δ 为稳定区内腔短臂的可调整量。并设 δ_{\max} 和 δ_{\min} 分别为稳定区内腔的可调整量的极大值和极小值。由 [1] 有:

$$\delta_{\min} = f^2 / (d_2 - R_2 - f)$$

$$\delta_{\max} = f^2 / (d_2 - f)$$

图 1 中设 $f = R/2 = 50\text{ mm}$, $R_1 = 50\text{ mm}$, $R_2 = \infty$, $d_2 = 1400\text{ mm}$, 则有稳定区 $2S = \delta_{\max} - \delta_{\min} \approx f^2 / d_2 = 1.8\text{ mm}$ 。这意味着反射镜 R_1 与 R 之间的距离 d_1 的可调整范围只有 $\sim 1.8\text{ mm}$, 否则腔会变得不稳定。

b) 光腰位置

设光腰离端反射镜 R_1 的距离为 t , 由 [1] 有:

$$t = \frac{(R_1 + \delta - \delta_{\max})(R_1 + \delta - \delta_{\min})}{(R_1 + 2\delta - \delta_{\max} - \delta_{\min})}$$

由上式可见光腰位置 t 是腔的可调整量 δ 的函数。设 $\Delta = R_1 - t$, Δ 为光腰距镜 R_1 球心的距离。 Δ 与 δ 的关系曲线如图 5 所示。

c) 光腰直径

由 [1] 有:

$$\left(\frac{\pi\omega_0^2}{\lambda}\right)^2 = \frac{(R_1 + \delta - \delta_{\max})(R_1 + \delta - \delta_{\min})(\delta_{\max} - \delta)(\delta - \delta_{\min})}{(R_1 + 2\delta - \delta_{\max} - \delta_{\min})^2}$$

式中 ω_0 为光腰半径, λ 为染料激光波长。

设 $\lambda = 0.6\mu\text{m}$ (其他参数同前), 所得的光腰直径 $2\omega_0$ 和调整量 δ 的关系曲线如图 6。

从上分析可知, 在稳定区内, 构成腔短臂 d_1 的二块反射镜的距离调整时, 光腰位置和光腰直径也随之变化。

2. 考虑像散时的情况

据 [1] 的分析, 在图 1 的三镜腔中, 由于折叠镜 R 及布儒斯特角放置的染料喷流 J 的像散, 当光沿 z 方向传播时, 在 xz 和 yz 面上腔的调整量 δ_x 、 δ_y 也不同, 因而使这二面上的稳定区不重合, 严重时甚至完全错开, 影响腔的稳定性。像散补偿的目的就是使此二面上的稳定区有最大的重叠, 即 $\delta_x - \delta_y = 0$ 。

由 [1] 有

$$\Delta = \delta_x - \delta_y = h(n^2 - 1) \sqrt{n^2 + 1} / n^4 - f \sin \theta \cdot \text{tg } \theta$$

式中, h 为染料喷流的厚度, n 为其折射率, f 为折叠镜 R 的焦距, θ 为折叠角。

设 $h = 0.3\text{ mm}$, $n = 1.45$, 其余参数同前, 由此得 $\Delta/2S$ 和 θ 的关系曲线如图 7。

$2S$ 为不考虑像散时腔的稳定区, 所以 $\Delta/2S$ 为像散存在时稳定区的相对变化。显然 $\Delta/2S = 0$ 时表示像散完全补偿, $\Delta/2S = 1$ 时, 表腔变得不稳定了。

二、四镜环形腔

图 2 是四镜腔的光路图。设 $R_1 = R_2 = R = 100\text{ mm}$, $d \sim 100\text{ mm}$, $l + d = 3000\text{ mm}$, R_3, R_4 均为平板, 染料喷流厚度 $h = 0.3\text{ mm}$, 折光率 $n = 1.45$ 。喷流以布氏角置于 d 的中间。

1. 稳定区的计算

a) 不考虑像散时的空腔情况

图 3 是四镜环形腔的等效光路图, 当光

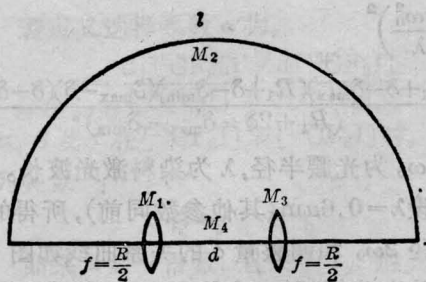


图3 四镜环形腔的等效光路图

在腔内走一圈时,光线的总矩阵为 M ,则有

$$M = M_1 \cdot M_2 \cdot M_3 \cdot M_4 = \begin{vmatrix} A & B \\ C & D \end{vmatrix};$$

其中 M_1 、 M_3 为镜 R_1 、 R_2 的光线矩阵; M_2 、 M_4 分别为光通过 l 和 d 距离的光线矩阵。

由稳定条件^[4,5]有:

$$|A+D| \leq 2;$$

经运算后得稳定条件为: $R \leq d \leq \frac{R \cdot l}{l-R}$ 。令

$d \equiv R + \delta'$, δ' 为稳定区内腔短臂 d 的可调整量,则有 $\delta_{\max} = \frac{R^2}{l-R}$, $\delta_{\min} = 0$; δ_{\max} 和 δ_{\min} 为调整量的最大值和最小值。所以稳定区 $2S = \delta_{\max} - \delta_{\min} = \frac{R^2}{l-R} \approx 3.6 \text{ mm}$ 。

b) 考虑像散时稳定区的变化

与三镜腔类似,设光沿 z 方向传播,由于像散的存在,腔的调整量在 oxz 和 oyz 平面的值是不同的。

设 $d_x \equiv 2f_x + \delta_x = d_{air} + h_x$

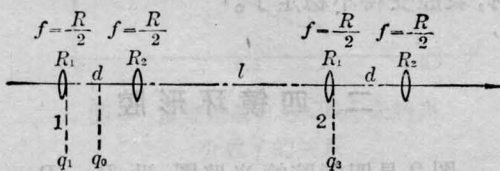


图4 四镜环形腔等效的透镜列阵

q_1 为输入端的光束参量, q_2 为输出端的光束参量, q_0 为光腰处的光束参量, $R_1 = R_2 = R$

$$d_y \equiv 2f_y + \delta_y = d_{air} + h_y$$

式中 d_x 、 d_y 为上述二平面上 R_1 镜至 R_2 镜的有效距离, f_x 、 f_y 为这二平面上的有效焦距,

δ_x 、 δ_y 为这二面上的腔的调整量; h_x 、 h_y 为这二面上喷流的有效厚度, d_{air} 为空气中的二镜距离。不难得出:

$$A = \delta_x - \delta_y = h(n^2 - 1) \sqrt{n^2 + 1} / n^4 - 2f \sin \theta \cdot \text{tg } \theta$$

由上式可见,由于四镜环形腔多了一个折叠镜 R_1 色散元件,所以式右边第二项比三镜腔多了一个因子 2。

$A/2S$ 和 θ 的关系曲线如图 7。像散完全补偿时 $\delta_x - \delta_y = 0$, $\theta = 2.1^\circ$ 其折叠角应比三镜腔情况小。

2. 光腰位置及光腰尺寸的计算

图 4 为四镜环形腔等效的透镜列阵,设输入平面为 1,输出平面为 2,高斯光束从平面 1 到平面 2,等效于光束在腔内跑了一圈。其透射矩阵为

$$M = \begin{vmatrix} A & B \\ C & D \end{vmatrix}$$

设 $d = R + \delta'$, δ' 为稳定区内腔的可调整量,光腰距 R_1 镜的距离为 t 。由自洽条件和 $ABCD$ 定律不难得出:

$$\left(t - \frac{R}{2}\right) = \frac{\delta'}{2};$$

亦即 $\left(t - \frac{R}{2}\right)$ 和 δ' 有如图 5 虚线所示的线性关系。

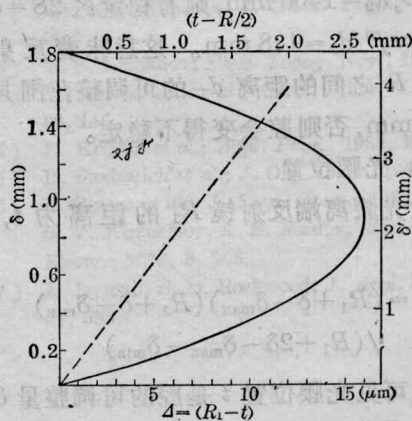


图5 光腰位置与调整量的关系曲线

——为三镜腔光腰位置 $(R_1 - t)$ 与调整量 δ 的关系曲线;
---为四镜环形腔光腰位置 $\left(t - \frac{R}{2}\right)$ 与调整量 δ' 的关系曲线

$$\text{光腰半径 } \omega_0^2 = \left(\frac{\lambda}{\pi}\right) \left[\frac{\sqrt{4 - (A+D)^2}}{2C} \right]$$

经运算后得:

$$\omega_0^2 = \left(\frac{\lambda}{2\pi}\right) \left(\frac{R^2}{l-R}\right) \times \sqrt{\left\{1 - \left[\frac{l}{R} - (R+\delta')\left(\frac{l-R}{R^2}\right)\right]\right\}} \times \sqrt{\left\{\frac{l}{R} - (R+\delta')\left(\frac{l-R}{R^2}\right)\right\}}$$

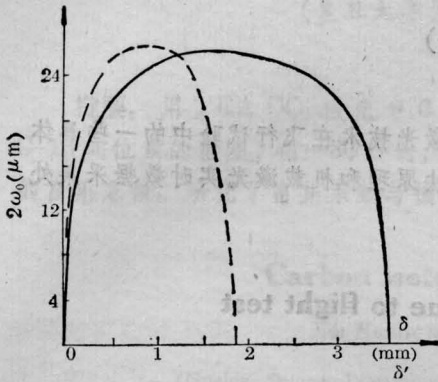


图6 光腰直径与腔的调整量的关系曲线

---三镜腔的光腰直径 $2\omega_0$ 与腔的调整量 δ 的关系曲线

$$d_1 = f + R_1 + \delta, R_1 = f = \frac{R}{2} = 50 \text{ mm}, \lambda = 0.6 \mu\text{m}$$

—四镜环形腔的光腰直径 $2\omega_0$ 与腔的调整量 δ' 的关系曲线

$$d = R + \delta', R_1 = R_2 = R = 100 \text{ mm}, \lambda = 0.6 \mu\text{m}$$

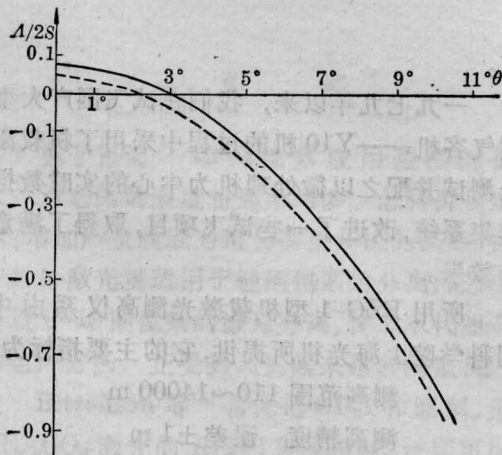


图7 考虑像散时稳定区的相对变化 $\Delta/2S$ 与折叠角 θ 的关系曲线

$\Delta = \delta_x - \delta_y$ 为像散引起的稳定区的变化, $2S$ 为不考虑像散时腔的稳定区

$$h = 0.3 \text{ mm}, n = 1.45$$

—三镜折叠腔

---四镜环形腔

由上式可见, 当 $d=R$ 及 $d = \frac{lR}{l-R}$ 时, $\omega_0=0$, 这时腔已变得不稳定了。 $2\omega_0$ 和 δ' 的关系曲线如图6。

三、分析和讨论

由以上的结果可见,

(1) 当光在腔内走一圈的等效光程相同时(即等效腔长为 300 cm), 上述四镜环形腔的稳定区约为三镜腔的 2 倍, 而光腰直径却差不多相等。

(2) 由于四镜环形腔有二个折叠镜产生像散, 所以对相同的喷流厚度及折叠角 θ , 其像散补偿效果比三镜腔差。但是由于四镜腔的稳定区比较大, 所以像散引起的稳定区的相对变化还不是很大。

(3) 由图5可见, 当三镜腔的短臂 d_1 从 $d_1 = R_1 + f$ 调整到 $d_1 = R_1 + f + 1.8 \text{ mm}$ 时, 光腰从球心向 R_1 镜移动至极大 $\sim 16 \mu\text{m}$, 然后又回到球心处, 其变化是非常单调的。而四镜腔的情况则截然不同, 当腔的短臂 d 调整时, 光腰也跟着线性移动, 并一直处于 d 的中间位置。所以在三镜腔情况下, 除对 R_1 和 R_2 镜的间距有一定要求外, 对喷流 J 与端镜 R_1 的距离要求是十分苛刻的, 而四镜环形腔的要求却不是十分临界。

实验上也证明了这一点, 在三镜腔的调整中, 当端镜 R_1 相对于喷流的最佳位置有微小偏离时, 激光输出就有明显的变化。所以在调整中, 除了 Ar^+ 激光的聚焦镜的调整较重要外, R_1 端镜的调整也是很关键的。而当三镜腔调成最佳时, 为了改成四镜环形腔, 可把 R_1 端镜换成 $R_1 = R = 100 \text{ mm}$ 的折叠镜, 此时只要将此镜往外平移少许, 再调整各镜的倾角, 便能很快得到四镜腔的最佳输出。

采用上述器件参数, 当 Ar^+ 聚焦镜 $R_1 = 70 \text{ mm}$, 输出耦合为 5%, Rh6G 染料溶于
(下转第 365 页)

关时, 可以将延迟时间减小到 100 ns 以内, 从而得每米 29 个通道的结果。在实验过程中曾对以下几方面的因素作了定性的研究:

1) 触发丝的位置对于触发均匀性有较大影响, 采用二个五维调正系统经过细致的调正, 可以基本上保证均匀的预电离触发。

2) 触发丝的直径要选择恰当, 比较了 $\phi=0.012\text{ mm}$ 到 $\phi=1\text{ mm}$ 的情况, 发现 $\phi=0.39\text{ mm}$ 的触发丝能获得比较好的结果。

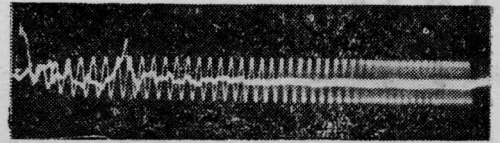
3) 触发丝的材料应选择电阻率较小的金属, 比较铜丝、镍丝和钨丝, 发现前二者性能较好, 钨丝由于电阻率太大而使电位在触发丝上分布不均匀。

一般而言, 球隙开关的导通时间由电感部分和电阻部分组成^[5]。根据我们实验中得到的结果, 在 38 cm 长的电极上有 11 个通道, 可求得多通道开关的导通时间 τ' 为:

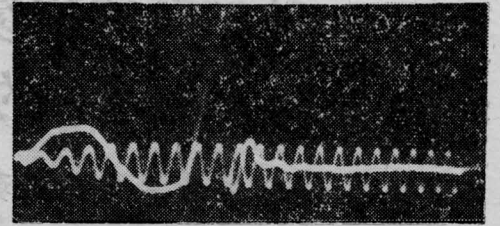
$$\tau' = \tau'_L + \tau'_R \cong (4.5 + 6) \text{ ns} = 10.5 \text{ ns}$$

而单通道球隙的导通时间接近 64 ns, 即把电压导通时间将近缩短了六倍。图 5(b) 给出了多通道开关的电压下降时间为 9 ns 左右, 与估计的数值十分接近。

为了验证多通道开关对激光器特性的改进, 我们将本文研制的丝状触发多通道开关用于横向放电准分子激光器。激光器是一台放电体积为 0.2 立升的 X 光预电离准分子激光器, 采用电容量为 50 nf 的布鲁姆林线路。作为对比, 我们分别用单通道球隙和多通道球隙作为开关元件, 实验测量了放电的



(a)



(b)

图 5 用触发丝触发的轨道开关特性
(a) 触发讯号; (b) 轨道的导通电压波形。
(时标: 100 MHz)

电压波形和激光输出能量。实验结果表明, 在相同的工作气压相同的混合比及工作电压下, 多通道开关时激光输出能量为单通道开关时的 1.55 倍。

王润文同志阅读了本文手稿, 并提出宝贵意见, 作者表示衷心感谢。

参 考 文 献

- [1] S. C. Lin, J. I. Levatter; *Appl. Phys. Lett.*, 1979, **34**, 505.
- [2] 林绍基等;《电子学报》, 1981, **9**, 70.
- [3] G. R. Neil, R. S. Post; *Rev. Sci. Instrum.*, 1978, **49**, No. 3, 401.
- [4] R. S. Taylor et al.; "14th Pulse Power Modulator Symp.", Orland, 1980, p. 32.
- [5] J. C. Martin; *Switching Notes*, 1970, No. 10, AWRE.

此时激光输出的稳定性和再现性较佳。

参 考 文 献

- [1] H. W. Kogelnik et al.; *IEEE J. Quant. Electr.*, 1972, **QE-8**, 373.
- [2] K. K. Li et al.; *Appl. Opt.*, 1981, **20**, 407.
- [3] K. K. Li; *Appl. Opt.*, 1982, **21**, 967.
- [4] H. W. Kogelnik, T. Li; *Appl. Opt.*, 1966, **5**, 1550.
- [5] 朱如曾等编译;《激光物理》, 国防工业出版社, 1975 年。

(上接第 369 页)

乙二醇溶液中, 浓度为 $\sim 1.5 \times 10^{-3} \text{ M/l}$ 时, 染料激光的最佳输出为:

三镜腔:

泵浦功率 3.9 W

染料激光输出: 930 mW

四镜环形腔:

泵浦功率: 2.5 W

染料激光输出: 500 mW