

横向泵浦染料激光器腔内元件的研究

王 应 哲

(北京光电技术研究所)

提要: 对于横向泵浦的染料可调谐激光器的性能研究必然涉及腔内诸元件, 而腔内诸元件除其物理性能及理论计算外, 更为主要的是技术设计和工艺过程。本文则逐一地对它们的设计、工艺和装校技术进行分析。

Researches on intracavity elements of transversely pumped dye lasers

Wang Yingzhe

(Beijing Institute of Optical and Electronic Technology)

Abstract: The study on the performances of transversely pumped dye lasers are naturally connected with the intra cavity elements. To ensure the quality of these elements, their technical design and technological processing are of more importance in addition to the physical properties and theoretical calculation. This paper gives the analysis on their technical design, technology, and adjustment respectively.

一、谐 振 腔

如图 1 的调谐染料激光器, 由于光栅采用自准直形式, 因此可以近似地将其看成一平-平腔, 腔内插入一个望远光学系统(图 1(b)所示)。对于这种腔的性能分析, 可以运用模象变换方法。首先可以用图解法判定腔的稳定性, 我们给出如图 2 的一个谐振腔, 利用已给的腔结构尺寸做它的变换圆图解^[2]。从图 2(b)的图解分析中得知, 当 σ_1 与 σ_2'' 相交时, 腔是稳定的; 由图也可知, 在满足稳定的条件下, 光栅和输出镜的相对位置允许有较大的变化余地。

其次, 为了确定一个合理的腔结构, 必须

对它进行解析的分析。根据柯格尔尼克等人给出的谐振腔内带有透镜组的光模成像理论^[1], 若这个腔是稳定的, 则高斯光束的两个腰分别位于两端平面镜上, 如图 3 所示。假设 R_1 镜处的束参数是已给定的, 按照下式我

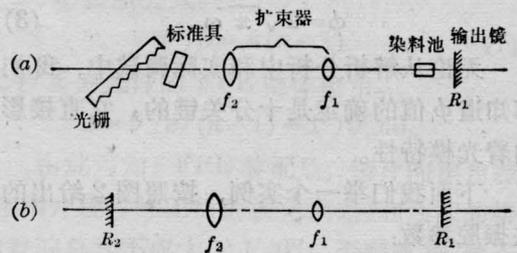


图 1 带扩束器的染料激光器谐振腔

收稿日期: 1981年3月17日。

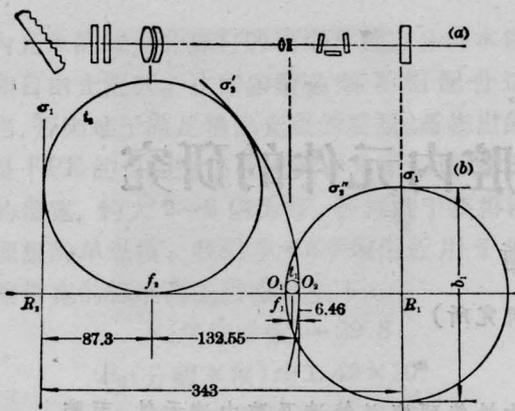


图2 谐振腔及其变换圆图解

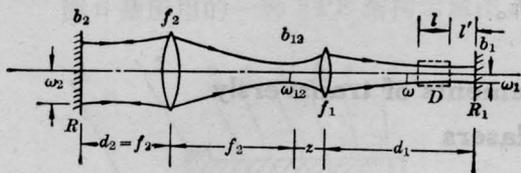


图3 腔内光模的基本特征

们可以推导出整个腔内的光模参数。当然，关心的是 ω_1 和 ω_2 两束腰的参数，其公式如下：

$$\omega_2^2 = \omega_1^2 \frac{f_2^2}{f_1^2} \left[1 + \frac{4(d_1 - f_1)^2}{b_1^2} \right] \quad (1)$$

$$\omega_1^2 = \frac{\left(\frac{\phi^2}{4\pi} \right) \pm \sqrt{\left(\frac{\phi^2}{4\pi} \right)^2 - \frac{4\lambda^2}{\pi^2} (l+l')^2}}{2} \quad (2)$$

式中 ϕ 为染料激活介质 D 的通光截面直径。为了保证这种激光器基模运转，有人给出激活介质与基模光斑尺寸 ω 的匹配关系式^[2]，即：

$$\phi = 2\sqrt{\pi} \omega \quad (3)$$

无论从解析分析和实际调试中，我们都知道 ϕ 值的确定是十分关键的，它直接影响着光模特性。

下面我们举一个实例，按照图2给出的共振腔参数：

$$\lambda = 0.6 \times 10^{-3} \text{ 毫米};$$

$$d_1 = 110.17 \text{ 毫米};$$

$$f_1 = -6.46 \text{ 毫米};$$

$$l = 18 \text{ 毫米};$$

$$f_2 = 152.53 \text{ 毫米};$$

$$l' = 59 \text{ 毫米};$$

和根据公式：

$$b_1 = \frac{\phi^2}{4\lambda} \quad (4)$$

我们目前能做到的 ϕ 最小值为 0.7 毫米，则

$$b_1 = \frac{\phi^2}{4\lambda} = 204.17 \text{ 毫米}。$$

代入式(1)、(2)得：

$$\omega_1 \approx 0.18 \text{ 毫米}$$

$$\omega_2 \approx 6.44 \text{ 毫米}。$$

须注意，这里给出的 ω_1 和 ω_2 都是自孔径选模条件下的有效基模运转时束腰的尺寸。

这种结构腔的选频特性取决于 ω_2 与 ω_1 的比值，利用 ω_1 和 ω_2 式近似可得：

$$\frac{\omega_2}{\omega_1} = \frac{f_2}{f_1} \cdot \frac{2(d_1 - f_1)}{b_1} \quad (5)$$

适当选择 d_1 和 b_1 尺寸可以得到更大的放大，而其中减小 b_1 (也就是减小 ϕ 值) 尤为重要。由此可知，进一步提高腔的性能必须在改进激活区的截面尺寸上努力。

此外，无论从理论分析还是从调试经验中都知道，输出镜选用适当的曲率半径的凹面镜比用平面镜容易获得好基模，而此镜的曲率半径 R_1 可以近似等于 $b_1/2$ 。这样做除有上述利益外，还可以降低对扩束器的象差要求及减小扩束器调节时的灵敏度。

为了更好地获得基模输出，可在腔内加空间滤波器。我们在扩束器前端加一光阑 (对于伽利略型望远镜在物镜端加一光阑即可)，其孔径为：

$$2a = 0.8 \text{ 毫米}。$$

在 $\lambda = 0.6 \times 10^{-3}$ 毫米时，菲涅耳数如下：

$$N = (2a)^2 / L\lambda = 31.37$$

$$(L = 34 \text{ 毫米})$$

$$\delta_D = e^{-2\pi N} = 2.46 \times 10^{-86}。$$

由此可知：加入腔内选模光阑时，由于它

的孔径大于激活区的截面直径, 所以远不会引起衍射损耗。

二、调谐光栅

我们在调试工作中测得射向光栅上光斑尺寸(即 ω_2 和多模运转光斑的迭加)为 8×30 到 15×30 毫米², 而分辨率优于 0.5 埃时的光栅实际分辨率所需面积为: 6.14×30 到 12.71×30 毫米²。这个数值与前节计算的 ω_1 值吻合, 在实际调试工作中与理论上的分析也相符。实际上, 在调试中主要调节 Δd 和 ϕ 值的大小。

在此需提及一点的是关于光栅调谐带宽的测试问题。我们曾使用 GDM-1000 型双单色仪和 $L=1$ 毫米的法布里-珀洛标准具, 前者测得为 1.2 埃或 0.7 埃, 后者测得为 0.8 埃或 0.46 埃。这是由于在测试过程中将测试仪器的分辨率卷积到所测结果中之故。因为前者的分辨本领 R_0 只有 20000, 而后者 $R_0 \approx 10^5$ 。欲去除测试仪器对测得结果的影响, 则必须对结果做快速傅里叶变换 (FFT) 数据处理^[4]。

三、法布里-珀洛标准具 (FPE)

用于压缩带宽的 FPE 在文献和实践中早有报导, 在腔内选用此元件时, 既考虑到它的物理性能又考虑到它的工艺性。

FPE 的镜片平面性和装调的平行性优劣, 在调谐激光器腔内的影响甚大, 由于干涉条件方程:

$$m\lambda = 2nL \cos \theta \quad (6)$$

可知, 当 L 有微小变化就可引起干涉级次 m 的非整数改变, 因之影响输出。在实验中得知, 当 L 调整较好时, 腔内插入 FPE 只损失 20~30% 的能量, 若 L 调整不好则能抑制振荡。用平行光束调节 FPE 干涉场时可得到如图 4 的光场。

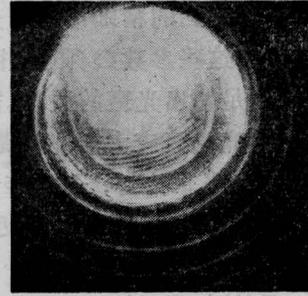


图 4 平行光束调节的干涉场

特别需要指出的是, 当 FPE 整体存在楔角时, 甚至可以使损耗远大于增益, 振荡停止, 如图 5 所示(为了表示方便, 图中将光栅刻划线旋转了 90°)。

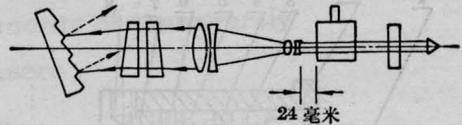


图 5 楔角 FPE 插入腔内的影响

我们已知: 染料池左端射出光斑截面积为 0.6×1.2 毫米²(s), 扩束器放大倍数为 23.6 倍(x), FPE 整体楔角(Δ), FPE 镜片的折射率 1.4586(n)。

由扩束器目镜返回染料池时, 能继续激活染料的最大偏移角不能大于 ($\text{tg } \theta = 0.3/24$) $\theta = 43'$, 通过扩束器后, 物镜端允许的最大偏移角为:

$$\theta' = \theta/x = 1' 49'' 32.$$

当光线往返经过光楔时, 偏离了 $3\theta'$ 角。因此在计算光楔角时, 只能允许折光角不大于 $\theta'/3$, 按照公式:

$$\theta'/3 = A(n-1) \quad (7)$$

式中 A 为允许的 FPE 整体楔角。

$$A = \theta'/3/(n-1) = 1' 19'' 46.$$

由此可知, FPE 装配后, 镜片的楔角差(指两片镜片加工后的楔角误差)和装配的楔角差的总和不应大于 $1' 20''$, 否则或根本不能实现振荡或增加 FPE 后使波长有明显位移。

使用腔内 FPE 同样需要仔细地按照腔

内光束的特点计算它的精细常数、分辨本领和自由光谱区。这些参数必须互相配合适当,否则难于满足输出光斑的质量。需指出的是 FPE 的自由光谱区应大于光栅调谐光斑的带宽,约大 2~3 倍为好,否则难于获得较理想的单纵模。我们在 6000 埃附近用于压缩带宽的标准具选用参数如下:

$$F(\text{精细常数}) = 29.8$$

$$R_0(\text{分辨本领}) \approx 1.49 \times 10^5$$

$$\Delta\lambda(\text{自由光谱区}) \approx 1.2 \text{ 埃}$$

$$L(\text{空气间隔}) = 1.5 \text{ 毫米}$$

图 6 是所用的一种 FPE 结构示意图。

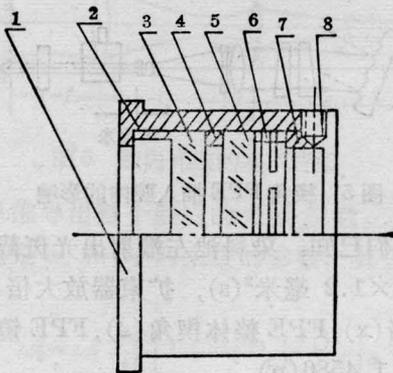


图 6 一种 FPE 结构

1—镜座; 2—补偿圈; 3、5—镜片; 4—隔圈;
6—弹簧压圈; 7—调节圈; 8—调节螺钉

四、扩束器

依据第一节所述腔内参数的分析,式(1)、(2)和(5)给出了它们之间的关系,由此可知腔内诸腰除与输出镜处的束参数 b_1 有关外,主要由扩束器的参数及它所处的位置所决定。选择适当的参数可以大大提高 ω_2/ω_1 的比例。

目前常用的扩束方法有棱镜式、透镜式、折反射四面镜式及光栅式等。本文着重研究透射式扩束器。对扩束器应做如下一些考虑:

1. 系统选择: 伽利略型比开卜勒型筒长可短一些, f_1 是负值对增大 ω_2/ω_1 有利, 无实

焦点防止空间电离, 这些都是它的优点。当 f_1 比较小时, 伽利略型的镜片加工比较困难, 装校技术要求较高, 而且这种系统易出现光晕现象, 这是它的缺点。

2. 关于防止非调谐振荡问题: 扩束器的透镜界面对振荡光束均有反射, 特别是目镜第一面的反射尤为重要, 染料激光器腔内应极力避免这种反射, 方法有两种。一是离轴工作; 二是使反射有足够大的发散, 以使反射光不致于形成非调谐振荡。前一种方法在设计扩束器时, 必须注意系统的象差分布, 如图 7 所示, 通常使用的望远镜象差与视场坐标曲线如 I, 而这里用的扩束器象差与视场坐标曲线则应为 II 所示。

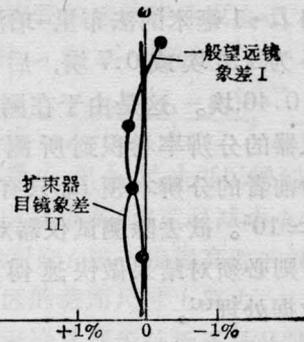


图 7 系统象差曲线

后一种方法则需特别注意目镜第一面的曲率半径和染料池窗口到目镜第一面的距离。当曲率半径足够小, 且距离足够大时, 则完全可以避免反射光引起的非调谐振荡。实验证明, 当返回的光束能量小于原光束的 0.1% 时, 就可以达到这一目的。

3. 关于扩束器波前象差的计算: 腔内用的扩束器由于高斯光束通过它将改变波阵面直接影响损耗的大小, 因此其象差要求较高。文献报导它们的波前差均在 $\lambda/8 \sim \lambda/4$ 之间^[2,5]。波前差的计算可用光线象差分量表达式求得, 即:

$$x_1 - x_1^* = \frac{R'_1}{n_1} \frac{\partial \phi}{\partial x}$$

$$y_1 - y_1^* = \frac{R'}{n_1} \frac{\partial \phi}{\partial y} \quad (8)$$

对于薄透镜系统,几何球差和波球差的关系,可如下式计算(在我们使用的系统中即可用这种方法计算):

$$W' = -\frac{n'}{2} \int_0^{\sin^2 U'} LA' d(\sin^2 U') \quad (9)$$

用级数表示,可写为:

$$W' = \frac{n'}{4} a_1 U^4 + \frac{n'}{6} a_2 U^6 + \frac{n'}{8} a_3 U^8 + \dots \quad (10)$$

对于轴向几何色差和波色差的关系,可按下式计算:

$$W'_{cF} = \frac{n'}{2} \int_0^{\sin^2 U'} \Delta L_{cF} d(\sin^2 U') \quad (11)$$

或

$$W'_{cF} \approx \sum (d - D) \delta_{nF0} \quad (12)$$

染料激光腔欲获得基模稳定运转,则必须限定束参数 b_1 的偏差。束参数 b_1 与系统波前差的关系式可由下式给出:

$$\left(\frac{b_1}{2}\right)^2 = \frac{f_1^2 (d_1 - f_1)}{\Delta d} - (d_1 - f_1)^2 \quad (13)$$

式中 Δd 为修正 b_1 的离焦调节量。

微分上式,可得 b_1 与 Δd 的变量关系,即:

$$db_1 = -\frac{2}{b_1} \left[f_1^2 (d_1 - f_1) \frac{d\Delta d}{\Delta d^2} + (d_1 - f_1)^2 \right] \quad (14)$$

由此可知,当腔的稳定性要求 db_1 不大于某值时,则 $d\Delta d$ 必不大于一限值。

$$d\Delta d = W' + W'_{cF}$$

4. 离焦调节的灵敏度:从扩束器在腔内作用的解析分析和变换圆分析可知, Δd 的变化对于基模运转影响极灵敏,实践证明 Δd 调节量往往小于 0.01 毫米,输出就有明显变化。为了降低这个灵敏度,可以配合使用凹面输出镜^[2]。

五、染料池。

目前实用的染料池主要有三种:

1. 层流式染料池:它的特点是层流方向、泵浦方向和输出方向三者互相垂直,它的光学性能和热稳定性都很好,但结构复杂。

2. 磁搅拌式染料池:它的热稳定性较好,但光学性能和结构复杂程度都不够理想。

3. 毛细管式染料池:在流速要求不大时,这种染料池的热稳定性尚能适用,它的最大优点是染料工作区截面接近衍射极限,因而可以获得优等的光束模式。

我们这里采用的是一种层流式结构,对这种染料池需做如下几方面的考虑:

① 输出窗口与激活线的不垂直度,我们在这里采用非对称式,考虑到与腔内其他元件匹配,选用 2.5° 和 5° 两种夹角。

② 关于层流的形成,在有限空间内将结构设计成符合流体力学原理。在获得层流和防止出现气泡方面是理想的。

③ 根据泵浦能量的大小选择适当的激活长度。我们按照功率密度为 1 兆瓦/毫米² 确定激活长度为 18 毫米。由图 8 可知染料池中能量密度分布曲线,由此可知如何选择焦线深度和染料的浓度。

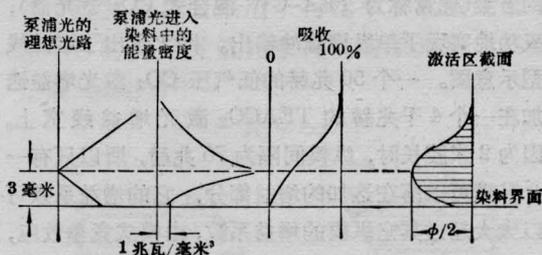


图 8 染料池中的能量密度分布曲线

④ 在激光单色仪中,我们采用了染料池转换器,这对使用者是十分方便的。这种转换器的定位精度要求并不高,大约只需 $2' \sim 3'$ 的精度就足够了。

(下转第 30 页)

如果记录系统满足条件

$$R_{r1} = R_{r2},$$

则

$$\delta(x) = \frac{3}{8} x^5 \left(\frac{2}{R_r^5} - \frac{2}{R_0^5} - \frac{1}{R_c^5} \right) \quad (27)$$

由(22)、(23)式得:

$$R_0 = (1 + \sqrt{5}) R_c, \quad (28)$$

由(19)、(20)式得:

$$R_{r1} = R_{r2} = (\sqrt{5} - 1) R_c, \quad (29)$$

因此,把(28)、(29)式代入(27)式得:

$$\delta(x) = \frac{3}{8} \frac{5}{16} \frac{x^5}{R_c^5} = 0.11718 K^5, \quad (30)$$

式中 $K = \frac{x}{R_c}$ 过渡准直全息图的相对孔径。

例:当 $R_c = 1$ 米, $K = 0.3$ 时(相对孔径为 1:1.67),根据(28)、(29)、(30)式得,消球差的二元全息图记录参数和全息图角象差为:

$$R_0 = 3.2361 \text{ 米}$$

$$R_{r1} = R_{r2} = 1.2361 \text{ 米}$$

(上接第 35 页)

六、输出镜

染料激光器对于不同染料增益变化幅度很大,故在设计这种器件时需选用几种反射率的输出镜,我们选用的是 50%、60% 和 85% 三种反射率。此外,考虑到适用于大的调谐范围,要求膜层的反射率对应波长的曲线比较平滑。不同的反射率可以获得不同的输出背景,常用的是 60% 反射率。

七、泵浦光聚焦系统

欲得到理想的激活区截面形状,必须有优质的泵浦光源和高质量的聚焦光学系统。我们使用的泵浦源——氮分子激光器发散角为:

$$\theta/2_{\text{水平}} = 3 \text{ 毫弧度}$$

$$\theta/2_{\text{垂直}} = 5 \text{ 毫弧度}$$

使用一块柱面石英透镜聚焦,该柱面透

$$\delta(x) = 0.11718 (0.3)^5$$

$$= 0.00028475 \approx 1',$$

因此系统的角象差正好与人眼的角分辨率相当。 $\delta(x)$ 与 K 成正比,所以在取 $K \leq 0.3$ 情况下,该系统均可获得相当好 [$\delta(x) < 1'$] 的成象清晰度。

参 考 文 献

- [1] Komar V. G.; *SPIE*, 1977, **120**, 127~144.
- [2] G. Groh; *Appl. Opt.*, 1968, **7**, 1643.
- [3] Robert J. Collier *et al.*; "Optical Holography", p 377.
- [4] Комар В. Г. и др.; *Техника кино и телевидения*, 1978, No. 1, C15~17.
- [5] J. N. Latta; *Appl. Opt.*, 1972, **11**, 1686.
- [6] E. B. Champagne; *JOSA*, 1967, **57**, 51~55.
- [7] R. W. Meier; *JOSA*, 1965, **55**, 987.
- [8] D. H. Close; *Optical Engineering*, 1975, **14**, 428.
- [9] J. N. Latta; *Appl. Opt.*, 1971, **10**, 666~667.
- [10] P. C. Mehta; *Opt. Acta*, 1974, **21**, 1005.
- [11] J. C. Rayces; *Opt. Acta*, 1964, **11**, 85.

镜的一级衍射狭缝象宽 3.6 微米,焦距 51 毫米,离焦调节范围 ± 5 毫米。在这样一些条件下,染料的激活截面尺寸约为 0.6×1.2 毫米²。

参 考 文 献

- [1] Herwing, Kogelnik; *The Bell System Technical Journal March*, 1965, 455~494.
- [2] 张光寅;《激光与光学》,1980, No. 1, 1~8.
- [3] T. W. Hänsch; *Appl. Opt.*, 1972, **11**, No. 4, 895.
- [4] 母国光等;《光学图象的信息处理》,
- [5] J. E. Lawer. *et. al.*: *Appl. Opt.*, 1976, **15**, No. 4, 1083~1090.
- [6] Gary K. Klauminzer; *Opt. Engineering*, 1974, **13**, No. 6, 528.
- [7] Gary K. Klauminzer; *Laser Focus*, 1975, **11**, No. 11, 35~37.
- [8] H. G. Heard; "Laser Parameter Measurements", *Handbook*, Chapter 6.
- [9] 激光参数测量编写组;《激光参数测量》,上海人民出版社,1976 年
- [10] James R. Allkins; *Analytical Chemistry*, **47**, No. 8, 752 A~762 A.
- [11] 王应哲;《激光与光学》,1978, No. 4.