

光学谐振腔的图解设计方法(四)

南开大学物理系 张光寅

七、倍频腔

作为腔内倍频用的激光腔应当要求基频激光束为基模，并在腔内空隙处有一小光斑尺寸的束腰。如此，将倍频晶体置于该束腰处，将有利于获得较大的倍频激光输出。除此以外，还应要求该激光腔，在腔内存在一定热扰动的作用下，仍能实现稳定运转，否则，倍频输出功率的起伏将更为严重。

由上所述可知，倍频腔也应当是一种基模热稳腔。因此，基于上节的讨论，我们不难考虑倍频腔的最佳设计问题。在上节中，我们曾给出了基模热稳固体激光腔的两个建议方案(见图19)。在这里，我们只需对它们稍作改变，即将图19(a)中的凸面镜 R_1 换成相同曲率半径的凹面镜，并将其置于 σ_1 圆的右侧；或将图19(b)中的平面镜 R_2 换成任意曲率半径的凹面镜，并使其所对应的 σ_2 圆通过 σ'_1 圆和 π 圆的切点 F_2 ，即可得到两种较为合理的倍频腔，如图20所示。它们与图19中相应的激光腔实质上是等效的。这是因为，上述腔结构的改变，都是在保持高斯光束的侧焦点 F_1 或 F_2 不变的情况下进行的，如此演变而来的各种谐振腔与原有的谐振腔都应是等效的。因而图20中所示的两种谐振腔必然也是基模热稳的(参看图20(c)和(d))。

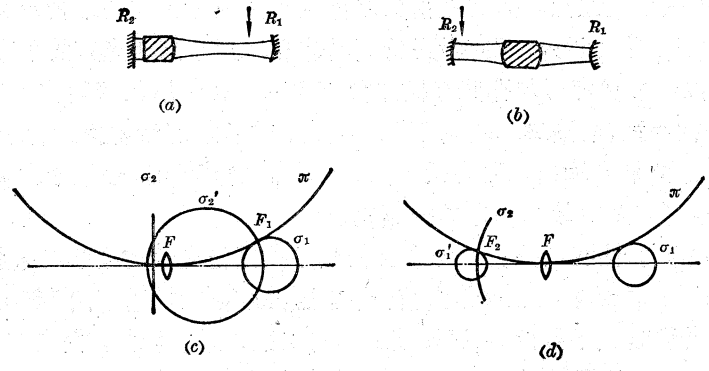


图20 两种倍频腔结构((c)、(d)分别为(a)、(b)的图解分析)

此外，从图中还可以看出，在这些腔内的空隙处均有一高斯光束的小束腰，如图中箭头所示之处。这些束腰的大小，不难精确地算出，然而我们也可以由图20(c)中 σ_1 圆和图20(d)中 σ'_1 圆的直径近似地估算出来。如图20(a)中的 R_1 镜的曲率半径为5厘米，即 σ_1 圆的直径

为5厘米,则利用(4)式,即可估算出束腰的光斑尺寸约略小于0.09毫米(对1.06微米的基频激光波长而言)。将倍频晶体置于这些小束腰处,即可望获得稳定的较大功率的倍频输出。

下面我们进一步来分析这两种倍频腔结构,何者更为合理?在腔内存在一定的热扰动的情况下,激光振荡的模式不可能在整个激光腔内都是稳定的。在图19或图20所示的热稳腔中,光模的热稳定性只发生在 R_2 镜和激光棒之间,而在 R_1 镜和激光棒之间则仍然是不太稳定的。为了更好地说明问题,我们对图20(a)所示的腔结构作进一步的热扰分析。当我们把热扰作用施加于 R_1 时,这时可得由一变动的 σ_1 圆和一不变的 σ_2' 圆描写的等效两镜腔,如图21(a)所示。由热稳腔的特点已知,尽管 σ_1 圆在热扰动作用下是变动的,但它和 σ_2' 圆的交点 F_1 是不动的。由此可以确定, R_2 镜和激光棒间激光振荡模式则是稳定的。当我们把热扰作用施加于 R_2 时,这时可得由一变动的 σ_2' 圆和一不变的 σ_1 圆描写的等效两镜腔,如图21(b)所示。这里,由于 σ_2' 圆的变动,将引起 σ_2' 圆和 σ_1 圆的交点 F_1 的变动。由此可知, R_1 镜和激光棒间激光振荡的模式是不稳定的。但这里的情况也是有所不同的:在大 π 圆与小 σ_1 圆相切的热稳腔中,情况类似于图13(b)所示的, R_1 镜和激光棒间激光振荡的模式稳定得多,这时束腰位置有所变动,但束参数 b 变化不大;在小 π 圆与大 σ_1 圆相切的热稳腔中,则情况类似于图13(a)所示的, R_1 镜和激光棒间激光振荡的模式极不稳定。

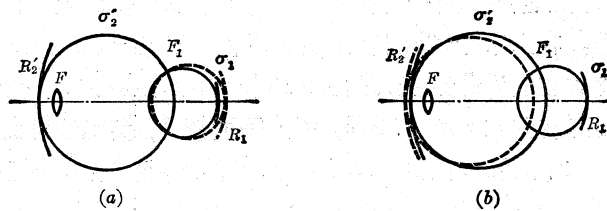


图21 图20(a)所示腔结构的热扰分析

在各种基模热稳腔中,上述非完全的稳定性均同样地存在。因此,必须选择 R_2 镜一端作为输出镜,才可望获得模式特性和功率特性稳定的激光输出。在我们选择基模热稳腔作为倍频腔时,这一情况更应引起注意。只有把倍频晶体置于基模热稳腔的最稳定区中,才可望获得最为稳定的倍频输出。除此以外,还应考虑倍频晶体必须置于高斯光束的小束腰处这一要求。因而,只有小束腰位于最稳定区的那些基模热稳腔才最适合于用作倍频腔。图20(b)的倍频腔就是属于这种结构类型,而图20(a)则不是。因而,前者较之后者更适合于用作倍频腔,由它可望获得最为稳定的倍频输出。而在采用图20(a)的倍频腔时,如限于大 π 圆和小 σ_1 圆相切这种情况,这时也可望获得较为稳定的倍频输出。

在结束这一小节时,让我们分析对比几种倍频腔的热稳定性的实验结果将是有意义的。在工作[9]中,曾采用一种近半共心腔作为倍频腔。这种腔结构相当于图13(a)的情况,属于非热稳腔,它的热稳定性是很不好的。正如该工作的实验结果表明的,由它获得的倍频输出是极不稳定的。在接着的工作^[10]中,对倍频腔的结构作了改进,采用凹凸腔的结构,它近于图20(b)的情况,应是比较稳定的。实验结果表明,由它获得的倍频输出确是稳定得多(功率稳定性好于10%)。在工作[11]中报导了另一种倍频腔结构,是为平凹腔结构。它近于图20(a)的情况,并具有大 π 圆和小 σ_1 圆相切这一特点,因而也获得了较为稳定的倍频输出。所举的这些例子表明,上述关于倍频腔的图解分析方法是符合实际的。

八、三镜折迭染料激光腔

连续运转的染料激光器通常采用如图 22 所示的三镜折迭腔的形式^[12,13]。对于这种三镜折迭腔,我们仍可用腔内包含一透镜的等效三镜腔来描写(为分析简单起见,这里我们暂且忽略了染料盒和布角棱镜的作用)。在这种激光腔中, R_1 镜一般为平面镜或大曲率半径的球面镜; R_1 镜至 R_3 镜的距离 d_1 较大, R_3 镜为小曲率半径的球面反射镜。这样的安排,是为了能够在 R_3 和 R_2 镜间形成高斯光束的小束腰,以便与放置于该处的染料盒中小激活区相匹配。腔中 R_3 镜是一象散元件,因此在等效三镜腔中和它对应的等效透镜的焦距应有两个值:

$$\left. \begin{aligned} f_s &= \frac{R_3}{2} \frac{1}{\cos \theta}; \\ f_t &= -\frac{R_3}{2} \cos \theta, \end{aligned} \right\} \quad (26)$$

它们分别对应于反射镜 R_3 在弧矢面内和子午面内的焦距值,此处 θ 为光束在 R_3 镜上的入射角。

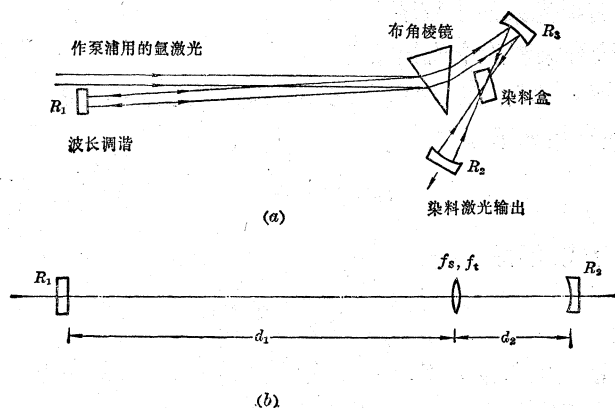


图 22 染料激光腔和它的等效三镜腔

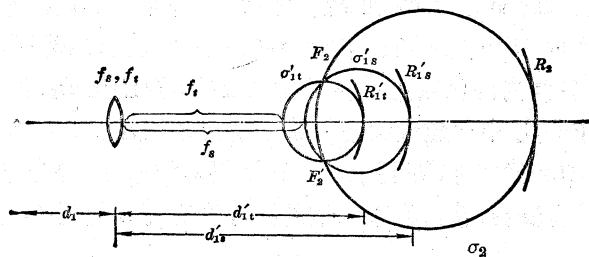


图 23 染料腔的图解分析示意图

运用图解的方法,我们可以清楚地说明这种染料腔中可能振荡的光模的特点。图 23 中给出染料腔的图解分析示意图。这里仅示出等效透镜和 R_2 镜间的传播圆分析图,由它足已能够反映腔内光模的最主要特点。图中 R'_{1s} 和 R'_{1t} 分别为 R_1 镜在弧矢面内和子午面内的等效镜,它们由 R_1 镜分别通过 f_s 和 f_t 的变换作用而来。考虑到这种腔的特点, $d_1 \gg f_s, f_t$, 并取 $R_1 = \infty$, 利用模象变换关系(9)和(10)式,我们可以确定等效镜 R'_{1s} 和 R'_{1t} 的位置和曲率

半径:

$$\left. \begin{aligned} d'_{1s} &= f_s + \frac{f_s^2}{d_1}, \\ R'_{1s} &= -\frac{f_s^2}{d_1}; \end{aligned} \right\} \quad (27)$$

$$\left. \begin{aligned} d'_{1t} &= f_t + \frac{f_t^2}{d_1}, \\ R'_{1t} &= -\frac{f_t^2}{d_1}, \end{aligned} \right\} \quad (28)$$

式中的负号表示 R'_{1s} 和 R'_{1t} 等效镜的曲率中心面向等效透镜方向。由上面两式不难确定 R'_{1s} 的 σ'_{1s} 圆和 R'_{1t} 的 σ'_{1t} 圆的直径为

$$D'_{1s} = \frac{f_s^2}{d_1}; \quad (29)$$

$$D'_{1t} = \frac{f_t^2}{d_1}. \quad (30)$$

由此可知,取用大 d_1 值和小曲率半径的 R_3 镜,有利于获得小直径的 σ'_{1s} 和 σ'_{1t} 圆,因而也有利于获得 R_2 和 R_3 镜间高斯光束的小束腰。

由图中不难看出这种染料腔中光模振荡的特点。如果 σ'_{1t} 和 σ'_{1s} 圆不相交,那么 R_2 镜的 σ_2 圆就不可能同时和两 σ'_1 圆相交,因而在这样的谐振腔中就不可能实现稳定的振荡。为使 σ'_{1t} 和 σ'_{1s} 圆相交,必须满足如下条件:

$$f_s \leq f_t + \frac{f_t^2}{d_1}. \quad (31)$$

将(26)式的关系代入上式,可得

$$\cos^2 \theta \left(1 + \frac{R_3}{2d_1} \cos \theta \right) \geq 1. \quad (32)$$

由此可知,光束在 R_3 镜上的入射角 θ 不能太大,它要受(32)式的限制。除此以外,还应要求 R_2 镜的 σ_2 圆必需和 σ'_{1s} 和 σ'_{1t} 圆相交,否则谐振腔也将是不稳定的。

从图中所示的关系,我们还可以看到一个明显的事实。在满足(32)式的条件下, σ'_{1s} 和 σ'_{1t} 圆应当是相交的。设它们的交点为 F_2 和 F'_2 。如选择这样的 R_2 镜,使它的 σ_2 圆恰好通过 F_2 和 F'_2 ,则这时在弧矢面内和子午面内的高斯光束的侧焦点将合二为一。这意味着,在这样的谐振腔内,在 R_2 和 R_3 区间内的高斯光束将是无象散的,因而从 R_2 镜一端输出的染料激光也将是无象散的。在工作 [12] 中曾建议利用按布儒斯特角放置的染料盒本身来补偿 R_3 镜引起的象散,并给出了严格的补偿条件,即要求 θ 角和染料盒的厚度及其折射率之间应满足严格的关系。然而由上述的分析表明,输出光束象散的消除完全可以通过 R_2 镜的合适选择与调整而得到解决。

九、多镜折迭腔

在二氧化碳激光器中,为了获得较大的输出功率,通常采用如图 24(a) 所示的折迭腔的形式,以增长激活介质的长度,而使激光器的总体长度又不致太长,便于使用。在设计这种谐振腔时,我们仍可应用模象理论加以处理。一般地,可从最后的全反镜(即图中的 R_5 镜)开始,逐

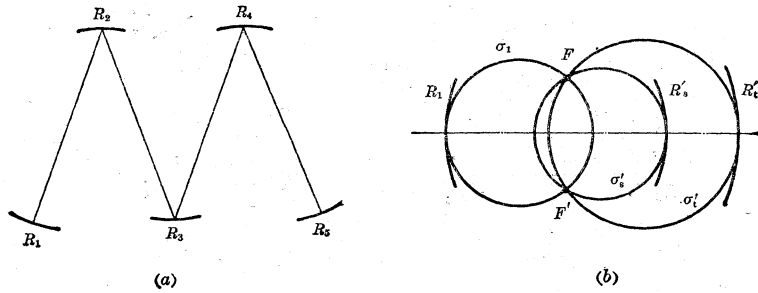


图 24 多镜折迭腔及其等效两镜腔

次地运用求等效镜的方法，求得除输出镜(即图中的 R_1 镜)以外的所有反射镜的等效镜 R'_2 和 R'_3 ，它们分别为弧矢面内和子午面内的等效镜。和它们对应的 σ' 圆也应有两个值，即有 σ'_s 和 σ'_t 。谐振腔也只有在反射镜 R_1 的 σ_1 圆和 σ'_s 及 σ'_t 圆相交的情况下才是稳定的。

需要指出的是，球面反射镜 R_2 、 R_3 和 R_4 引起的象散现象，不一定在折迭腔的各臂中都是无法避免的。如图 24(b) 所示，如恰当地选择 R_1 镜，使其 σ_1 圆恰好通过 σ'_s 和 σ'_t 圆的交点 F 和 F' ，那么在这种谐振腔的输出臂中将是无象散的。这是因为，由 σ_1 圆和 σ'_s 圆所确定的侧焦点 F 和 F' ，和由 σ_1 圆和 σ'_t 圆所确定的侧焦点是同一的，因而在输出臂的弧矢面内和子午面内的高斯光束的束参数是完全相同的。从这样的谐振腔中输出的激光束显然也是无象散的。无象散的输出光束在各种应用中无疑地更具实用价值。

除此以外，在设计各种球面反射镜的折迭腔时，还要注意尽可能地减弱其它各臂中的象散现象也是十分必要的。一般地，选用较大曲率半径的球面反射镜有利于减弱整个谐振腔中象散现象，从而有利于更好地利用腔内的激活介质中储存的能量，以达到提高基模输出功率的目的。

在设计多镜折迭腔时，为了简化设计工作，可采用某种对称的形式，如图 25(a) 所示。由图中可以看出，谐振腔对于图中虚线所示的平面是镜对称的，因而其中可能形成的模也是对称的。这样，我们只需分析虚线所示的平面一边的三镜腔(图 25(b))，就可以很快地得出整个谐振腔中的高斯光束的特性。

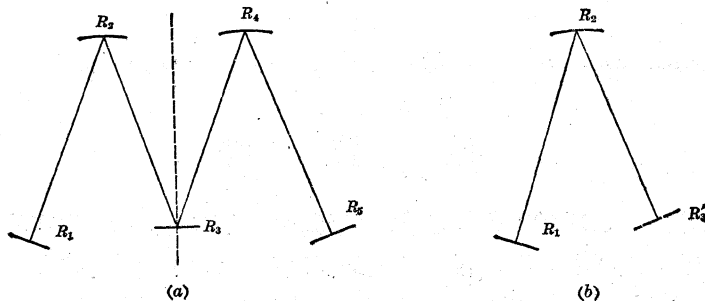


图 25 对称形式的多镜折迭腔 ($R_2=R_4$)

回形腔是多镜折迭腔的一种特殊形式。在这里，由数面反射镜的折迭，构成一个闭合的回路。如我们采用对称形式的回形腔(图 26)，则对它的处理也可以大大地简化。实际上它也可以简化为一般的三镜腔问题(图 26(b))。和前面所述的相似，我们也可以在回形腔的一臂中实现无象散的高斯光束。

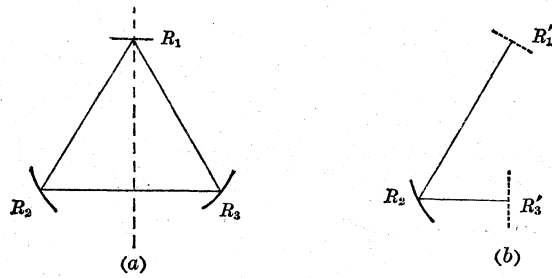


图 26 对称形式的回形腔 ($R_2=R_3$)

总之,运用图解设计方法,可以将许多复杂的谐振腔设计问题大为简化,它可以更清楚地揭示出发生于谐振腔内的一些物理现象的实质,从而有可能使我们较快较好地解决一些复杂谐振腔的最佳设计问题。

参 考 资 料

- [1] H. Kogelnik and T. Li, *Appl. Opt.*, **5**, No. 10, 1550~1566 (1966).
- [2] G. D. Boyd and J. P. Gordon, *B. S. T. J.*, **40**, No. 2, 489~508 (1961).
- [3] G. A. Deochamps and P. E. Mast, in "Proceedings of the Symposium on the Quasi-Optics," P. 379, Polytechnic Press, New York (1964).
- [4] P. Laures, *Appl. Opt.*, **6**, No. 4, 747~754 (1967).
- [5] H. Kogelnik, *B. S. T. J.*, **44**, No. 3, 455~494 (1965).
- [6] J. Staffen, J. P. Dörtcher and G. Herziger, *IEEEJ. Quantum Electron.*, **QE-8**, No. 2, 239~245 (1972).
- [7] R. B. Chesler and D. Maydan, *J. Appl. Phys.*, **43**, No. 5, 2254 (1972).
- [8] D. C. Sinclair, W. E. Bell, "Gas Laser Technology," Holt Rinehart and Wingtn, Inc.
- [9] 上海交通大学激光研究室器件组,《激光》, **1**, No. 1, 10~16 (1974).
- [10] 上海交通大学激光研究室器件组,《激光》, **2**, No. 1, 6~10 (1975).
- [11] W. Culshaw, J. Kannelaud and J. E. Peterson, *IEEE J. Quantum Electron.*, Vol. **QE-10**, No. 2, 253~263 (1974).
- [12] H. W. Kogelnik, E. P. Ippen, A. Dienes, and C. V. Shank, *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-8**, No. 3, 373~379 (1972).
- [13] A. Dienes, E. P. Ippen, and C. V. Shank, *IEEE J. Quantum Electron.*, Vol. **QE-10**, No. 3, 388 (1972).

(续完)

致 读 者

英明领袖华主席对科学工作做了重要指示,发出了阶级斗争、生产斗争和科学实验三大革命运动一起抓的号召,极大地鼓舞了科技战线的广大科技人员为革命搞科研的积极性。一场向科学技术现代化进军的伟大革命群众运动,正在迅猛兴起。为了适应大好形势的发展,本刊从1978年起页数增加至64页。

编辑部