

不均匀反射光学谐振腔的稳定性

方 洪 烈

(中国科学院上海光机所)

反射面反射率分布不均匀的光学谐振腔与均匀反射的谐振腔相比具有一些不同的性质。由于不均匀反射面的衍射情况与均匀反射的锐边反射面的衍射极不相同,除了对谐振腔的模场分布和衍射损失有影响之外,对于谐振腔的稳定性也有影响。下面就来讨论不均匀反射谐振腔的稳定性问题。

一、均匀反射谐振腔的稳定性

为了和不均匀反射谐振腔进行比较,这里先叙述一下有关均匀反射谐振腔的某些结果。

我们讨论一个这样的谐振腔,它的两个反射镜的曲率半径分别为 r_1 和 r_2 ,腔长为 L (图1)。为了叙述的简便,只讨论一个二维问题。对于我们所讨论的问题,采用光线变换矩阵来处理是方便的。我们将描写光线位置和方向的参考平面选在图1中“1”的位置上,将光线的位置(用 X 坐标表示)和方向(用光线与 Z 轴的夹角 θ 表示)写成如下的列矩阵 $\begin{pmatrix} X \\ \theta \end{pmatrix}$,那么光线在谐振腔内往返一周的变换矩阵 D 可写为

$$D = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -2\varphi_1 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & -L \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 2\varphi_2 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \alpha & \beta \\ \gamma & \delta \end{pmatrix} \quad (1)$$

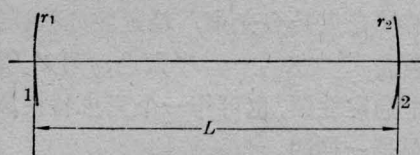


图1 均匀反射谐振腔

其中 $\varphi_1 = r_1^{-1}$, $\varphi_2 = r_2^{-1}$, 而

$$\alpha = 2g_2 - 1, \quad (2)$$

$$\beta = 2Lg_2, \quad (3)$$

$$\gamma = -\frac{2}{L}(g_1 + g_2 - 2g_1g_2), \quad (4)$$

$$\delta = 4g_1g_2 - 2g_2 - 1, \quad (5)$$

$$g_1 = 1 - \varphi_1L, \quad g_2 = 1 - \varphi_2L. \quad (6)$$

所谓谐振腔是稳定的^[1],指的是在腔内的任意一条光线(当然要满足旁轴条件)在腔内往返多次之后仍不逸出腔外。这样的谐振腔称为稳定的(或无损失),否则称为不稳定的(或高损失)。因为光学矩阵的行列式 $Det(D) = 1$, 对于一个稳定的谐振腔应满足条件是矩阵 D 的迹, $Sp(D)$ 满足如下关系:

$$|Sp(D)| \leq 2. \quad (7)$$

由此得到

$$g_1g_2 \leq 1 \quad \text{或} \quad g_1g_2 \geq 0. \quad (8)$$

(8)式就是谐振腔稳定性的判据,满足(8)式的是稳定的,不满足的腔是不稳定的。

与稳定性概念同时存在的还有一个谐振腔内可存在的特征光束的概念。当某一个光束(或称光线汇)在腔内可存在的条件是往返一周自再现,此光束称为谐振腔的特征光束。特征光束 $\begin{pmatrix} X \\ \theta \end{pmatrix}$ 满足如下方程(自再现):

$$D \begin{pmatrix} X \\ \theta \end{pmatrix} = M \begin{pmatrix} X \\ \theta \end{pmatrix} \quad (9)$$

方程中的 M 是复常数。由矩阵的一般理论可知, 特征值 M 等于

$$M = 2g_1g_2 - 1 \pm \sqrt{(2g_1g_2 - 1)^2 - 1}. \quad (10)$$

由(10)式看到 M 可取实数亦可取复数。 M 是实数时, 特征光束是一个点光束, 当 M 是复数时, 特征光束是一个高斯光束。 M 取复数的条件仍由(8)式确定。由此得出: 不稳定腔的特征光束是点光束, 稳定腔的特征光束是高斯光束。在 g_1-g_2 平面上, 可对(8)式作一个稳定性图, 也可作一个光束特性图。这两个图是一样的。

谐振腔的稳定性也可以由 M 值判断, 对比(10)式和(7)式可知, 稳定条件又可写为

$$|\operatorname{Re} M| > 1. \quad (11)$$

(11)式给出的是不稳定条件。

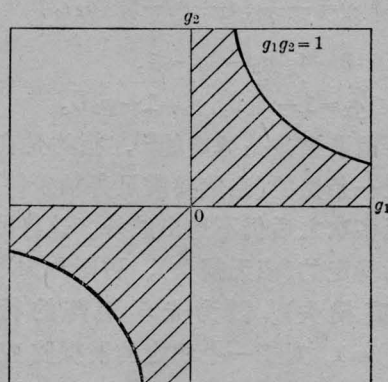


图2 稳定性图和光束特性图
图中打斜线的区域是稳定—高斯区,
其他是不稳定—点光束区

二、高斯反射率分布谐振腔的稳定性

现在讨论反射率分布不均匀的谐振腔。这里我们只讨论一个特殊情形, 即反射率分布呈高斯型的情况。我们假定图1所示的谐振腔反射镜的反射率分布具有如下形式

$$\left. \begin{aligned} R_1 &= \exp(-x^2/w_1^2), \\ R_2 &= \exp(-x^2/w_2^2). \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

上式中 w_1^2 和 w_2^2 是反射率分布参数。

对于具有高斯透过特性的光阑可以用如下矩阵^[2]描写:

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{i\lambda}{\pi w^2} & 1 \end{pmatrix}.$$

因此对于高斯分布反射镜的反射矩阵可写为:

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -2(\varphi_j + i\theta_j) & -1 \end{pmatrix}, \quad j=1, 2, \quad (13)$$

其中

$$\theta_j = \frac{\lambda}{2\pi w_j^2}, \quad j=1, 2. \quad (14)$$

如果我们引入表示

$$\left. \begin{aligned} G_j &= g_j - iD_j, \\ D_j &= \theta_j L. \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

那么上一节所得结果本节可以直接应用。此时

$$M = (2A - 1) - i2\Delta \pm 2\sqrt{[A(A-1) - \Delta^2] - i\Delta(2A-1)} \quad (16)$$

式中

$$A = g_1g_2 - D_1D_2, \quad (17)$$

$$\Delta = g_1D_2 - g_2D_1. \quad (18)$$

不稳定谐振腔的条件是:

$$\left. \begin{aligned} g_1g_2 &> 1 + D_1D_2, \\ g_1g_2 &< D_1D_2. \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

具有点光束特征的谐振腔再加上条件

$$\Delta = 0. \quad (20)$$

或

$$g_1 = -\frac{D_1}{D_2} g_2. \quad (21)$$

如同前一节一样, 可以在 g_1-g_2 平面上以 D_1 、 D_2 为参量对(19)式和(21)式作图, 见图3。由图3可以看出, 点光束区域与均匀反射谐振腔相比大大缩小了, 变为一条直线, 而高斯光束区则增大到整个平面。稳定区的形状发生了变化, 但稳定区的大小不变。这一点可如下看出。

均匀反射谐振腔稳定区的面积等于

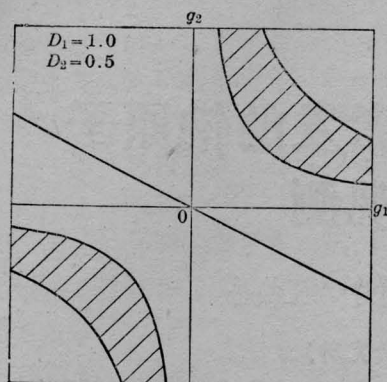


图3 高斯反射腔的稳定性和光束特性图
打斜线的是稳定区,其余是不稳定区,直线是点光束区,其余是高斯光束区

$$S_0 = 2 \int_0^{\infty} g_1^{-1} dg_1, \quad (22)$$

不均匀反射谐振腔稳定区的面积等于

* ~~~~~ *

提高 He-Ne 激光器寿命的一些措施

由于环氧胶涂复不当而形成慢漏气,是 He-Ne 激光管寿命不长的主要原因之一。我们采用多次涂复环氧胶及在布氏窗外面涂复的方法,对消除慢漏气,增长 He-Ne 管的寿命有良好效果。具体做法是:

先涂一层“环氧树脂 618”与“2 乙基-4 甲基咪唑”的混合胶粘剂,重量比为 10:1,80°C 烘烤,恒温 2 小时,然后再涂一层“密封 1#”粘接剂,120°C 烘烤,恒温 2 小时。“咪唑”具有放气少、应力小的特点,但密封性不如“密封 1#”,而“密封 1#”又具有耐湿性较好但放气较多应力较大的特点,二者交替使用,恰好取长补短。

如两次都涂复“密封 1#”粘接剂也可以。但无论采用哪种方法,都要把环氧胶加热稀释,充分搅拌,并防止环氧胶进入管内。

此外还要加厚贴膜管的厚度,使其厚度为 3 毫米以上。这样,加大的布氏窗片的长轴尺寸大于贴膜管布氏窗口的尺寸,以便窗片很好地盖住窗口,防止涂复环氧胶时进入管内,影响工作气体的纯度。

另外,分子筛的运用对维持管子的真空度,提高管子的寿命也有很好的作用。

$$S'_0 = 2 \int_0^{\infty} (1 + D_1 D_2) g_1^{-1} dg_1 - 2 \int_0^{\infty} D_1 D_2 g_1^{-1} dg_1 = S_0. \quad (23)$$

由此证明稳定区的大小没有发生变化。由于稳定区的移动,使得一些原来的不稳定腔变得稳定了,另一些原来的稳定腔变得不稳定了。

上面的讨论表明矩阵光学不仅适用于均匀反射的情况,对于不均匀反射的情况也能应用。对于反射率分布非常任意的情形有待进一步的工作。

参 考 文 献

- [1] G. D. Boyd, H. Kogelnik; *Bell. Syst. Tech. J.*, 1962, 41, 1347.
- [2] L. W. Casperson, S. D. Lunnam; *Appl. Opt.*, 1975, 14, 1193.

分子筛是一种对于水分子具有极强吸附能力的粉末状晶体,它吸附气体的本领是惊人的,但在一般情况下,对 He、Ne 等惰性气体很少吸附,只有对大气吸附的几十万分之一。因此在真空系统中,正确掌握和使用分子筛,对于阻挡油蒸气、水蒸气,减少氢气成分,提高 He-Ne 激光器的功率和寿命,都是有积极意义的。

我们使用的是上海开源化工厂生产的钙 A 型 (5A) 条状分子筛。将分子筛放在靠近激光器的部分,重量大约 250 克左右,分子筛外面用电炉加热。实验表明,分子筛分别被加热到 460、400、360°C 然后自由降到室温,静态真空度已经保持了 15 分钟仍然不低于 3×10^{-5} 托,以后真空度又降得十分缓慢,几乎没有什么变化。这对于我们充 He-Ne 气,老练激光器是非常重要的和有益的。在我们没有使用分子筛之前,静态真空度保持的时间极短,一、二分钟之内,真空度就从 2×10^{-5} 托降到 4×10^{-4} 托左右,这就会影响工作气体的纯度,妨碍器件寿命的提高。

四年来使用分子筛的实践表明,效果是良好的。

(北京光学仪器厂研究室 金耀幸)