

提高稳频 He-Ne 激光器输出功率的研究

曾 明 丁金星 袁晓东

(国防科技大学应用物理系, 长沙 410073)

摘 要 稳频 He-Ne 激光器的输出功率与谐振腔的损耗密切相关。本文对其中的布儒斯特角窗口带来的附加损耗进行了定量的分析, 指出布儒斯特窗片封接引起的各向异性损耗是主要的腔内损耗来源。在实践上采用具有独特优点的铜封接技术, 大大提高了布儒斯特窗片的封接质量, 从而减小了腔的损耗, 提高了稳频 He-Ne 激光器的输出功率。比如, 腔长为 110 mm 的 633 nm 稳频 He-Ne 激光器的输出功率达到 2.5~3.0 mW。

关键词 稳频激光器, 布儒斯特角窗, 腔损耗, 应力双折射效应, 铜封接。

1 引 言

影响稳频 He-Ne 激光器输出功率的物理因素多而复杂。有些因素(如充气和激励情况等)与输出功率的关系甚至不可能完全从理论上分析清楚。人们只是通过大量的实验研究, 得到能够给出最大输出功率的所谓最佳工作条件, 才使输出功率的(半经验)公式大为简化。下面给出的相应于谐振腔的最佳透过率的最大输出功率表达式就是一例^[1, 2];

$$P_{0\mu} = KG(1 - \sqrt{r/G})^2 \quad (1)$$

其中 G 为最小信号增益系数, r 为谐振腔单程总损耗(输出透过率除外), K 为比例系数。从(1)式可以看到, 激光器的输出功率与谐振腔损耗密切相关。要提高稳频 He-Ne 激光器的输出功率, 必须尽可能地减小腔的损耗。而稳频管的腔损耗与普通 He-Ne 激光器的不同之处, 仅在于腔内布儒斯特窗片带来的附加损耗。本文仅对这类附加损耗进行定量的分析; 在实践上, 本文采用具有独特优点的铜封接技术, 既解决了长期以来激光器封接中存在的慢漏和镜片污染问题, 还大大减小了其它各种封接方法都无法避免的应力双折射效应, 从而显著降低了谐振腔损耗, 研制出输出功率高、寿命(存放期)长的稳频 He-Ne 激光器。例如, 腔长为 110 mm 的 633 nm 稳频 He-Ne 激光器, 输出功率达到 2.5~3.0 mW, 约为国内同类产品的三倍; 寿命(存放)已超过三年, 功率并无明显下降。现已申请国家发明专利。

2 布儒斯特窗片的附加损耗分析

通常, 布儒斯特窗片引起的附加损耗除了吸收、散射(通过选用优质光学材料, 加上超光滑表面抛光技术, 可使其减小到忽略不计的程度)之外, 主要包括布儒斯特角的角度误差引

起的反射损耗，两布儒斯特窗片扭角造成的反射损耗，以及布儒斯特窗片封接过程中引起的各向异性损耗(应力双折射效应)。人们往往注意到了前二种损耗，而忽视后一种即窗片封接引起的应力双折射效应，其实，它才是最主要的附加损耗来源。

2.1 布儒斯特角度误差和窗片扭角引起的反射损耗

如图 1 所示，将两布儒斯特窗片的入射面 OA 和 OB 之间的夹角 β 称为扭角。为简单计，令输出线偏振激光的电矢量 E 的方向在 β 的角平分线上，则它的任一窗片入射面内的分量为

$$E_p = E \cos \beta/2 \quad (2)$$

而在垂直于入射面内的分量为

$$E_s = E \sin \beta/2; \quad (3)$$

且有能量反射率

$$R_p = (E'_p/E_p)^2, \quad R_s = (E'_s/E_s)^2 \quad (4)$$

式中 E'_p 、 E'_s 分别为 p 偏振光和 s 偏振光电矢量的反射振幅。根据菲涅耳公式^[3]， R_p 和 R_s 还可表示为：

$$R_p = \frac{\operatorname{tg}^2(\theta_i - \theta_r)}{\operatorname{tg}^2(\theta_i + \theta_r)}, \quad R_s = \frac{\sin^2(\theta_i - \theta_r)}{\sin^2(\theta_i + \theta_r)}, \quad (5)$$

式中 θ_i 、 θ_r 分别为光束对窗片的入射角和折射角。若 θ_i 恰好等于布儒斯特角，则应有 $R_p = 0$ ，激光器输出 p 偏振光。实际上，在布儒斯特窗口的制作过程中总会存在一定的角度误差的。只有采取严格的工艺措施，才能保证这种角度误差在 $30'$ 之内。将上述(2)、(3)两式分别代入(4)式，可得窗片一个表面的反射损耗：

$$R = \frac{E_p'^2 + E_s'^2}{E^2} = R_p \cos^2 \frac{\beta}{2} + R_s \sin^2 \frac{\beta}{2}. \quad (6)$$

光束行进一个单程时，两布儒斯特窗片的总反射损耗则为

$$R_T = 4 \left(R_p \cos^2 \frac{\beta}{2} + R_s \sin^2 \frac{\beta}{2} \right). \quad (7)$$

(7)式即为布儒斯特角度误差和窗片扭角共同引起的反射损耗表达式。从(7)式可以看到，若窗片扭角为零($\beta = 0$)，则得到 $R = 4R_p$ ，此即布儒斯特角度误差引起的反射损耗；若 $R_p = 0$ (即无布儒斯特角度误差)，则 $R = 4R_s \sin^2(\beta/2)$ ，它表示纯因扭角引起的反射损耗。

表 1 给出石英和 K_9 玻璃两种窗片的布儒斯特角度误差为 $30'$ 时，各种扭角情况下的总反射损耗：

Table 1. Reflective losses of two kinds of window at different angles

$\Delta\beta$	Bre. Angl. Err. $\Delta\theta = 30'$						
	$10'$	$30'$	$60'$	$90'$	$120'$	$150'$	$180'$
quartz ($n = 1.46$)							
single loss ($\times 10^{-4}$)	1.023	1.114	1.419	1.928	2.641	3.557	4.677
K_9 glass ($n = 1.52$)							
single loss ($\times 10^{-4}$)	1.206	1.314	1.680	2.291	3.145	4.244	5.586

2.2 窗片封接引起的各向异性损耗——应力双折射效应

在布儒斯特窗片的封接技术中，既有传统的粘结剂法，又有新发展起来的玻璃硬封接技

术和光学胶合技术。它们各有优缺点。但不论使用上述何种方法,都不可避免地要在两种材料的结合处产生某种残余应力,形成应力双折射效应。其应力双折射相移量(δ 值)视窗口材料及封接工艺而有不同,一般都在 $0.5^\circ \sim 3^\circ$ 范围之内^[4]。

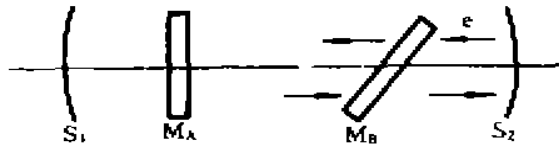


Fig. 2 Equivalent model of a frequency-stabilized laser

具有应力双折射效应的布儒斯特窗片在谐振腔中相当于一个各向异性的损耗元件(用图 2 中的 M_B 来表示),其它所有的微小双折射效应(因为还有其它镜片封接)则用一合成双折射元件 M_A 来代替,从而得到如图 2 所示的等效谐振腔结构示意图:

根据矩阵理论,当不考虑腔内各向同性损耗和相移时,其琼斯(Jones)传播矩阵为:

$$M = T_{M_B}^{(z, \delta)} R(\alpha) (T_{M_A}^{(z, \delta)})^2 R(-\alpha) T_{M_B}^{(z, \delta)},$$

$$\text{其中, } T_{M_A} = K_{M_A} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \exp(-i\delta) \end{pmatrix}, \quad T_{M_B} = K_{M_B} \begin{pmatrix} t_s & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (8)$$

而 $t_s = [2\eta/(\eta^2 + 1)]^2 = \sin^2 2\theta$, 此处的 θ 即为布儒斯特角, η 为窗片材料的折射率。 $R(\alpha)$ 和 $R(-\alpha)$ 是两元件表面所在坐标系之间的变换矩阵,其中的 α 也正反映了两者间的耦合关系。且当 $\alpha = \pi/4$ 时,耦合关系最强。这时,令 $T = (1 - t_s)/(1 + t_s)$, 可得上述矩阵本征值的简化表示式为

$$\lambda_{1,2} = \frac{1 + t_s}{2} \exp(-i\delta) [\cos \delta \pm (T^2 - \sin^2 \delta)^{1/2}], \quad (9)$$

这样,激光束在腔内往返一个行程,其损失系数由 $V = |\lambda_{1,2}|^2$ 表示,附加的各向异性损耗则为

$$1 - V = 1 - |\lambda_{1,2}|^2 = 1 - \left(\frac{1 + t_s}{2}\right)^2 (\cos \delta \pm \sqrt{T^2 - \sin^2 \delta})^2 \quad (10)$$

表 2 分别是石英和 K_9 玻璃布儒斯特窗片封接引起的各向异性损耗。从表 2 可以看到,应力双折射相移引起的各向异性损耗是相当大的。比较表 1 与表 2 的数字结果:在稳频激光器的制作过程中,可以做到布儒斯特角度误差和扭角都在 $30'$ 以内,这时两者引起的反射损耗为 $(1.1 \sim 1.3) \times 10^{-4}$;但窗片封接引起的各向异性损耗则可能在 $(6 \sim 50) \times 10^{-4}$ 范围(必须优化封接工艺才能有此结果)。因此,可以得出这样的结论:布儒斯特窗片封接引起的各向异性损耗是稳频 He-Ne 激光器主要的腔内损耗来源,也是影响其输出功率的关键因素。故改革封接工艺,减小应力双折射效应,对于提高稳频 He-Ne 激光器的输出功率具有重要的意义。

Table 2. Losses caused by window sealing

birefringence phase drift	$10'$	$30'$	$60'$	$90'$	$120'$	$150'$	$180'$
quartz ($n = 1.46$) cavity loss ($\times 10^{-4}$)	0.258	5.632	22.478	50.723	98.653	142.65	207.28
K_9 glass ($n = 1.52$) cavity loss ($\times 10^{-4}$)	0.296	8.903	36.040	82.112	148.54	237.70	353.60

3 铟封接技术用于稳频 He-Ne 激光器

所谓铟封接技术,就是利用金属铟这种熔点低、塑性好(比铅还软)的软金属,在膨胀系数可以相差很大的两种材料之间实现非匹配封接。它的特点是应力小,不污染和损坏窗片,密封性能好,还可方便地确保布儒斯特窗片的安装精度。图 3 是铟封接装置示意图。

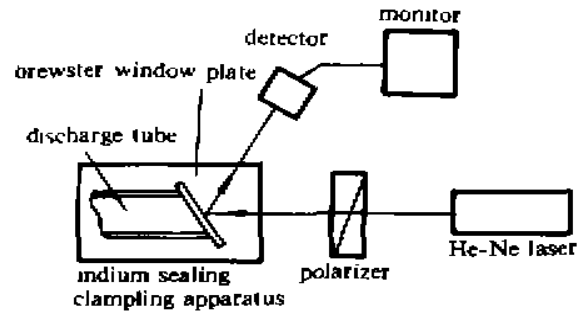


Fig. 3 Indium sealing devices of frequency-stabilized lasers

测量表明,铟封接形成的残余应力非常小,其应力双折射相移量比传统的粘结剂法至少小一个数量级,几乎可以忽略不计^[4,5]。正是由于这个原因,铟封接稳频 He-Ne 激光器的腔内损耗才得以大大降低,从而显著提高了输出激光的功率。作者研制的铟封接稳频 He-Ne 激光器的输出功率远较商品稳频管的功率大(约大 3 倍以上)。而且,铟封接真空密封性能好,质量可靠。作者在三年前制作的铟封稳频 He-Ne 激光器至今仍工作正常,输出功率没有明显下降。

参 考 文 献

- [1] H. P. Brandli, Method for measuring small optical losses using a He-Ne laser. *Rev. Sci. Instrum.*, 1968, 39(): 583~587
- [2] 蔡伯荣等著, 激光器件, 长沙, 湖南科技出版社, 1983 年版, 38~47
- [3] Keneth Sasen, Polarization and brewster angle properties of light pillars. *J. Opt. Soc. Am. (A)*, 1987, 4(3): 570~580
- [4] 曾 明, 丁金星, 外腔式 He-Ne 激光器的偏振特性. *激光技术*, 1992, 16(1): 21~29
- [5] J. Junghans, M. Keller, H. Weber, Laser Resonators with polarizing elements-eigenstates and eigenvalues of polarization. *Appl. Opt.*, 1974, 13(12): 2793~2798

Enhancement of Frequency-Stabilized He-Ne Laser Output Power

Zeng Ming Din Jinxing Yuan Xiaodong

(Department of Applied Physics, National University of Defence Technology, Changsha 410073)

(Received 2 December 1994; revised 10 February 1995)

Abstract The output power of a frequency-stabilized He-Ne laser depends strongly on the cavity losses. In this paper, the additional losses which come mainly from Brewster windows plate sealing are quantitatively analysed. Using indium sealing techniques, the mount quality and precision for Brewster window are greatly improved, and the output power of lasers are apparently enhanced due to reduction of the cavity losses. As an example, a He-Ne 633 nm frequency-stabilized laser with cavity length of 110 mm can give a output power of 2.5~3.0 mW.

Key words frequency-stabilized laser, Brewster windows, cavity loss, birefringence effect, indium sealing.