

# 磷玻璃宽带调Q激光器

何伟明 陈绍和 尤南昌 余文炎 邓锡铭

(中国科学院上海光学精密机械研究所)

## 提 要

本文提出采用两片尖峰简并型共振反射器作为磷玻璃振荡器的耦合输出镜, 利用其反射调制包络特性, 实现了带宽  $100\text{\AA}$  的激光输出方案, 并获得了成功, 实验分析了宽带输出特性。

关键词: 共振反射器; 尖峰简并; 宽带调Q激光器。

## 一、引 言

影响提高高功率激光束亮度的一个根本原因, 是光束自身强电场引起的自聚焦效应, 它降低了光束的亮度, 甚至破坏介质本身。为提高光束空间平滑度, 避免小尺度自聚焦的产生, 根本的办法是消除费累涅耳衍射所造成的强度起伏。以宽频带的激光, 在高功率激光系统中进行传输, 可消除费累涅耳衍射<sup>[1]</sup>, 从而抑制了小尺度自聚焦, 并提高了激光系统的负载功率。近几年来, 许多实验室已经开展这方面的工作<sup>[2~6]</sup>, 本文提出用共振反射器来加宽频带。与“频率选通腔技术”<sup>[7,8]</sup>相比, 共振反射器承受光强大, 不易损伤, 其反射调制包络可通过空气隙厚度来改变, 包络周期可达到一个较大值, 这一点 F-P 标准具是难以实现的。

## 二、共振反射器调制特性

对于两片共振反射器, 若腔片厚度  $L_1 = L_2$ , 则称之为简并型共振反射器, 其最小区段光程决定反射调制包络, 最大区段光程决定反射调制尖峰, 因此两片简并型共振反射器又可分为包络简并型和尖峰简并型, 共振反射器反射调制十分复杂<sup>[7,8]</sup>, 对于简并型共振反射器, 具有规则的调制包络形状。图 1(a) 和 (b) 分别为两片包络简并型和尖峰简并型共振反射器的反射调制曲线。看到包络简并型的包络调制度较大, 其包络谷值几乎为 0, 此类共振反射器

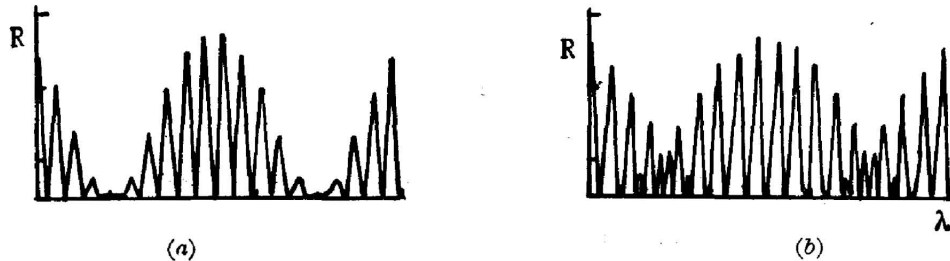


Fig. 1 Reflection spectra of two types degenerate nesonant reflector  
(a) envelop degenerate; (b) peak degenerate

不适于加宽频带,因此我们选用尖峰简并型共振反射器作为振荡器的耦合输出镜。

图 1(b)的调制尖峰包络线可以用下式拟合<sup>[9,10]</sup>:

$$R(\nu) = 1 + \Delta - \frac{1}{1 + \frac{1}{2} F - \frac{1}{2} F \cos \frac{2\pi(\nu - \nu_1)}{\Delta\nu}},$$

式中  $\nu$  为某一包络谷值频率,  $\Delta\nu = \frac{c}{2L_2}$  为包络周期。 $\Delta$  为反射率包络线的谷值,  $F$  为包络谷的锐度参数。调制包络的调制度随腔片折射率  $n$  的提高而变小,表 1 列出了几种腔片折射率下的调制包络峰值和谷值,从而对给定的腔片折射率,可以确定参数  $\Delta$ 、 $F$  的值(如  $n = 1.5$ , 则  $\Delta = 0.15$ ,  $F \approx 0.43$ )。

Table 1 The relation between  $\eta$  and  $R_{\max}$ ,  $R_{\min}$

$\eta$	$R_{\max}$	$R_{\min}$
1.5	45%	15%
1.79	67%	27%
1.82	69%	28%
2.24	85%	44.6%

$\eta$ —Refractive index of the plates in resonant reflectors

$R_{\max}$ —The maximum of the envelop of reflection spectra in resonant reflectors

$R_{\min}$ —The minimum of the envelop of reflection spectra in resonant reflectors

### 三、加宽理论

铍玻璃激活离子的谱线加宽比较复杂,一般把它看作非均匀加宽<sup>[9,10]</sup>,其线型函数为:

$$L(\nu) = \exp[-4 \ln 2 \cdot (\nu - \nu_0)^2 / \Delta\nu_D^2],$$

$\Delta\nu_0$  为半高全宽,  $\nu_0$  为中心频率。那么小信号在腔内的单程放大倍率为:

$$G(\nu) = \exp \left\{ g_0 \cdot \exp \left[ -4 \ln 2 \cdot \frac{(\nu - \nu_0)^2}{\Delta\nu_D^2} \right] \right\} \cdot \left\{ 1 + \Delta - \frac{1}{1 + \frac{1}{2} F - \frac{1}{2} F \cos \frac{2\pi(\nu - \nu_1)}{\Delta\nu}} \right\}^{1/2} \cdot T_A, \quad (1)$$

式中  $g_0$  为增益系数,  $T_A$  为腔内除腔镜外其它所有元件的透过率。选择合适的包络周期  $\Delta\nu$ , 将包络谷值频率  $\nu_1$  调至与增益中心频率  $\nu_0$  重合,这样由于共振反射器对边频的反射率较高,从而起到抑制中心波长光子数的增长,提高旁带光子数的增长,使得在较宽频带范围内的光子达到阈值并起振,从而获得宽带激光输出。其光谱最大加宽条件为<sup>[9,10]</sup>: 1.  $\nu_1 = \nu_0$ ;

2.  $\left. \frac{d^2 G(\nu)}{d\nu^2} \right|_{\nu=\nu_0} = 0$ 。由条件 1 可得到:

$$L_2 = \frac{1}{2} m \lambda_0, \quad (2)$$

$m$  为正整数。在条件 1 下,由条件 2 可以导得:

$$L_2 = \frac{\lambda_0^2}{\pi \Delta \lambda_D} \sqrt{\frac{2 \ln 2 \cdot g_0 \cdot \Delta}{F}} \quad (3)$$

在共振反射器腔片折射率  $n=1.5$  时, 取  $g_0=2$ ,  $\Delta \lambda_D=200 \text{ \AA}$ , 则由(3)计算得  $L_2 \approx 17.6 \mu\text{m}$ 。通常由(2)、(3)式决定的空气隙厚度  $L_2$  不会相等, 但是在  $L_2 \gg \frac{1}{4} \lambda_0$  时,  $L_2$  微小的变化, 对包络周期的影响很小, 仍能保证  $G(\nu)$  在  $\nu_0$  处足够平滑, 因此对于由(3)式确定的空气隙厚度, 可以通过粘在共振反射器腔片上的压电陶瓷, 作精密细调以满足条件 1。

在满足最大加宽条件下, 假定噪声光信号经  $N$  次来回振荡后开始输出激光, 其频宽为  $\Delta \nu_n$ , 若初始光信号频宽  $\Delta \nu_0 \approx \Delta \nu_D$ , 而  $\Delta \nu_n < \Delta \nu_0$ , 而  $\Delta \nu_n$  的表达式<sup>[9]</sup>为:

$$\Delta \nu_n = 2 \left[ (2N/4!) \cdot \ln 2 \left| \frac{d^4 G(\nu)}{d\nu^4} \right|_{\nu=\nu_0} \right]^{-1/4} \quad (4)$$

通过计算, 并利用(3)式, 得:

$$\Delta \nu_n = \Delta \nu_D \left\{ N \ln 2 \cdot \Delta^{1/2} \cdot T_A \cdot e^{g_0} \left[ \left( 2 + 4\Delta + \frac{4}{3F} \Delta \right) g_0^2 - g_0 \right] \right\}^{-1/4} \quad (5)$$

(1) 对主动调 Q, 在脉冲建立时间  $t_D$  内, 小信号增益系数为:

$$g(\nu) = \frac{\Delta n_0 \cdot \lambda^2 \cdot l}{8\pi n^2 t_{sp}} L(\nu) \quad (6)$$

$\Delta n_0$  为反转粒子数密度,  $l$  为激活介质长度。在  $t=t_D$ , 一般腔内光子数密度增长约  $10^{10}$  倍, 设在  $t_D$  时间内, 光信号来回振荡了  $N$  次, 对中心频率有:

$$G^{2N}(\nu_0) = (e^{g_0} \cdot \Delta^{1/2} \cdot T_A)^{2N} = 10^{10},$$

得:

$$N = 5 \ln 10 / [g_0 + \ln(\Delta^{1/2} \cdot T_A)] \quad (7)$$

将(7)式代入(5)式得:

$$\Delta \nu_n = \Delta \nu_D \left\{ 5 \ln 2 \cdot \ln 10 \cdot \Delta^{1/2} \cdot T_A \cdot \frac{e^{g_0} \cdot g_0 \cdot \left[ \left( 2 + 4\Delta + \frac{4}{3F} \Delta \right) g_0 - 1 \right]}{g_0 + \ln(\Delta^{1/2} \cdot T_A)} \right\}^{-1/4} \quad (8)$$

从上式可以看到,  $g_0$  过大反而会导致谱线的压窄。由于  $g_0 \propto \Delta n_0 \cdot l$ , 因此必须选择合适的棒长  $l$  及泵浦能量。

(2) 在脉冲建立时间以后, 腔内光子数发生“雪崩过程”, 巨脉冲开始输出, 此时必须考虑增益饱和效应, 对非均匀加宽,  $g(\nu) = g_0(\nu) \frac{1}{\sqrt{1 + I_\nu/I_s}}$ 。  $I_s$  为饱和强度,  $I_\nu$  是频率为  $\nu$  的光强, 它由激光场频谱决定<sup>[11]</sup>, 因而在脉冲输出期间, 增益线型发生变化, 这样最大加宽条件 2 就不再满足, 从而将导致输出谱线两边的强度比中间的强。

(3) 实际磷玻璃的加宽线型函数与高斯函数有很大差别, 加上激光器的增益也难以确定, 因而实际最大加宽下的  $L_2$ , 与由(3)决定的理论值不尽相同。设  $L_{2\text{max}}$  为实际最大加宽下的空气隙厚度, 那么当  $L_2 < L_{2\text{max}}$  时,  $G''(\nu)|_{\nu=\nu_0} < 0$ ,  $G(\nu)$  曲线在  $\nu_0$  处是凸的, 经过多次振荡,  $\nu_0$  附近的光子将占优势, 通过竞争, 最终谱线会被压窄; 当  $L_2 > L_{2\text{max}}$  时,  $G''(\nu)|_{\nu=\nu_0} > 0$ ,  $G(\nu)$  曲线在  $\nu_0$  处是下凹的, 多次振荡后, 两边光子将占优势, 通过竞争, 光谱边频强度会比中心频率强, 甚至中心波长光子会被完全抑制, 谱线发生中心分裂。

(4) 由于调整精度及稳定性等因素, 常常不能保证  $\nu_1 = \nu_0$ 。输出谱带相对  $\nu_1$  的变化是

十分敏感的, 随  $|\nu_1 - \nu_0|$  的增大, 谱线将明显变窄, 而且谱线中心波长也发生移动, 特别在  $L_2 > L_{2max}$  情况, 由于谱线中心分裂, 很容易抑制其中一条谱线, 使得输出带宽大大压缩。

### 四、实验研究

上文讨论了最大加宽条件下共振反射器空气隙的厚度, 这为实验提供了参考, 图 2 为实验装置的示意图, 通过透镜  $L$ , 及光阑  $S_2$  的 He-Ne 激光经共振反射器的反射, 在屏  $S_2$  上形成若干组干涉圆环, 据此对空气隙平行度进行调整和监控<sup>[12]</sup>, 其调整精度达  $1''$  量级, 共振反射器, 系由未镀膜的 F-P 标准具切割所得, 其折射率  $n=1.5$ , 厚度为 10mm, 平行度优于  $0.2''$ 。用双灯泵浦激活介质, 调 Q 晶体为 KD\*P 材料。用 1 米光栅摄谱仪摄谱, 由于谱面光强不足以使普通干板感光, 故让光谱成像在毛玻璃上, 后面用红外夜视仪观察和拍摄, 图 3 为摄得的磷玻璃加宽光谱。

实验采用两片共振反射器, 在最大加宽条件下, 空气隙厚度约为  $15\mu\text{m}$ , 此值略小于理

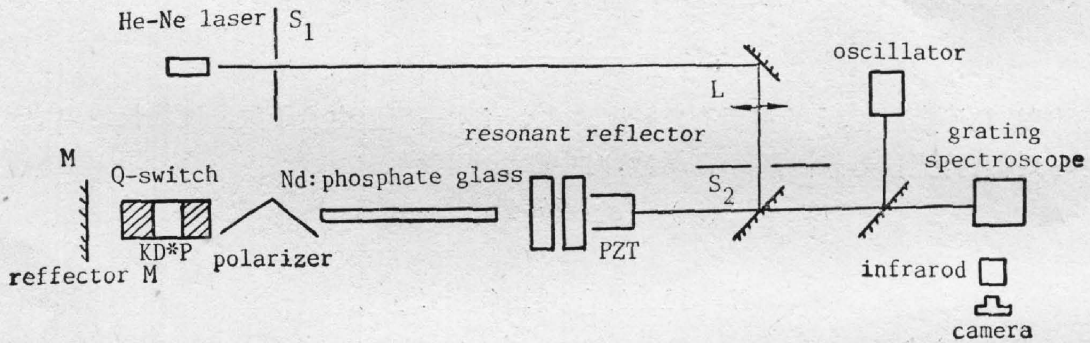


Fig. 2 Diagram of the experimental system

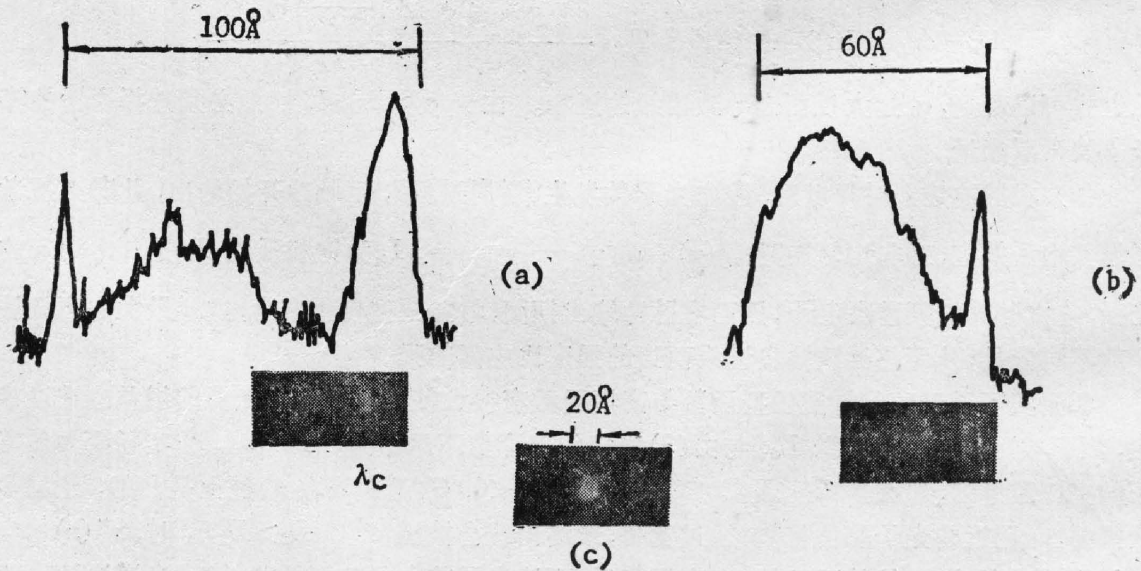


Fig. 3 The broadening spectra of phosphate glass

(a) The maximum condition; (b), (c) as in (a) but  $L_2$  decreased or increased slightly

论估算值。实验发现磷玻璃光谱加宽严重不对称,谱线基本上只向长波长方向加宽,如图 3(a),图中  $\lambda_0$  为静态普通腔激光中心波长,因此可以推断,磷玻璃的光谱加宽线型具有严重不对称性,短波长方向上升沿比长波长方向的下降沿陡度大,从而在短波长方向难以加宽。磷玻璃的这种加宽线型不对称性,是由磷玻璃材料本身决定的,这在一定程度上限制了其激光光谱加宽的效果。

实验曾采用两根不同浓度的磷玻璃棒,一根  $\phi 6 \times 70$  mm 掺钕浓度约为 3.5%,当超阈度大于 2 时,发现光谱内出现一亮点,谱线明显变窄,可见超阈度太高,对高浓度磷玻璃的光谱加宽是不利的;另一根  $\phi 6 \times 80$  mm 掺钕浓度 1~2%,发现光谱质量比前一根高,而且在超阈度大于 2 时,没有发现上述现象,因此对磷玻璃必须选择合适的掺钕浓度。另一方面,磷玻璃加宽光谱谱带存在明显的峰结构,且谱带分裂,如图 3(a)所示。我们也曾采用三片共振反射器来加宽光谱,发现与两片共振反射器无多大差别。

磷玻璃由于  $L_2$  较小,其加宽光谱稳定性较差,特别是由于光谱仅向长波长方向加宽,当  $L_2$  稍偏大,包络向长波长方向移动,很容易出现一条宽度约  $20 \text{ \AA}$  的谱线,如图 3(c)所示;当  $L_2$  稍偏小时,谱带变窄,如图 3(b)所示。因此应严格保证系统足够的稳定性。在恒温条件控制得比较严格时,我们曾作过光谱稳定性实验,结果在半小时之内,光谱宽度起伏小于 10%。

宽带调 Q 激光脉冲波形相当光滑,具有很好的重复性,这与单纵模调 Q 脉冲相似,从而在高功率激光系统中保证削波输出足够稳定。实验发现,带宽大于  $100 \text{ \AA}$  的激光确能消除由于费累涅耳衍射引起的空间高频调制,而且光斑边缘能得到软化。

钕玻璃具有较宽的荧光线宽,应用共振反射器也可实现光谱调谐。

## 五、结 束 语

将尖峰简并型共振反射器作磷玻璃振荡器的耦合输出镜,利用其反射调制特性,获得了谱宽  $100 \text{ \AA}$  左右的激光输出,但是光谱带产生分裂,究其原因,主要是共振反射器包络调制度过高。适当减小包络调制度,可望获得较为均匀的宽带光谱。减小包络调制度的方法大约有三种:

1. 增加腔片折射率或腔片表面镀反射膜;
2. 提高腔片片数;
3. 使尖峰简并失调。

对于方法 1、2,实验发现效果不明显。由分析知道,方法 3 是比较合适的,从简并型共振反射器调制特性来看,尖峰简并失调,包络会变得更为平滑,尤其在包络谷;当  $n\Delta L = \lambda/4$  时,包络峰值和谷值反射率分别约为 28% 和 17%,此时调制度最低。考虑这些参数,由(3)式可以估算得  $L_2 \sim 30 \mu\text{m}$ ,因而加宽光谱的稳定性可望得到改善。厚差  $n\Delta L$  可以这样来实现:将  $\phi 50$  mm,平行度在  $1.5''$  左右的平面腔片,沿平行于其平面干涉条纹方向对称切割,并相对放置,这样光斑处于不同位置就可得到不同的腔片厚差。

## 参 考 文 献

- [1] 邓锡铭,余文炎等;《光学学报》,1983, 3, No. 2 (Mar), 97~101.

- [2] N. K. Moncur; *Appl. Opt.*, 1977, **16**, No. 6 (Jun), 1449~1451.  
[3] 陈时胜等;《光学学报》, 1982, **2**, No. 2 (Mar), 105~112.  
[4] KMS Quarterly Progress Report, April-June, 1981 (KMS F-U 1197) KMS Fusion Inc. Ann. Arbor, Mich.  
[5] G. P. Banfi *et al.*; *Optics Comm.*, 1983, **44**, No. 3 (Jan), 192~195.  
[6] 余文炎等;《中国激光》, 1984, **11**, No. 1 (Jan), 135~144。  
[7] 朱智敏, 陈绍和;《光学学报》, 1986, **6**, No. 1 (Jan), 6~11。  
[8] 何伟明, 陈绍和;《光学学报》, 1987, **7**, No. 11(Nov), 976~981。  
[9] D. Vonder Linde and K. F. Rodgers, *Optics Comm.*, 1973, **8**, No. 1 (May), 91~93.  
[10] H. Graener and A. Laubereau; *Optics Comm.*, 1981, **37**, No. 2 (Apr), 138~142.  
[11] A. 亚里夫著;《量子电子学》, (上海科技出版社, 1983)。  
[12] 何伟明等;《中国激光》, 1988, **15**, No. 9 (Sep), 708~709.

## Wideband phosphat Nd glass Q-switched laser

HE WEIMING, CHEN SHAOHUO, YOU NANCHANG, YU WENYAN AND DENG XIMING

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

(Received 14 September 1988; revised 24 February 1989)

### Abstract

The resonant reflector of two plates peak degenerate type is used as the output coupling mirror of Nd glass oscillator. Selected its suitable reflection spectra envelop, the bandwidth about  $100\text{\AA}$  is obtained successfully.

**Key words:** resonant reflector; peak degenerate; wideband Q-switched laser.