

文章编号: 0258-7025(2001)12-1063-03

# 三面共振反射器耦合 Nd:YAG 振荡器获得 光滑调 Q 脉冲\*

何伟明 吕志伟

(哈尔滨工业大学光电子技术研究所 哈尔滨 150001)

**提要** 光学共振反射器作为 Nd:YAG 振荡器的耦合输出腔镜,具有很强的选纵模能力,三面共振反射器具有规则的反射峰调制结构。为获得稳定的单纵模光滑脉冲输出,理论上对振荡器结构参数作了优化设计,并指出振荡器宜在阈值附近工作,以充分发挥共振反射器的选纵模能力。实验上振荡器获得了 17 mJ 的光滑单纵模脉冲,光滑脉冲出现几率大于 97%。

**关键词** 共振反射器,单纵模,Nd:YAG 振荡器

**中图分类号** TN 248.1<sup>+</sup>3 **文献标识码** A

## Smooth-pulse Nd:YAG Q-switched Oscillator Coupled with Three-plan Resonant Reflector

HE Wei-ming LÜ Zhi-wei

(Institute of Opto-Electronics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

**Abstract** Optical resonant reflector (RR), as a coupled-output mirror of Nd:YAG oscillator, has very strong ability for selecting longitudinal mode. Three-plan RR has more regular structure of modulated reflecting-spectrum. For outputting stable single longitudinal mode, it is optimized for oscillator parametric designing in theory and it is suggested that the oscillator should operate near threshold for full utilizing the mode selecting ability of RR. Great than 97% smooth pulses, with 17 mJ, are obtained in experiment.

**Key words** resonant reflector, single longitudinal mode, Nd:YAG oscillator

普通 Nd:YAG 调 Q 振荡器输出会产生不稳定的拍频调制脉冲,用其作为抽运源研究受激布里渊散射等非线性现象会带来所不希望的随机起伏。要获得稳定的光滑脉冲波形,激光器必须以单纵模运转。采用短腔长、腔内插入 F-P 标准具或者采用环型腔<sup>[1]</sup>都能实现单纵模运转,但出现单纵模几率并不很高,且不够稳定。采用注入种子或者主动反馈控制等措施,几乎能做到 100% 的单纵模运转,并且具有很高的稳定性,但其结构复杂、成本高。光学共振反射器<sup>[2~4]</sup>具有比 F-P 标准具更强的选模能力,用其作为 Nd:YAG 调 Q 振荡器的耦合输出镜,已经实现了激光器的单纵模运转<sup>[3,5,6]</sup>,获得光滑脉冲

波形输出。

光学共振反射器从结构上可分为简并型和非简并型两类<sup>[3,4]</sup>。文献[6]采用三片非简并型共振反射器获得了稳定的单纵模输出,但三片共振反射器调整比较困难。而对于两片简并型共振反射器,严格要求两个平行平片的厚度相等,否则调制小峰包络将复杂化,文献[4]对此作了详细的分析。

这里采用图 1 所示的振荡器光路图,腔的光程长度  $L = 40$  cm,小孔光阑直径 2.3 mm,染料片透过率 30%,YAG 介质为  $\phi 6$  mm  $\times$  80 mm,采用单灯抽运。图中的输出耦合镜为非简并型三面反射共振器,其中一光学平片(折射率  $n = 1.5$ )的厚度为  $d$ ,平行度小于  $5$  s,另一平片的外侧表面镀增透膜,两内侧光学平面相距为  $s$ 。当  $s > nd$  时,调制反射峰包络周期取决于  $nd$ ,如图  $\chi R$ 。其反射峰结构比较简单,且其包络峰值反射率  $\sim 30\%$ ,能有

\*863 惯性约束聚变主题、国家自然科学基金(编号: 60088001)和国防科技重点实验室基金资助项目。

收稿日期 2000-09-18;收到修改稿日期 2000-11-21

效提取振荡器能量,获得~10 ns的单纵模脉冲;另外不同于两片筒并型共振反射器,对平片厚度没有严格精度要求,而调整起来又比三片共振反射器方便得多。

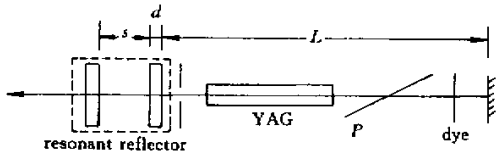


图1 单纵模 Nd:YAG 振荡器光路图

Fig.1 Schematic of single longitudinal mode Nd:YAG oscillator

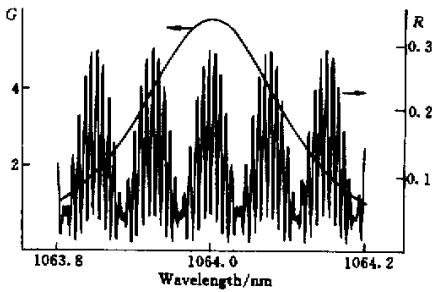


图2 共振反射器反射频谱(R)和共振反射器反射外腔的双程净增益(G)

Fig.2 Reflecting-spectrum of resonant reflector(R) and the round-trip net gain excepting for the reflection of resonant reflector(G)

图2画出了  $d = 5\text{mm}$ ,  $s = 70\text{mm}$  的反射频谱  $R(\lambda)$  与两片筒并型共振反射器类似,反射频谱呈周期变化。其小峰的包络周期由  $\lambda^2/2nd$  决定,小峰周期由  $\lambda^2/2ns$  决定。

对图1的振荡器,除输出镜反射率  $R$  以外的来回振荡一周的纯增益为

$$G = (T_Q \times T_p \times T_d)^2 \times \exp\left[2g_0l \frac{(\Delta\lambda/2)^2}{(\lambda - \Delta\lambda)^2 + (\Delta\lambda/2)^2}\right]$$

式中  $T_Q, T_p$  和  $T_d$  分别为染料片、偏振片和小孔光阑衍射透过率,这里 YAG 介质为均匀加宽,  $\Delta\lambda$  为其荧光线宽,  $g_0, l$  分别为中心波长的小信号增益、增益介质长度。当抽运工作在阈值之上,即  $GR > 1$ , 振荡器起振,图2中  $G$  是在阈值之上取  $T_Q = 30\%$ ,  $T_p = 95\%$ ,  $T_d = 96\%$ ,  $\Delta\lambda = 0.5\text{nm}$ ,  $g_0l = 2.2$  所

得到的。多次振荡后  $GR$  的反射频谱宽度被压窄。一般来说,调  $Q$  过程中,当起始光子数密度  $\phi$  被放大  $10^{10}$  倍后,光子数密度导致雪崩放大,从而输出调  $Q$  脉冲。在产生雪崩放大之前,光子数密度较小,激光跃迁上能级粒子反转数几乎不变,因而为小信号放大。一般要求激光纵模的压缩选取应在雪崩放大之前完成。经计算,图2中  $GR$  经过  $m = 43$  次振荡后  $\phi$  的放大达到  $10^{10}$  倍水平,此时的  $GR$  频谱变成图3(a),图2中小峰包络最大值与增益中心是基本重合的情形,这样共振反射器仅剩两个反射小峰,且此相邻反射小峰产生明显差别。当降低抽运,取  $g_0l = 2.0$  时,  $GR$  将经过  $m = 170$  次振荡后  $\phi$  的放大才达到  $10^{10}$  倍水平,如图3(b)所示,一方面小峰宽度进一步压窄,另一方面相邻反射小峰差别明显增大。我们设计使得腔长  $L$  与  $s$  之比在  $5 \sim 6$ ,即在一个小反射峰内,可分布  $5 \sim 6$  个纵模,这样经过模式竞争,最后可望实现单纵模运转。

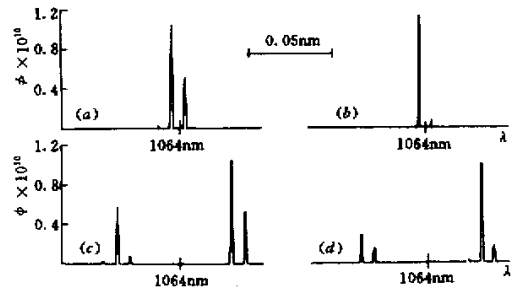


图3 在不同参数下经多程放大后的光子数密度频谱

Fig.3 Spectrum of amplified photo density for different parameters

(a)  $nd = 7.5\text{mm}$ ,  $s = 70\text{mm}$ ,  $gl = 2.2$ ,  $m = 43$ ; (b)  $nd = 7.5\text{mm}$ ,  $s = 70\text{mm}$ ,  $gl = 2.0$ ,  $m = 170$ ; (c)  $nd = 7.5\text{mm} + \lambda/4$ ,  $s/nd = 9$ ,  $gl = 2.2$ ,  $m = 50$ ; (d)  $nd = 7.5\text{mm} + \lambda/4$ ,  $s/nd = 9.5$ ,  $gl = 2.2$ ,  $m = 50$

如前所述,反射小峰的包络周期由  $\lambda^2/2nd$  决定,通常  $d$  值不能正好使包络最大值与增益中心重合。随着  $nd$  的微小变化,包络会发生移动,当  $\Delta(nd) = \lambda/2$  时,包络移动一个周期。图2中,使包络移动半个周期时,两个包络峰值以增益中心对称分布,这样两个包络峰值处的反射小峰即使经多次振荡后,仍不会有明显差别,可能会导致多纵模振荡。对此,可合理选取  $s$  与  $nd$  的比值,以避免这一情况的发生。当  $s/nd$  为半奇数时,如果反射小峰处于

一个包络峰值处,那么另一个相邻包络峰值处就不会有反射小峰,而是在偏离半个反射小峰周期的位置处才出现。这样多次振荡后,可以增大它们的差别。图 3(c)和(d)分别为  $s/nd = 9$  和  $s/nd = 9.5$  时经  $m = 50$  次振荡后的反射频谱。可见,当  $s/nd$  取半奇数时,能抑制其他反射峰,从而即使包络对称分布,也能产生单纵模。根据这一思想,在设计腔长  $L$  与  $s$  之比时也选为半奇数,这样更有利于抑制相邻反射小峰的纵模。

为有利于单纵模运转,理论上应尽可能降低  $g_0l$  值,即激光器应该在阈值附近运转,这样在脉冲建立时间内有更多的振荡次数来抑制边模的产生;另外宜设计合理的结构参数,使得  $s/nd$  及  $L/s$  为半奇数,这样相邻包络的反射峰值不会完全相等,且相邻反射峰值处的纵模分布也不完全对称。

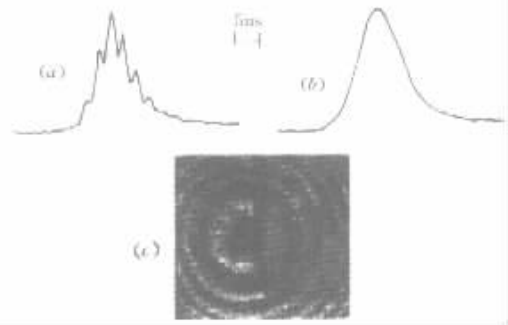


图 4 调 Q 脉冲波形

(a)用单块输出镜 (b)用共振反射器耦合输出镜;  
(c)由 F-P 标准具测得的脉冲(b)的光谱

Fig. 4 Waveform of the Q-switched pulses

(a)with one plan mirror;(b)with resonant reflector coupled-mirror;  
(c) the spectrum of pulse (b) measured with Fabry-Perot spectrometer

根据上述思想设计的振荡器结构参数为  $L = 400$  mm,  $d = 5$  mm,  $s = 71$  mm;小孔光阑直径 2.3 mm,染料片透过率 30%。脉冲测量采用 PIN 管探测器(响应  $< 2$  ns),用 Tecktron380 数字示波器显示,能量测量用 ED200 能量计。当仅用一平片作输出镜时,调 Q 输出如图 4(a)的不稳定调制波形。当采用三面反射型共振反射器时,调 Q 激光阈值氙灯电压为 700 V,图 4(b)为氙灯电压为 750 V 时输出的光滑脉冲波形,其脉冲能量为 17 mJ。用空气隙 50 mm 厚的 F-P 标准具测得如图 4(c)的光谱,此时激光器确实以单纵模运转。激光器以 1 Hz 重复率工作,观察 1000 个脉冲,光滑脉冲波形出现几

率为 100%,波形峰值起伏小于  $\pm 6\%$ ,能量起伏小于  $\pm 4\%$ 。当氙灯电压升高 50 V 时,同样观察 1000 个脉冲,这时有约 3% 的几率出现调制脉冲,脉冲不稳定性开始增大。

当氙灯电压进一步升高,此时激光器达到通常的二镜腔的阈值之上,输出激光脉冲明显不稳定,并且激光束方向也将会抖动。因此,激光器的动态工作应该在二镜腔的阈值之下。由于采用染料片调 Q,激光器重复率在 5 Hz 以下,若要提高激光器重复频率可采用  $\text{Cr}^{4+}$  离子色心晶体调 Q,此时与二镜腔别无差别。激光器以单纵模运转,输出能量要略小于二镜腔,不过共振反射器耦合腔的激光阈值要比普通二镜腔低。

总之,采用三面反射型共振反射器作为 Nd:YAG 染料调 Q 激光器的耦合输出镜,很容易实现稳定的单纵模运转,获得光滑脉冲输出。但是三面反射型共振反射器的调整要求精度较高,否则激光横模变差,光束质量降低,同时会产生光束方向的抖动。好在当参数设计给定后,可以加工标准具套环来固定共振反射器,这样能达到很高的平行度,且结构稳定,有利于长期稳定运转。

## 参 考 文 献

- 1 Huang Maoquan, Zhen Jinling, Pan Qing *et al.*. A single longitudinal mode dye-Q-switched ring Nd:YAG laser. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 1995, **A22**(9):645~649 (in Chinese)
- 2 M. Born, E. Wolf. *Principles of Optics*. Oxford: Pergman Press, 1965. 51
- 3 Zhu Zhiming, Chen Shaoh, Chen Qinshao *et al.*. Optical resonant reflectors and their application in laser technique. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1986, **6**(1):6~11 (in Chinese)
- 4 He Weiming, Chen Shaoh, You Nanchang *et al.*. Three-plate optical resonant reflectors and their design. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1987, **7**(11):976~982 (in Chinese)
- 5 D. F. Voss, L. S. Goldberg. Simple single longitudinal mode Q-switched Nd:YAG oscillator. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1985, **QE-21**(2):106~107
- 6 Dirk J. Kuizenga. Short-pulse oscillator development for the Nd:glass laser fusion systems. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1981, **QE-17**(9):1694~1708