

Nd:YAG 激光器从 $1.06\ \mu\text{m}$ 向 $1.32\ \mu\text{m}$ 的改装*

翟华金

(中国科学院上海光机所量子光学开放研究实验室, 上海 201800)

李宝其 答孝义 陈 聪

(武汉大学物理系, 武汉 430072)

刘进平

(中南民族学院物理系, 武汉 430074)

提要 证实了 $1.32\ \mu\text{m}$ 波长上运转的输出功率大于 $2.0\ \text{W}$ 的单模稳定连续波 Nd:YAG 激光器可通过对性能较好的进口激光器进行简单的改装而获得。同时讨论了 Nd:YAG 激光器在 $1.32\ \mu\text{m}$ 波长上连续波调 Q 及连续波锁模运转的可能性。

关键词 升级改装, Nd:YAG 激光器, $1.32\ \mu\text{m}$ 波长

1 引言

作为现代固体激光器件的典型代表, Nd:YAG 激光器通常工作于 $1.06\ \mu\text{m}$ 波长, 相应的激光产品(尤其是国外知名公司的产品)已具备相当好的性能。但就 $1.32\ \mu\text{m}$ 波长运转的 Nd:YAG 激光器而言, 国际上也只有少数公司生产定型的产品; 而在基础研究的一些领域, 例如“光纤-光栅对-光孤子效应”的双级光脉冲压缩^[1]和全光纤光脉冲压缩^[2]等, $1.32\ \mu\text{m}$ 连续波锁模 Nd:YAG 激光光源是目前唯一可供选用的光源。正是基于基础研究的迫切需要, 国内许多研究组都试图研制 $1.32\ \mu\text{m}$ 的 Nd:YAG 激光器^[3], 但据我们所知, 到目前为止仍难以找到能满足基础研究实际需要的国产 $1.32\ \mu\text{m}$ Nd:YAG 激光产品, 主要症结在于输出功率及其稳定性方面。本文报道性能较好的典型进口 Nd:YAG 激光器从 $1.06\ \mu\text{m}$ 向 $1.32\ \mu\text{m}$ 改装的初步实验结果, 获得了大于 $2.0\ \text{W}$ 的单模稳定连续波 $1.32\ \mu\text{m}$ 激光输出, 并讨论了 Nd:YAG 激光器在 $1.32\ \mu\text{m}$ 连续波调 Q 及连续波锁模运转的可能性。改装后光源的性能与原光源相当。本文给出了在国内条件下获取这种高性能光源的一种廉价而有效的新途径。

2 Nd:YAG 激光器 $1.32\ \mu\text{m}$ 连续波运转

2.1 若干参数的选取及腔镜膜层的设计

* 国家自然科学基金资助项目。

收稿日期: 1995年1月12日; 收到修改稿日期: 1995年2月28日

本改装实验在 Quantronix 416 型激光系统上完成。改装立足于以下两条原则:一是进行尽可能少的改动,从而确保改装后的系统在需要时能立即复原;二是获得尽可能高的稳定激光输出。

改装过程中,以下方面基本沿袭原激光系统:(1) 由于激光棒的固有的依赖于泵浦功率的动态热透镜效应^[4],一方面,随着泵浦功率的改变,激光腔两次经历稳定区,即存在两个稳定工作区: I 区和 II 区;另一方面,泵浦功率的起伏将显著影响激光输出的稳定性,为此,我们让改装后的激光腔仍运转于激光棒模体积($\propto \omega_0^2$, ω_0 为激光棒上的光斑半径)对于泵浦功率($\propto 1/f$, f 为激光棒的热焦距)起伏不敏感的状态

$$d\omega_0/d(1/f) = 0 \quad (1)$$

即热不灵敏状态^[5],从而有效地保证激光输出功率对于泵浦扰动的稳定性;(2) 仍采用原先的 Nd:YAG 棒,其规格为 $\phi 4 \times 79 \text{ mm}$,利用其自身的孔径效应可限制高阶横模,获得单模激光输出;(3) 仍选用原腔长参数 $L \equiv L_1 + L_2 \approx 137 \text{ cm}$ (其中 L_i , $i = 1, 2$, 为腔镜 M_i 到热透镜相应主面的距离),这一较长的腔长有利于选模和提高输出激光的方向性,同时便于调 Q 或锁模运转时经腔长微调使总光程满足新工作波长上的调 Q 或锁模条件(调制频率为 49.9 MHz);但我们特别注意调整了激光棒位置 L_1 (见 2.3 节);(4) 仍选用原激光器的典型凹凸腔型,输出镜 M_1 的曲率半径 $R_1 = -120 \text{ cm}$,全反镜 M_2 的曲率半径 $R_2 = 100 \text{ cm}$,以利于提高激光效率及激光腔的失调稳定性^[6];只是在镀膜时使 1.06 μm 不落在设计的 1.32 μm 膜系覆盖宽度之内,从而增大 1.06 μm 的损耗,抑制 1.06 μm 振荡,我们选取透射率 $T_1 = 4\%$, 5.5% , 7% , 10.8% 等四种不同的 1.32 μm 输出镜以便于确定输出镜的最佳透射率(见 2.2 节),全反镜的实际透射率为 0.5%。

2.2 输出镜透射率对输出特性的影响

对于激光振荡而言,输出镜的透射是一种损耗,透射率与激光振荡是一对矛盾。同时,激光腔运转波长的改变,将改变激光棒的增益。故确定输出镜的最佳透射率,对于在新的波长上获得最大的激光输出十分必要。图 1 给出四种输出镜对激光器 1.32 μm 输出特性的影响的实验结果,其中曲线 c, d 为更换新泵浦灯后的测量结果,由此可见:(1) 较大的透射率对应于较高的激光阈值,因而过大的透射率将可能使激光器不能起振;(2) 新的泵浦灯能提供更大的激光增益,从而降低激光阈值;(3) $T_1 = 4\%$ 较 $T_1 = 5.5\%$ 更利于获得大的功率输出,由此推知 $T_1 > 5.5\%$ 将更不利于获得大的功率输出,可见最佳透射率在 $T_1 < 5.5\%$ 的范围之内,作为良好的近似,我们选取 $T_1 = 4\%$ 为最佳透射率。

2.3 激光棒位置对输出特性的影响

激光棒等效于动态热透镜,因而其位置的改变必将影响激光腔的运转。图 2 给出 1.32 μm 波长上激光腔的输出特性随着激光棒不同位置 L_1 而变化的一组实验结果。为便于分析,图 3 给出激光腔稳定工作区边界、热不灵敏工作点($1/f$)以及热不灵敏状态下的失调灵敏度 D 参数^[7]随激光棒位置 L_1 而变化的理论结果。需要说明的是,对于本文中给定的腔型参数,在泵浦功率允许的范围(我们设定为 $f = \infty \sim 20 \text{ cm}$ 这一较宽范围)内,每一 L_1 只对应单一的工作区, $L_1 < 19 \text{ cm}$ 时为 II 区, $L_1 > 19 \text{ cm}$ 时为 I 区;另一工作区在 $f < 20 \text{ cm}$ 范围,为泵浦功率所限,本文不予考虑。

显然,图 3(a) 中任一 X 值对应的三个 Y 值依次对应于图 2 中该激光棒位置的输出特性曲线的阈值位置、峰值位置和截止值位置。由此可对图 2 的实验结果作如下分析:

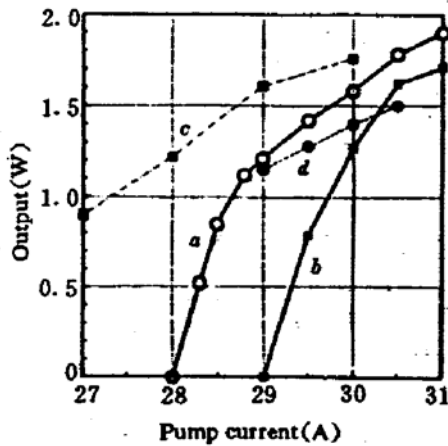


Fig. 1 Laser output versus pump current for different output-transmissivities T_1 : a, 4%; b, 5.5%; c, 7%; d, 10.8%. For discussion, refer to the text

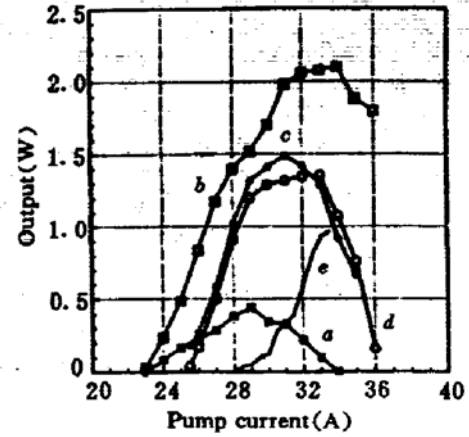


Fig. 2 Laser output versus pump current for different rod position L_1 (in cm): a, 32; b, 50; c, 67; d, 79; e, 90

(1) 曲线 b, c, d, e 的稳定区阈值、截止值、稳定区宽度随 L_1 的变化均与图 3(a) 的理论结果相符。

(2) 注意到输出特性曲线的峰值近似地满足

$$dP_{out}/dI_{in} = 0 \quad (2)$$

而 $P_{out} \propto \omega_s^2, I_{in} \sim 1/f$, 即(2)式近似地等价于(1)式, 故曲线峰值通常出现于热不灵敏点附近。由此可解释峰值位置随 L_1 的变化, 因为热不灵敏点 $(1/f)_0$ 随 L_1 而改变, 见图 3(a)。

(3) 尽管所有的曲线均依同样的腔调试程序而得, 曲线 a 不满足上述分析, 这可能与腔的失调有关。事实上, 如图 3(b) 所示, $L_1 = 32$ cm 时激光腔的 D 参数确实很大, 即腔的失调稳定性较差。

(4) 曲线的峰值(即热不灵敏状态下的激光输出)随 L_1 而变化, 这是下列因素共同作用的结果: 热不灵敏工作点 $(1/f)_0$ 随 L_1 而变化, 如图 3(a), 它决定激励能源的大小; 腔镜上光斑半径随 L_1 而变化, 它决定腔镜引起的衍射损耗; 激光棒上光斑半径随 L_1 而变化, 它决定激光棒的模体积(即有效增益)以及激光棒孔径效应引起的损耗。上述诸种增益、损耗因素及其对比关系随 L_1 而表现为复杂的变化, 它们之间的最佳平衡决定了激光棒的最佳位置和激光腔的最大输出。

(5) 改变激光器的运转波长 λ , 显然将改变各光斑尺寸(均正比于 $\lambda^{1/2}$), 由第(4)可知, 必须重新调整激光棒位置, 才能获得新工作波长上增益与损耗之间的新的最佳平衡。对于本工作中选用的激光器, 其 $1.32 \mu\text{m}$ 运转的最佳激光棒位置为 $L_1 \approx 50$ cm。

2.4 Nd:YAG 激光器 $1.32 \mu\text{m}$ 连续波稳定单模运转

在上述各小节选择和确定的诸参数下, 我们实现了 Nd:YAG 激光器在 $1.32 \mu\text{m}$ 的连续波运转, 其输出特性曲线如图 2 中曲线 b 所示。曲线的顶部功率大于 2.0 W。由 2.3 节的讨论可知, 曲线顶端位于热不灵敏点附近, 具有较好的稳定性; 该激光器在 $1.06 \mu\text{m}$ 运转的锁模峰起伏小于 4%, 因而连续波运转的起伏远小于 4%, 改装后激光器的输出稳定性应该与此相当, 因为在热不灵敏条件下输出起伏主要与激励电源、泵浦灯、冷却系统、激光棒热特性及整个系统的防震性能等有关, 而改装显然不影响这些因素。实验过程中并利用红外观察镜观察反射后的远场激光光斑, 为规则的圆斑, 改变泵浦电流过程中亦无多模运转的迹象出现。

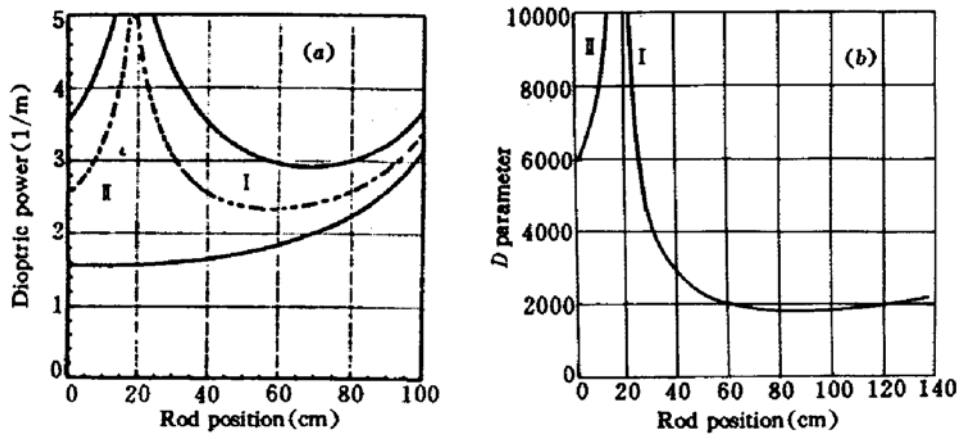


Fig. 3 Theoretical results of (a) boundaries of the stability zones (solid lines) and thermal insensitive point ($1/f$) (dashed line) and (b) thermal insensitive misalignment parameter D . All are as a function of rod position L_1

3 Nd:YAG 激光器 1.32 μm 调 Q 、锁模运转的可能性分析

在实现 1.32 μm 连续波单模稳定运转之后,我们试图对 Nd:YAG 激光器进行进一步改装,以期获得 1.32 μm 的连续波调 Q 或连续波锁模运转。但加入锁模头之后(调制电源不开),经反复调试仍未能获得 1.32 μm 输出,其原因只能归于锁模头在 1.32 μm 损耗太大。

设 d, g, α, l_0 分别为激光棒的长度、增益系数、损耗系数及端面单程损耗, T_1, T_2 为腔镜 M_1, M_2 的透射率, l_i 为腔内其它元件的单程损耗,易得傍轴近似下激光腔的振荡条件为

$$(1 - T_1)(1 - T_2)(1 - l_0)^2 \exp[2(g - \alpha)d] \prod_i (1 - l_i)^2 = 1 \quad (3)$$

注意到 $T_1 = 10.8\%, 7\%, 5.5\%, 4\%$ 等均能实现 1.32 μm 连续波运转,我们设想以较小的输出透射率来补偿锁模头的损耗,此时锁模头的最大允许单程损耗为

$$l_{\max} = 1 - \left(\frac{1 - T_{1\max}}{1 - T_{1\min}} \right)^{1/2} = 1 - \left(\frac{1 - 10.8\%}{1 - 4\%} \right)^{1/2} \approx 3.6\% \quad (4)$$

这一允许值应当容易满足。为此,我们将锁模头置于腔外 1.32 μm 光路上,测量其单程损耗 l ,结果如表 1,表中 P_i, P_o 分别为通过锁模头前、后的激光功率。测量时选用双凹腔型(即由全反镜组成谐振腔),在选用泵浦电流下,其功率起伏 $< 0.5\%$ 。表 1 结果表明,该锁模头实际的单程损耗约为 5.6%,已超出(4)式的限制,可见该锁模头未对 1.32 μm 增透。

Table 1 Measurement of single-pass losses of the mode-locker at 1.32 μm

Test index	P_i (mW)	P_o (mW)	$l = (P_i - P_o)/P_i(\%)$	$\bar{l}(\%)$
1	228	215	5.7	5.6
2	224	213	4.9	
3	228	213	6.6	
4	224	212	5.4	
5	215	203	5.6	

换用对 1.32 μm 增透的锁模头(依目前国内的镀膜技术其单程损耗将 $< 1\%$),将实现 1.32 μm 锁模运转,并且容易得到平均功率 1.0 W 以上、脉宽(FWHM)在 100 ps 量级的高重复率连续波锁模输出。提高全反镜的反射率以及更细致地调整激光棒位置 and 选择输出镜透射

率,将有助激光器性能的进一步优化。这种光源是超短光脉冲、非线性光纤光学、光纤孤子通信等研究领域十分独特而难得的理想光源之一。有关激光器的进一步改装及将其应用于“光纤光栅对-光孤子效应”双级光脉冲压缩实验的工作,目前正在进行之中。

致谢 作者感谢国营华中精密仪器厂伍远鹏高级工程师在镀膜技术上的大力帮助。

参 考 文 献

- 1 K. Tai, A. Tomita. 1100×optical fiber pulse compression using grating pair and soliton effect at 1.319 μm. *Appl. Phys. Lett.*, 1986, 48(16):1033~1035
- 2 A. S. Gouveia-Neto, A. S. L. Gomes, J. R. Taylor. A femtosecond all-fibre compressor. *Opt. Commun.*, 1987, 64(2):163~166
- 3 滕家炽, 孙寅生等. 单模连续 1.32 μm Nd³⁺:YAG 激光器. 上海机械学院学报, 1989, 11(1):99~102
- 4 W. 克希奈尔著, 华 光译. 固体激光工程. 北京: 科学出版社, 1983. 369~407
- 5 J. P. Lörtscher, J. Steffen, G. Herziger. Dynamic stable resonators; a design procedure. *Opt. Quant. Electr.*, 1975, 7(6):505~514
- 6 R. B. Chesler, D. Maydan. Convex-concave resonators for TEM₀₀ operation of solid-state ion lasers. *J. Appl. Phys.*, 1972, 43(5):2254~2257
- 7 R. Hauck, H. P. Kortz, H. Weber. Misalignment sensitivity of optical resonators. *Appl. Opt.*, 1980, 19(4):598~601

Reconstruction of a Nd:YAG Laser from 1.06 μm to 1.32 μm

Zhai Huajin

(Joint Laboratory for Quantum Optics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,
Academia Sinica, Shanghai 201800)

Li Baoqi Da Xiaoyi Chen Cong

(Department of Physics, Wuhan University, Wuhan 430072)

Liu Jinping

(Department of Physics, South-Central College for Nationalities, Wuhan 430074)

Abstract We report the first experimental demonstration that a 1.32 μm single-mode thermally stable continuous-wave Nd:YAG laser with an output higher than 2.0 W can be obtained through simple reconstruction of an imported commercial 1.06 μm Nd:YAG laser. A brief discussion is given for further reconstruction; 1.32 μm mode-locked or Q-switched operations.

Key words upgrade-reconstruction, Nd:YAG laser, 1.32 μm wavelength