

文章编号：1001-4322(2006)09-1413-04

高功率连续侧面泵浦 1 341.4 nm Nd :YAP 激光器*

朱海永^{1,2}, 张 戈¹, 黄呈辉¹, 魏 勇¹, 黄凌雄¹,
陈 静^{1,2}, 陈玮冬¹, 位 民¹, 陈振强³

(1. 中国科学院 福建物质结构研究所, 福州 350002; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049;
3. 暨南大学 光电工程研究所, 广州 510632)

摘 要：报道了一台线性偏振输出、波长为 1 341.4 nm、采用激光二极管(LD)连续侧面泵浦的 Nd :YAP 激光器。通过分析 Nd :YAP 晶体的能级结构和跃迁特点 显示了 Nd :YAP 晶体作为 1.3 μm 波段激光器的工作物质的优点。实验对比了不同透过率的输出耦合镜片的输出功率。最终以透过率为 6.5% 的输出耦合镜片, 在 555 W 的 LD 泵浦功率下获得了 121 W 的平行于晶体 c 轴线性偏振(c 偏振)的 1 341.4 nm 激光输出, 光-光转化效率 21.8% 斜率效率为 41% 并且在 c 偏振激光失稳后成功获得了平行于 a 轴的线性偏振(a 偏振)的 1 339.2 nm 激光。

关键词：Nd :YAP 激光器; 侧面泵浦; 连续激光; 线性偏振

中图分类号：TN248.1 **文献标识码：**A

1.3 μm 波段的激光在光纤传输中具有损耗低和接近零色散区域、可通过倍频产生红光、以及水对该波段激光的吸收较大等特点, 在光纤通讯、视频显示及激光医疗等领域有着广泛的应用前景, 日益受到人们的重视^[1-3]。掺钕晶体中的⁴F_{3/2}—⁴I_{13/2}能级跃迁是产生 1.3 μm 波段激光的主要途径。在众多的掺钕激光晶体中, Nd :YAP 晶体不但具有较高的热导率, 而且其⁴F_{3/2}—⁴I_{13/2}跃迁的受激发射截面较大, 是目前已知最适用于 1.3 μm 波段高功率运转的激光晶体之一。并且 Nd :YAP 晶体具有天然的双折射特性, 对于克服热致退偏振和激光非线性频率变换的应用等方面十分有利。沈鸿元等采用双氙灯泵浦 Nd :YAP 获得了 195 W 的 1 341.4 nm 连续激光输出^[4]。吴瑞芬等用 LD 侧面泵浦 Nd :YAP 晶体, 在最高的泵浦光强 571 W 下得到了 60 W 的 1 341.4 nm 激光输出^[5]。我们通过能级分析, 实验对比了不同透过率的输出耦合镜片的输出, 在 555 W LD 泵浦功率下获得了 121 W 的 c 偏振 1 341.4 nm 激光输出, 并且在 c 偏振激光失稳后成功获得了 a 偏振 1 339.2 nm 激光。

1 能级分析

Nd :YAP 激光晶体是以 +3 价钕离子作为激活粒子的四能级系统。+3 价钕离子在基质材料的晶格势场中, 根据斯塔克效应, 原子能级精细分裂成为若干个能级, 从而形成若干条具有一定间隔的多重谱线。图 1 为 Nd :YAP 晶体的 Nd³⁺ 能级图。基态⁴I_{9/2}的钕离子在 800 nm 附近对不同偏振方向的光存在着不同的吸收峰值中心^[6], 在非偏振光的泵浦下具有较宽的吸收带宽, 所以对泵浦源热稳定性的要求没有那么苛刻。它吸收 800 nm 波段的泵浦光子能量后跃迁到高能级⁴F_{5/2}, 而后几乎全部经无辐射跃迁迅速下降到亚稳态能级⁴F_{3/2}, 处于该能级的 Nd³⁺ 离子可以向⁴I_{9/2}, ⁴I_{11/2}, ⁴I_{13/2}三个终端能级辐射跃迁, 其中最强的受激辐射来自⁴F_{3/2}—⁴I_{11/2}跃迁, 它包含 5 条较强的斯塔克子

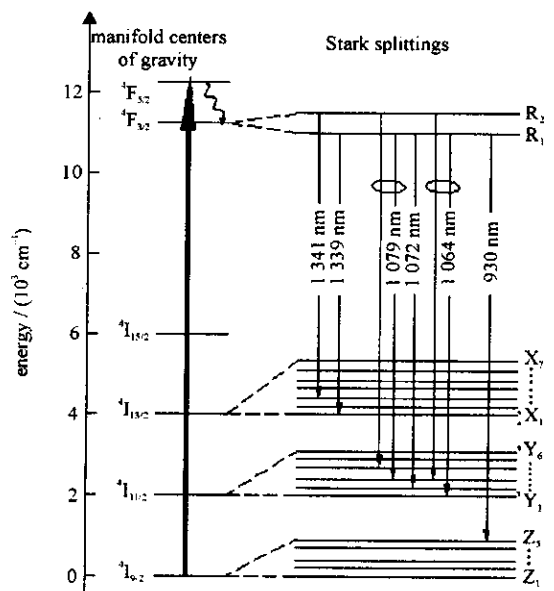


Fig. 1 Diagram of energy levels of Nd³⁺ in YAP crystal

图 1 Nd :YAP 晶体的 Nd³⁺ 能级精细结构

* 收稿日期 2006-03-27; 修订日期 2006-07-13

基金项目 国家自然科学基金资助课题(60208001) 福建省科技专项基金资助课题(2004HZ01-1)

作者简介 朱海永(1982—), 男, 浙江人, 硕士研究生, 主要从事大功率固体激光器研究。

联系作者 张 戈 zhg@fjirsm.ac.cn.

跃迁,产生 1 064, 1 072, 1 079 nm 三个波长的辐射光谱; $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{9/2}$ 的跃迁是准三能级系统,主要用以产生 930 nm 波长激光; $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$ 的跃迁,主要包含两个斯塔克能级的跃迁,分别为 $R_1 - X_1$ 的 1 339 nm 波长光谱和 $R_2 - X_3$ 的 1 341 nm 波长光谱^[7]。由于在各向异性的 Nd :YAP 晶体中,对于不同的偏振方向,受激发射截面差别较大。对于沿 b 轴切割的 Nd :YAP 晶体的 $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$ ($^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$)跃迁,产生 c 偏振激光时,1 341 nm(1 079 nm)的谱线增益最强;产生 a 偏振激光时,1 339 nm(1 064 nm)的谱线增益最强。在激光设计时,不加任何光学选偏的情况下,由于 c 偏振的跃迁增益最强,所以输出为 c 偏振激光^[8]。

本实验主要运用 Nd :YAP 的 $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$ 跃迁来产生 1.3 μm 波段的激光。激光晶体的受激发射截面 σ 和荧光寿命 τ 的乘积与激光输出功率成正比,与激光阈值成反比。表 1 给出了各晶体 $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$ 跃迁的参数和晶体热导率的对比。从表中看出,Nd :YAP 晶体中 Nd^{3+} 的 $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$ 跃迁的受激发射截面 σ 为 $2.2 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$,是 Nd :YAG, Nd :YLF 等晶体同一跃迁受激发射截面的 2.4 倍以上,它与 τ 的乘积在这些晶体中也是较大的^[9],仅比 Nd :YVO₄ 小。虽然 Nd :YVO₄ 晶体有更好的受激发射性能^[10],但由于其热导率低而限制了在高功率泵浦下的使用。而 Nd :YAP 的热导率与 Nd :YAG 接近,所以 Nd :YAP 晶体是实现低阈值、高功率的 1 341.4 nm 连续激光运转的优良材料,比其它晶体更适合于 LD 侧面泵浦的 1.3 μm 波段激光。

表 1 各晶体 $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$ 跃迁的参数和晶体热导率的对比

Table 1 $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$ transition parameters and thermal conductivity of various neodymium doped crystals

	Nd :YAP	Nd :YAG	Nd :GdVO ₄	Nd :YLF	Nd :YVO ₄
wavelength/nm	1 341	1 319 or 1 338	1 342	1 313	1 342
emission section/ 10^{-19} cm^2	2.2	0.87 or 0.92	1.8	0.6	6
fluorescence lifetime/ μs	150	230	90	480	90
thermal conductivity/ $(\text{W} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	11	14	11.7	6.3	5.2

2 实验与结果

图 2 为 LD 侧面泵浦 Nd :YAP 晶体的实验装置图。泵浦源是北京国科世纪激光技术有限公司的半导体侧面泵浦模块,其结构是由 3 组半导体激光二极管阵列 120° 对称分布,对激光工作物质进行均匀泵浦。工作电流从 20 A 调到 45 A,工作电压从 26 V 上升到 27.6 V。当工作电流 45 A 时,泵浦光功率达 555 W。Nd :YAP 激光晶体的尺寸为 $\phi 4 \text{ mm} \times 110 \text{ mm}$,b 向切割,掺杂质量分数为 0.9%。为抑制 1 079 nm 波长光在晶体内的自激振荡,将 Nd :YAP 晶体的两端面进行抛光并镀对波长 1 341.4 nm 和 1 079 nm 激光增透膜。半导体激光器和激光晶体的冷却水温控制在 20 $^{\circ}\text{C}$,半导体激光器中心波长为 808 nm。激光谐振腔由全反射镜 M1 和耦合输出镜 M2 构成,采用腔长为 20 cm 的对称平行平面腔。全反射镜镀对 1 341.4 nm 激光高反($R > 99.7\%$),对 1 079 nm 激光高透($T > 70\%$)的膜。输出耦合镜镀对 1 341.4 nm 激光半反射膜。实验中,我们用了 1 341.4 nm 激光透射率分别为 $T = 5\%$, 6.5% , 10% , 13.5% 的输出耦合镜片,得到图 3 所示的结果。

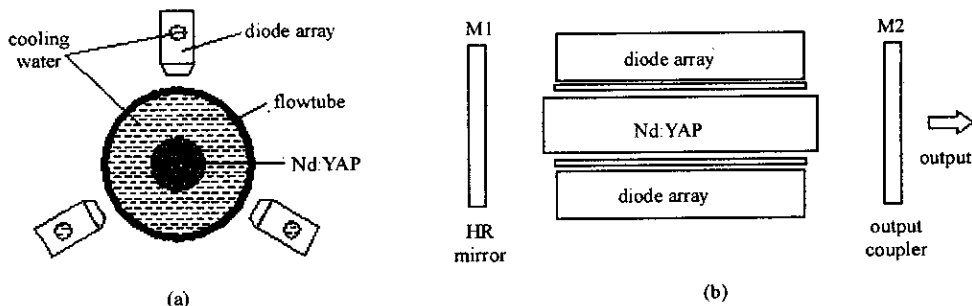


Fig. 2 Schematic diagram of laser diode side-pumped Nd :YAP laser system :

(a) diode-side-pump module cross-section, (b) resonator configuration,

图 2 LD 侧面泵浦 Nd :YAP 晶体的实验装置 (a) 半导体侧泵模块的横截面 (b) 腔形结构

根据激光理论,激光的输出功率对特定的透过率存在最大值,当透过率过大时将引起腔内损耗过大,导致阈值较高,输出功率偏低;当透过率过小时,阈值降低,但随着泵浦光功率的增加,腔内存在着较大的增益而无法有效输出。由图 3 可知,采用透射率 $T = 5\%$, 6.5% , 10% 的输出耦合镜片其泵浦阈值比较接近(260 W 左右),输出功率都超过 110 W;当透过率达 13.5% 时,损耗过大,泵浦阈值明显升高达 300 W,最后在 555 W 的

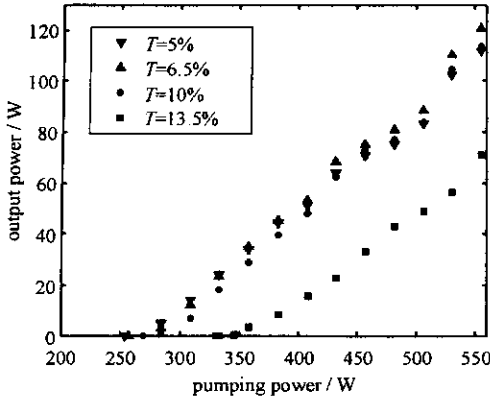


Fig. 3 Output power with different output couplers

图 3 不同输出耦合镜片的输出功率

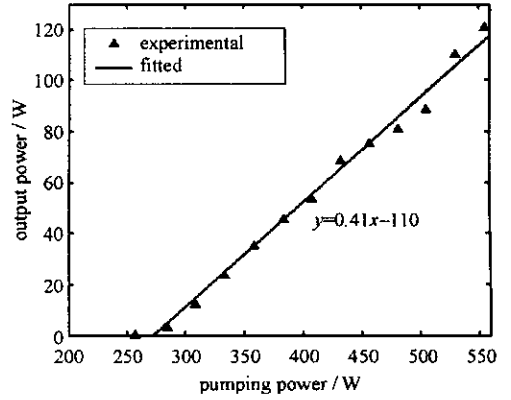


Fig. 4 Slope efficiency with a maximum CW output power of 121 W

图 4 获得最高 121 W 输出时激光的斜率效率

泵浦功率下输出仅为 71.2 W。图 3 显示用 $T=6.5\%$ 的镜片的输出功率略高于其他镜片,最高输出功率达到 121 W,光-光转化效率达 21.8%。在输出最高时,测得平行于晶体 a 轴和 c 轴的光束质量 M^2 分别为 34 和 43。对 $T=6.5\%$ 的镜片的输出功率进行线性拟合,得到其斜率效率为 41%,见图 4。

我们用 44 W 型平面光栅单色仪扫描激光波长,发现从 1 000 ~ 1 500 nm 的波长范围内,仅有 1 341.4 nm 波长激光输出,未见到其它谱线的激光输出。图 5 给出了它的谱线宽度,从图中可知,谱线中心为 1 341.4 nm,半高全宽(FWHM)为 0.43 nm。让激光通过格兰-付科棱镜进行检偏,测量结果为平行于晶体 c 轴的线性偏振光。

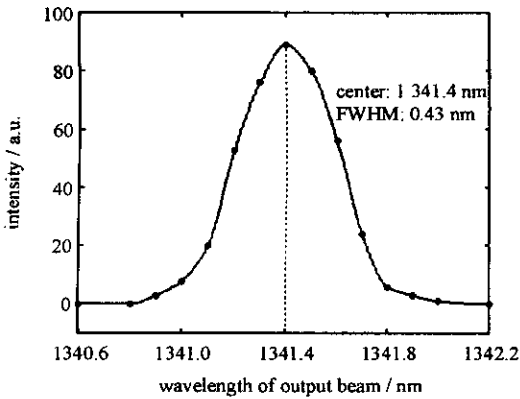


Fig. 5 Measured emission spectrum of Nd :YAP laser at 1 341 nm

图 5 Nd :YAP 激光器输出的 1 341 nm 激光的谱线

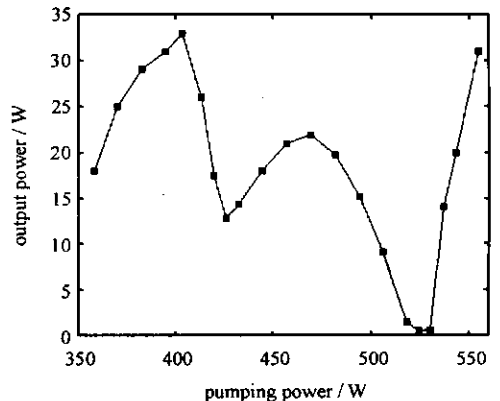


Fig. 6 Output characteristics of non-symmetrical resonator

图 6 不对称腔下的输出特性

我们对腔长为 26 cm 的不对称腔进行了实验,其中 $M1$ 和 $M2$ 与各自临近晶体端面的距离分别为 10 cm 和 5 cm,得到的输出特性如图 6 所示。对其输出激光的波长和偏振性进行检测,结果显示:输出功率第二次上升到下降的过程中,输出为 1 339.2 nm 的 a 偏振光,其他为 1 341.4 nm 的 c 偏振光。这是由于不对称腔随着热焦距的变短会出现两个稳定区,并且在 Nd :YAP 激光棒中 c 偏振光的热焦距比 a 偏振光短。随着泵浦功率的增大,1 341.4 nm 的受激发射截面大,最先输出的为 1 341.4 nm 的 c 偏振光。当泵浦功率达到 400 W 左右时, c 偏振激光的热焦距减小到第一个稳定区的边缘,功率开始下降。此时由于较长热焦距的 a 偏振激光还在第一个稳定区内并开始起振,激光装置开始输出 1 339.2 nm 的 a 偏振光。当泵浦功率继续上升直到热焦距超出 a 偏振激光稳定区, a 偏振激光也失稳,输出接近为零。当泵浦功率继续上升到 530 W 左右时, c 偏振激光进入另一个稳定区,1 341.4 nm 激光又重新起振。

3 结 论

本文通过分析 Nd :YAP 晶体的能级结构和跃迁特点,说明了 Nd :YAP 晶体作为 1.3 μm 波段激光器的工作物质的优点。通过对比不同透过率的输出耦合镜片的输出情况,最终用透过率 $T=6.5\%$ 的镜片,在泵浦功率为 555 W 时获得了 121 W 的 1 341.4 nm 的 c 偏振激光输出,斜率效率为 41%,光-光转化效率 21.8%。并且采用不对称腔时在 c 偏振激光失稳后成功获得了 1 339.2 nm 的 a 偏振激光。

参考文献：

- [1] Zhang G , Shen H Y , Zeng R R , et al. The study of 1 341. 4 nm Nd :YAlO₃ laser intracavity frequency doubling by LiB₃O₅[J]. *Opt Commun* , 2000 , **183** :461-466.
- [2] 毕 勇 , 孙志培 , 李瑞宁 , 等. 高平均功率腔内和频蓝光 Nd :YAG 激光器[J]. 光学精密工程 , 2005 , **13**(1) :16-21.(Bi Y , Sun Z P , Li R N , et al. High power blue Nd :YAG laser by intracavity summing frequency. *Optics and Precision Engineering* , 2005 , **13**(1) :16-21)
- [3] 贾方 , 王修齐 , 马军忠. 1 341. 4 nm Nd :YAP 激光内镜下治疗消化道疾病 45 例报告[J]. 中国激光 , 2001 , **28**(11) :1054-1056.(Jia F , Wang X Q , Ma J Z. Report on 45 patients with digestive diseases who were treated by the Nd :YAP laser with endoscope. *Chinese Journal of Lasers* , 2001 , **28**(11) :1054-1056.
- [4] Zhou Y P , Zeng R R , Yu G F , et al. Laser action of Nd :YAlO₃ at 1 300 nm[J]. *J Appl Phys* , 1991 , **70**(6) 3373-3374.
- [5] Wu R F , Poh B P , Kin S L. Linearly polarized 120 W output from a diode-pumped Nd :YAlO laser[C]// Proc of SPIE. 2000 , **3929** :25-32.
- [6] Boucher M , Musset O , Boquillon J P , et al. Multiwatt CW diode end-pumped Nd : YAP laser at 1. 08 and 1. 34 μm : influence of Nd doping level [J]. *Opt Commun* , 2002 , **212** :139-148.
- [7] Weber M J , Varitimos T E. Optical spectra and intensities of Nd³⁺ in YAlO₃[J]. *J Appl Phys* , 1971 , **42**(12) :4996-5005.
- [8] Massey G A , Yarborough J M. High average power operation and nonlinear optical generation with the Nd :YAlO₃ laser[J]. *Appl Phys Lett* , 1971 , **18**(12) 576-579.
- [9] Shen H Y , Zeng R R , Zhou Y P . et al . Comparison of simultaneous multiple wavelength lasing in various neodymium host crystals at transitions from ⁴F_{3/2}—⁴I_{11/2} and ⁴F_{3/2}—⁴I_{13/2}[J]. *Appl Phys Lett* , 1990 , **56**(20) :1937-1938.
- [10] Tucker A W , Birnbaum M , Fincher O L , et al. Stimulated-emission cross-section at 1 064 and 1 342 nm in YVO₄[J]. *J Appl Phys* , 1977 , **48** : 4907-4911.

High-power CW diode-side-pumped Nd :YAP laser at 1 341. 4 nm

ZHU Hai-yong^{1,2} , ZHANG Ge¹ , HUANG Cheng-hui¹ , WEI Yong¹ , HUANG Lin-xiong¹ ,
CHEN Jing^{1,2} , CHEN Wei-dong¹ , WEI Min¹ , CHEN Zhen-qiang³

(1. Fujian Institute of Research on the Structure of Matter , Chinese Academy of Sciences , Fuzhou 350002 , China ;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences , Beijing 100049 , China ;

3. Institute of Optoelectronic Engineering , Jinan University , Guangzhou 510632 , China)

Abstract : A high-power linearly polarized CW diode-side-pumped Nd :YAlO₃(Nd :YAP) laser oscillating at 1 341. 4 nm was reported. By analyzing the level structure and characteristics of transition in Nd :YAP crystal , the advantages of Nd :YAP crystal as a kind of working matter medium of 1. 3 μm laser were displayed. Different output couplers for the laser were studied by experiment. Finally , a c-axis polarized laser with an output power as high as 121 W at 1 341. 4 nm was obtained with a coupler transmittance of 6. 5% at the maximum pumping power of 555 W. The beam quality factor was 34 , the optical-optical efficiency was 21. 8% and the optical slope efficiency was 41% . The a-axis polarized laser at 1 339. 2 nm was also successfully obtained at the c-axis polarized laser being instable.

Key words : Nd :YAP laser ; Diode-side-pump ; CW laser ; Linearly polarization