

文章编号: 0258-7025(2006)06-0748-05

离轴切割 Nd:YVO₄晶体的激光特性

陈 浩¹, 闫长春¹, 王占新¹, 曾和平²

(¹ 徐州师范大学物理系, 江苏 徐州 221000; ² 华东师范大学光谱学与波谱学教育部重点实验室, 上海 200062)

摘要 通过比较 a 切, 45° 切割 Nd:YVO₄ 晶体连续(CW)和以 Cr⁴⁺:YAG 晶体为被动调 Q 器件激光器的输出特征, 发现 Nd:YVO₄ 晶体在激光器中既作为增益介质, 又作为双折射 o 光, e 光分裂器件。在不同的运转条件下, o 光, e 光偏振模式相互竞争, 导致离轴晶体在连续运转时表现出 a 切晶体的特征, 有较小的阈值、光-光转换效率高; 在被动调 Q 运转时, 则表现出 c 切晶体的特征, 在 1340 mW 的激光二极管(LD)抽运功率下, 可以获得峰值功率 0.6 kW, 重复频率为 18.7 kHz, 脉宽为 6.5 ns 的脉冲。

关键词 激光技术; 激光二极管抽运; 离轴切割; 被动调 Q; 模式竞争

中图分类号 TN 248.1 **文献标识码** A

Characteristics of Off-Axially Cut Nd:YVO₄ Crystal for Laser

CHEN Hao¹, YAN Chang-chun¹, WANG Zhan-xin¹, ZENG He-ping²

¹Department of Physics, Xuzhou Normal University, Xuzhou, Jiangsu 221000, China
²Key Laboratory of Optics and Magnetic Resonance Spectroscopy of Ministry of Education,
East China Normal University, Shanghai 200062, China

Abstract The characteristics of 45° -off-axially-cut and a -cut Nd:YVO₄ crystal, were compared for continuous wave (CW) and passively Q-switching operations by Cr⁴⁺:YAG crystal as the intracavity saturable absorber. By analyzing the experimental results, the 45° -off-axially-cut Nd:YVO₄ exhibited parts of properties of the a -cut and c -cut crystals for CW passively Q-switching operations respectively, due to the competition between π polarization and σ polarization simulated emissions. With the laser diode (LD)-pump power of 1340 mW, a peak power of 0.6 kW with a 6.5-ns pulse width and 18.7-kHz repetition rate was obtained.

Key words laser technology; laser diode pump; off-axially cut; Q-switched; mode competition

1 引 言

20 世纪 80 年代中后期, 激光二极管(LD)抽运的全固态激光器(DPSL)研究工作取得巨大进展, 这种激光器的特点是: 效率高、热效应小、器件结构紧凑, 能获得高功率及较高光束质量的输出。特别是大功率全固态激光器在军事、科研、工业等诸多领域有重要的用途^[1]。能够被激光二极管抽运的晶体有很多, 其中由于 Nd:YVO₄ 晶体具有很高的增益, 较宽的吸收带, 特别适合使用激光二极管作为抽运源。如果经过合理的设计, 例如微片式结构激光器^[2,3], 可以使激光器实现小型化, 拥有良好的机械性

能^[4,5], 具有广泛的应用价值。关于 Nd:YVO₄ 晶体的研究, 主要集中于传统切割方向的 a 切和 c 切晶体; a 切割晶体的连续(CW)激光器有极高的光-光转换效率, 达到了惊人的 64%^[6], 比较适合连续输出; c 切晶体在调 Q 脉冲激光输出方面有很好的特性^[7~9], 非常适合应用在倍频、遥感测距等广阔领域。然而, 关于离轴切割的 Nd:YVO₄ 晶体的研究却报道甚少。

2 理论分析

离轴切割是指晶体切割方向与 c 轴成一定角

收稿日期: 2005-11-17; 收到修改稿日期: 2006-01-12

基金项目: 江苏省教育厅自然科学基金(04KJD140196)资助项目。

作者简介: 陈 浩(1976—), 男, 江苏徐州人, 徐州师范大学物理系讲师, 主要从事小型固体激光器、全息光学的研究。

E-mail: chen hao@xznu.edu.cn

度,如 45° 切割是指切割方向与 c 轴成 45° 角($\varphi = 0^\circ$ 为 a 切, $\varphi = 90^\circ$ 为 c 切)。图 1 给出了不同切割方向晶体的示意图。由于 Nd:YVO₄ 晶体具有双折射效应($n_o = 1.9573, n_e = 2.1652$),特别是该晶体的发射截面也是各向异性的($25 \times 10^{-19} \text{ cm}^2 @ 1064 \text{ nm}$, π 极化, $E // c$ 轴; $7 \times 10^{-19} \text{ cm}^2 @ 1064 \text{ nm}$, σ 极化, $E \perp c$ 轴)。当晶体的切割方向与 c 轴(光轴)的夹角介于 $0^\circ \sim 90^\circ$ 时, Nd:YVO₄ 晶体在激光器中就起到两个作用:1) 作为双折射晶体,使振荡光分为 o 光和 e 光,产生在空间上的走离;2) 作为偏振发射的增益介质,其发射截面理论上讲应该介于 $7 \times 10^{-19} \sim 25 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$ 之间,或者激光输出模式应该在 π 偏振与 σ 偏振模式之间有跃变性的选择。

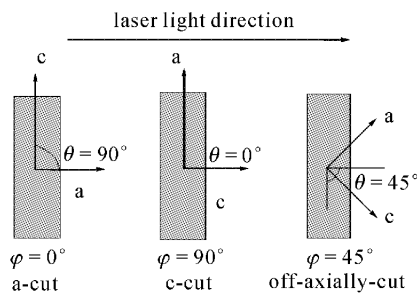


图 1 各种晶体的切割示意图

Fig. 1 Crystals with different cut-angle

选取了一块 a 切割和一块 45° 切割、原子数分数均为 2% 的 Nd:YVO₄ 晶体作为激光增益介质,详细研究了晶体连续与调 Q 运转下的激光输出特征。

Nd:YVO₄ 晶体是单轴双折射晶体,其中 c 轴为光轴($n_c = n_e = 2.1652 @ 1064 \text{ nm}$),另外两个方向的折射率相同($n_a = n_b = n_o = 1.9573 @ 1064 \text{ nm}$)。当具有线偏振特性的激光二极管端面垂直抽运 a 切 Nd:YVO₄ 晶体时,选择抽运效率最高的方向,即抽运光的电场 $E // c$ 轴;由于晶体具有偏振发射特性,1064 nm 的光在腔中往返传播时,电场方向始终是平行于 c 轴的,晶体不表现出双折射效应,发射截面为 $25 \times 10^{-19} \text{ cm}^2 @ 1064 \text{ nm}$ 。对于 c 切晶体,由于 a, b 轴完全等价,只要线偏振光垂直晶面入射(电场 $E \perp c$ 轴),晶体仍不表现出双折射效应,此时的发射截面为 $7 \times 10^{-19} \text{ cm}^2 @ 1064 \text{ nm}$ 。

但是,对于 45° 离轴切割 Nd:YVO₄ 晶体,晶体垂直激光腔轴线放置时, c 轴与激光腔轴线成 θ 角, $\theta = 45^\circ$, 如图 1 所示。 o 光沿激光腔轴线传播, e 光偏离轴线。由于折射率的不同,这两种偏振方向不同的光在激光腔中往返一次会产生光程差约为

$$\Delta = 2(n_e - n_o)h, \quad (1)$$

其中 h 为晶体的厚度。因此,不同偏振方向的 o 光, e 光在纵模频率上会有一些差别,称之为频率分裂。相互分离的 o, e 光构成夹角 ρ , 此夹角同 θ 有密切的关系

$$\rho = \arctan \left[\frac{(n_o^2 - n_e^2) \tan \theta}{n_e^2 + n_o^2 \tan^2 \theta} \right], \quad (2)$$

当入射光束与主轴呈 $\theta = 47^\circ$ 时,有最大夹角 $\rho = 5.8^\circ$ 。对于 45° 切割的 Nd:YVO₄ 晶体来说,两束光夹角接近最大分离角度^[10]。由于两束光在空间上有所分离,所以在增益介质中,虽然 o 光, e 光会争夺被激发的粒子,产生模式竞争,但是较之没有空间分离的情况已经大大减小,完全可能实现双频输出,频率的差别主要取决于晶体的厚度 h 。所以当切割角度变化时,分离的角度 ρ 不同, o 光, e 光在空间上交叠的程度不同,导致模式竞争的强度不同,最终激光器的输出特性会有很大的差别。总之,切割角度可以有效地控制激光器的发射特性。

3 实验及讨论

采用典型的平凹腔结构,如图 2 所示。所使用的抽运源是 2 W 的激光二极管,用冷却系统把温度稳定在 26 °C,这时激光二极管的发射波长正好和 Nd:YVO₄ 的吸收峰相匹配,激光二极管的抽运光通过一组非球面透镜耦合进入激光腔中。 M_1 为一凹面镜(曲率半径为 30 mm),两面镀 808 nm 增透膜,凹面镀 1064 nm 高反膜。Nd:YVO₄ 的厚度为 1 mm,原子数分数为 2.0%, a 切和 45° 切割各一片,两面均镀 808 nm 和 1064 nm 增透膜。 M_2 为耦合输出镜,其透射率根据实验有所改变。实验中,整个激光器的腔长约为 25 mm;光电二极管(Newport 818-BB-30)和示波器(500 MHz, HP-54616C)用来记录激光器的输出。整个实验过程中,所有的激光器都运行在 TEM₀₀ 状态下。激光器在连续运转时,光路中不放置被动调 Q 晶体 Cr⁴⁺:YAG;被动调 Q 运转

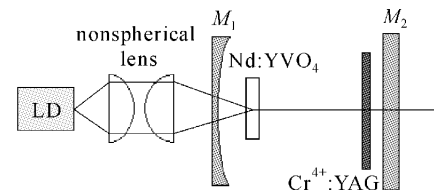


图 2 被动调 Q 实验装置

Fig. 2 Experimental setup for the passively Q-switched Nd:YVO₄ laser

时,插入了一块 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$,其初始透射率为 90%; $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 在插入时紧贴在输出镜上,根据基模高斯光束的传播理论,光束的光腰将在 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 晶体上,使得此处的功率密度最大,饱和吸收体容易被漂白。

图 3 给出的是两种激光器的连续光输出功率随抽运功率的变化,此时输出镜的透射率为 95%。从图中可以看出,两种连续激光器的阈值都很小;在实验中得到的都接近 20 mW。这一点明显有别于 a 切和 c 切: c 切激光器的阈值要比 a 切的高得多^[7]。另外, a 切的激光器的斜率效率为 33%,45°切割的约为 35%。同时发现出射激光有良好的偏振性,偏振消光系数达到了 600:1。两激光器输出光的偏振方向相同。

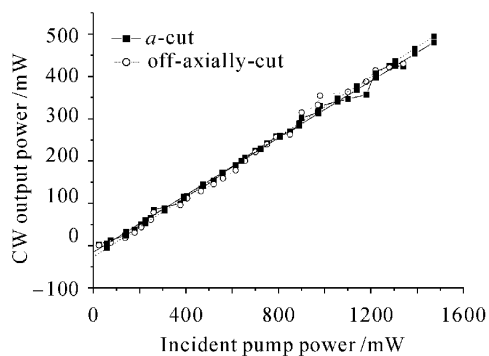


图 3 a 切和 45°切割 $\text{Nd}:\text{YVO}_4$ 连续激光器输出功率与抽运功率之间的关系

Fig. 3 CW laser output power of the a -cut and off-axially-cut $\text{Nd}:\text{YVO}_4$ lasers as a function of the incident pump power

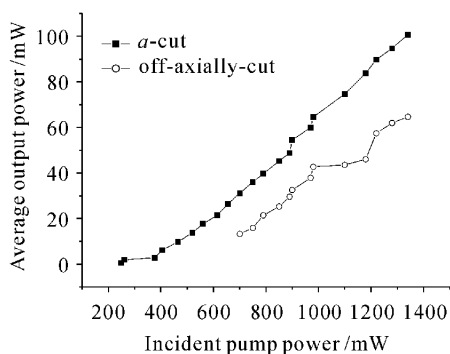


图 4 平均输出功率与抽运功率之间的关系

Fig. 4 Average output power varies with pump power

a 切和 45°切割 $\text{Nd}:\text{YVO}_4$ 激光器运转在被动调 Q 状态下的平均输出功率如图 4 所示。显然,由于激光器运行在调 Q 状态下时,饱和吸收体引入了额外的损耗,包括 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 自身的基态和激发态吸

收、反射引起的损耗、衍射损耗等,所以输出功率要比连续运行时小得多。抽运功率为 1340 mW 时, a 切晶体连续运转激光器最大可以输出 423 mW 的 1064 nm 激光,45°切割的为 430 mW。调 Q 运转时,同样的抽运功率下, a 切 $\text{Nd}:\text{YVO}_4$ 晶体可产生 100 mW 的平均输出功率,45°切的 $\text{Nd}:\text{YVO}_4$ 产生 65 mW。

图 5 至图 8 分别给出了两种晶体被动调 Q 激光器的重复频率、单脉冲能量、脉宽、峰值功率随抽运功率变化的规律。从图中可以看出,离轴切割晶体在被动调 Q 运转方面要优于 a 切晶体。 a 切晶体的重复频率要远高于离轴切割晶体,这导致了其单脉冲能量要比后者小许多;45°切割的晶体的脉宽基本上稳定在 7 ns 左右,这说明 45°切割的晶体激光上能级储存能量的能力要比 a 切的强得多。在最大抽运的

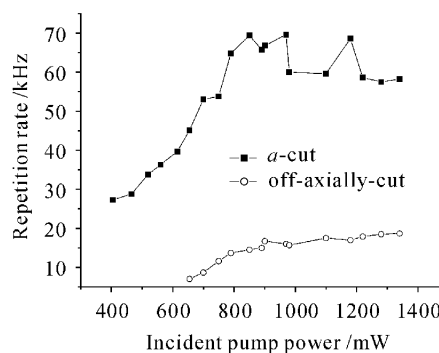


图 5 重复频率随抽运功率的变化

Fig. 5 Q -switched pulse repetition rate varies with the pump power

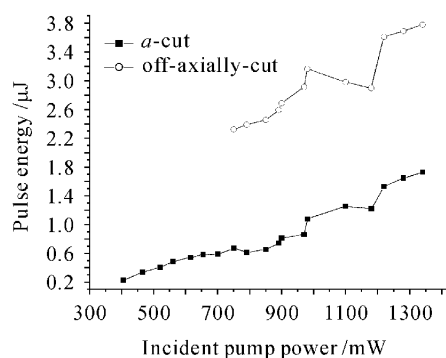


图 6 单脉冲能量随抽运功率的变化

Fig. 6 Single-pulse energy varies with input pump power

时候(1340 mW),对应 18.7 kHz 的重复频率,可以得到接近 0.6 kW 的峰值。需要指出的是:1) 在实验测量范围内,45°切割晶体的峰值功率虽然波动比较大,但是随抽运功率增加很快, a 切晶体的增加相对要缓慢得多;2) 当抽运功率超过 1100 mW 时, a

切的峰值功率似乎趋于稳定,但是 45°切割的却没有这种迹象。如果继续增加抽运功率,45°切割的晶体估计会产生更高的峰值功率。

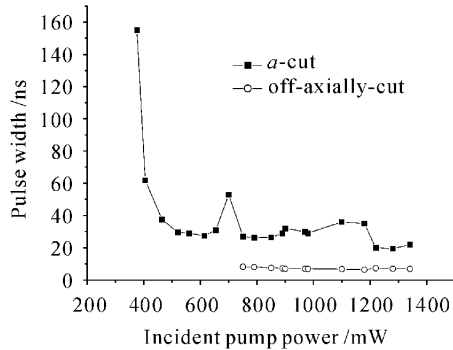


图 7 脉宽与抽运功率的关系

Fig. 7 Q-switched laser pulse width as a function of the incident pump power

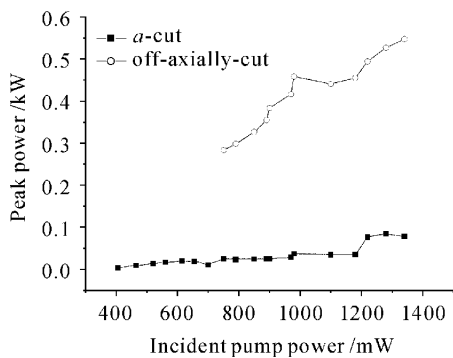


图 8 峰值功率随抽运功率的变化

Fig. 8 Peak power as a function of the incident pump power

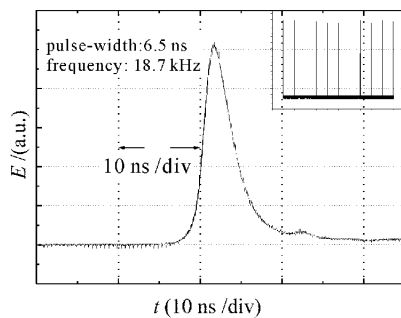


图 9 示波器记录的脉冲包络和脉冲序列

Fig. 9 Pulse profile and Q-switched pulse train of the off-axially cut Nd:YVO₄ laser

图 9 描述了 45°切割晶体在 1340 mW 抽运下的单脉冲包络以及脉冲序列链。此时的重复频率为 18.7 kHz,脉宽为 6.5 ns。Y. F. Chen 等^[7]的关于 a 切与 c 切晶体连续、被动调 Q 实验,与本实验 a 切晶体表现出来的特性基本相符。例如,激光阈值较低,

单脉冲能量在线性增加,脉宽的变化规律也基本相似。这从另一方面也证实了 a 切割和 45°切割晶体实验结论的可信性。

将三者同时比较,45°切割晶体一方面具有 a 切割晶体的部分特性,例如,连续激光器的阈值都比较低;另一方面又具有 c 切晶体的特性,例如,脉宽比较窄而且比较稳定,调 Q 运转时阈值比 a 切的要高一些。

事实上,离轴切割晶体在连续运转时,在激光腔中是可以同时存在两个偏振方向相互垂直的光振荡(o 光,e 光振荡),它们在频率上有一定的差别,这是由于两束光在腔长上有细微差别造成的。但是对于 45°切割晶体,连续运转时,e 光发射截面要远大于 o 光,由于模式竞争,o 光完全被 e 光压制,不能形成振荡。此时,离轴晶体更多地表现出 a 切晶体的特性;较大的发射截面有天然的优势。如果改变晶体的切割角度,选取较小的切割角度,或者将抽运光的偏振方向更倾向 o 光,使 o 光,e 光得到相近的抽运,完全可以实现双频输出;当然实验光路需要进行一定的改造。

而对于被动调 Q 运转,根据第二阈值条件(吸收体的吸收饱和必须发生在激光工作介质增益饱和之前)来判断,较大的激发截面却不利于被动调 Q 运行。假设在激光腔中,输出镜的反射率为 R,增益介质的受激发射截面为 σ ,饱和吸收体的初始透射率和基态吸收截面分别为 T_0 和 σ_{gs} ,则有^[11]

$$\frac{\ln(1/T_0^2)}{\ln(1/T_0^2) + \ln(1/R) + L} \frac{\sigma_{gs}}{\sigma} \frac{A}{A_s} \gg \frac{\gamma}{1-\beta}, \quad (3)$$

其中 L 为非饱和时的往返损耗, A/A_s 为增益介质和饱和吸收体上的光斑之比, γ 为反转因子(对应三能级和四能级系统分别为 2 和 1)^[12], β 为饱和吸收体的激发态吸收截面与基态吸收截面之比。通过(3)式可以看出, A/A_s 和 σ_{gs}/σ 对于被动调 Q 运行很重要。前者依赖于激光器的几何结构,后者则依赖于激光晶体和可饱和吸收体的内在特性。在光腔中分裂的 o, e 两束偏振光, o 光的发射截面更小,更有利于被动调 Q 运转;一旦 o 光得以振荡,将会完全压制 e 光的振荡;因此在被动调 Q 运转时,45°切割晶体更多地表现出 c 切晶体的特性,获得了较高的峰值功率和窄的脉宽。同样地,如果选择合适的切割角度与光腔结构,从理论上讲,也应该可以获得双频脉冲输出。而双频激光器在实际中有着广泛的应用价值,如测速等。

4 结 论

通过比较 a 切和 45° 切割 Nd:YVO₄ 晶体,发现离轴切割晶体在连续运转时,由于 e 光的发射截面较大,更多地表现出 a 切晶体的特征:激光器的光-光转换效率高,阈值较低;而在被动调 Q 运转时,由于 o 光发射截面更小,离轴切割晶体更多地表现出 c 切晶体的特征:脉宽窄、重复频率低、峰值功率高等。通过选择晶体的切割角度,可以控制 o, e 光的竞争程度,实现对脉宽、峰值功率等参量的控制。同时,理论上可以实现双频输出,频率的差别主要取决于晶体的厚度。

参 考 文 献

- Zheng Quan, Zhao Ling, Qian Longsheng. Application and development of high power diode-pumped solid-state laser [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2001, **9**(1):6~9
郑 权,赵 岭,钱龙生. 大功率二极管泵浦固体激光器的应用和发展[J]. *光学精密工程*, 2001, **9**(1):6~9
- Engin Molva. Microchip lasers and their applications in optical microsystems [J]. *Optical Materials*, 1999, **11**:289~299
- Wang Hao, Wang Qingpu, Zhang Xingyu *et al.*. La₃Ga₅SiO₁₄ as active electrooptic Q-switch in a pulsed Nd:LiYF laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(7):939~942
王 浩,王青圃,张行愚等. La₃Ga₅SiO₁₄电光调 Q 的 Nd:LiYF 激光器研究[J]. *光学学报*, 2005, **25**(7):939~942
- Nicolaie Pavel, Takunori Taira, Mitsuyoshi Furuhashi. High-efficiency longitudinally-pumped miniature Nd:YVO₄ laser [J]. *Optics & Laser Technology*, 1998, **30**:275~280
- G. Martel, C. Ozkül, F. Sanchez. Experimental and theoretical evidence of pump-saturation effects in low power end-pumped Nd:YVO₄ microchip laser [J]. *Opt. Commun.*, 2000, **185**:419~430
- M. J. Damzen, M. Trew, E. Rosas *et al.*. Continuous-wave Nd:YVO₄ grazing-incidence laser with 22.5 W output power and 64% conversion efficiency [J]. *Opt. Commun.*, 2001, **196**:237~241
- Y. F. Chen, Y. P. Lan. Comparison between c -cut and a -cut Nd:YVO₄ lasers passively Q-switched with a Cr³⁺:YAG saturable absorber [J]. *Appl. Phys. B*, 2002, **74**:415~418
- Zhiqiang Cai, Wuqi Wen, Yonggang Wang *et al.*. 5.3-W Nd:YVO₄ passively mode-locked laser by a novel semiconductor saturable absorber mirror [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2005, **3**(6):342~344
- Yang Chengwei, Huo Yujing, Yin Xiaodong. Experimental study on LD pumped Nd:YVO₄ laser passively Q-switched by Cr³⁺:YAG [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(1):1~4
杨成伟,霍玉晶,尹晓东. 激光二极管抽运 Cr³⁺:YAG 被动调 Q Nd:YVO₄ 激光器的实验研究[J]. *中国激光*, 2004, **31**(1):1~4
- Suzuki Kenji, Shimomura Katsuhiko, Eda Akira *et al.*. Low-noise diode-pumped intracavity-doubled laser with off-axially cut Nd:YVO₄ [J]. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(20):1624~1626
- G. Xiao, M. Bass. Generalized model for passively Q-switched lasers including excited state absorption in the saturable absorber [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1997, **33**(1):41~44
- J. J. Degnan, D. B. Coyle, R. B. Kay. Effects of thermalization on Q-switched laser properties [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1998, **34**(5):887~899