

文章编号 : 0253-2239(2001)12-1516-03

高功率准连续激光二极管抽运的 Q 开关内腔 倍频固体激光器的研究*

宁继平 詹仰钦 鲁笑春 姚建铨

(天津大学精仪学院, 教育部光电信息技术科学开放实验室, 天津 300072)

摘要: 对高功率准连续激光二极管抽运的声光调 Q 内腔倍频 Nd:YAG 和 Nd:YVO₄ 激光器进行了实验研究, 分别获得了输出功率为 3.5 W 和 3.2 W、输出波长为 532 nm 的激光脉冲, 其重复率达 22 kHz。

关键词: 高功率激光二极管抽运; 声光 Q 开关; 内腔倍频

中图分类号: TN248.1 文献标识码: A

激光二极管抽运的声光调 Q 内腔倍频固体激光器具有效率高、体积小、重复率高、输出 532 nm 绿光等特点, 在激光遥感^[1]、测距、雷达、水下通信^[2]、光学存储等方面有广泛的应用。与相同掺钕浓度的 Nd:YAG 晶体相比, Nd:YVO₄ 晶体有着较大的发射截面、较宽的吸收带宽、较高的吸收系数、较短的上能级寿命以及偏振输出等特点, 因此用激光二极管抽运效率更高, 可在更宽的温度范围下运行, 适用于高重复率激光器。近几年用 Nd:YVO₄ 晶体进行连续激光二极管抽运的全固态高重复率内腔倍频激光器的研究, 已获得平均功率 4.5 W 的绿光输出^[2]。但因 Nd:YVO₄ 晶体的导热性能较差, 对于高重复率高功率的固体激光器, 一般采用 Nd:YAG 晶体。利用 Nd:YAG 晶体, 已有激光器输出达 138 W 及 56 W 绿光的相关报道^[3,4]。本文报道高功率脉冲激光二极管抽运的高重复率声光调 Q 内腔倍频 Nd:YAG 和 Nd:YVO₄ 激光器的研究结果。

1 实验装置与结果

高功率激光二极管抽运的高重复率声光调 Q 内腔倍频 Nd:YVO₄ 激光器的实验装置如图 1 所示。Nd:YVO₄ 晶体为 a 切割, 产生高增益 π 偏振光, 钕离子掺杂的原子数分数为 0.7%, 尺寸为 4 mm × 4 mm × 8 mm, 用铝箔包裹并放在水冷却的铜块上。晶体一端镀对 1064 nm 光高反射膜 ($R > 99%$), 对

808 nm 抽运光镀高透射膜 ($T > 95%$), 另一端镀对 1064 nm 增透膜 ($R < 0.5%$)。声光 Q 开关两通光面镀对 1064 nm 增透膜。M₁ 为对 1064 nm 光高透、对 532 nm 高反的双色介质膜镜, M₂ 为对 1064 nm 光高反、对 532 nm 高透的双色输出介质膜镜。

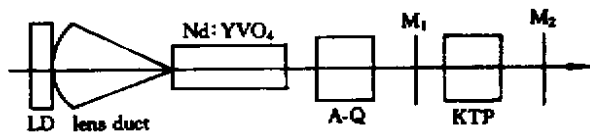


Fig. 1 Experimental setup for the Q -switched intracavity-frequency-doubled Nd:YVO₄ laser

抽运源是占空比为 15% 的 800 W 准连续激光二极管阵列, 发光面积为 4.8 mm × 40 mm, KTP 晶体长 7 mm, 两端均镀对 1064 nm 光增透的多层介质膜。谐振腔为平-平腔结构, 腔长 18 cm, 光学耦合系统采用透镜-导管结构。实验研究了抽运功率、激光二极管的重复率和脉冲宽度、声光 Q 开关的重复率等参数对激光器输出特性的影响。

图 2 表示了声光 Q 开关重复率为 22 kHz, 激光二极管的重复率为 700 Hz 和脉宽为 200 μ s 时, 激光器平均绿光输出功率随入射到 Nd:YVO₄ 晶体上抽运平均功率变化的曲线。可以看出, 激光器平均绿光输出功率随平均抽运功率的增加几乎成线性增长, 当平均抽运功率为 40 W 时, 绿光最大输出功率为 3.2 W, 光-光转换效率为 8%。

图 3 是抽运功率为 40 W、激光二极管的重复率为 700 Hz 和脉宽为 200 μ s 时, 绿光平均输出功率和脉冲宽度随声光 Q 开关重复率变化的曲线。可

* 国家科委 863 高科技项目资助课题。

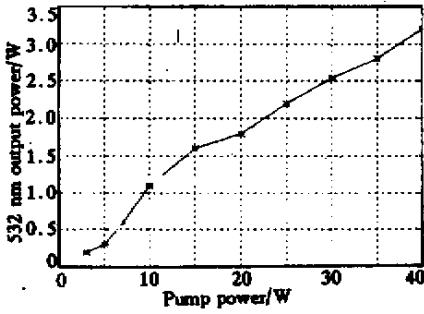


Fig. 2 Average green output power at a 22 kHz pulse repetition rate vs the incident pump power

可以看出, Q 开关重复率较低时, 激光脉宽比较窄, 而单个脉冲能量比较高。在脉冲高重复率时, 每个脉冲能量较低, 脉宽加宽, 但平均功率较高, 脉宽从 2.8 kHz 的 75 ns 增加到 22 kHz 的 100 ns。特别需要指出的是, 激光器在高重复率时输出比较稳定, 平均功率的起伏稳定在 $\pm 2\%$ 。腔内光的峰值功率为 $3 \text{ MW/cm}^2 \sim 10 \text{ MW/cm}^2$, 它低于 KTP 晶体的破坏阈值。当重复率继续增加时, 绿光平均输出功率也随着增加, 重复率达到 50 kHz 左右, 绿光平均输出功率达到最大值, 重复率大于 50 kHz, 绿光平均输出功率不再增加, 基本上达到饱和^[2]。

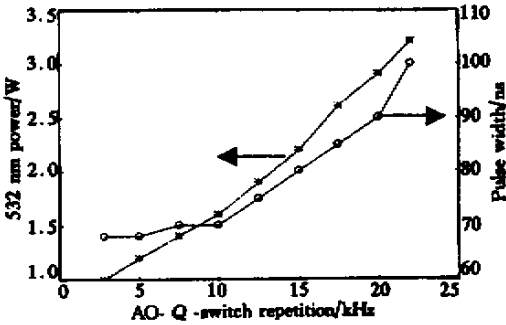


Fig. 3 Average green output power and pulse width vs Q-switched repetition rate

实验中还固定声光 Q 开关重复率为 22 kHz, 激光二极管的脉宽为 200 μs 及输入电流为 50 A, 改变激光二极管的重复率, 来观察激光器平均绿光输出功率的变化情况。当激光二极管的重复率从 50 Hz (平均功率为 2.3 W) 增加到 700 Hz (平均功率为 32.4 W) 时, 激光器平均绿光输出功率基本上呈线性增长, 而其脉冲宽度基本不变。

将 Nd:YVO₄ 晶体换成 $\phi 4 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 的 Nd:YAG 棒, 在与图 2 同样的实验条件时, 激光器绿光平均输出功率为 2 W。为了提高输出功率, 采用如图 4 所示的腔结构, 即在腔内加一个放大的 Nd:YAG 板条, 用 200 W 的激光二极管 LD₂ 侧面抽

运, 原有的 Nd:YAG 棒仍然采用端面抽运方式, 用 600 W 激光二极管 LD₁ 作抽运源, 这样总的抽运功率是不变的。两只激光二极管串联共用一个驱动电源, 以保证同步。当声光 Q 开关重复率为 22 kHz, 激光二极管的重复率为 400 Hz, 脉宽 280 μs , 激光二极管的输入电流为 48 A (平均功率为 24.2 W) 时, 激光器的绿光平均输出功率已达 3.2 W, 光-光效率比没有加放大介质时提高近一倍, 比用 Nd:YVO₄ 晶体作激光介质效率还高一点。继续增大抽运功率, 最大绿光平均输出功率达 3.5 W。如果将放大介质放在腔外进行放大, 只观察到微弱的放大现象。将用作放大的 Nd:YAG 板条放在 Nd:YVO₄ 激光器中, 还未来得及观察激光器的输出情况, 就发现 Nd:YVO₄ 晶体的端面被损坏。如何优化这种情况下的激光器参数, 有待于今后作进一步的深入研究。

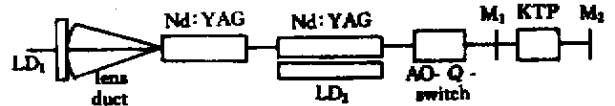


Fig. 4 Experimental setup for the Q-switched intracavity frequency-doubled Nd:YAG laser with amplifier

2 讨 论

声光 Q 开关一般用于连续激光器中, 但本文报道的是高功率准连续激光二极管抽运的声光 Q 开关内腔倍频激光器的实验结果。实验中固定激光二极管的重复率为 700 Hz, 脉宽为 200 μs , 激光二极管的输入电流 50 A, 即固定激光二极管的抽运功率不变, 改变声光 Q 开关的重复率。由于激光二极管的占空比为 15%, 因此输出的激光脉冲并不是间隔相同的脉冲序列, 而是疏密相间的脉冲序列。且因高重复率的声光 Q 开关与低重复率的激光二极管脉冲并不完全同步, 因此激光脉冲的能量与宽度不完全相同, 如图 5 所示。特别是在低重复率时更明显, 如 Q 开关的重复率低于 10 kHz 时, 脉冲之间的差别大, 当 Q 开关的重复率逐渐增加时, 输出激光脉冲间的差距越来越小, 且输出功率提高。当声光 Q 开关的重复率达到 20 kHz 时, 大部分脉冲基本相



Fig. 5 Relation between laser pulses and LD pulses

同。如果激光二极管脉冲与声光 Q 开关同步,并保证每个声光调 Q 脉冲的抽运时间相同时,这种现象就会消除了。

由于 Nd:YVO_4 晶体的宽吸收带及大的受激发射截面,因而转换效率高。但其热导系数小,因而破坏阈值低,限制了抽运功率。对于端面抽运的激光器,最大的抽运功率与吸收系数成反比。

$$P_{\text{lim it}} = 4\pi R(\alpha\xi), \quad (1)$$

式中 ξ 为热负载, α 为对抽运光的吸收系数, R 为热冲击系数,它取决于基质材料的热特性。激光晶体的吸收系数随着掺杂浓度的增加线性增加,对 808 nm 的 π 偏振,吸收经验公式为^[5~7]

$$\alpha = c \cdot \rho^b, \quad (2)$$

式中 ρ 为掺杂质量百分比, b 、 c 为实验常数, $b = 1.5$, $c = 25$ 。由此可见,晶体的掺杂浓度越高,其吸收效率越大,激光器的阈值也就越低。在强光抽运条件下激光器的输出功率:

$$P_{\text{out}} = \eta_p [1 - \exp(-c \cdot \rho^b \cdot l)] (\lambda_p / \lambda) \times \frac{T}{c_1 \rho l + c_2 \sqrt{P_{\text{in}}} + \delta_0 + T} P_{\text{in}}, \quad (3)$$

η_p 为量子效率, P_{in} 为入射到增益介质表面的抽运功率, l 为增益介质长度, λ_p 为抽运光波长, λ 为振荡光波长, δ_0 为衍射及反射不完全等损耗, T 为输出镜透过率, $c_1 = 0.04 \text{ cm}^{-1}$, $c_2 = 0.001 \text{ W}^{-1/2}$ 为实验常数。由(3)式可知,在强光抽运时,低掺杂浓度的晶体更能实现高功率激光输出,为了更好地减少热效应对输出的影响,可适当增加晶体长度。因此,低的钕离子浓度有利于提高晶体的破坏阈值。实验中选用了钕掺杂的原子数分数为 0.7% Nd:YVO_4 晶体,当抽运功率为 40 W 时,发现晶体有轻微的损坏,所以可选用比此浓度更低一点的晶体。

激光晶体中的热致透镜效应使平-平腔结构成

为稳定腔^[8],然而,端面抽运的热致透镜是一个稍有畸变的透镜。理论和实验证明^[2],对于一定的抽运功率,热致衍射损耗是激光振荡模与抽运光斑比的快速增加函数。当抽运功率大于 5 W 时,激光模与抽运光斑最佳比为 0.8 ~ 1.0。一旦产生最佳模匹配,热致透镜效应为激光器提供了稳定的条件。

结论 对高功率准连续激光二极管抽运的声光 Q 开关内腔倍频 Nd:YAG 和 Nd:YVO_4 激光器进行了研究,最大绿光输出功率分别为 3.5 W 和 3.2 W。

参 考 文 献

- [1] Hirano Y, Koyata Y, Yamamoto S *et al.*. 208 W TEM₀₀ operation of a diode-pumped Nd:YAG rod laser. *Opt. Lett.*, 1999, **24**(10):679~681
- [2] Chen Yungfu. High-power diode-pumped Q -switched intracavity frequency-doubled Nd:YVO₄ laser with a sandwich-type resonator. *Opt. Lett.*, 1999, **24**(15):1032~1034
- [3] Konno S, Kojima T, Fujikawa S *et al.*. High-brightness 138 W green laser based on an intracavity-frequency-doubled diode-side-pumped Q -switched Nd:YAG Laser. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(2):189~191
- [4] 姜东升,周寿恒,赵 鸿等. 二极管侧面抽运的高平均功率倍频 Nd:YAG 激光器. *中国激光*, 2001, **A28**(4):301~303
- [5] Sasaki T, Kojima T, Yokotani A *et al.*. Single-mode operation and second-harmonic generation of Nd:YVO₄ microchip lasers. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(21):1665~1667
- [6] Brignon A, Feugnet G, Huignard J P *et al.*. Compact Nd:YAG and Nd:YVO₄ amplifiers end-pumped by a high-brightness stacked array. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1998, **QE-34**(3):577~585
- [7] 李 健,何京良,侯 玮等. Nd³⁺ 掺杂浓度对大功率全固态激光器输出特性影响的研究. *中国激光*, 2001, **A27**(4):298~302
- [8] Zayhowski J J, Mooradian A. Single-frequency microchip lasers. *Opt. Lett.*, 1989, **14**(1):24~26

High-Power Diode-Pumped Q -Switched Intracavity Frequency-Doubled Nd:YVO₄ Laser

Ning Jiping Zhan Yangqin Lu Xiaochun Yao Jianquan

(College of Precision Instrument and Optoelectronics Engng., Tianjin University;

Photoelectronic Information Science and Technology Laboratory, MOE, Tianjin 300072)

(Received 15 January 2001; revised 21 June 2001)

Abstract: High-power quasi-CW diode laser-pumped acoustic-optically Q -switched intracavity frequency-doubled Nd:YAG and Nd:YVO₄ laser are demonstrated. Average power of 3.5 W and 3.2 W at 532 nm with a repetition rate of 22 kHz was generated respectively.

Key words: high-power diode-pumped; acoustic-optically Q -switched; intracavity frequency-doubled