

激光二极管抽运 Nd:YVO₄ 晶体声光 调 Q 1342 nm 激光器

张恒利

(中国科学院力学研究所高温气体动力学开放实验室 北京 100080)

侯 玮 许祖彦

(中国科学院物理研究所光物理实验室 北京 100080)

王建明

(中国科学院物理研究所晶体生长实验室 北京 100080)

吴柏昌

(中国科学院福建物质结构研究所 福建 350002)

提要 报道了激光二极管抽运 Nd:YVO₄ 晶体声光调 Q 的 1342 nm 激光器,在重复频率为 15 kHz 时,获得最大单脉冲能量为 71 μJ,脉宽为 56 ns,峰值功率为 1.27 kW,平均功率达到 1.14 W。利用二类非临界相位匹配的 LBO 晶体腔外倍频,得到约 30 mW 的 671 nm 激光输出。

关键词 声光调 Q, 二极管抽运, Nd:YVO₄, LBO

1 引 言

Nd:YVO₄ 晶体由于其优良的激光性能(吸收系数大、发射截面大、输出线偏振等)而成为近年来研究最多的激光晶体之一,主要的研究工作集中在 1 μm 谱线,然而,1.3 μm 谱线由于与硅光纤传输窗口吻合而具有非常广阔的应用前景。在 1.3 μm 这条谱线上,相对于 Nd:YAG, Nd:YLF 等晶体, Nd:YVO₄ 晶体具有明显的优势,主要表现在其较大的发射截面和分支比。在 Nd:YVO₄ 晶体的 1.3 μm 谱线上,已经报道了许多工作,包括连续^[1~3], 调 Q^[4,5], 被动锁模^[6]等,其中声光调 Q^[5] 在重复频率为 1~10 kHz 时,得到脉宽为 3.3 ns, 峰值功率为 0.8~0.6 kW, 单脉冲能量为 2.6~2.1 μJ 的激光输出。

对 Nd:YVO₄ 晶体 1.3 μm 谱线,我们已经做了一些研究工作,激光二极管抽运连续波输出超过 2 W^[3], 利用 KTP 和 LBO 晶体腔内倍频,分别获得超过 270 mW^[3]和 500 mW^[7]的 671 nm 红光输出。本文报道 Nd:YVO₄ 晶体 1.3 μm 声光调 Q 激光器,在重复频率为 15 kHz 时,获得最大单脉冲能量为 71 μJ, 最短脉宽为 56 ns, 峰值功率为 1.27 kW, 最大平均输出功率达到 1.14 W。利用二类非临界相位匹配的 LBO 晶体腔外倍频,得到约 30 mW 的 671 nm 激光输出。

2 实验装置

实验装置如图 1 所示。抽运源激光二极管为光纤耦合输出, 直径为 1.15 mm, 数值孔径为 0.22, 808 nm 最大输出功率为 15 W。耦合系统物距为 70 mm, 像距约为 50 mm, 这样抽运光斑直径约为 0.82 mm, 该系统耦合效率约为 90%。所用 Nd:YVO₄ 晶体为中国科学院物理研究所生长, 尺寸为 3 mm × 3 mm × 5 mm, *a* 轴切割, 通光长度为 5 mm, Nd 离子掺杂浓度为 0.5 at-%。Nd:YVO₄ 晶体一端面镀 1.34 μm 高反膜(反射率大于 99.5%) 和 808 nm 增透膜(透过率约为 85%), 同时对 1.06 μm 波长的透过率约为 60%, 作为一面腔镜使用; 另一端面镀 1.34 μm 的增透膜(透过率大于 99.5%)。由于抽运功率比较高, 所以在激光器运转过程中, Nd:YVO₄ 晶体利用循环水冷却。谐振腔采用平凹腔型, 腔长约为 90 mm。输出镜曲率半径为 100 mm, 对 1.34 μm 的透过率为 5%, 对 1.06 μm 的透过率大于 80%。

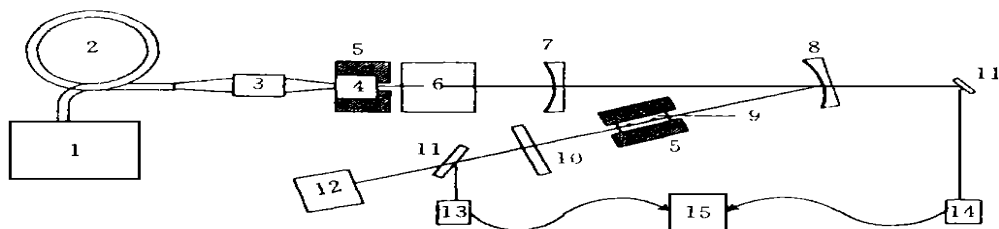


图 1 实验装置图

1: 激光二极管; 2: 光纤; 3: 耦合系统; 4: Nd:YVO₄ 晶体; 5: 温控器; 6: 声光调制器; 7: 输出镜; 8: 聚焦反射镜; 9: LBO 晶体; 10: 滤波片; 11: 玻璃片; 12: 功率计; 13: DET2-SI 快速光电二极管; 14: DET2-GE 快速光电二极管; 15: 示波器

Fig 1 Schematic of the experimental setup

1: diode laser; 2: fibre; 3: coupling system; 4: Nd:YVO₄ crystal; 5: temperature controlling system; 6: A-O Q-switch; 7: output mirror; 8: focus reflector; 9: LBO crystal; 10: filter; 11: plate; 12: power meter; 13: DET2-SI photodiode; 14: DET2-GE photodiode; 15: oscilloscope Vp-5530B

声光调 Q 元件为 ZF6 玻璃, 作用长度 $L = 36$ mm。实验测得其对 1.34 μm 激光的静态单次透过率为 97.8%, 一级衍射效率为 80%。LNbO₃ 声光换能器的超声频率 $f_0 = 40$ MHz, 调制重复频率在 5~20 MHz 可调, 调制脉冲上升沿 < 250 ns, 调制宽度为 5~7 μs。声光调制器在腔内靠近 Nd:YVO₄ 晶体放置。声光调 Q 输出的 1.34 μm 激光脉宽用型号为 DET3-GE DC-100 MHz 的锗快速光电二极管探测。再利用 300 MHz 示波器测量。

3 实验结果

在重复频率为 2 kHz, 5 kHz, 10 kHz 和 15 kHz 时, 测量了调 Q 输出的平均功率和脉宽(见图 2~4)。利用公式 $E = P_{\text{aver}}/f$, 可由平均功率计算出单脉冲能量 E , 继而由公式 $P_{\text{peak}} = E/\Delta t$, 可计算出单个光脉冲的峰值功率。图 2 为在不同重复频率下, 调 Q 输出的平均功率随抽运功率的变化关系。图 3 为单脉冲能量与抽运功率的变化关系。图 4 为不同重复频率下脉宽与抽运功率的变化关系。图中点为实验点, 实线为拟合曲线(图 5, 图 6 同), 其中横坐标的注入抽运功率为经耦合系统后的抽运功率, 没有计及晶体前表面对入射光的反射。由图 2 和图 3 可以看出, 对应同样的抽运功率, 在较高的重复频率时, 平均输出功率也较高, 效率也较高, 但单脉冲能量则在重复频率较低时比较高。在重复频率为 15 kHz, 抽运功率为 7.8 W 时, 得到最大平均

输出功率为 1.14W, 转换效率为 14.6%; 最大单脉冲能量为 71 μJ。而图 4 则显示出, 在重复频率一定时, 脉宽随抽运功率的增加而减小; 在同样的抽运功率下, 脉宽随重复频率的增大而增大。这与理论计算^[8]的变化趋势是一样的。在重复频率为 15 kHz, 抽运功率为 7.8W 时, 得到最短脉宽为 56 ns, 最高峰值功率达到 1.27 kW。

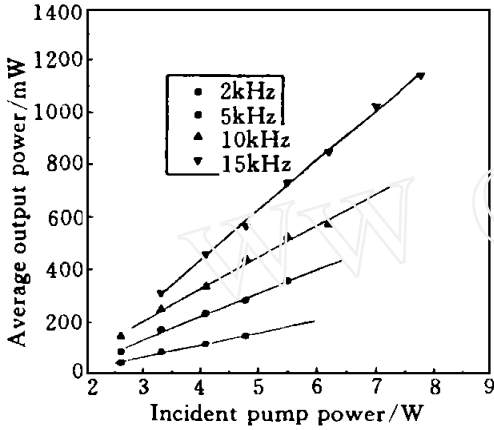


图 2 重复频率不同时, 平均输出功率与抽运功率的关系

Fig. 2 A average power as a function of pump power at different repetition rates

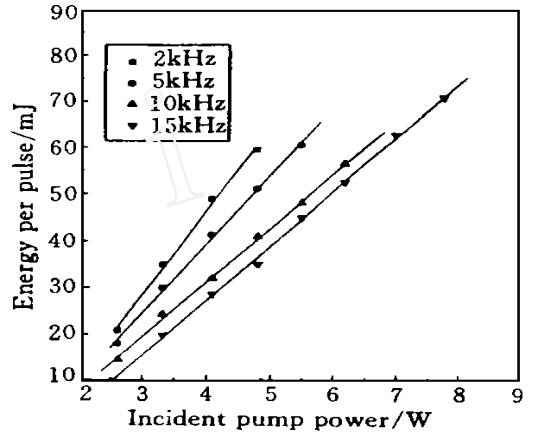


图 3 重复频率不同时, 单脉冲能量与抽运功率的关系

Fig. 3 Energy per pulse as a function of pump power at different repetition rates

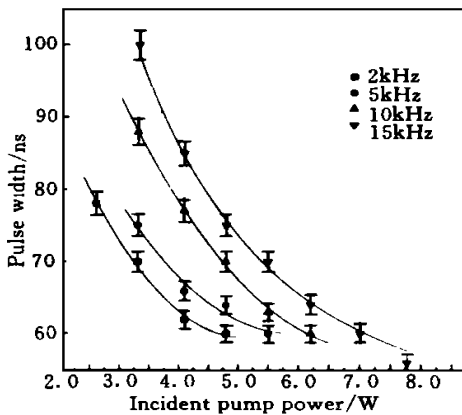


图 4 重复频率不同时, 脉宽与抽运功率的关系

Fig. 4 Pulse width as a function of pump power at different repetition rates

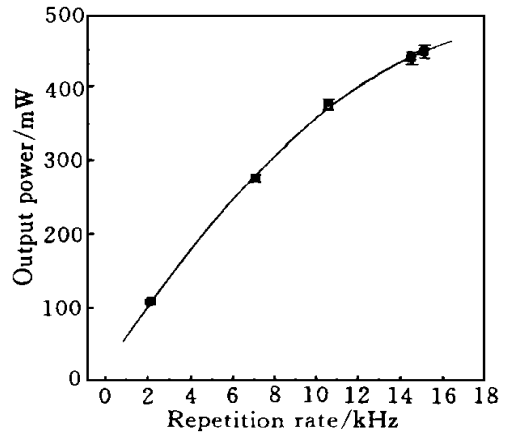


图 5 抽运功率为 4W 时, 平均输出功率与重复频率的关系

Fig. 5 A average power as a function of repetition frequency at an incident pump power of 4W

图 5 为抽运功率稳定在约 4W 时, 调 Q 输出平均功率与重复频率的关系。图中随着脉冲重复频率的增加, 平均输出功率也逐渐增加, 并逐渐趋于饱和。图 6 为在该抽运功率下, 输出单脉冲能量和脉宽与重复频率的变化关系。其中在单脉冲能量与重复频率的变化关系的拟合过程中采用了 $E = [1 - \exp(-1/\tau)]$ 这一关系^[9]。从图中我们可以看到, 在抽运功率不变的情况下, 随着调 Q 激光输出重复频率的提高, 单脉冲能量迅速减小, 而脉宽增加。这与图 3, 图 4

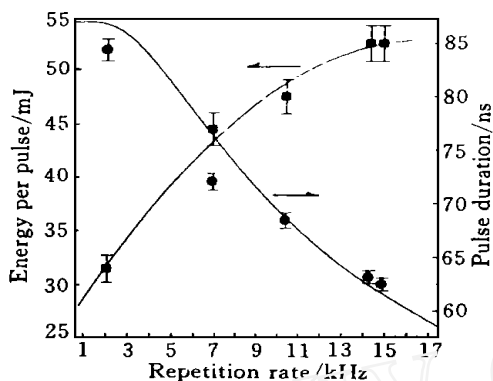


图6 抽运功率为4W时,脉宽与重复频率的关系

Fig. 6 Pulse duration and energy per pulse as a function of repetition rate under an incident pump power of 4 W

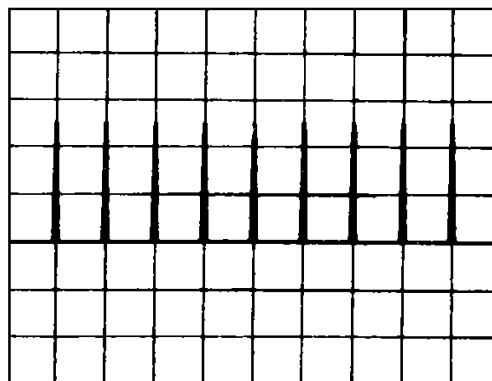


图7 抽运功率为4W,重复频率为10kHz时示波器显示的脉冲序列

Fig. 7 Oscilloscope traces of a train of pulses at 10 kHz with an input pump power of 4 W

中的结果是一致的。

利用示波器对不同抽运功率、不同调制频率下的调 Q 脉冲波形进行观察,发现对于实验中具体的谐振腔型,在抽运功率较低时,输出不是很稳定,而在抽运功率比较高时,脉冲输出非常稳定,在示波器上可以观察到等间距的调 Q 脉冲序列输出。图7为在重复频率约为10kHz,抽运功率为4W时,调 Q 输出脉冲序列在示波器上的形状。

在基频光平均功率为880mW,脉宽为70ns,重复频率为19kHz,相当于单脉冲能量约为46 μ J,峰值功率为662W时,利用LBO晶体进行了腔外倍频实验。在距输出镜约100mm处,用曲率半径为200mm的凹面全反镜将调 Q 输出的基频光聚焦后,入射到LBO晶体上。LBO晶体尺寸为3mm \times 3mm \times 17mm,两端镀1.34 μ m增透膜,采用I类非临界相位匹配方式,通过温度控制,使LBO晶体温度稳定在匹配温度39.6 $^{\circ}$ C(控温精度 \pm 0.1 $^{\circ}$ C)。调 Q 输出1.34 μ m激光单次通过LBO晶体后,得到约30mW的红光输出(测量时,用滤波片滤掉红外光),转换效率约为3.4%;利用DET2-SIDC-350MHz快速光电二极管及示波器测量,脉宽为40ns。在倍频晶体处,基频光的光斑半径约为100 μ m,功率密度约为2~3MW/cm 2 。

在上面的工作中,1342nm激光获得的最短脉宽为56ns。进一步减小腔长将会缩短脉宽,文献[5]中能获得脉宽为3.3ns的短脉冲与其采用7mm长的腔长有很大关系。但腔长过短,在较大功率抽运时,对于我们所采用的平凹腔型将不易关断腔内的振荡激光,因此改用平平腔或平凸腔将会得到更短的脉冲输出,并可在允许的条件下,进一步加大抽运功率,另外,缩小抽运光斑,提高抽运光功率密度,减小阈值,提高初始粒子反转数与阈值粒子反转数之比,这样必将获得单脉冲能量更大,峰值功率更高的调 Q 脉冲输出。在进行腔外倍频时,倍频效率也将得到较大提高。

参 考 文 献

1 G. C. Bowkett, G. W. Baxter, D. J. Booth *et al.*. Single-mode 1.34- μ m Nd:YVO $_4$ microchip laser with cw Ti:sapphire and diode-laser pumping *Opt Lett*, 1994, **19**(13): 957~ 959

2 R. S. Conroy, A. J. Kemp, G. J. Friele *et al.*. Microchip Nd:vanadate lasers at 1342 and 671 nm. *Opt*

- Lett*, 1997, **22**(23): 1781~ 1783
- 3 He Jingliang, Zhang Hengli, Hou Wei *et al.* Generation of cw radiation of 273 mW at 671 nm from a diode-pumped intracavity-doubled Nd:YVO₄ laser. *Chin. Phys. Lett.*, 1998, **15**(5): 343~ 344
 - 4 R. Fluck, B. Braun, E. Gini *et al.* Passively Q-switched 1.34- μ m Nd:YVO₄ microchip laser with semiconductor saturable-absorber mirrors. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(13): 991~ 993
 - 5 H. Plaessmann, K. S. Yamada, C. E. Rich *et al.* Subnanosecond pulse generation from diode-pumped acousto-optically Q-switched solid-state lasers. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(33): 6616~ 6619
 - 6 R. Fluck, G. Zhang, U. Keller *et al.* Diode-pumped passively mode-locked 1.3- μ m Nd:YVO₄ and Nd:YLF lasers by use of semiconductor saturable absorbers. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(17): 1378~ 1380
 - 7 Zhang Hengli, He Jingliang, Chen Yuchuan *et al.* Diode pumped Nd:YVO₄ laser emitting at 1342 nm and 671 nm. *Acta Physica Sinica* (物理学报), 1998, **47**(9): 1579~ 1584 (in Chinese)
 - 8 Liu Jinghai, Xu Rongfu. Device and Technology of Lasers. Beijing: Express of University of Beijing Science and Engineering, 1995. 161 (in Chinese)
 - 9 A. E. Siegman. Lasers. Calif: University Science, Mill Valley, 1986. 1008~ 1010

Diode Pumped High Repetition Rate Q-switched Nd:YVO₄ 1342 nm Laser

Zhang Hengli

(Laboratory of High Temperature Gas Dynamics, Institute of Mechanics,
The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

Hou Wei Xu Zuyan

(Laboratory of Optical Physics, Institute of Physics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

Wang Jianming

(Laboratory of Crystal Growth, Institute of Physics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

Wu Baichang

(Fujian Institute of Research on the Structure of Matter, The Chinese Academy of Sciences, Fujian 350002)

Abstract An acousto-optically Q-switched diode-pumped Nd:YVO₄ 1342 nm laser emits short pulses at kilohertz repetition rates. The laser generates a maximum average power of 1.14 W, peak power of 1.27 kW and pulse width of 56 ns (FWHM) at a pulse repetition rate of 15 kHz. With a LBO crystal as the frequency doubler outside the cavity, about 30 mW of 671 nm laser output is obtained.

Key words A-O Q-switch, diode pump, Nd:YVO₄, LBO