

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%。

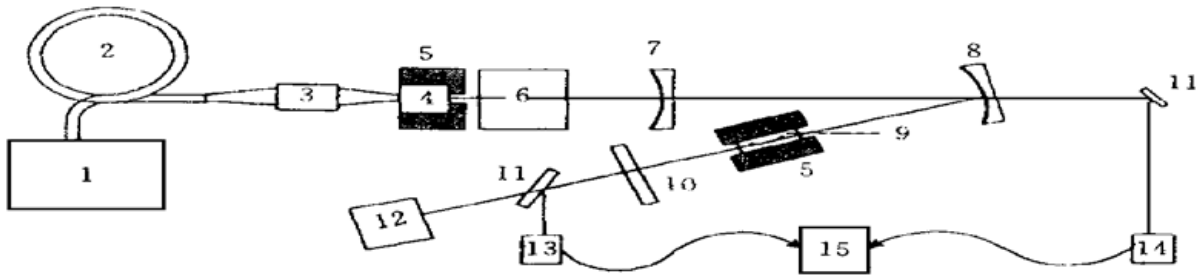


图 1 实验装置图

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: 聚集反射镜;
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%。LiNbO₃ 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 1.14 W, 转换效率为 14.6%; 最大单脉冲能量为 71 μ J。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 7.8 W 时, 得到最短脉宽为 56 ns, 最高峰值功率达到 1.27 kW。

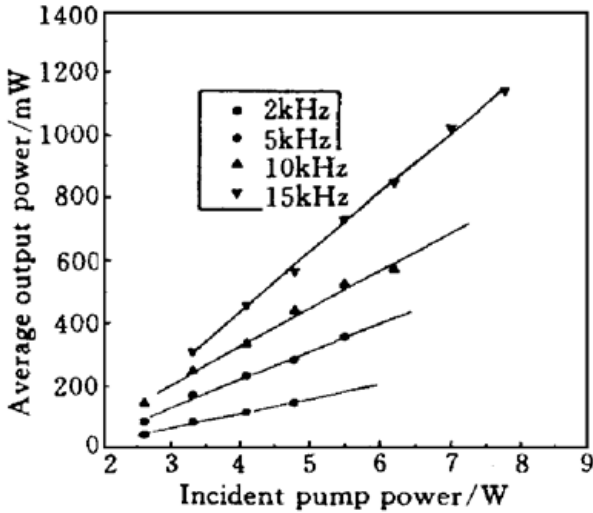


图 2 重复频率不同时, 平均输出功率与抽运功率的关系

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

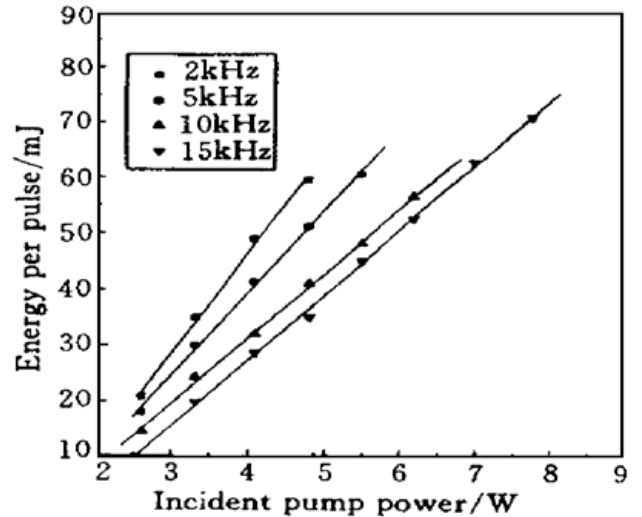


图 3 重复频率不同时, 单脉冲能量与抽运功率的关系

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

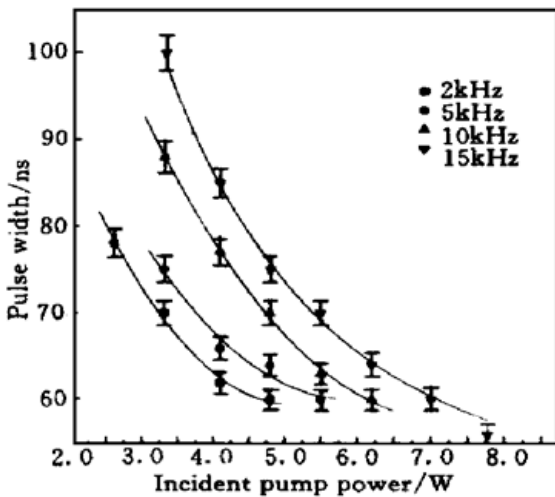


图 4 重复频率不同时, 脉宽与抽运功率的关系

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

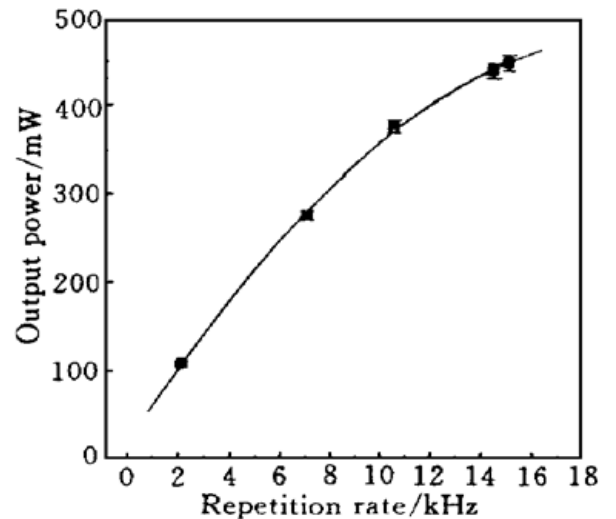


图 5 抽运功率为 4 W 时, 平均输出功率与重复频率的关系

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

图 5 为抽运功率稳定在约 4 W 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 $E \propto [1 - \exp(-1/\tau f)]$ 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

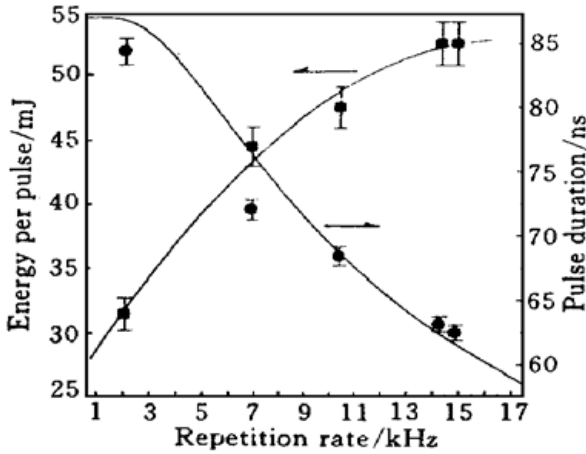


图 6 抽运功率为 4 W 时,脉宽与重复频率的关系

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

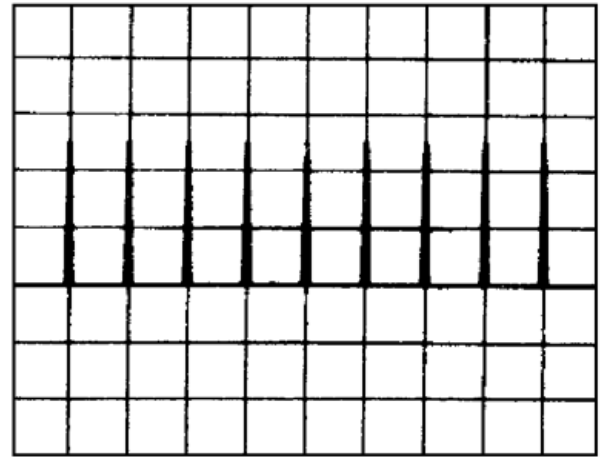


图 7 抽运功率为 4 W,重复频率为 10 kHz 时示波器显示的脉冲序列

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 10 kHz,抽运功率为 4 W 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 880 mW,脉宽为 70 ns,重复频率为 19 kHz,相当于单脉冲能量约为 46 μJ,峰值功率为 662 W 时,利用 LBO 晶体进行了腔外倍频实验。在距输出镜约 100 mm 处,用曲率半径为 200 mm 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 3 mm × 3 mm × 17 mm,两端镀 1.34 μm 增透膜,采用一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℃处(控温精度 ±0.1℃)。调 Q 输出 1.34 μm 激光单次通过 LBO 晶体后,得到约 30 mW 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-SI DC-350 MHz 快速光电二极管及示波器测量,脉宽为 40 ns。在倍频晶体处,基频光的光斑半径约为 100 μm,功率密度约为 2~ 3 MW/cm²。

在上面的工作中,1342 nm 激光获得的最短脉宽为 56 ns。进一步减小腔长将会缩短脉宽,文献[5]中能获得脉宽为 3.3 ns 的短脉冲与其采用 7 mm 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-μm Nd:YVO₄ 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. Friel *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