

# 二极管激光泵浦的微型绿光调 $Q$ $\text{Nd} \cdot \text{YVO}_4$ 激光器

唐 淳 丁有义 杨森林 杨成龙

(中国工程物理研究院流体物理研究所 成都 610003)

**提要** 介绍了一种高效率腔内倍频及调  $Q$   $\text{Nd} \cdot \text{YVO}_4$  激光器。激光器的  $Q$  开关工作是通过一块腔内 KTP 晶体实现的, 该晶体同时用作倍频晶体, 实现  $\pi$  类相位匹配。连续工作情况下, 在泵浦功率 800 mW 时, 得到 115 mW 的绿光输出, 光-光转换效率为 14.4%。调  $Q$  工作时, 获得脉宽为 5.45 ns, 峰值功率为 74 W 的脉冲绿光, 工作频率为 100 Hz。

**关键词** 腔内倍频,  $Q$  开关, 二极管激光泵浦,  $\text{Nd} \cdot \text{YVO}_4$  激光器

## 1 引 言

近年来, 二极管激光(LD)泵浦的固体激光器(DPL)发展迅速, 器件水平不断提高, 引起了人们极大的关注。中小功率微型蓝绿光固体激光技术因在光存储、显示、信息处理、激光照排、准直、水下通讯、娱乐等方面有广泛的应用, 成为研究开发的热点之一。由于直接激发蓝绿光难以实现, 如今的蓝绿激光均是通过非线性晶体倍频近红外激光而得到的。腔内激光基波功率比腔外大  $1/T$  倍( $T$  为输出镜的透过率), 采用内腔倍频, 且通过调  $Q$  工作在准连续方式, 可以大大提高倍频效率。

针对 DPL 激光的倍频和调  $Q$  技术人们已做了大量的研究工作<sup>[1,2]</sup>, 但大部分都是用两块不同的晶体分别实现倍频及调  $Q$ , 一般腔内还需要偏振元件。本文充分利用 KTP 晶体的光学效应及电光效应, 使其在用作倍频晶体的同时充当电光调  $Q$  器件, 在 LD 泵浦  $\text{Nd} \cdot \text{YVO}_4$  激光腔内采用单个 KTP 晶体成功地实现了倍频及调  $Q$ 。由于减少了腔内插入元件, 降低了损耗, 有效地提高了激光效率。该技术在器件小型化、简单化方面也有重要意义。

## 2 理论分析

KTP 晶体作为倍频晶体已广泛用于  $1.064 \mu\text{m}$  准连续激光内腔倍频及脉冲激光的外腔倍频。除了优良的非线性光学性能外, 它还具有大的线性电光系数和低的介电常数, 使其可以用作电光调制器及  $Q$  开关<sup>[3,4]</sup>。实验中我们选用  $\text{Nd} \cdot \text{YVO}_4$  作为激光增益介质。因为沿  $a$  轴切割的  $\text{Nd} \cdot \text{YVO}_4$  晶体具有偏振辐射特性(偏振方向平行于晶体  $c$  轴), 这不仅有利于内腔倍频, 而且还可省去腔内偏振元件。令  $a$  轴切割的  $\text{Nd} \cdot \text{YVO}_4$  的  $c$  轴与按  $\pi$  类相位匹配切割的 KTP 晶

体的  $c$  轴成  $45^\circ$  夹角, 则偏振光分解成数值相等、互相正交的快光和慢光两个分量。首先, 在 KTP 晶体不加电场时, 通过调节它的入射角及温度, 使其作用为  $\lambda/4$  波片, 基波因 Nd:YVO<sub>4</sub> 偏振辐射特性被有效地抑制, 谐振腔处于高损耗状态, 无激光输出。此时, 当一脉冲高压 ( $\lambda/4$  波电压) 沿 KTP 晶体  $c$  轴加于 KTP 晶体上, 则 KTP 的主轴折射率发生改变, 并使 KTP 工作为  $\lambda/2$  波片, 从而获得调  $Q$  脉冲输出。对于长 5 mm, 厚 1 mm ( $c$  轴方向) 的 KTP 晶体,  $\lambda/4$  波电压理论值为 716 V。在此电压下, 二次谐波相移为  $\delta_s = 0.358\pi$ , 相应的相位失配量小于最大允许失配量, 此时三波互作用的效率为最大值的 64%。这说明通过对腔内偏振态的控制, 在用 KTP 晶体实现电光调  $Q$  的同时, 二次谐波的相匹配条件仍能满足。

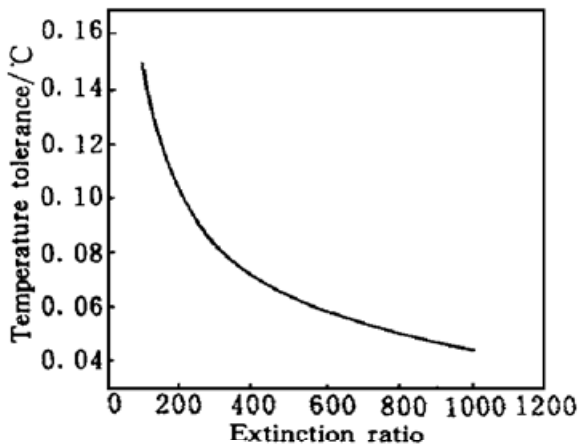


图 1 温度精度与消光比的关系

Fig. 1 Temperature control tolerance as a function of extinction ratio

KTP 晶体的自然双折射对温度极为敏感, 小的温度变化就会改变晶体的主折射率, 导致相位失配, 倍频效率降低。在调  $Q$  时, 由于腔内偏振态遭到破坏, 使  $Q$  开关难以关严。偏转 KTP 晶体角度可以部分补偿温升的影响, 但由于晶体的偏转将造成腔内过多的反射损耗, 降低了倍频输出功率, 故应采取冷却措施, 以降低晶体中的温升。为此, 我们根据要求的消光比计算出相应的相移和温度控制精度。图 1 示出了长为 5 mm 的 KTP 晶体消光比与温控精度的关系曲线。可见, 温控精度要求是较苛刻的。电光效应引起的折射率变化与温度变化对折射率的影响相比甚微, 故用 KTP 调  $Q$  时, 可将两者结合起来, 既温控作粗调, 沿 KTP 晶体  $c$  轴加直流电场作细调, 充分

消除自然双折射的影响, 使  $Q$  开关能够关严。实验中, 将 KTP 晶体安装于半导体制冷片上进行控温, 控温精度  $\leq \pm 0.1^\circ\text{C}$ 。

### 3 实验与结果

#### 3.1 实验装置

LD 端泵浦 Nd:YVO<sub>4</sub> 内腔倍频调  $Q$  激光实验装置如图 2 所示。泵浦源是连续功率为 1 W 的线阵激光二极管, 中心波长为 808 nm, 发光尺寸为  $1\ \mu\text{m} \times 100\ \mu\text{m}$ 。激光晶体 Nd:YVO<sub>4</sub> 掺钕浓度为 1 at-%, 尺寸为  $3\ \text{mm} \times 3\ \text{mm} \times 1\ \text{mm}$  (通光方向), 沿  $a$  轴切割。KTP 晶体尺寸为  $1\ \text{mm}$  ( $c$  轴方向)  $\times 3\ \text{mm} \times 5\ \text{mm}$  (通光方向)。Nd:YVO<sub>4</sub> 的  $c$  轴与 KTP 的  $c$  轴相交  $45^\circ$ 。谐振腔为平凹腔。为了提高泵浦光能利用率以及使器件微型化和简单化, 一方面, LD, Nd:YVO<sub>4</sub> 及 KTP 三者间尽可能靠近, LD 与 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体之间采用紧贴直接耦合, 没有耦合光学系统; 另一方面, 对各元件镀的膜层作了特殊要求。Nd:YVO<sub>4</sub> 晶

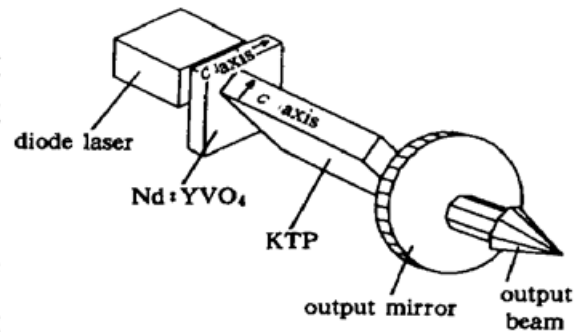


图 2 LD 泵浦的 Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器腔内倍频及调  $Q$  实验装置

Fig. 2 Schematic diagram of the intracavity  $Q$ -switched and frequency doubled Nd:YVO<sub>4</sub> laser pumped by a diode laser

体泵浦光入射面镀 808 nm 增透膜, 透过率  $T > 95\%$ ; 1.064  $\mu\text{m}$ , 0.532  $\mu\text{m}$  的全反膜, 反射率分别为 99.8%, 99%, 另一面镀 1.064  $\mu\text{m}$ , 0.532  $\mu\text{m}$  的增透膜。KTP 晶体通光面镀 1.064  $\mu\text{m}$ , 0.532  $\mu\text{m}$  的增透双色膜。

### 3.2 激光连续工作特性

为了研究 Nd·YVO<sub>4</sub> 激光的基本特性, 首先在没有 KTP 晶体时进行实验。输出镜曲率半径为 155 mm, 对 1.064  $\mu\text{m}$  的反射率为 97.6%, 腔长为 70 mm。在泵浦功率为 960 mW 时, 获得 428 mW 的 1.064  $\mu\text{m}$  激光输出, 光-光效率达 44.6%, 激光阈值为 130 mW, 斜效率为 51.6%, 输出激光束是圆对称的。输出功率与泵浦功率关系曲线如图 3 所示。

将 KTP 晶体放入腔内进行倍频实验。此时的输出镜曲率半径为 50 mm, 其中凹面镀 1.064  $\mu\text{m}$  全反膜, 反射率为 99.9%, 0.532  $\mu\text{m}$  的增透膜, 透过率  $> 99.6\%$ ; 平面镀 0.532  $\mu\text{m}$  增透膜。激光腔腔长为 20 mm, 基膜束腰约为 90  $\mu\text{m}$ 。采用短腔是为了减小激光光斑尺寸, 增大功率密度, 提高倍频效率。在泵浦功率为 800 mW 时, 得到 115 mW 的绿光输出, 光-光效率

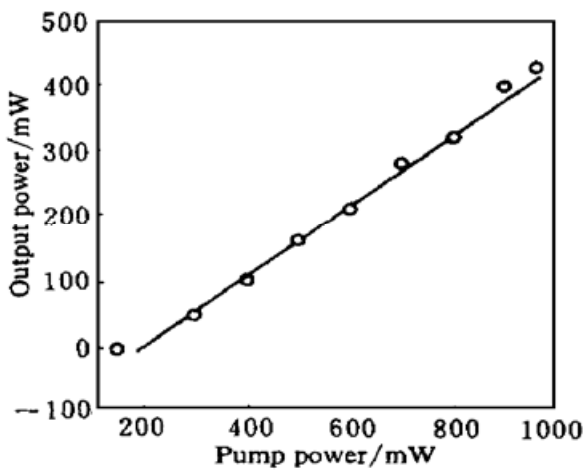


图 3 基波输出功率与输入泵浦功率关系曲线  
Fig. 3 Fundamental wave output power as a function of the incident pump power

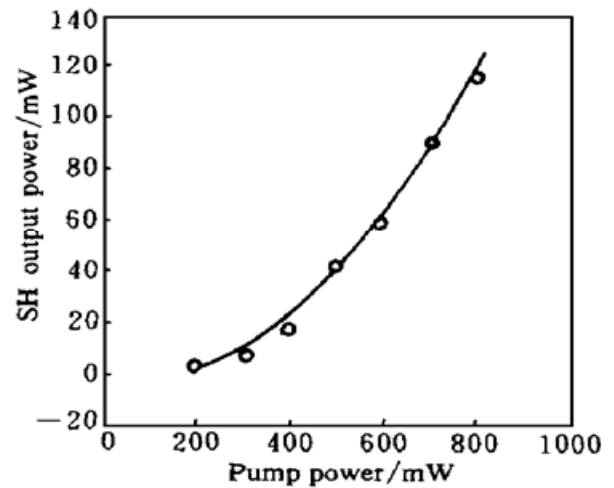


图 4 绿光输出功率与输入泵浦功率关系曲线  
Fig. 4 Green output power as a function of the pump power

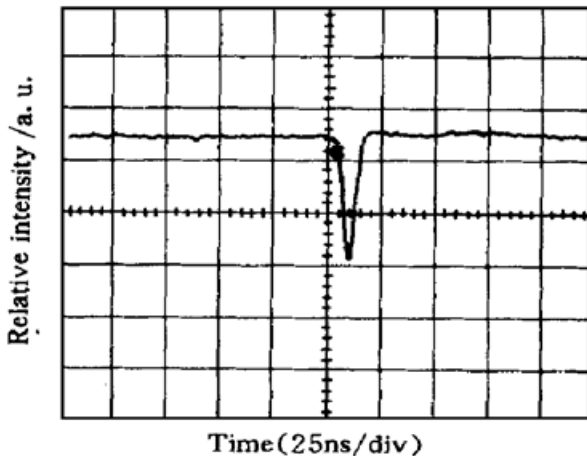


图 5 倍频及调 Q Nd·YVO<sub>4</sub> 激光波形  
Fig. 5 Pulse profile of the frequency doubled and Q-switched Nd·YVO<sub>4</sub> laser

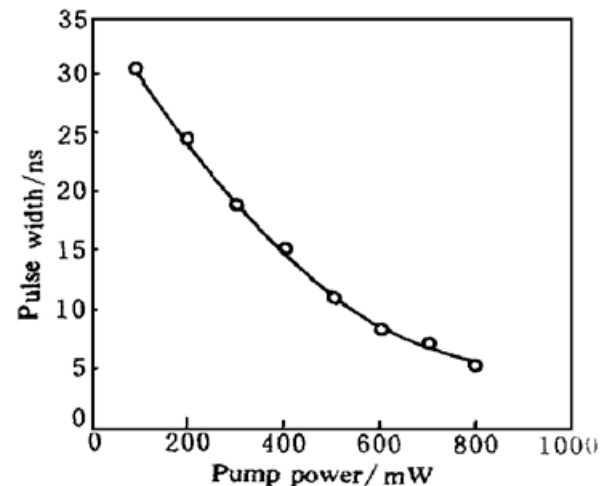


图 6 激光脉宽与泵浦功率关系曲线  
Fig. 6 Pulse width vs pump power

为 14.4%。二次谐波功率与泵浦功率关系示于图 4。

### 3.3 调 $Q$ 工作特性

在垂直于 KTP 晶体  $c$  轴的两个面(3 mm × 5 mm)上镀金属电极,用于加脉冲高压改变腔内基波的偏振特性。由于 KTP 晶体具有离子导电性,故所加高压脉宽仅为 300 ns,脉冲上升沿为 26 ns。调  $Q$  实验时,首先在没有加电压的情况下调节 KTP 晶体的入射角和温度,使其工作为  $\lambda/4$  波片,然后加上调  $Q$  电压,工作频率为 20~ 100 Hz 连续可调。当所加电压为 740 V 时,获得理想的调  $Q$  脉冲激光,这与理论计算的结果 716 V 吻合较好。在泵浦功率为 800 mW 时,获得最大的调  $Q$  倍频光输出,单脉冲能量为 0.405  $\mu$ J,脉宽为 5.45 ns,此时,调  $Q$  绿光的峰值功率为 74 W,是连续输出功率的 640 倍。图 5 是输出激光的波形。随着泵浦功率的增加,脉宽从 30.5 ns 减小到 5.45 ns,脉冲宽度与泵浦功率关系如图 6 所示。

### 参 考 文 献

- 1 Chen Youming, Zhou Fuzheng, Hu Wentao *et al.*. Prelase single longitudinal mode  $Q$ -switched Nd:YAG laser pumped by a diode-laser-array. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1995, **15**(1): 42~ 46 (in Chinese)
- 2 Li Chuandong, Hu Wentao, Zhou Fuzheng *et al.*. TEM<sub>00</sub> mode, high-repetition rate  $Q$ -switching of LD pumped Nd:YVO<sub>4</sub> lasers. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 1996, **23**(2): 97~ 101 (in Chinese)
- 3 M. Bass. Electrooptic  $Q$  switching of the Nd:YVO<sub>4</sub> laser without an intracavity polarizer. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1975, **QE-11**(12): 938~ 941
- 4 Takunori Taira, Takao Kobayashi.  $Q$ -switching frequency doubling of solid-state laser by a single intracavity KTP crystal. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1994, **30**(3): 800~ 804

## Miniature Green $Q$ -switched Nd:YVO<sub>4</sub> Laser Pumped by Diode Laser

Tang Chun Ding Youyi Yang Senlin Yang Chenglong

(Institute of Fluid Physics CAEP, Chengdu 610003)

**Abstract** A highly efficient diode-laser-pumped intracavity frequency doubled and  $Q$ -switched Nd:YVO<sub>4</sub> laser is presented.  $Q$ -switched operation of the laser was realized by using an intracavity KTP crystal, which was also used as a frequency doubling crystal in type  $\bar{1}$  phase matching for generating green laser. In CW operation, a green output of 115 mW and optical-to-optical conversion efficiency of 14.4% were observed at 800 mW pump power. In  $Q$ -switch operation, a pulse width of 5.45 ns and a peak power of 74 W of the green laser were achieved at a 100 Hz repetition rate.

**Key words** intracavity frequency doubling,  $Q$ -switching, diode-laser pumping, Nd:YVO<sub>4</sub> laser