

新型电光调 Q 腔内倍频绿光激光器

陈 飞, 霍玉晶, 何淑芳, 冯立春

(清华大学电子工程系, 北京 100084)

[摘要] 本文报道了一种新型的 LD 泵浦 Nd:YVO₄-KTP 电光调 Q 绿光激光器, 用单块 KTP 晶体同时作为电光调 Q 开关和 II 类相位匹配的倍频晶体, 减少了腔内损耗, 提高了效率, 得到了脉宽为 12 ns 的绿光脉冲序列。激光器采用纵向同轴泵浦方式、独特的整体控温技术和小焦距非球面聚焦透镜, 并把全部元件固化为一个整体, 进一步提高了器件的效率、激光的输出功率和光束方向的稳定性。

[关键词] KTP; 绿光激光器; 电光调 Q 开关; 倍频

1 引言

0.53 μm 绿光激光器由于其具有波长短、光子能量高、在水中传输距离远和对人眼敏感等优点, 在科学研究、国防建设和国民经济的许多领域有重要的应用, 因而成为各国研究的重点^[1,2]。LD 泵浦的调 Q 全固态绿光激光器具有光束质量好、能量转换效率高、体积小、寿命长、使用方便等优点, 因而成为其它种类的绿光激光器的换代产品。国外已经有类似商品出售, 但其价格、体积、光束质量及光束方向稳定性方面仍需改进。研制高性能的微型调 Q 绿光激光器, 降低成本, 提高器件性能是努力的方向之一。

本文报道了一种新型的 LD 泵浦 Nd:YVO₄-KTP 微型调 Q 绿光激光器。采用纵向同轴泵浦方式、独特的整体控温技术和小焦距非球面聚焦透镜, 并把全部元件固化为一个整体, 从而提高了激光的输出功率和光束方向稳定性。其中 KTP 晶体既作为电光调 Q 开关, 又同时作为倍频晶体, 降低成本, 减少腔内损耗, 提高器件的效率。

2 KTP 同时倍频调 Q 的理论分析

KTP 作为一种高效非线性晶体在各种频率转换的领域中起着越来越重要的作用。这主要是因为 KTP 晶体有高非线性系数、大匹配角度、高损坏阈值和相位匹配的热稳定性等, 同时又具有大的线性电光系数、不易潮解、不受压电效应的影响、透过波长范围宽等优点, 这使得 KTP 晶体在电光方面的应用也有很广阔的前景^[3]。

在一般情况下, KTP 作为 1.06 μm 红外光的倍频晶体时, 是沿 $\theta=90^\circ$ 、 $\varphi=23.6^\circ$ 角度切割, 光波沿这个方向传播时倍频效率最高。晶体切割如图 1 所示。

2.1 1/4 波电压 $V_{\pi/2}$ 的计算^[4]

当在 KTP 晶体的 z 方向上加电压 $V_z = E_z d$ (E_z 为 z 方向的电场强度), KTP 对于 1.06 μm 基频光沿 x 、 y 、 z 方向的折射率与 V_z 有关。通过菲涅耳方程, 可求得快轴和慢轴的基频折射率 n'_{ω_f} 和 n'_{ω_s} 。快轴和慢轴的相位延迟为

$$\Gamma = \frac{2\pi}{\lambda}(n'_{\omega_f} - n'_{\omega_s}) \cdot l。 \quad (1)$$

将基频光波长 $\lambda = 1.06 \mu\text{m}$, 图 1 的 KTP 参数代入

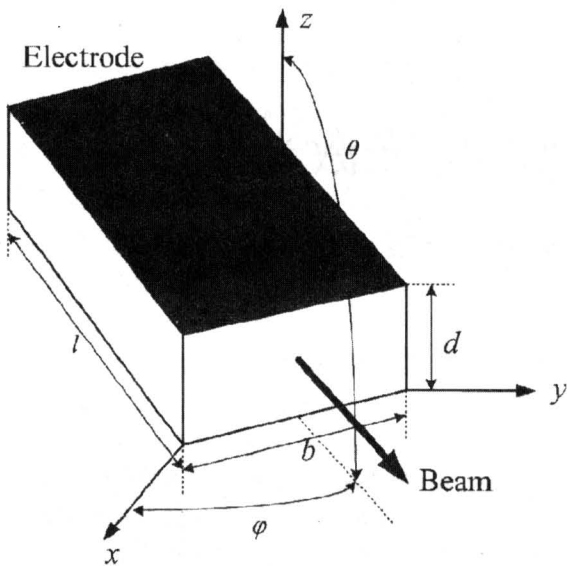


图 1 KTP 晶体切割方向
 $\theta = 90^\circ$, $\varphi = 23.6^\circ$, $d = 2$ mm,
 $l = 10$ mm, $b = 4$ mm

Fig.1 The orientation in KTP crystal

上式，可计算出当快轴和慢轴的相位延迟 $\Gamma = \pi/2$ 时，加在 KTP 晶体 z 方向上的 $1/4$ 波电压 $V_{\pi/2}$ (V_z) = 647 V。

2.2 $1/4$ 波电压对倍频效率的影响^[4]

加上电压 V_z 后 KTP 对于 $0.53 \mu\text{m}$ 倍频光的快轴与慢轴的折射率 $n'_{2\omega f}$ 和 $n'_{2\omega s}$ 发生了变化，二次谐波的相位将偏离相位匹配条件，失配角为

$$\delta_s = \frac{\pi l}{\lambda} \{2n'_{2\omega f} - (n'_{\omega f} + n'_{\omega s})\}. \quad (2)$$

将 $\theta = 90^\circ$, $\varphi = 23.6^\circ$, $d = 2$ mm, $l = 10$ mm, $b = 4$ mm, $\lambda = 1.06 \mu\text{m}$ 代入式 (1) 和式 (2) 中，可以得出相位延迟 Γ 和相位失配角 δ_s 随电压 V_z 的变化曲线，如图 2。从图中可以看出当外加电压 V_z 与 $V_{\pi/2} = 647$ V 时二次谐波的失配角 δ_s 约为 $\pi/5$ ，仍在相位匹配的范围之内，倍频效率的变化不大。上述计算结果说明，在不影响倍频效率的情况下，可以用单块 KTP 晶体同时实现腔内倍频和电光调 Q。

3 实验装置与实验结果

实验装置采用半导体激光二极管 LD 纵向同轴泵浦 Nd:YVO₄ 晶体得到 $1.06 \mu\text{m}$ 近红外激光，再用 KTP 晶体进行腔内倍频和电光调 Q 得到 $0.53 \mu\text{m}$ 的绿激光脉冲序列，并把全部元件固化为一个整体，

构成了高性能微型全固化激光器。其中采用：连续输出功率为 1 W 的、波长为 808.5 nm 的 LD 作为泵浦光源；Nd:YVO₄ 激光晶体；KTP 晶体作腔内倍频晶体和调 Q 开关的双功能器件；自行研制的聚焦系统和控温系统以提高激光器的性能。

实验装置如图 3。由于所用的 LD 的输出功率较小，因此提高器件的光-光转换效率是提高激光器性能的关键。使用半导体制冷器作为温度控制元件，对 LD 的温度进行控制，以使其工作波长和 Nd:YVO₄ 激光晶体的吸收波长峰准确重合，提高激光晶体对泵浦光的吸收效率。

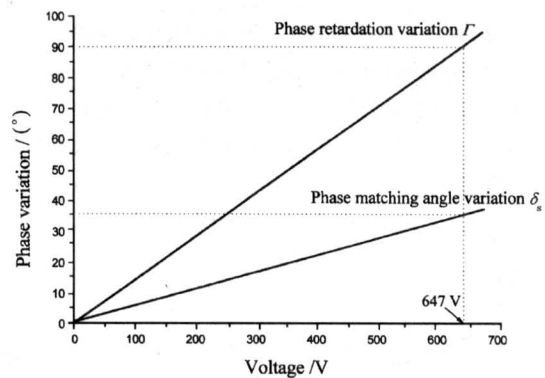


图 2 基波相位延迟和二次谐波失配角随电压变化

Fig.2 Phase retardation of fundamental wave and phase matching angle variation as the function of voltage

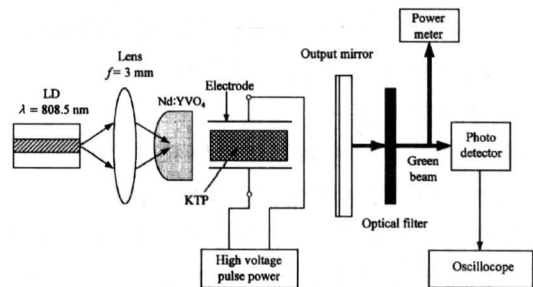


图 3 同时倍频和调 Q 的实验装置

Fig.3 Experiment setup for LD pumped Q-switched intracavity SHG Nd:YVO₄ laser

实验中把 LD 的工作波长调整到 808.5 nm。采用通光方向长度为 1 mm 的、掺杂浓度为 3at% 的、c 轴向切割的 Nd:YVO₄ 激光晶体作为工作介质。入射到此晶体内部的泵浦光约有 95% 被吸收。采用端面同轴泵浦方式，使 LD 的泵浦光束沿激光

器光轴方向入射到激光晶体内部，和所产生的 $1.06 \mu\text{m}$ 激光光束在空间上能很好地匹配，提高它们的空间耦合率。采用等效焦距为 3 mm 的微型非球面透镜收集 LD 的激光，把它聚焦成为光腰直径为 $120 \mu\text{m}$ 的细光束，使其光腰处于 Nd:YVO_4 晶体的内部。因此，采用平凹型谐振腔，泵浦端的谐振腔反射镜为球面镜，输出端为平面反射镜。此球面镜是直接镀制在 Nd:YVO_4 晶体的一个端面上的介质膜反射镜，对泵浦光是高透射 ($T > 90\%$)、对 $1.06 \mu\text{m}$ 振荡激光是全反射 ($R > 99.8\%$)、对 $0.53 \mu\text{m}$ 倍频光是高反射 ($R > 99\%$)。 Nd:YVO_4 晶体的另一个通光表面上镀有同时对 $1.06 \mu\text{m}$ 的基频光和 $0.53 \mu\text{m}$ 倍频光高透射膜 (剩余反射率 $R < 0.5\%$)。使用平面反射镜作为谐振腔的输出端反射镜，它对振荡基频光是全反射的、对倍频光是高透射的。KTP 晶体放在振荡激光的光腰处，晶体的正轴方向与基频光的偏振方向成为 45° 。由于在 Nd:YVO_4 晶体中 Nd^{3+} 离子的跃迁具有很强的偏振性， π 方向 (平行于 c 轴) 的发射截面是 σ 方向 (垂直于 c 轴) 发射截面的 4.2 倍，即所产生的激光在 π 方向的增益比 σ 方向大得多，这表明 Nd:YVO_4 晶体可同时作为一有效的偏振器件，而无需另加电光调 Q 时所必需的腔内偏振器^[5,6]。

将 $1/4$ 波电压 $V_{\pi/2}$ 加在 KTP 晶体两端的电极上，细调使快轴与慢轴的静态相位延迟 $\Gamma = 0$ 。当泵浦功率为 1 W 时，测得输出连续绿光的最大功率为 54 mW 。把电压降为零，腔内的损耗大于增益，不能产生激光振荡。当在晶体两端加上 $V_{\pi/2}$ 的高压脉冲，则出现调 Q 的脉冲光。实验中采用高性能雪崩晶体管串来驱动 Q 开关，雪崩晶体管的脉冲前沿可达到 $1 \sim 2 \text{ ns}$ ，且抖动小，可以达到较高的调 Q 频率，是一种理想的电光调 Q 驱动器。在调 Q 的频率为 1 kHz 时，测得绿光的峰值功率随 LD 泵浦功率的变化曲线如图 4 所示，此时的最大峰值功率为 762 W ，脉宽为 12 ns 。光脉冲的波形如图 5 所示。

使半导体激光器的倍频晶体处于稳定的特定温度，对提高输出功率并保持其稳定是十分重要的。采用半导体致冷器对器件进行整体控温，保证 LD 辐射光波长与 Nd:YVO_4 激光晶体的吸收峰值波长重合，并保证了 KTP 的相位匹配条件和激光谐振腔的稳定。采用整体控温的另一个明显优点是减化了控温装置，减小了器件体积，便于使用。激光器

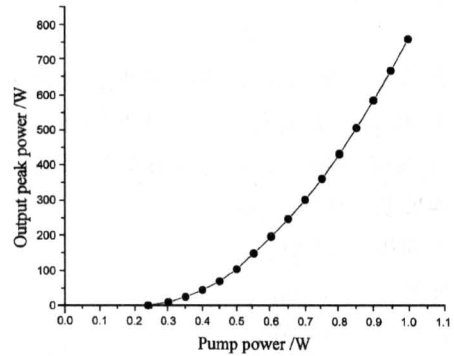


图 4 绿光峰值功率与 LD 泵浦功率关系
Fig.4 Peak green laser output power as the function of LD output power

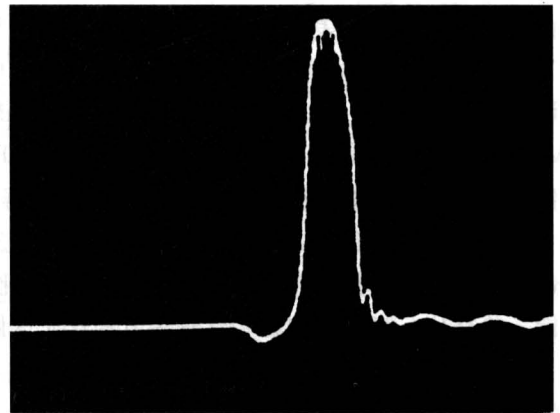


图 5 光脉冲波形
Fig.5 Laser pulse shape

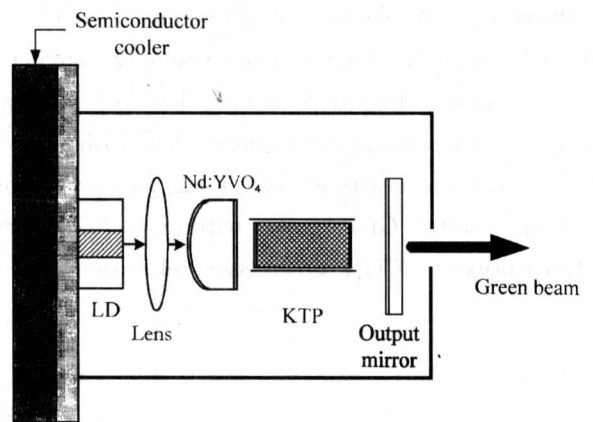


图 6 激光器结构图
Fig.6 The configuration of Q-switched green laser

的结构如图 6 所示。器件的整个体积为 $\phi 25 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$ ，只有半个彩色胶卷大小。

激光器输出的激光束经滤波器滤除 808 nm 泵浦光和 1.06 μm 基频光后，在 1 KHz 的重复频率和 1 W 的泵浦功率下，测得的数据结果为：

激光波长 0.523 μm ，
 激光横模 TEM_{00} ，
 脉冲宽度 12 ns，
 峰值功率 762 W，
 输出功率稳定度 $< \pm 2\%$ ，
 光束方向稳定性 $< 0.01 \text{ mrad/h}$ 。

4 结束语

详细分析 KTP 晶体内外加电压与倍频效率之间的相互作用和计算表明，在不影响倍频效率的情况下，单块 KTP 晶体可以同时实现腔内倍频和电光调 Q。采用吸收谱线宽、吸收系数大的 Nd:YVO₄ 晶体和倍频晶体与调 Q 开关共用的 KTP，研制出全固化高性能的微型电光调 Q 绿光激光器。

该系列器件性能可靠，体积小 ($\phi 25 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$)，质量轻，使用方便。在输出功率 - 体积比、性能 - 价格比、光束方向稳定性等多方面优于国际

同类产品，具有很强的市场竞争力。

参考文献

- [1] Sasaki T, Kojima T, Yokotani A, et al. Single-longitudinal-mode operation and second-harmonic generation of Nd:YVO₄ microchip lasers [J]. Optics Letters, 1991, 16 (21): 1665~1667
- [2] Nabors D, Sanches A, Mooradian A. High-power continuous-wave Nd:YVO₄ microchip lasers [J]. Optics Letters, 1992, 17 (22): 1587~1589
- [3] Ebbers C A, Velsko S P. High average power KTiOPO₄ electro-optic Q-switch [J]. Applied Physics Letters, 1995, 67 (5): 593~595
- [4] Yao J Q, Sun X W, Kwok H S. Analysis of simultaneous Q-switching and frequency doubling in KTP [J]. Journal of Modern Optics, 1997, 44 (5): 997~1004
- [5] Takunori T, Takao K. Intracavity frequency doubling and Q-switching in diode-laser-pumped Nd:YVO₄ lasers [J]. Applied Optics, 1995, 34 (21): 4298~4301
- [6] Bass M. Electro-optic Q-switching of the Nd:YVO₄ laser without an intracavity polarizer [J]. IEEE J. Quantum Electronics, 1975, 11 (12): 938~939

A New Type of Q-switched and Frequency-doubling Green Laser

Chen Fei, Huo Yujing, He Shufang, Feng Lichun

(Dept. of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

[Abstract] A new type of LD pumped Nd:YVO₄ - KTP Q-switched green laser is demonstrated. By using the KTP crystal as both an electro-optic Q-switcher and a frequency-doubling crystal in type II phase matching for generating pulsed green beams, low loss and high efficiency characteristics were realized. Special temperature control technique and aspherical lens with smaller focus length were used in the laser, and all elements were fixed into a whole with epoxy. These measures improved the laser efficiency, output power and laser beam direction stability. Green power with up to 762 W peak output and 12 ns pulse width was obtained.

[Key words] KTP; green laser; electro-optic Q-switcher; frequency-doubling;