

百瓦级全固态绿光激光器的实验研究*

郭 丽^{1,2} 姚建铨^{1,3} 禹国俊¹ 徐德刚^{1,3} 周 睿^{1,3} 王 鹏¹ 郝 冀⁴

(1 天津大学精密仪器与光电子工程学院, 激光与光电子研究所, 天津 300072)

(2 南开大学、天津大学联合研究院, 天津 300072)

(3 激光技术国家重点实验室(华中科技大学), 武汉 430074)

(4 天津塘沽海军后勤学院, 天津 300450)

摘 要 利用 80 个 20 W 的二极管呈五角型阵列泵浦 Nd:YAG 棒, 采用 KTP 晶体(II 类相位匹配 $\theta = 90^\circ \phi = 23.6^\circ$) 腔内倍频、单声光调 Q 装置、平凹直腔结构, 在泵浦电流 17.5 A、声光调制频率 20.4 kHz 时获得了平均输出功率为 97 W、脉冲宽度 150 ns 的准连续绿光; 分析了泵浦功率密度及晶体内部温度是影响倍频效率的因素, 认为此实验中获得高功率的关键原因是对于 KTP 晶体使用了角度调节并加强了水冷。

关键词 全固态绿光激光器; KTP 晶体; 热效应; 角度调节

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A

0 引言

LD 泵浦的全固态高功率绿光激光器在工业加工、军事、激光分离铀离子同位素等方面都有广阔的应用前景, 并且它还可以作钛宝石的泵浦源以及大屏幕彩色显示的光源等。国内外对此进行了广泛的研究^[1~3], 国外相关的文献报道了绿光的输出功率达到了百瓦级以上的水平, 而在国内由于泵浦组件以及相关设备水平的落后, 绿光的功率还不高, 仅有电子部 11 所的姜东升等人采用国产半导体激光器组件, 利用三镜 L 型腔, 实现平均功率 68 W 的绿光输出^[4]。我们利用简单的平凹腔、单声光调 Q、KTP 晶体腔内倍频等获得了 97 W 的准连续绿光。

1 Nd:YAG 激光器倍频效率的理论分析

用 LD 泵浦 Nd:YAG 棒再进行倍频时, 其二次谐波的产生是以基模光束功率的损耗为代价的。当二次谐波的转换效率很低时, 基模功率转化很少, 占基模总功率的比例不大, 可以近似地认为基模的功率没有变化, 这也就是通常所说的小信号的情况。谐波的输出功率与基模功率的平方成正比, 其倍频效率表达式为

$$\eta_{\text{little}} = \frac{P_{2\omega}}{P_{\omega}} = l^2 K \frac{P_{\omega}}{A} \frac{\sin^2(\Delta kl/2)}{(\Delta kl/2)} \quad (1)$$

但是当二次谐波的转换效率大于 20% 后, 就不能再忽视基模的损耗功率, 此时倍频效率的表达式变为

$$\eta_{\text{large}} = \frac{P_{2\omega}}{P_{\omega}} = \tan 2 \left[lK^{1/2} \left(\frac{P_{\omega}}{A} \right)^{1/2} \frac{\sin \Delta kl/2}{\Delta kl/2} \right] \quad (2)$$

式中 $\Delta k = \frac{4\pi}{\lambda_1} (n_1 - n_2)$, $k = 2\eta^3 \omega_1^2 d_{\text{eff}}^2$, l 为非线性晶体的长度, A 为基波光束的面积, $\eta = \sqrt{\mu_0/\epsilon_0 \epsilon} = 377/n_0 [V/A]$, d_{eff} 为有效非线性系数, 其量纲采用的是 MKS 制, 它与单位 m/V 的换算关系是 $d[esu] = 2.4 \times 10^3 d[m/V]$ 。

由式(2)可以看出: 影响高效率二次谐波转换效率的主要因素包括基波的功率密度也就是 P_{ω}/A 这一项, 以及相位失配量 Δk 和晶体的长度 l 。

在其他参数已知的情况下, 倍频效率随泵浦功率密度的增大而增大, 但是当泵浦功率密度达到一定值, 倍频效率的增长趋势就变得缓慢了, 也就是接近倍频效率的极限值。因此增大泵浦功率密度是提高倍频效率的方法之一。通常可以采用增大泵浦电流、调 Q 技术、透镜聚焦等方法提高泵浦功率密度。我们在实验中用调 Q 装置增大泵浦功率密度。关于聚焦的方法, 由于使用的是 KTP 晶体, 其破坏阈值比较低, 对基频光聚焦有可能破坏晶体, 所以实验中不采用此种方法。

另外, 晶体内部温度升高引起晶体折射率的变化, 折射率的变化又会使相位失配量 Δk 增大, 从而导致倍频效率降低。从下面的推导可以看出: 晶体在相位匹配温度 T_0 的折射率, 对 T_0 周围温度以泰勒级数展开, 即

$$n_1 - n_2 = (T - T_0) \frac{d(n_2 - n_1)}{dT} \quad (3)$$

*国家自然科学基金(60278001)、教育部南开大学、天津大学联合研究院基金、天津市光电子联合科学研究中心(013184011)及 863 项目(2002AA31190)资助

Email: beth_79@eyou.com

收稿日期: 2003-08-11

$$\Delta k = \frac{4\pi}{\lambda_1}(n_1 - n_2) \quad (4)$$

首先确定 Δk 的值,当转换效率降到其峰值一半时,其值已经很低,可以认为是小信号情况下的转化效率了.由式(1)可以推出当峰值降到 1/2 处 $\Delta k \cdot l = 2 \times 1.39$. 此时一定长度的 KTP 晶体可能产生二次谐波的温度范围的半峰全宽为

$$\Delta T = 2(T - T_0) = \frac{0.44\lambda_1}{ld(n_2^f - n_1^s)/dT} \quad (5)$$

式中上角标中的 f,s 分别代表快光和慢光.

当基频波入射到 KTP 晶体上时,能量主要集中在晶体中心,导致中心温度远远高于边缘温度,晶体内部温度梯度增大.当晶体内部温度差值大于 ΔT 时,晶体的某些部分就起不到倍频的作用,这样实现相位匹配的晶体体积就会减小,倍频效率相应会下降.前面主要讨论的是晶体内部温度差超过了相位匹配的允许温度范围而导致的倍频效率的下降.另外晶体内部温度变化会影响相位匹配角度,当增大泵浦功率时,晶体的吸收会导致晶体内部温度升高,这样相位匹配角就会发生变化.如果入射方向与新的相位匹配角的差值大于相位允许角 $\Delta\phi$,倍频效率也会显著下降.关于 KTP 倍频晶体长度由经验得来的值一般在 $9 \sim 10 \text{ mm}^{[5-7]}$,实验中我们采用的晶体长度为 10 mm .

2 实验过程

图 1 为激光器谐振腔的分布简图,在实验中采用美国 CEO 公司生产的半导体激光器组件,它由 80 个 20 W 二极管激光器组成,按照五角形等间距侧面泵浦 Nd:YAG 棒,这种泵浦方式可以使增益分布均匀,克服了由于增益分布不均而导致振荡激光产生畸变的现象,为获得高光束质量、高效激光输出提供了前提条件.其总泵浦功率为 1600 W(结构如图 2,输入输出特性如图 3),激光介质的尺寸为 $\phi 6.36 \times 146 \text{ mm}$,侧面打毛,两端磨成平面,镀 1064 nm 的增透膜. Q 开关器件采用 GOOCH & HOUSEGO 公司生产的中心频率为 27.12 MHz,驱动功率为 100 W,调制频率为 $1 \sim 100 \text{ kHz}$ 可调.倍频晶体采用 II 类临界相位匹配的 KTP 晶体($\theta = 90^\circ \varphi = 23.6^\circ$),尺寸为 $7 \times 7 \times 10 \text{ mm}^3$,两边镀有 1064 nm 及 532 nm 的增透膜.谐波反射镜为两面镀有 1064 nm 高透和 532 nm 高反膜层的石英镜片.谐振腔采用的是全反镜为 3 m 的平凹镜,输出镜为平镜的平凹直腔结构.通过调节晶体角度和加强水冷,最终在泵浦电流为 17.5 A、重复频率为 20.4 kHz 时,获得了最大平均功率为 97 W,脉冲宽度 150 ns 的准连续绿光.

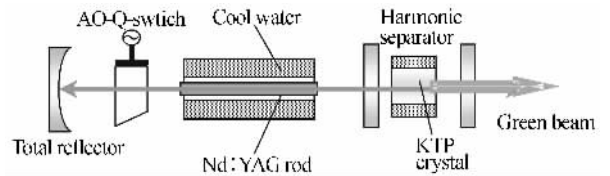


图 1 实验装置简图

Fig. 1 The simply chart of experimental facility

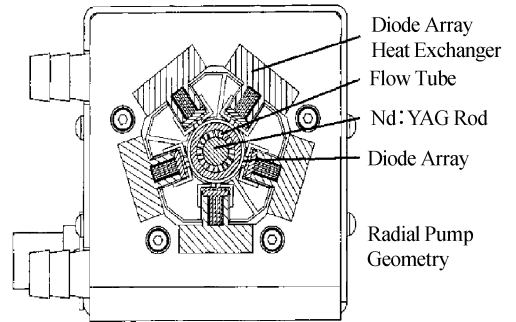


图 2 泵浦组件剖面图

Fig. 2 The profile of LD pump module

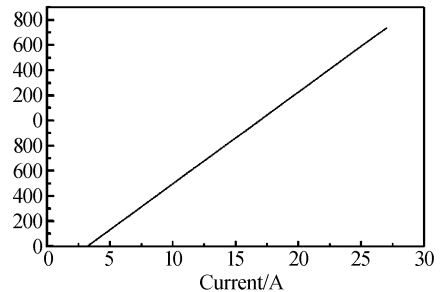


图 3 泵浦组件的输入输出特性曲线

Fig. 3 The in-out characteristic curve of LD pump module

在实验中为了解决由于晶体内部温度升高而导致的相位失配问题,我们分别采取了小角度偏转 KTP 晶体^[8]以及对 KTP 晶体加强水冷的办法.偏转 KTP 晶体是为了使基频波波矢的入射方向在晶体 XOY 面的投影与晶体 x 轴的夹角接近于新的温度下的相位匹配角度.但是 KTP 晶体的偏转角度不宜过大,因为偏转角过大会造成光路通光直径的减小,基频光的能量不能全部通过晶体,即损耗增大,限制功率提高,并且晶体表面的倾斜也会使一部分激光功率反射到腔外,增大反射损耗.当绿光的最大输出功率为 97 W 时,利用 He-Ne 准直光通过小孔光阑入射到晶体表面上,测量反射回来的光点与原光点偏离的距离及小孔光阑与晶体间的距离,计算出晶体的偏转角度为 1.6° .关于加强对晶体的水冷主要是考虑在相同泵浦功率情况下冷却水温低的晶体热传导系数大,内部温度低且温差小.我们对不同冷却温度下的输出功率进行了比较,如图 4,冷却水的温度分别为 20°C 、 15°C 、 5°C ,在泵浦电流不高时,其输出功率差别不大,这主要是低电流泵浦时,泵浦功率还不高,因此晶体中心温度也不会很高,温度梯度还不大,晶体内部温度差还在相位匹配的允许温度范围内.当泵浦电流到 16 A 时,继续

增大泵浦功率,冷却水温度高的晶体内部温度差值超过了相位匹配的允许温度,导致倍频效应的晶体体积减小,因而输出功率开始下降.

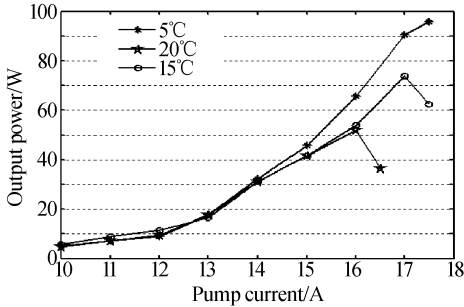


图 4 不同冷却温度下输入输出特性曲线

Fig. 4 The in-out characteristic curve with different temperature cooling water

另外在实验中测试了同等条件下基波的最佳耦合输出功率,我们认为二次谐波的转换效率可以近似地等效为 532 nm 输出功率与 1064 nm 的最佳耦合输出功率的比值,由此从图 5 中可以看出:随着泵浦电流的增加,即泵浦功率密度的增大,基波向二次谐波的转换效率不断增大,但此增长趋势会随着泵浦电流的增加而变得缓慢.这与前面的理论分析相当吻合,当泵浦电流为 17.5 A 时,绿光最大输出功率是 97 W,此时二次谐波的转换效率达到最高为 45%.图 6 显示出不同泵浦电流下 532 nm 绿光的输出功率及脉冲宽度.可以看出:在泵浦电流 17.5 A 时,绿光输出功率达到最高 97 W,脉冲宽度降到最低 150 ns 左右.

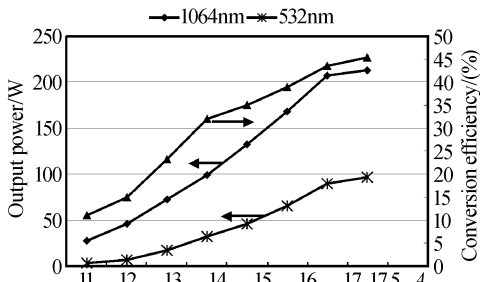


图 5 不同泵浦电流下二次谐波的转换效率

Fig. 5 The conversion efficiency of SHG with different pump current

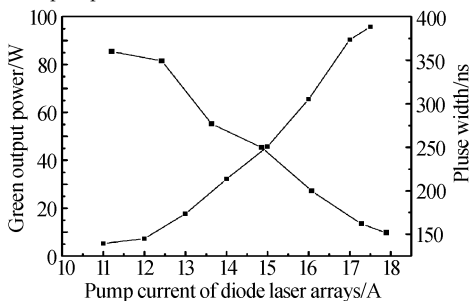


图 6 不同泵浦电流下 532 nm 输出功率及脉冲宽度

Fig. 6 The output power and pulse width of 532nm laser with different pump current

3 结论

分析了影响高功率倍频激光器倍频效率的因素,认为增大泵浦功率密度以及解决倍频晶体热效应问题可以提高倍频效率.通过偏转晶体角度和加强水冷的方法解决晶体热效应导致的相位失配,使激光入射方向接近相位匹配方向,最终获得了 97 W 的高功率绿光输出,基频波到二次谐波的转换效率高于 40%,其稳定性约为 $\pm 1.03\%$.但是在实验中发现,角度调节以及加强水冷都存在一定的局限性,我们认为可以计算出高温下的匹配角,按此角度对晶体进行切割;对于冷却装置可以采取换用冰点低的冷却液进行冷却,例如酒精等,这样可以进一步降低晶体内部温度减小相位失配量.目前正在对这些方法进行实验.

参考文献

- 1 LeGarrec B J, Raze G J, Gilbert P Y M, et al. High-average-power diode-array-pumped frequency-doubled YAG laser. *Optics Letters*, 1996, **21**(24): 1990 ~ 1992
- 2 Honea E C, Ebbers C A, Beach R J, et al. Analysis of an intracavity-doubled diode-pumped Q-switched Nd:YAG laser producing more than 100 W of power at 0.532 μm . *Optics Letters*, 1998, **25**(15): 1203 ~ 1205
- 3 Konno S, Yasui K. Efficient high-power green beam generation by use of an intracavity frequency-doubled laser-diode-pumped Q-switched Nd:YAG laser. *Appl Opt*, 1998, **37**(3): 551 ~ 554
- 4 姜东升,赵鸿,王建军,等.平均功率达 68 W 的 LD 抽运倍频 Nd:YAG 激光器. *中国激光*, 2002, **29**(增刊): 102 ~ 104
Jiang D S, Zhao H, Wang J J, et al. *Chinese Journal of Laser*, 2002, **29**(Z): 102 ~ 104
- 5 李小英,荆杰泰,潘庆,等. LD 抽运 II 类非临界位相匹配腔倍频单频 Nd:YAP/KTP 激光器的设计. *中国激光*, 2001, **A28**(10): 865 ~ 869
Li X Y, Jing J T, Pan Q, et al. *Chinese Journal of Laser*, 2001, **A28**(10): 865 ~ 869
- 6 李健,卢兴强,候玮,等.大功率 LD 抽运 Nd:YVO₄/KTP 声光调 Q 绿光激光器. *中国激光*, 2000, **A27**(12): 1063 ~ 1064
Li J, Lu X Q, Hou W, et al. *Chinese Journal of Laser*, 2000, **A27**(12): 1063 ~ 1064
- 7 杨春林,张蓉竹,蔡邦维,等. LD 泵浦 Nd:YVO₄/KTP 激光器晶体长度对输出的影响. *半导体光电*, 2000, **21**(2): 118 ~ 120
Yang C L, Zhang R Z, Cai B W, et al. *Semiconductor Optoelectronics*, 2000, **21**(2): 118 ~ 120

8 姚建铨,于意仲,陈进,等. 高功率激光器中 KTP 晶体的热效应研究. 中国物理快报,2001,18(10):1356~1359

Yao J Q, Yu Y Z, Chen J, *et al.* *Chin Phys Lett*, 2001, 18(10):1356~1359

Study on All-solid State Green Laser with Hundred Watt Level

Guo Li^{1,2}, Yao Jianquan^{1,3}, Yu Guojun¹, Xu Degang^{1,3}, Zhou Rui^{1,3}, Wang Peng¹, Hao Ji⁴

1 College of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering, Institute of laser and Optoelectronics
Tianjin University, Tianjin 300072

2. Cooperated Institute of Nankai University and Tianjin University, Tianjin 300072

3. State Key Lab of Laser Technology (Huazhong University of Science and Technology), Wuhan 430074

4. Tianjin Tanggu Navy Logistic College, Tianjin 300450

Received date:2003-08-11

Abstract The Nd:YAG bar was side-pumped by eighty 20W LDs of a pentahedral radial pump geometry. Single acousto-optic Q switching and intracavity frequency doubled KTP crystal (II phase match $\theta = 90^\circ \phi = 23.6^\circ$) were used in the experiment. A maximum CW green laser output power of 97 W was generated at a repetition rate of 20.4 kHz and the pulse width is 150 ns. Pump power density and temperature inside KTP crystal was considered as the central reason to influence SHG efficiency. And high power was obtained by tuning matching angle and strengthening cooling to KTP crystal.

Keywords All-solid-state green laser; KTP crystal; Thermal effect; Tilt angle



Guo Li was born in 1979, in Hebei province. She got her bachelor's degree in optoelectronics from Tianjin University in 2001. Since then she has been working towards a master's degree in the Institute of Laser and Optoelectronics, Tianjin University. She mainly pursues the research of all-solid state laser and the technology of optics parameter oscillator.