

LD 泵浦 Nd:YAG/Cr:YAG 腔外频率变换
高功率紫外激光器*

谭成桥 薛庆华 贾富强 亓岩 郑权 钱龙生

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130022)

摘要 用 KTP 晶体对激光二极管端面泵浦的 Nd:YAG 晶体, Cr:YAG 被动调 Q 产生的 1064 nm 脉冲激光器进行腔外倍频, 用 BBO 晶体四倍频产生 266 nm 紫外激光. 用 15 W 的 LD 阵列, 当 LD 泵浦功率为 12 W 的情况下, 红外 (1064 nm) 调 Q 平均输出功率为 2.2 W, 脉冲序列周期为 40 μ s, 脉宽为 18 ns, 峰值功率高达 4.9 kW. 采用 KTP 腔外二倍频, 532 nm 的绿光输出平均功率为 850 mW; 用 BBO 腔外四倍频, 266 nm 的紫外光输出平均功率高达 215 mW, 绿光-紫外光光转换效率为 25.2%, 红外到紫外总的转换效率为 9.8%.

关键词 紫外激光器; 四倍频; DPSSL; 腔型设计; 被动调 Q

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A

0 引言

紫外激光器在光数据存储、光刻技术、精细材料加工、医疗、光谱分析、光化学、光生物学及微电子学领域有广泛的应用前景. 与传统的准分子激光器相比, 全固态紫外激光器具有光束质量好、功率稳定、可靠性高、使用方便、体积小、适合产业化等优点日益取代准分子紫外激光器而得到重视^[1,2].

目前对全固态紫外的获得最直接的方法是对掺 Nd³⁺ 固体激光的近红外波进行腔内或腔外频率转换, 产生三次、或四次谐波^[1~6]. 1998 年, Antonio Agnesi, Stefano Dell'Acqua 等用被动调 Q 的方式, 在绿光泵浦功率为 920 mW 时, 获得了 265 mW 的 266 nm 紫外脉冲输出^[1]. 2000 年, Tetsuo Kojima, usumu Konno 等用主动调 Q 的方式, 在 532 nm 绿光泵浦功率为 100 W 时, 采用了一种新型的非线性晶体 CLBO^[7], 获得了高达 20 W 的 266 nm 紫外脉冲输出, 转换效率为 20%^[2]. 而纵观国内, 在全固态紫外的研究上起步较晚, 功率不高, 2000 年, 何京良等获得了功率为 63 mW 的脉冲 266 nm 紫外输出^[3], 王屹山等用 Nd:YLF 为工作物质, 在绿光功率为 6 W 的泵浦下, 获得了 780 mW 的 263 nm 紫外输出, 转换效率为 13%, 作者所在单位也在这方面进行了实验, 2003 年, 用 2 W 的 LD 为泵源, Cr:YAG 被动调 Q Nd:YAG 腔外倍频变换获得了平均功率为 1.1 mW 的 266 nm 输出, 并成功的产业化^[10].

作者通过对 Cr:YAG 被动调 Q Nd:YAG 激光器设计, 不但得到了峰值功率很高的脉冲, 并且脉冲序列稳定, 是获得高功率紫外的保证. 用最大输出功率为 15 W 的 LDA, 在泵浦功率为 12 W 的情况下, 红外 (1064 nm) 调 Q 脉冲输出平均功率为 2.2 W, 脉冲序列周期为 40 μ s, 脉宽为 18 ns, 峰值功率为 4.9 kW, 采用一种新颖的聚焦方式, KTP 腔外二倍频, 532 nm 绿光平均功率为 850 mW, BBO 腔外四倍频, 紫外脉冲输出平均功率高达 215 mW, 绿光-紫外光光转换效率为 25.2%.

1 理论分析

腔外四倍频产生紫外激光, 很多作者都采用透镜聚焦、倍频, 再聚焦、倍频的方案来获得^[1,3], 这样虽然提高了基波光的功率密度, 但结构复杂, 腔长较长, 且给调整带来很大的困难. 本文采用了另一种方案, 用透镜一次聚焦, 在其焦点附近直接放二倍频 (KTP) 和四倍频 (BBO) 晶体, 结构如图 1.

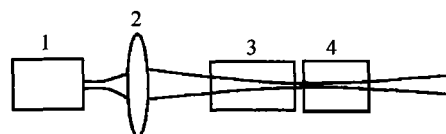


图 1 四倍频实验简图

Fig. 1 The simple graph of fourth harmonic generation

图中 1 为红外调 Q 激光器, 2 为聚焦透镜, 3 为二倍频晶体 (KTP), 4 为四倍频晶体 (BBO). 二倍频晶体和四倍频晶体同时放在聚焦瑞利长度范围内, 因此必须兼顾二倍频和四倍频的转换效率, 如将 KTP 中心放于束腰中心处, 提高了二倍频转换效率, 但势必影响四倍频转换效率, 如将 BBO 放于束腰中心处, 提高了四倍频转换效率, 但降低了二倍频

*国家高技术研究发展计划(2002AA311141)资助项目

Email: bridge19800501@tom.com

收稿日期: 2004-06-02

转换效率. 因此, 必须权衡考虑二倍频和四倍频的转换效率.

倍频效率为^[11]

$$p_2 = K p_1^2 l k_1 e^{-\alpha l} h(\xi, \mu) \quad (1)$$

式中 $K = (128 \pi^2 / c^3 m^2 m) d^2$, m_1, m_2 分别为倍频晶体对基频光、倍频光的折射率, $\omega_1 = 2\omega_2$, $\omega_1 = 2\omega_2$ 为基频光圆频率, ω_1 为基频光频率, c 为光速, d 为倍频晶体有效非线性系数. p_1 为基频光功率, l 为倍频晶体长度, $k_1 = 2\pi/\lambda_1$ 为基波波矢量, λ_1 为基波波长, $\alpha = \alpha_1 + \alpha_2$, α_1, α_2 分别为倍频晶体对基频光、倍频光的吸收系数, $h(\xi, \mu)$ 是与倍频晶体参数及光束聚焦有关的量, 式中 $\xi = \frac{1}{2} b k$, $k = 2k_1 - k_2 = (2\omega_1/c)(m_1 - m_2)$ 为位相匹配因子, $\mu = B^{-1/2}$, $B = (lk_1)^{1/2}/2$ 为倍频晶体双折射参数, θ 为倍频晶体走离角, $\xi = \frac{1}{2} b$, $\mu = 1 - \frac{1}{2} \theta$, $\mu = l/b$, $\mu = (l - 2f)/l$, $b = \frac{2}{k_1}$ 为光束共焦参数.

由 K 的表达式可知, K 为与倍频晶体有关的参量, 因此一旦倍频晶体, 晶体长度选定的前提下, K 为定值. 由倍频式(1)可见, 一旦基频光功率也确定, 影响倍频效率最主要的因子为 $h(\xi, \mu)$, 要使其最大, 就有一最佳聚焦即最佳值 μ_m 使 h 最大, 即倍频效率最高. 按照 Boyd 和 Kleinman 的理论^[10], 在优化取值的情况下(通常可以通过调节晶体放置角度, 晶体温度来达到), 且晶体放在最佳聚焦位置时(此时 $\mu = 0$), 且不考虑倍频晶体损耗的情况下(即 $\alpha = 0$), 表征最佳聚焦的参数 μ_m 与表征晶体双折射参数 B 成图 2 对应关系, 且 $h(\xi, 0, 0)$ 取得最大值. (详细计算过程请参阅文献[11] Appendix 4: Computation).

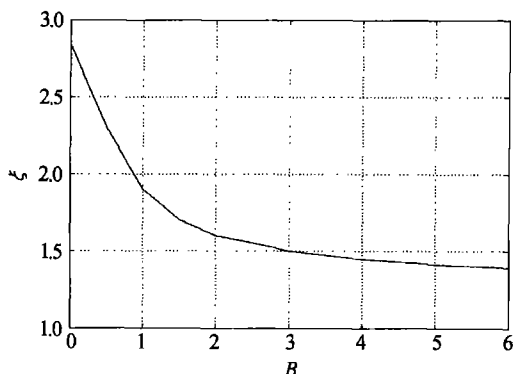


图 2 优化聚焦与晶体双折射参数的关系图
Fig. 2 Relation of optimum focusing Parameter and doubling refraction of crystal

当晶体没有放在最佳位置的时候, 其倍频效率与放在最佳聚焦位置时倍频效率比较如图 3(详细

计算过程请参阅文献 [11] Appendix 4: Computation).

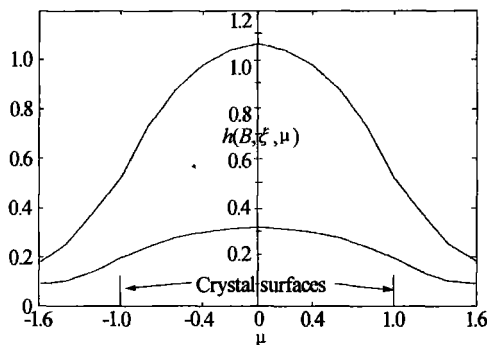


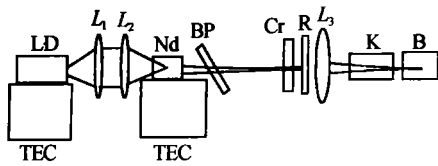
图 3 晶体位置对倍频效率的影响
Fig. 3 Second harmonic generation affect by crystal position

分别代入 KTP, BBO 的晶体参数, $k_{\text{KTP}} = 3.16 \text{ mrad}$, $k_{\text{BBO}} = 65.57 \text{ mrad}$, $l_{\text{KTP}} = 9 \text{ mm}$, $l_{\text{BBO}} = 7 \text{ mm}$, $k_{\text{KTP}} = 2/\lambda_1$, $k_{\text{BBO}} = 2/\lambda_2$, λ_1, λ_2 分别为 1064 nm 、 532 nm , 由 $B = (lk_1)^{1/2}/2$, 可得 $B_{\text{KTP}} = 0.47$, $B_{\text{BBO}} = 12.26$, 由图 2 可以方便的获得 μ_m 的值, 为了结构紧凑, 将聚焦透镜直接放在腔镜的后面, 选用 $f = 17 \text{ mm}$ 的透镜对基频光 (1064 nm , 束腰半径 $w_0 = 100 \mu\text{m}$) 聚焦, 聚焦后基频光束腰半径为 $20 \mu\text{m}$, 权衡二倍频和四倍频效率我们将 KTP 放在聚焦透镜后 14 mm 处, 通过 KTP 后产生的倍频光 (532 nm), 其束腰半径降为 $w_1 = \frac{1}{\sqrt{2}} w_0$, 相当于又起到了起到了了一次聚焦的效果, 紧靠 KTP 放 BBO 晶体, 使之满足最佳聚焦, 从而使整个系统频率转换效率最高.

2 实验装置及结果

实验装置如图 4. 所用 LD 为德国 LIMO 公司生产 (HLU15F400-808), 最大输出功率为 15 W , LD 由半导体制冷器控制温度, 调节温控, 使其发射波长与 Nd^{3+} 的吸收峰相重合, 泵浦光经光纤耦合输出, 光纤数值孔径为 0.22 , 芯径为 $400 \mu\text{m}$, 经耦合光学系统 L_1, L_2 成 $1:1$ 的像于工作物质 Nd:YAG 内, 耦合光学系统的效率为 95% , Nd:YAG 一面镀 808 nm 增透 ($T > 98\%$), 1064 nm 高反膜作为一个腔镜 ($R > 99\%$), 另一面镀 1064 nm 增透膜, 透过率要尽可能的高. 由于在较大的泵浦功率下, Nd:YAG 的热透镜效应已经比较明显, 实验中通过良好的致冷来降低热透镜效应^[12]. 输出镜为平面镜, 实验中选用了不同透过率的输出镜作比较, 它们分别是 $T_1 = 10\%$, $T_2 = 20\%$, $T_3 = 25\%$, 为了比较输出镜的透过率对紫外功率的影响, 选定 Cr:YAG 的小信号透过率 ($T_d = 87\%$) 和聚焦透镜的焦距 ($f = 17 \text{ mm}$), 用不同透过率的输出镜时, 其实验结果如图 5, 由图可以明显的看出,

当输出镜透过率为 $T_3 = 25\%$ 时,效果最佳.



LD: Laser diode Array; L_1, L_2 : Optical coupling system; Nd: Nd: YAG; BP: Brust plate; Cr: Cr: YAG; R: Output mirror; L_3 : Focus; K: KTP; B: BBO; TEC: Diode temperature control

图 4 实验装置示意图

Fig. 4 Setup of Q-switched ultraviolet laser

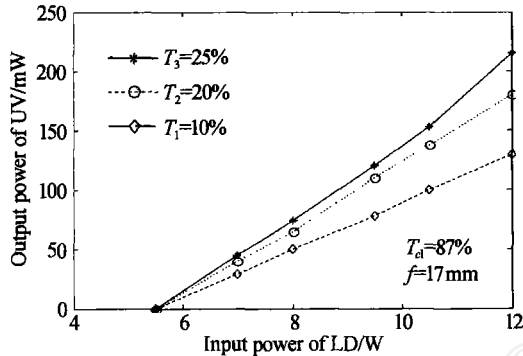


图 5 不同输出镜透过率下紫外输出功率

Fig. 5 UV output power of different output mirror

在被动调 Q 系统中^[13],被动调 Q 晶体的小信号透过率对系统影响很大,实验选用 Cr YAG 为被动调 Q 晶体, Cr YAG 在 $1\ \mu\text{m}$ 波长左右具有大的吸收截面,并且透过率随强度改变,当腔内光强比较小的时候,其透过率为 T_0 ,即小信号透过率,随光强增加其透过率增加, $T = T_0 + I$, 为光强非线性系数. 起初,腔内光强较低,增益小于损耗,不能发射激光,腔内光子数增加,随着腔内光强增加,损耗突然减少,增益大于损耗,突然发射激光,形成巨脉冲输出,因此 Cr YAG 小信号透过率的选取将直接影响输出脉冲的峰值功率、脉冲宽度、重复频率、周期,直接影响着下一步倍频转换效率的高低,因此 Cr YAG 小信号透过率的选取至关重要. 实验中还发现调 Q 晶体的小信号透过率与输出镜的透过率互相影响,固定输出镜透过率 $T_3 = 25\%$, 仔细调节,直到输出功率最大, $1064\ \text{nm}$ 连续光最大可达 $4\ \text{W}$ (Coherent Fieldmaster-Gs, LM-10 探头), 稳定性优于 1% , 用格兰棱镜测输出光的偏振性,为圆偏振光. 加入布矢片,利用布矢片对 s 偏振方向的损耗,(对 p 方向几乎没有损耗),从而限制 s 方向的起偏,提高输出激光的偏振性. 加入布氏片后,仔细调节,最大输出功率稳定在 $3.2\ \text{W}$,此时再用格兰棱镜测其偏振性,偏振比高达 $400\ 1$,水平偏振. 紧靠透镜加入调 Q 晶体,为了减小其对基频光的损耗,对 Cr YAG 两面均镀 $1064\ \text{nm}$ 增透膜,我们固定输出镜透过率和聚焦透镜的焦距,选用不同的小信号透过率的 Cr YAG 作比较,它们分别是 $T_{d1} =$

87% , $T_{d2} = 85\%$, $T_{d3} = 82\%$, 当小信号透过率为 87% 的时候,此时峰值功率最高,此时红外调 Q 平均功率为 $2.2\ \text{W}$ (Coherent Fieldmaster-gs, LM-3 探头),用重庆四十四所产 Si 快速光电二极管(上升时间小于 $0.2\ \text{ns}$) 连接到示波器 (Tektronix TDS 1002, 带宽 $60\ \text{MHz}$) 测得脉宽 $\tau = 18\ \text{ns}$, 周期 $T = 40\ \mu\text{s}$, 此时峰值功率高达 $4.9\ \text{kW}$, 紫外功率如图 6.

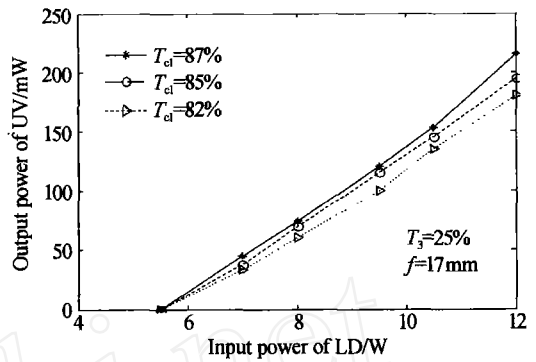


图 6 不同小信号透过率下紫外输出功率图

Fig. 6 UV output power of different little transmit of Cr YAG

当固定输出镜透过率为 $T_3 = 25\%$ 且调 Q 晶体的小信号透过率为 87% 时,选用不同聚焦透镜,它们的焦距分别为 $f_1 = 17, f_2 = 23$,紧靠输出镜放置,其实验结果如图 7,选定聚焦透镜 L_3 的焦距为 $17\ \text{mm}$,将 KTP 放在聚焦透镜后 $14\ \text{mm}$ 左右, KTP 两面同时镀 $1064\ \text{nm}$ 和 $532\ \text{nm}$ 增透膜,调节 KTP 的方位,使之满足非线性最大,当泵浦功率为 $12\ \text{W}$ 的时候,绿光输出功率达到最大,达到 $850\ \text{mW}$,紫外功率亦达到最大为 $215\ \text{mW}$,绿光到紫外转换效率为 25.2% . 实验中没有发现功率饱和现象,因此增大泵浦功率的情况下,有望获的更大功率的紫外输出.

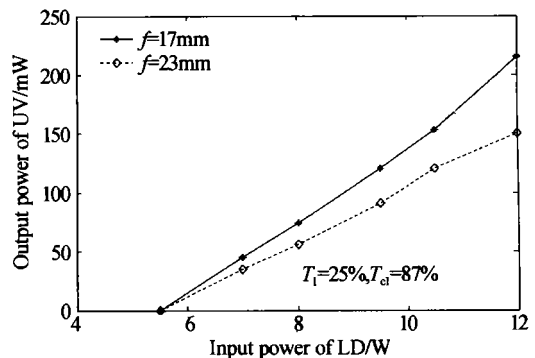


图 7 不同聚焦透镜下紫外输出功率图

Fig. 7 UV output power vs input power

3 结论

本文采用 Nd YAG 为增益介质, Cr YAG 被动调 Q, 腔外四倍频,设计了一种新颖的聚焦结构,在泵浦功率为 $12\ \text{W}$ 的情况下,红外连续输出功

率最高可达 4 W,稳定性优于 1%,加入布矢片后,连续功率为 3.2 W,功率虽有少量下降,但偏振比高达 400:1,提高了绿光的转换效率,加入调 Q 晶体,红外(1064 nm)调 Q 脉冲输出平均功率为 2.2 W,脉冲序列周期 40 μs,脉宽 18 ns,峰值功率高达 4.9 kW,峰值功率为 4.9 kW,532 nm 绿光平均功率为 850 mW,紫外脉冲输出平均功率高达 215 mW,绿光-紫外光光转换效率为 25.2%,红外到紫外总的光光转换效率为 9.8%。

参考文献

- 1 Agnesi A, Acqua S D, *et al.* Efficient wavelength conversion with high-power passively Q-switched diode-pumped neodymium lasers. *IEEE Q E*, 1998, **34**(8): 1480 ~ 1484
- 2 Kojima T, Konno U, *et al.* 20 W ultraviolet-beam generation by fourth-harmonic generation of all-solid-state laser. *Optics Letters*, 2000, **25**(1): 58 ~ 60
- 3 何京良,卢兴强,等. BBO 四倍频全固态 Nd:YVO₄ 紫外激光器. *物理学报*, 2000, **49**(10): 2106 ~ 2108
He J L, Lu X Q, *et al.* *Acta Physica Sinica*, 2000, **49**(10): 2106 ~ 2108
- 4 宁继平,陈志强,等. 全固态调 Q 紫外光 Nd:YAG 激光器的研究. *光电子·激光*, 2002, **13**(8): 778 ~ 780
Ning J P, Chen Z Q, *et al.* *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2002, **13**(8): 778 ~ 780
- 5 冯衍,毕勇,等. 3 W 全固态 355 nm Nd:YAG 激光器. *中国激光*, 2002, **29**(9):
Feng Y, Bi Y, *et al.* *Chinese Journal of Lasers*, 2002, **29**(9):
- 6 Kondo K, Oka M, *et al.* Demonstration of long-term reliability of a 266 nm, continuous-wave, frequency-quadrupled solid-state laser using α -BBO. *Optics Letters*, 1998, **23**(3): 195 ~ 197
- 7 王丽,陈少华. 非线性光学晶体 CsLiB₆O₁₀ 谐波产生的允许参量分析. *光子学报*, 2003, **32**(12): 1532 ~ 1536
Wang L, Chen S H. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(12): 1532 ~ 1536
- 8 李银柱,戴亚平,等. 高功率激光装置中的三倍频 Nd:YLF 模拟激光系统. *中国激光*, 2002, **29**(2): 101 ~ 103
Li Y Z, Dai Y P, *et al.* *Chinese Journal of Lasers*, 2002, **29**(2): 101 ~ 103
- 9 王屹山,赵尚弘,等. 高效全固化 263 nm 紫外脉冲的产生. *光子学报*, 2000, **29**(10): 917 ~ 919
Wang Y S, Zhao S H, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 2000, **29**(10): 917 ~ 919
- 10 周城,叶子青,等. Cr⁴⁺ YAG 被动调 Q 四倍频全固态紫外激光器的研究. *激光技术*, 2003, **27**(8): 339 ~ 341
Zhou C, Ye Z Q, *et al.* *Laser Technology*, 2003, **27**(8): 339 ~ 341
- 11 Boyd G D, Kleiman D A. Parametric interaction of gaussian light beams. *IEEE Q E*, 1983, **39**(8): 3597 ~ 3639
- 12 Neuenschwander W B, *et al.* Cooling schemes for longitudinally diode laser-pumped Nd:YAG rods. *IEEE Q E*, 1998, **34**(6): 1046 ~ 1053
- 13 宋晏蓉,周国生. 用时域 ABCD 矩阵对调 Q 锁模激光器的研究. *光子学报*, 2003, **32**(2): 162 ~ 165
Song Y R, Zhou G S. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(2): 162 ~ 165

LD-pumped Nd:YAG Outcavity Fourth Harmonic Generation High Power Ultraviolet Laser

Tan Chengqiao, Xue Qinghua, Jia Fuqiang, Qi Yan, Zheng Quan, Qian Longsheng

Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Academy of Sciences, Changchun 130022

Received date: 2004-06-02

Abstract A diode-pumped, Cr:YAG passively Q-switched Nd:YAG laser with an ultraviolet output at 266 nm is studied. Using a LDA with 15 W, when the incident pump power was 12 W, the passively Q-switched average power infrared output power reached 2.2 W, and the period of the pulse was 40 μs, and the width of the pulse was 18 ns, and the peak power rose up to 4.9 kW. Taking KTP as the second harmonic generation crystal, 532 nm green light average power was 850 mW; Taking BBO crystal for fourth harmonic generation outcavity, 266 nm ultraviolet average output power was 215 mW, the efficiency of green to ultraviolet conversion was 25.2%, and the efficiency of infrared to ultraviolet conversion was 9.8%.

Keywords Ultraviolet laser; Fourth harmonic generation; DPSSL; Cavity design passively; Q-switched



Tan Chengqiao was born in 1980. He received the Bachelor's Degree in 2002 from the Department of Physics, Jilin University, Changchun, China. Now he is pursuing his M. S. degree in Changchun Institute of Optics and Fine Machine and Physics, Chinese Academy of Sciences. His major is in the fields of solid state lasers and nonlinear frequency conversion.