

文章编号: 0258-7025(2008)02-0191-04

Nd:YAG/Cr:YAG 键合晶体的 355 nm 激光器

申 高^{1,2} 檀慧明¹ 付喜宏^{1,2} 南楠^{1,2} 赵玉环^{1,2}

(¹ 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033; ² 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要 报道了一台基于 Nd:YAG/Cr:YAG 键合晶体的全固态 355 nm 紫外(UV)激光器的设计及实验结果。采用平-平腔结构获得高功率、小束腰的 1064 nm 基频光。在谐振腔外,未聚焦的 1064 nm 基频光经 KTP 晶体倍频产生 532 nm 波长激光,二者再经 LBO 晶体和频获得 355 nm 紫外激光输出。实验中发现尽管 Nd:YAG 与 Cr:YAG 都是各向同性晶体,但在特定情况下输出的 1064 nm 基频光具有近似线偏振的特性,此特性可以有效地增加二次谐波产生(SHG)时基频光的利用率,从而提高整台激光器的转换效率。而基频光的谱线宽度及发散角也影响二次谐波及三次谐波产生(THG)的转换效率,需使其尽量在晶体的允许带宽及允许角范围以内。综合这几项因素,对激光谐振腔进行了仔细设计。当激光二极管(LD)抽运功率为 8 W,激光器运行稳定时,基频光峰值功率达 28 kW,最终获得平均功率为 124 mW 的 355 nm 紫外激光。

关键词 激光器;紫外激光器;和频;偏振特性

中图分类号 TN 248.1 **文献标识码** A

355 nm Laser Based on a Nd:YAG/Cr:YAG Composite Crystal

Shen Gao^{1,2} Tan Huiming¹ Fu Xihong^{1,2} Nan Nan^{1,2} Zhao Yuhuan^{1,2}

¹Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
The Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China
²Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China

Abstract Design and experiment results of an all solid-state 355 nm ultraviolet (UV) laser based on Nd:YAG/Cr:YAG composite crystal are reported. The 1064 nm fundamental frequency radiation of high peak power and small waist was generated by plano-plano cavity. Outside the cavity, the fundamental beam was passed through a KTP crystal and a LBO crystal without been focused. The KTP crystal was used for frequency doubling of the 1064 nm radiation to generate second harmonic 532 nm radiation, and the LBO crystal was used as a sum-frequency of the 1064 nm radiation and the 532 nm radiation to generate 355 nm radiation. Although both Nd:YAG and Cr:YAG are isotropic crystals, the 1064 nm fundamental frequency radiation was near-linearly polarized in particular situations. This characteristic is beneficial for the conversion of fundamental radiation to second harmonic generation (SHG) and enhance the conversion efficiency of the whole laser system. And divergence angle and bandwidth of the fundamental beam related to conversion efficiency of both SHG and the third harmonic generation (THG) should be within the range of crystal acceptance angle and acceptance bandwidth. Considering these factors, the cavity had been designed carefully. When the laser diode (LD) pump power is 8 W, the peak power of the fundamental beam was 28 kW, and finally, the 355 nm radiation average power of 124 mW was achieved.

Key words lasers; ultraviolet laser; sum-frequency; polarization

1 引 言

紫外(UV)激光器在超高密度光驱、精密材料加工、紫外固化、光刻、光印刷、医疗、光谱分析和科

学研究等领域有广泛的应用前景^[1,2]。用高功率的脉冲激光腔外直接通过二倍频及三倍频晶体是获得紫外激光最简单的方法。结构紧凑的全固态紫

收稿日期:2007-07-16; 收到修改稿日期:2007-08-24

作者简介:申 高(1981—),女,湖南人,博士研究生,主要从事全固态激光器及非线性频率变换研究。

E-mail:shengao1@163.com

导师简介:檀慧明(1954—),男,辽宁人,研究员,博士生导师,目前研究方向为固体激光技术。

E-mail:hmtan2223@yahoo.com.cn

外激光器必然成为紫外激光器发展的主要趋势^[3~6]。但由于 Cr:YAG 晶体是公认的获得被动调 Q 高功率 1064 nm 基频光最合适的饱和吸收体,将 Nd:YAG 激光晶体与 Cr:YAG 饱和吸收体键合,可使谐振腔结构更紧凑,调节更方便。虽然 Nd:YAG 是各向同性晶体,但在特定情况下它发射的激光是近似线偏振的^[7~9],这对研究二次谐波及三次谐波的产生(SHG,THG)有重要意义。整个激光器系统设计时还要考虑晶体吸收带宽及发散角对倍频、和频的影响。

2 理论研究

二次谐波的转换效率可表示为^[10]

$$\frac{P_{2\omega}}{P_{\omega}} = \tanh^2 \left[l_c K^{1/2} \left(\frac{P_{\omega}}{A} \right)^{1/2} \frac{\sin(l_c \Delta k / 2)}{l_c \Delta k / 2} \right], \quad (1)$$

式中 $K = 2 \left(\frac{\mu_0}{\epsilon_0 \epsilon_r} \right)^{1.5} \omega^2 d_{\text{eff}}^2$, Δk 为相位失配, l_c 为非线性晶体的长度, A 为基频光束的横截面积, ω 为基频光频率, d_{eff} 为有效非线性系数, μ_0 与 ϵ_0 分别为真空中的磁导率与介电常数, ϵ_r 为非线性晶体的相对介电常数, P_{ω} 与 $P_{2\omega}$ 分别为基频光功率与倍频光功率。为了更加清晰地描述基频光功率 P_{ω} 与倍频光功率 $P_{2\omega}$ 之间的关系, (1) 式可写成

$$P_{2\omega} = \eta \frac{P_{\omega}^2}{A}, \quad (2)$$

其中 $\eta = l_c^2 K \frac{\sin^2(l_c \Delta k / 2)}{(l_c \Delta k / 2)^2}$ 为倍频效率。

由(2)式可以看出要提高倍频效率,就要提高基频光功率和减小基频光斑面积,同时还要满足相位匹配条件。实验中要尽量减小相位失配,因此就要使基频光的线宽尽可能地窄。在严格满足相位匹配条件下,基频光束腰很小时,会使基频光在倍频晶体上的入射角偏离相位匹配角造成相位失配。相位失配也同样影响三次谐波的产生,因此在实验中采用平-平腔使其产生短脉冲、小发散角、窄线宽的激光束,尽量满足完全相位匹配。

当采用共线相位匹配时,光波将有一个小发散角。如果偏离相位匹配方向的角度 $\Delta\theta$ 小,就要考虑波矢失配 Δk 。

晶体允许角为^[11]

$$\Delta\theta = \frac{\pm \pi / L}{d(\Delta k) / d\theta |_{\theta = \theta_m}}, \quad (3)$$

式中 L 为非线性晶体的长度, θ 为光波矢实际入射到晶体中与光轴的夹角, θ_m 为临界相位匹配时的相位匹配角。

12 mm 长的 LBO I 类相位匹配产生三次谐波时,对于 1064 nm 激光,其允许角为 3.04 mrad,对于 532 nm 激光,其允许角为 1.50 mrad。

同时,实际光束也都是具有一定谱线宽度的非理想单色波,所有频率分量不可能在同一匹配角下达到相位匹配。设接收线宽为 $\Delta\lambda$ ^[12], 则

$$\Delta k = [\partial(\Delta k) / \partial \lambda] \Delta \lambda, \quad (4)$$

式中 λ 为入射到晶体中的波长。

计算得到,12 mm 长的 LBO I 类相位匹配产生三次谐波时,对于 1064 nm 激光,其允许带宽为 1.46 nm,对于 532 nm 激光其允许带宽为 0.687 nm。

3 实验结构及分析

实验装置如图 1 所示。Nd:YAG/Cr:YAG 键合晶体的尺寸为 $\phi 3 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$, 其中 Nd:YAG 晶体长 7 mm, 钕离子掺杂原子数分数为 1.0%, 在其端面镀 808 nm 增透/1064 nm 高反的双色膜作为输入镜。Cr:YAG 晶体长 1 mm, 初始透射率为 70%, 在其端面镀 1064 nm 增透膜。平面输出镜镀 1064 nm 减反膜, 其透射率为 80%。二倍频晶体选用 KTP, $\theta_m = 90^\circ$, $\varphi = 23.5^\circ$, φ 为满足相位匹配时的方位角, 按 II 类临界相位匹配切割, 尺寸为 $2 \text{ mm} \times 2 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$, 两端面镀 1064 nm/532 nm 双色增透膜。三倍频晶体选用 I 类临界相位匹配 LBO, $\theta_m = 42.4^\circ$, $\varphi = 90^\circ$, 尺寸为 $3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm} \times 12 \text{ mm}$, 两端面镀 1064 nm/532 nm/355 nm 三色增透膜。由于输出光中同时存在 1064 nm, 532 nm 及 355 nm 激光, 需用石英棱镜进行分光。实验中所用的功率计为 Coherent Fieldmaster-gs, LM-3 热探头。为了测量输出基频光的偏振方向, 用格兰-泰勒棱镜作为检偏仪。

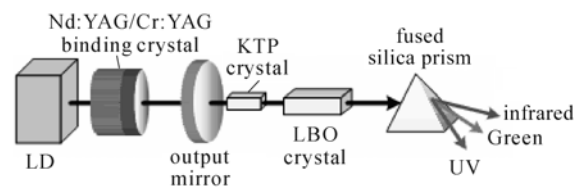


图 1 紫外激光器实验装置

Fig. 1 Experimental setup of the THG UV laser

虽然 YAG 是各向同性晶体,但最近的研究表明, YAG 发射的激光是有一定偏振性的。为了测定基频光的偏振方向,首先,用 Nd:YAG 作激光晶体,不加 Cr:YAG,连续输出激光。在实验中测得基频光的偏振比可达 5:1,基频光的偏振方向主要依赖于抽运光的偏振方向^[9]。而用 Cr:YAG 晶体作可

饱和吸收体被动调 Q 时, Cr:YAG 晶体在饱和开始以后饱和吸收具有明显的各向异性, 而且随着抽运功率的增加, 这种各向异性的饱和吸收的趋势在增加, 从而导致偏振输出。其偏振方向与 Cr:YAG 的晶轴方向密切相关, 须使光沿晶轴方向传播^[8]。实验中采用 Nd:YAG 与 Cr:YAG 键合的晶体, 旋转晶体棒使光束沿晶轴方向传播。但由于实验条件限制, 不能精确地找到晶轴方向, 因而在多次旋转晶体棒后, 找到一个最佳位置, 使输出的基频光近似线偏振, 且输出功率较大。测量的数据见图 2, 此时偏振比约为 52:1。这说明 Nd:YAG/Cr:YAG 输出基频光的偏振方向不仅与抽运光的偏振方向有关, 更取决于 Cr:YAG 的晶轴的放置方位。近似线偏振的基

频光可以有效地提高倍频时基频光的利用率。确定基频光的偏振方向后, 就要合理放置 KTP 及 LBO 晶体, 使其满足相位匹配条件, 如图 3 所示。

由于 Nd:YAG 与 Cr:YAG 在较大功率抽运下都会产生热透镜效应, 这使得平-平腔结构近似为平凹腔, 激光束腰落在平面输出镜上。而抽运功率越大, 热透镜效应越明显, 则激光束腰越小, 激光发散角越大。输出光斑越小, 则有利于提高倍频效率。但发散角越大则会使人射角偏离相位匹配角造成相位失配。因此要合理设计谐振腔, 使输出的基频光既有小束腰, 又能使发散角尽可能在晶体允许角范围内。综合考虑后, 设计腔长为 30 mm, 基频光束腰为 117 μm , 瑞利距离为 40 mm, 发散角为 2.9 mrad, 刚好在 LBO 晶体的允许角范围内。当抽运功率为 8 W 时, 1064 nm 输出功率为 3.5 W。用快速光电二极管连接到示波器上, 测得脉宽 8 ns, 重复频率 13 kHz, 此时峰值功率高达 33.6 kW。由于基频光光斑小且峰值功率高, 同时瑞利距离足够长可以同时放下 KTP 及 LBO 晶体, 因而实验中并没有使用透镜聚焦。

在实验中发现基频光输出功率最大时, 二倍频效率并不高。查看 532 nm 的光斑, 发现其是高阶模, 光斑质量变差。仔细调节腔镜, 使输出激光为 TEM₀₀ 模时, 基频光功率下降至 2.9 W。但此时放上倍频晶体 KTP, 532 nm 激光功率却有显著增大。原因是单横模状态较高阶模状态时基频光的谱线宽度变窄, 相位失配量减少, 能量更集中, 因而转换效率大幅提高。1064 nm, 532 nm, 355 nm 输出功率与激光二极管 (LD) 电流的变化关系见图 4。图中的数据都是经棱镜分光后测得的, 因而小于实际输出功率。

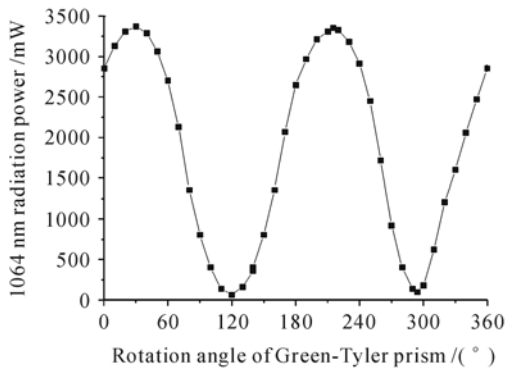


图 2 1064 nm 激光通过格兰-泰勒棱镜后的功率与棱镜旋转角度之间的关系

Fig. 2 After passing through Green-Tyler prism, 1064 nm laser power versus rotation angle of Green-Tyler prism

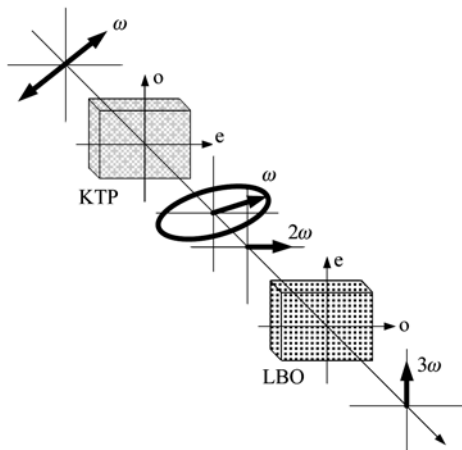


图 3 KTP 晶体中倍频 (II 类), LBO 晶体中三倍频 (I 类) 光束的偏振匹配情况

Fig. 3 SHG (type II), THG (type I) light polarizing matched in KTP and LBO crystal respectively

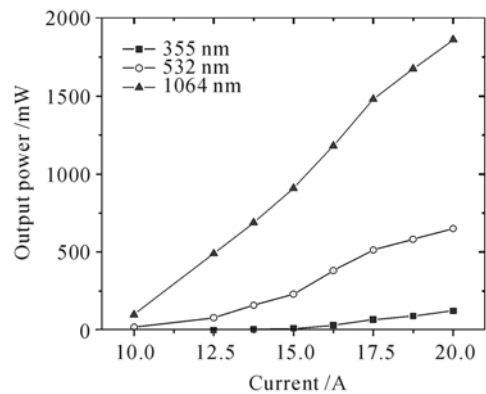


图 4 输出功率随激光二极管电流的变化关系

Fig. 4 Output power versus LD current

4 结 论

虽然 Nd:YAG 是各向同性晶体,但它发射的激光具有偏振特性,其偏振方向主要依赖于抽运光的偏振方向及 Cr:YAG 晶体晶轴的方位。这对倍频、和频的研究有重要意义。在激光器腔型设计时还要考虑基频光的谱线宽度及发散角对二次谐波及三次谐波的影响。经整体设计后,在激光二极管抽运功率为 8 W 时,获得平均功率为 124 mW 的 355 nm 紫外激光。随着抽运功率的增加,晶体热透镜效应明显,需要不断仔细调节腔长及输出镜的位置,使其输出 TEM₀₀ 模。由于基频光峰值功率高、光斑小且瑞利距离长,可将 KTP 与 LBO 晶体直接放在输出镜后,使激光器的结构更为紧凑。

致谢 感谢山东青岛海泰公司提供 Nd:YAG/Cr:YAG 键合晶体。

参 考 文 献

- Leng Jing, Sha Guohe, Hua Xiaoqing *et al.*. Stimulated Raman and Brillouin scattering in oxygen pumped by a Nd:YAG laser at 355 nm [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(8):1105~1110
冷 静,沙国河,花晓清等. 三倍频 Nd:YAG 激光抽运氧气中的受激拉曼和布里渊散射[J]. *光学学报*, 2005, **25**(8):1105~1110
- Li Wang, Jianhua Xue. Performance curves comparison of THG efficiency in CsLiB₆O₁₀ on flattened Gaussian and Gaussian beams [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2003, **1**(12):708~710
- Li Kun, Zhang Bin, Li Keyu *et al.*. Third harmonic generation of super intense femtosecond laser pulse [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(11):1506~1511
李 琨,张 彬,李格宇等. 超高强度飞秒脉冲的三次谐波转换[J]. *中国激光*, 2006, **33**(11):1506~1511
- Chen Jin, Yao Jianquan, Wang Peng *et al.*. LD pumped all-solid-state frequency tripled ultraviolet laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(1):86~88
陈 进,姚建铨,王 鹏等. LD 抽运的全固态三倍频紫外激光器[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(1):86~88
- Gao Lanlan, Tan Huiming. LD pumped all-solid-state 355 nm ultraviolet pulse laser [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2003, **24**(2):94~96
高兰兰,檀慧明. LD 泵浦全固态 355 nm 紫外脉冲激光器[J]. *半导体光电*, 2003, **24**(2):94~96
- Shen Gao, Tan Huiming, Liu Fei. Optimization design for the all-solid-state continuous-wave 355nm ultraviolet laser [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2006, **14**(5):567~571
申 高,檀慧明,刘 飞. 全固态 355 nm 连续紫外激光器的优化设计[J]. *光学精密工程*, 2006, **14**(5):567~571
- Y. Shimony, Z. Burshtein, A. Ben-Amar Baranga *et al.*. Repetitive Q-switching of a CW Nd:YAG laser using Cr⁴⁺:YAG saturable absorbers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1996, **32**(2):305~310
- H. Eilers, K. R. Hoffman, W. M. Dennis *et al.*. Saturation of 1.06 μm absorption in Cr,Ca:Y₃Al₅O₁₂ crystals [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1992, **61**(25):2958~2960
- Zhen Quan, Jiang Yaoliang, Qian Longsheng. Research on the polarization of a LD-pumped Nd:YAG/Cr:YAG laser [J]. *Laser and Infrared*, 2002, **32**(4):248~249
郑 权,姜耀亮,钱龙生. LD 泵浦 Nd:YAG/Cr:YAG 激光器偏振特性的研究[J]. *激光与红外*, 2002, **32**(4):248~249
- Jingang Liu, Dalwoo Kim. Optimization of intracavity doubled passively Q-switched solid-state lasers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1999, **35**(11):1724~1734
- Zhou Cheng. Frequency conversion of generating 193 nm laser by deep ultraviolet sum-frequency crystal CLBO [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, **17**(10):1489~1492
周 城. 深紫外和频晶体 CLBO 产生 193 nm 激光的频率变换[J]. *强激光与粒子束*, 2005, **17**(10):1489~1492
- Lan Xinju. *Laser Technology* [M]. 1st edition. Beijing: Science Press, 2000. 234
蓝信钜. *激光技术*[M]. 第一版. 北京:科学出版社, 2000. 234