

文章编号 : 1003-501X(2007)05-0023-04

## LD 抽运 355nm 连续紫外激光器

申 高<sup>1,2</sup>, 檀慧明<sup>1</sup>, 刘 飞<sup>3</sup>

(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; 3. 长春理工大学, 吉林 长春 130022)

**摘要** 报道了一台 LD 端面抽运 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体的内腔三次谐波转换的全固态连续紫外激光器。在谐振腔内, 1064nm 的基频波经 类相位匹配 KTP 晶体进行二倍频产生 532nm 波长激光, 二者再经 类相位匹配 LBO 晶体进行和频获得 355nm 紫外激光输出。在 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体的外端镀 1064nm/532nm 双波长高反膜作为输入镜, 其与输出镜构成平-凹腔结构, 并考虑到 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体所产生的热透镜效应, 对腔长进行了详细的分析计算。当 LD 抽运功率为 3W 时, 获得 4.2mW 连续运转的 355nm 紫外激光。

**关键词**: 连续紫外激光器; 355nm; LD 抽运

中图分类号: TN248.1

文献标识码: A

## LD pumped all-solid-state continuous-wave ultraviolet laser

SHEN Gao<sup>1,2</sup>, TAN Hui-ming<sup>1</sup>, LIU Fei<sup>3</sup>

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,

the Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China;

3. Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

**Abstract**: A laser-diode (LD) pumped Nd:YVO<sub>4</sub> intracavity frequency tripling all-solid-state Continuous-wave (CW) ultraviolet laser at 355 nm was reported. In cavity, the type phase-matched KTP crystal was used for Second Harmonic Generation (SHG) of the fundamental 1064 nm radiation to generate 532 nm radiation, and the type phase-matched LBO crystal was used as a Sum Frequency (SM) of the 1064 nm radiation and the 532 nm radiation to generate 355 nm radiation. The flat outside section of the Nd:YVO<sub>4</sub> crystal HR coated for both 1064 nm and 532 nm radiations was used as the input mirror. The output mirror was concave. Therefore, plano-concave cavity was composed of these two mirrors. Even at moderate pump power, the Nd:YVO<sub>4</sub> crystal will produce thermal lens. In considering the effect of thermal lens, the cavity was designed finely. At the pump power of 3W, the CW 355 nm radiation of 4.2 mW was obtained.

**Key words**: Continuous-wave ultraviolet laser; 355 nm; LD-pumped

## 引 言

紫外激光器的输出波长短, 能量集中, 分辨率高, 聚焦点可小到亚微米数量级, 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。长期以来, 准分子激光器在紫外“冷加工”应用领域中占有主导地位, 但随着全固态激光器的发展, 结构紧凑的全固态紫外激光器成为这个领域中更加有效的加工手段。但紫外波段多处于非线性晶体可实现位相匹配的边缘, 有效非线性系数小, 转换效率低, 因此全固态紫外激光器的发展目前多集中在用大功率 LD 或其阵列作抽运源来实现紫外激光输出<sup>[1~8,10]</sup>, 很少有小功率连续紫外激光器的报道。然而, 光盘控制处理需要 350nm

收稿日期: 2006-06-27; 收到修改稿日期: 2007-03-10

作者简介: 申高(1981-), 女(汉族), 湖南邵东人, 博士生, 主要从事全固态激光器及非线性频率变换的研究。E-mail: shengao1@163.com

附近波长的连续低功率激光光源, 355nm 激光作为 1064nm 的三倍频, 是一种很有吸引力的激光光源<sup>[2]</sup>。我们采用 LD 端面抽运 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体, 产生 1064nm 波长激光, 其经腔内 KTP 倍频和 LBO 和频, 最终获得 355nm 连续紫外激光输出。当 LD 抽运功率为 3W 时, 紫外输出功率达 4.2mW。

## 1 简单理论

三次谐波的产生分为两个部分, 在第一个晶体中, 部分 1064nm 基波辐射转换为二次谐波(532nm); 接着, 在第二个晶体中, 未转换的基波辐射与二次谐波和频产生三次谐波。在非线性晶体中混频的方程式为:

$$\begin{aligned} dE_1/dz &= -jK_1E_3E_2^* \exp(-j\Delta k \cdot z) - \frac{1}{2}\gamma_1E_1 \\ dE_2/dz &= -jK_2E_3E_1^* \exp(-j\Delta k \cdot z) - \frac{1}{2}\gamma_2E_2 \\ dE_3/dz &= -jK_3E_1E_2 \exp(j\Delta k \cdot z) - \frac{1}{2}\gamma_3E_3 \end{aligned} \quad (1)$$

此处的  $E_j$  项为以频率  $\omega_j$  在  $z$  方向上传播的波的综合电矢,  $\omega_3 = \omega_1 + \omega_2$ , 波  $j$  的电场是  $E_j \exp(i\omega_j t - ik_j z)$  的实数部分, 相位失配  $\Delta k = k_3 - (k_1 + k_2)$  正比于相位匹配方向上光路的偏离量  $\Delta\theta$ ,  $\gamma_j$  项为吸收系数。对于三倍频, 有  $\omega_2 = 2\omega_1$ ,  $\omega_3 = 3\omega_1$ ,  $K_2 \approx 2K_1$ ,  $K_3 \approx 3K_1$ 。为了提高倍频效率及和频光的功率输出, 我们要尽量满足位相匹配条件:  $\Delta k = 0$ 。令参量  $S$  为三倍频晶体中二次谐波功率与总功率之比:

$$S = P_{2\omega} / (P_{\omega} + P_{2\omega})$$

如果以  $\omega$  和  $2\omega$  输入的光子匹配为 1:1, 则有  $P_{\omega} + P_{2\omega}$  及  $S = 0.67$ , 理论上在小信号近似情况下, 输入光束都能转换为三次谐波。

有效的三倍频取决于从第一个晶体发出的基波与二次谐波光子在宽广的强度范围内为 1:1 的比例<sup>[9]</sup>。因此在实验中若想得到高转换效率、高功率的 355nm 激光, 就要尽可能的提高二次谐波转换效率, 使  $P_{\text{Green}}:P_{\text{IR}}$  接近 1:1。Yushi Kaneda 等对此作过相关报道<sup>[10]</sup>。

## 2 实验研究

### 2.1 实验装置

实验装置如图 1 所示。抽运源 LD 的最大输出功率为 3W。Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体采用 a 轴切割, 掺钕浓度为 1%, 尺寸为 3mm×3mm×2mm, 一面镀 1064nm/532nm 双波长高反膜作为输入镜, 另一面镀 808nm 增透膜。输出镜 M 曲率半径为 100mm, 凹面镀 1064nm/532nm 高反膜及 355nm 增透膜, 平面镀 355nm 高透膜。

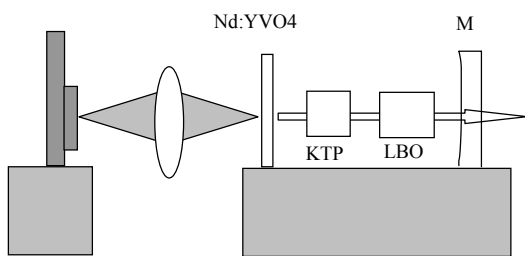


图 1 LD 抽运 Nd:YVO<sub>4</sub>/KTP/LBO 三倍频紫外激光器实验装置

Fig.1 Experimental setup of LD-pumped Nd:YVO<sub>4</sub>/KTP/LBO THG UV laser

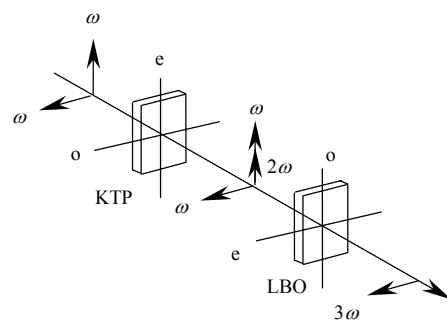


图 2 KTP 晶体中倍频(类), LBO 晶体中三倍频(类)光束的偏振匹配情况

Fig.2 SHG(type ), THG(type I) light polarizing matched in KTP and LBO crystal respectively

二倍频晶体选用 KTP,  $\theta = 90^\circ$ ,  $\varphi = 23.5^\circ$ , 按 类临界相位匹配切割, 尺寸为 2mm×2mm×10mm, 两端面镀 1064nm/532nm 双色增透膜。三倍频晶体选用 类临界相位匹配 LBO,  $\theta = 42.6^\circ$ ,  $\varphi = 90^\circ$ , 尺寸为 3mm×3mm×12mm, 两端面镀 1064nm/532nm/355nm 三色增透膜。二倍频和三倍频晶体的放置要符合光波

的偏振匹配条件 ,如图 2 所示 Nd:YVO<sub>4</sub>、KTP 和 LBO 用致冷器温控。用 coherent 公司生产的 LabMaster Ultima P540 功率计 , LM-UV2 紫外探测器测量紫外激光的功率。

也有文献报道过用 LBO( Ⅱ类)作为二倍频晶体<sup>[11]</sup> , 它产生的二次谐波与基波具有相互垂直的偏振态 , 恰好能满足 LBO( Ⅱ类)三倍频的匹配条件 , 偏振损耗较小。而 KTP 的有效非线性系数大且走离角小 , 是一种广泛用于 1064 nm 波段倍频的非线性晶体,但在大功率时的会产生灰线效应。我们对两种晶体都作了实验 , 发现在小功率抽运时 , KTP 的灰线效应并不太明显 , 使用 KTP 能获得更高的二次谐波转换效率。

2.2 腔型设计及实验结果分析

Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体在中小抽运功率下也易产生热透镜效应<sup>[12]</sup> , 这直接影响到谐振腔的设计。热透镜焦距公式<sup>[13]</sup> :

$$\frac{1}{f_{th}} = \frac{\xi P_{abs}}{4\pi K_c \omega_p^2} [dn_0/dT + (n_0 - 1)\alpha_T] \tag{2}$$

其中  $\xi$  为热负荷比 ,  $P_{abs}$  为吸收的抽运功率 ,  $K_c$  为热导率 ,  $\omega_p$  为平均抽运光斑半径 ,  $n_0$  为环境温度下的折射率 ,  $dn_0/dT$  为折射率温度系数 ,  $\alpha_T$  为热膨胀系数。实验中所用 Nd:YVO<sub>4</sub> 的有关参数为 :  $\xi=0.4$  ,  $K_c=5.23$  W/(K·m) ,  $\omega_p=200\mu\text{m}$  ,  $n_0=2.165$  ,  $\alpha_T=4.43\times 10^{-6}/\text{K}$  ,  $dn_0/dT=5.092\times 10^{-5}$ 。经计算 , 在 3W 抽运功率下 , 热焦距  $f_{th}$  约为 270 mm。

平-凹腔的束腰落在平面镜上 , 这样两块晶体都不能放在束腰上。由于热透镜效应的产生 , 使得平-凹腔变得类似于凹-凹腔。根据 ABCD 定律<sup>[14]</sup> , 用 matlab 计算得到不同腔长对应的参数值 , 见表 1。

表 1 不同腔长对应的参数值

Table 1 Parameter values corresponding to different cavity lengths

Cavity length/mm	Waist width/ $\mu\text{m}$	Waist position/mm	Spot size on M <sub>1</sub> / $\mu\text{m}$	Spot size on M <sub>2</sub> / $\mu\text{m}$	$G=g_1\times g_2$	Rayleigh length/mm
20	113.2	2.6667	113.5	124.5	0.7704	37.836
30	122.2	3.6207	122.6	142.4	0.6611	44.091
40	127.4	4.2857	127.9	158.9	0.5555	47.923
50	129.9	4.6296	130.4	175.7	0.4537	49.823
60	129.8	4.6154	130.3	194.3	0.3556	49.746
80	119.7	3.3333	120.1	247.8	0.1704	42.305
90	104.8	1.9565	105.0	303.2	0.08333	32.429
99.99	19.4	0.0023	19.4	1748.4	0.8148	1.1112

在设计谐振腔时要考虑以下几个因素 : 1) 在低抽运功率条件下 , 模匹配要求振荡光基膜半径应不小于抽运光斑半径 ; 2)  $G$  因子在 0.5 附近谐振腔最稳定 ; 3) 锐利距离大。激光在束腰附近近似于平行光 , 可将 KTP 和 LBO 晶体都放在束腰上 ; 4) 束腰小。为了获得较高的二倍频和三倍频转换效率,应尽可能的提高 KTP 和 LBO 晶体处的光功率面密度,即束腰尽量小些。

综合以上几点可以看出 , 当腔长为 40~50mm 时最合适 : 此时  $G$  因子最接近 0.5 , 且瑞利距离涵盖整个谐振腔 , M1 上的光斑半径也近似于与抽运光斑半径。我们在 30~80mm 之间反复实验 , 最终测得腔长为 43mm 时激光输出功率最大。用紫外探头测到 355nm 激光的最大输出功率为 4.2mW。在直腔时所拍摄到的紫外光斑如图 3。

由于 KTP 与 LBO 并没有单独制冷 , 这在一定程度上影响了激光器的稳定性 , 激光器在运行一段时间后功率有所下降。同时 , 由于条件所限 , 我们并没有在 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体端面

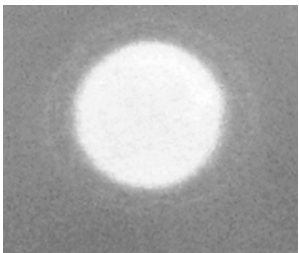


图 3 直腔时紫外光斑

Fig.3 UV light spot

上镀 355nm 的高反膜,也没有对 KTP 镀 355nm 增透膜,因而 355nm 的输出功率并没有预计的那么理想。若将实验装置进一步优化,会使激光器的性能更加完善。

### 3 结 论

报道了一种 LD 端面抽运 Nd:YVO<sub>4</sub> 全固态连续紫外激光器,在 3W 的抽运功率下,获得了 4.2mW 的紫外连续输出。实现了小功率领域的全固态连续紫外激光器运转。该激光器结构简单、携带方便,在小型紫外激光器产品化方面具有一定的应用价值。今后我们将进一步完善理论与实验研究,以便实现高性能的 LD 抽运全固态三倍频紫外激光器。

#### 参考文献:

- [1] 高兰兰,檀慧明. LD 泵浦全固体 355nm 紫外脉冲激光器[J]. 光电器件, 2003, **24**(2): 94-96.  
GAO Lan-lan, TAN Hui-ming. LD pumped all-solid-state 355nm ultraviolet pulse laser[J]. **Semiconductor Optoelectronics**, 2003, **24**(2): 94-96.
- [2] Yushi Kaneda, Shigeo Kubota. Continuous-wave 355-nm laser source based on doubly resonant sum-frequency mixing in an external resonator[J]. **Opt. Lett**, 1995, **20**(21): 2204-2206.
- [3] 宁继平,陈志强,詹仰钦,等. 全固态调 Q 紫外光 Nd:YAG 激光器的研究[J]. 光电子·激光, 2002, **13**(8): 776-780.  
NING Ji-ping, CHEN Zhi-qiang, ZHAN Yang-qing, et al. Study of all solid-state Q-switching ultraviolet light Nd:YAG lasers[J]. **Journal of Optoelectronics-Laser**, 2002, **13**(8): 776-780.
- [4] 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**(2): 86-88.  
CHEN Jin, YAO Jian-quan, WANG Peng, et al. LD pumped all-solid-state frequency tripled ultraviolet laser[J]. **Chinese Journal of Lasers**, 2002, **A29**(2): 86-88.
- [5] BI Yong, FENG Yan, GONG Hua-rong, et al. High-average power THG of a diode-pumped Nd:YAG laser at 355 nm generated by LiB<sub>3</sub>O<sub>5</sub> crystal[J]. **Chinese Optics Letters**, 2003, (2): 33-34.
- [6] Jun Sakuma, Yuichi Asakawa, Minoru Obara. Generation of 5-W deep-UV continuous wave radiation at 266nm by an external cavity with a CsLiB<sub>6</sub>O<sub>10</sub> crystal[J]. **Opt. Lett**, 2004, **29**(1): 92-94.
- [7] Hiroshi Kumagai, Katsumi Midorikawa, Tetsuaki Iwane, et al. Efficient sum-frequency generation of continuous-wave single-frequency coherent light at 252 nm with dual wavelength enhancement[J]. **Opt. Lett**, 2003, **28**(20): 1969-1971.
- [8] A.H.Kung, Lee Jr-i, Poe-Jou Chen. An efficient all-solid-state ultraviolet laser source[J]. **Appl. Physics Lett**, 1998, **72**(13): 1542-1544.
- [9] W.克希耐尔. 固体激光工程(第一版)[M]. 北京:科学出版社, 2002. 534-536.  
Koechner W. **Solid-State Laser Engineering** (The First Edition) [M]. Beijing: Science Press, 2002. 534-536.
- [10] Yushi Kaneda, Shigeo Kubota. Theoretical treatment, simulation, and experiments of doubly resonant sum-frequency mixing in an external resonator[J]. **Appl. Optics**, 1997, **36**(30): 7766-7775.
- [11] 王云,范秀伟,彭倩倩,等. LD 泵浦 Nd:GdVO<sub>4</sub> 晶体 LBO 三倍频紫外激光器[J]. 光电子·激光, 2005, **16**(5): 550-553.  
WANG Yun, FAN Xiu-wei, PENG Qian-qian, et al. LD pumped Nd:GdVO<sub>4</sub> [J]. **Journal of Optoelectronics-Laser**, 2005, **16**(5): 550-553.
- [12] Richard Scheps. **Introduction to Laser Diode-Pumped Solid State Lasers**[M]. Bellingham, Washington: SPIE, 2001. 30-31.
- [13] Yung-Fu Chen, S. W. Tsai. Diode-pumped Q-switched Nd:YVO<sub>4</sub> yellow laser with intracavity sum-frequency mixing[J]. **Opt. Lett**, 2002, **27**(6): 397-398.
- [14] 吕百达. 激光光学(第三版)[M]. 北京:高等教育出版社, 2003. 393-397.  
LÜ Bai-dai. **Laser Optics(The Third Edition)** [M]. Beijing: Higher Education Press, 2003. 393-397.