

## 《半导体激光泵浦全固体激光技术》专题文章导读

檀慧明

中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所

半导体激光作为泵浦源的全固体激光器具有体积小、重量轻、效率高、性能稳定、可靠性好、寿命长和光束质量高等优点,是近几年激光技术研究的热点。通过非线性光学频率变换技术,即通过对全固体激光器基频光的倍频、和频、差频、参量变换以及拉曼频移等技术,原则上可把全固体激光的波长范围扩展到从深紫外到远红外的整个波段。由于连续工作的半导体激光泵浦全固体激光器基频光的输出功率较低,在半导体激光泵浦全固体激光器中普遍采用激光谐振腔内高功率密度来获得高转换效率的腔内非线性频率变换技术。

随着半导体激光泵浦全固体激光技术的研究发展,采用全固体激光技术的产品也逐渐地取代了其它类型的激光器,获得了广泛的应用。但结构紧凑的全固体激光谐振腔不能采用传统的调节架方式,而是需要不同的腔镜装调对准工艺来完成全固体激光器产品的生产制造过程。

半导体激光器作为泵浦源,决定了其被泵浦的全固体激光器的性能指标和寿命,而半导体激光器是电流驱动器件,其使用寿命、工作特性在很大程度上又取决于所用驱动电源的性能好坏。半导体激光器驱动电源设计中存在的问题,将使全固体激光器的性能下降或造成永久性损伤。

本专栏的四篇文章属于半导体激光泵浦全固体激光技术的内容,包括了半导体激光驱动电源的设计,全固体基频激光的腔内非线性频率变换和谐振腔装调过程中的装调对准技术。

《全固态 355 nm 连续紫外激光器的优化设计》一文采用半导体激光泵浦的腔内同时倍频与和频技术,通过对谐振腔的优化设计,在 3 W 的泵浦功率下,通过腔内 KTP 晶体对基频光的倍频和 LBO 晶体对基频光与倍频光的和频,获得了 6.4 mW 的 355 nm 连续紫外激光高效输出。

《1.1 W 内腔和频连续波橙黄光 Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器》一文研究了由半导体激光阵列泵浦 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体,在腔内获得 1 064 nm 和 1 342 nm 的双波长振荡。通过 I 类临界相位匹配 LBO 对 1 064 nm 和 1 342 nm 基频光的腔内和频,在 12 W 注入泵浦功率下,获得了目前报道最高的 1.1 W 连续 593 nm 橙黄激光输出。

《一种基于高斯光束的平凹激光腔对准方法》一文通过在准直光束后加一透镜系统,使通过平凹激光谐振腔的平面反射镜和凹面反射镜反射回来的两个光斑直径大小相仿,解决了不加透镜系统时,两反射回来光斑直径相差很大,难于对准的问题,获得了角度对准精度 3.18 的实验结果。

《高频半导体激光器的驱动设计及稳定性分析》一文设计了计算机实时检测反馈、闭环控制、脉冲稳流的高频半导体激光器驱动电源。该设计通过抑制浪涌,减小纹波以及加入延时和软启动电路等多项安全设计及措施,能够确保作为全固体激光器泵浦源的半导体激光器工作的安全性。

文章编号 1004-924X(2006)05-0731-05

## 全固态 355 nm 连续紫外激光器的优化设计

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:**通过优化腔型设计,实现了 LD 端面抽运 Nd:YVO<sub>4</sub> 腔内三次谐波转换全固态连续 355 nm 紫外激光器高效率输出。选用平-凹腔结构并考虑到 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体的热透镜效应、模式匹配、倍频晶体位相匹配等因素对输出功率的影响,对谐振腔长进行了详细的分析计算。在激光谐振腔内,1 064 nm 的基频波经 KTP 晶体倍频产生 532 nm 激光,二者再经 LBO 晶体和频获得了 355 nm 紫外激光。当 LD 抽运功率为 3 W 时,355 nm 连续紫外激光输出功率达 6.4 mW。与折叠腔进行比较,发现在小功率抽运情况下,直腔结构紧凑、易于调节、输出功率较大。

**关键词:**连续紫外激光器;全固态激光器;355 nm 激光;LD 抽运;和频

**中图分类号:** TN248.1 **文献标识码:** A

**收稿日期:** 2005-12-14; **修订日期:** 2006-09-20.

## Optimization design for all-solid-state 355 nm 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, 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> all-solid-state 355 nm continuous-wave (cw) ultraviolet laser with intracavity frequency tripling and efficient output was achieved by optimization design. By considering influence of the thermal lens effect of the Nd:YVO<sub>4</sub> crystal, mode matching, phase matching *et al* on laser output power, a plate-concave cavity was designed finely. In cavity, the KTP crystal was used for second harmonic generation (SHG) of the fundamental 1 064 nm to generate 532 nm radiation, and the 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 cw 355 nm radiation of 6.4 mW is obtained with the pump power of 3 W. In comparison with the fold-cavity, the linear cavity has many advantages of more compact, easier for adjusting, and higher output power.

**Key words:** continuous-wave ultraviolet laser; all-solid-state laser; 355 nm laser; LD-pumping; sum-frequency

### 1 引言

紫外激光具有波长短,易聚焦、能量集中,分辨率高等优点,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。随着全固态激光技术的发展,结构紧凑的全固态紫外激光器必然成为紫外激光器发展的主要趋势。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,因此目前全固体紫外激光器的发展多集中在用大功率 LD 或其阵列作抽运源来实现紫外激光输出<sup>[1-8,10]</sup>,而用小功率 LD 作为抽运源的连续紫外激光器的报道较少。然而,光盘控制处理等技术需要 350 nm 附近波长的连续低功率激光光源,355 nm 激光作为 1 064 nm 的三倍频,是一种很有吸引力的激光光源<sup>[2]</sup>。有报道 LD 抽运 Nd:YAG 晶体,采用两球面镜作为腔镜,在抽运功率为 8 W 时,产生约 3 mW 的

连续 355 nm 紫外激光<sup>[4]</sup>。而本实验组采用 LD 端面抽运 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体,在 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体的端面镀膜充当输入镜形成平-凹腔结构,减小插入损耗,使结构更紧凑。考虑到 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体的热透镜效应、模式匹配、倍频晶体位相匹配等因素对输出功率的影响,对腔长进行了详细的分析计算。优化后在 LD 抽运功率为 3 W 时,获得 6.4 mW 的连续 355 nm 紫外输出。

### 2 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 3 W。Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体采用 *a* 轴切割,掺钕浓度为 1%,尺寸为 3 mm×3 mm×2 mm,一面镀 1 064 nm/532 nm 双波长高反膜作为输入镜,另一面镀 808 nm 增透膜。输出镜 M 曲率半径为 100 mm,凹面镀 1064 nm/532 nm 高反膜及 355 nm 增透膜,平面镀 355 nm 高透膜。

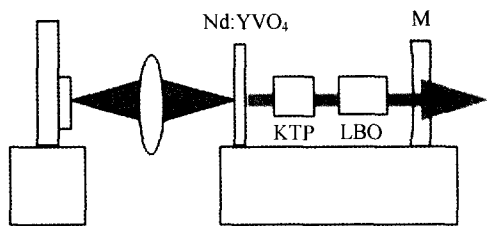


图 1 LD 抽运 Nd:YVO<sub>4</sub>/KTP/LBO 三倍频紫外激光器实验装置

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

二倍频晶体选用 KTP,  $\theta=90^\circ, \varphi=23.5^\circ$ , 按 II 类临界相位匹配切割, 尺寸为 2 mm × 2 mm × 10 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,  $\theta=42.4^\circ, \varphi=90^\circ$ , 尺寸为 3 mm × 3 mm × 12 mm, 两端面镀 1064 nm/532 nm/355 nm 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 Lab-Master Ultima P540 功率计, LM-UV2 紫外探测器测量紫外激光的功率。

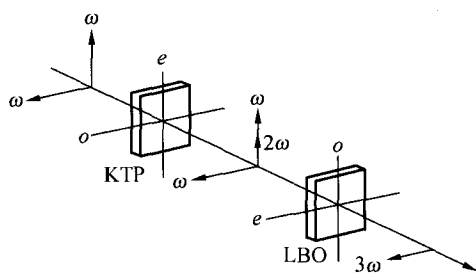


图 2 KTP 晶体中倍频(II类), LBO 晶体中三倍频(I类)光束的偏振匹配情况

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

实际上三次谐波的产生分为两个部分, 在第一个晶体中, 部分 1064 nm 基波辐射转换为二次谐波(532 nm); 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。

令参量  $S$  为三倍频晶体中二次谐波功率与总功率之比:

$$S = P_{2\omega} / (P_{\omega} + P_{2\omega}), \quad (1)$$

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  $S=0.67$ , 理论上在小信号变换的情况下, 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 355 nm 激光, 就要尽可能地提高二次谐波转换效率, 使  $P_{Green} : P_{IR}$  接近 1:1。Yushi Kaneda 等对此做过相关报道<sup>[10]</sup>。

曾有文献报道过用 LBO(I 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, 但在大功率时会产生灰线效应。本文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。

### 3 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>:

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

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:  $\xi=0.4, K_c=5.23 \text{ W}/(\text{K} \cdot \text{m}), \omega_p=200 \mu\text{m}, n_0=2.165, \alpha_T=4.43 \times 10^{-6}/\text{K}, dn_0/dT=5.092 \times 10^{-5}$ 。经计算, 在 3 W 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。

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模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) 瑞利距离大。激光在束腰附近

表 1 不同腔长对应的参数值

Tab. 1 Parameter values corresponding to different cavity lengths

cavity length (mm)	waist width ( $\mu\text{m}$ )	waist position (mm)	spot size on $M_1$ ( $\mu\text{m}$ )	spot size on $M_2$ ( $\mu\text{m}$ )	$G = g_1 * g_2$	Rayleigh length (mm)
20	113.2	2.6667	113.5	124.5	0.7704	37.83
30	122.2	3.6207	122.6	142.4	0.6611	44.09
40	127.4	4.2857	127.9	158.9	0.5555	47.92
50	129.9	4.6296	130.4	175.7	0.4537	49.82
60	129.8	4.6154	130.3	194.3	0.3556	49.75
80	119.7	3.3333	120.1	247.8	0.1704	42.30
90	104.8	1.9565	105.0	303.2	0.08333	32.439

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 40~50 mm 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, $M_1$  上的光斑半径也近似于抽运光斑半径。在 30~80 mm 之间反复实验,最终测得腔长为 43 mm 时激光输出功率最大。用紫外探头测到 355 nm 激光的最大输出功率为 6.4 mW。在直腔时所拍摄到的紫外光斑如图 3。

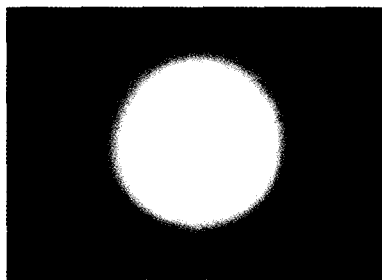


图 3 直腔时紫外光斑

Fig. 3 UV light spot

折叠腔也可提供多个束腰,对此也做了实验。装置如图 4。

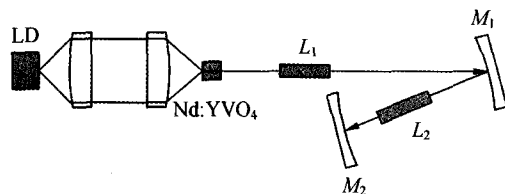


图 4 折叠腔实验装置

Fig. 4 Experimental setup of folded cavity

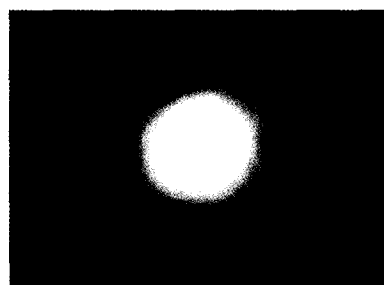


图 5 折叠腔紫外光斑

Fig. 5 UV light spot of folded cavity

采用 V 型腔虽然提供了两个束腰,但由于折叠腔存在像散,子午面与弧矢面的光腰不重合且大小也不相等,使得光斑变成椭圆形,光斑质量变差,紫外激光的输出功率仅为 4 mW。其光斑如图 5。

## 4 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 3 W 的抽运功率下,获得了 6.4 mW 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。实验中 KTP 与 LBO 晶体没有分别单独制冷,对 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体的制冷也不够理想,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。今后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泵浦全固态 355 nm 紫外脉冲激光器[J]. 光电器件, 2003, 24(2): 94-96.  
GAO L L, TAN H M. LD pumped all-solid-state 355 nm ultraviolet pulse laser[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2003, 24(2): 94-96. (in Chinese)
- [2] KANEDA Y, KUBOTA S. 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 J P, CHEN ZH Q, ZHAN Y Q, *et al.* Study of all solid-state Q-switching ultraviolet light Nd:YAG lasers [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2002, 13(8): 776-780. (in Chinese)
- [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 J, YAO J Q, WANG P, *et al.* LD pumped all-solid-state frequency tripled ultraviolet laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2002, A29(2): 86-88. (in Chinese)
- [5] BI Y, FENG Y, GONG H R, *et al.* High-average power THG of a diode-pumped Nd:YAG laser at 355 nm generated by  $\text{LiB}_3\text{O}_5$  crystal[J]. *Chinese Optics Letters*, 2003, 2:33-34.
- [6] JUN S, YUICHI A, MINORU O. Generation of 5 W deep-UV continuous wave radiation at 266 nm by an external cavity with a  $\text{CsLiB}_6\text{O}_{10}$  crystal[J]. *Opt. Lett.*, 2004, 29(1):92-94.
- [7] HIROSHI K, KATSUMI M, TETSUAKI I, *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] KUNG A H, LEE J, CHEN P J. 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[M]. (第一版)北京:科学出版社, 2002:534-536.  
KOECHNER W. *Solid-state laser engineering*[M]. (The First Edition) Beijing: Science Press, 2002. 534-536. (in Chinese)
- [10] YUSHI K, SHIGEO K. 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 Y, FAN X W, PENG Q Q, *et al.* LD pumped Nd:GdVO<sub>4</sub> [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2005, 16(5):550-553. (in Chinese)
- [12] RICHARD S. Introduction to laser diode-pumped solid state lasers[J]. *SPIE*, 2001:30-31.
- [13] CHEN Y F, TSAI S W. 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[M]. (第三版)北京:高等教育出版社, 2003:393-397.  
LV B D. *Laser optics*[M]. (The Third Edition) Beijing: Higher Education Press, 2003:393-397. (in Chinese)

作者简介:申 高(1981—),女,博士,现从事全固态激光器及非线性频率变换研究。E-mail:shengaol@163.com.