

## LD 端面泵浦 1064nm 和 355nm 双波长激光器的设计

何铁锋<sup>1</sup>, 陈义红<sup>2</sup>, 陈振强<sup>2</sup>, 尹浩<sup>2</sup>, 陈聪<sup>1</sup>

(1. 广州安特激光技术有限公司, 广州 510663;  
2. 暨南大学 光电工程研究所, 广州 510632)

**摘要:**针对激光加工过程中, 红外激光只能用于金属材料的加工, 而紫外激光则常用于非金属材料的加工, 无法同时兼顾两种材料的问题, 提出一种 1064nm 和 355nm 双波长激光器, 可在两种波长之间自由切换, 分别用于金属和非金属材料的加工。激光器采用大功率激光二极管端面泵浦 Nd:YAG 晶体, V 型谐振腔, I 类相位匹配 LBO 晶体和 II 类相位匹配 LBO 晶体进行腔内倍频与和频的方式实现 355nm 紫外激光输出。通过计算设计了高效稳定的紫外基频谐振腔, 以此谐振腔参数为基础, 又计算获得高功率高光束质量输出的红外谐振腔。两者之间采用旋转反射镜进行自由切换, 简单而有效的实现一棒多波长输出技术, 满足加工的多样性需要, 有利于工业化的应用。在泵浦功率最大为 40W 时, 得到了 5.5W 紫外激光输出和 18.1W 红外激光输出。

**关键词:**激光器; 双波长; LD 端面泵浦; 波长自由切换; 谐振腔

**中图分类号:** TN248.1 **文献标识码:** A **DOI 编码:** 10.14016/j.cnki.jgzz.2017.05.011

### Design of a LD end pumped 1064nm and 355nm dual wavelength laser

HE Tie-feng<sup>1</sup>, CHEN Yi-hong<sup>2</sup>, CHEN Zhen-qiang<sup>2</sup>, YIN Hao<sup>2</sup>, CHEN Cong<sup>1</sup>

(1. Guangzhou Ante Laser Co., Ltd, Guangzhou 510663, China;  
2. Institute of Optoelectronic Engineering, Jinan University of Technology, Guangzhou 510632, China)

**Abstract:** In the process of laser machining, the infrared laser can only be used to process metal materials while the UV laser can only be used to process nonmetallic materials. They can not process both at the same time. In order to solve this problem, a new kind of dual wavelength laser is presented in this paper. It switches between 1064nm and 355nm wavelengths which can be respectively used in metal and nonmetallic material processing. The laser source adopts a high power diode-end-pumped Nd:YAG crystal and a V type resonant cavity and type I phase-matched LBO as second harmonic generation crystal and type II phase-matched LBO as third harmonic generation crystal, the 355nm UV laser was demonstrated. Through calculation, we designed a stable and effective UV fundamental frequency resonant cavity. And base on the parameters of this cavity we calculated again and got a same-quality infrared resonant cavity that outputs high-power, high quality beam. They use the rotating mirror to switch freely and realizing the multi-wavelength-output-with-one-rod technology simply and effectively. It meets the need of diverse processing which helps the course of the industrialization. It gets a 5.5W UV laser output and a 18.1W infrared laser output while the max pump power is 40W.

**Key words:** laser; dual wavelength; LD end pumped; wavelength freely switch; resonant cavity

激光加工技术作为先进制造技术之一, 在传统产业改造、加工技术革新、国防信息化等方面发挥着重要作用, 因此激光被誉为“万能加工工具”、“未来制造系统的共同加工手段”<sup>[1-2]</sup>。长期以来, 薄钢板、不锈钢、铝合金板, 硬质合金等金属材料的切割、打标、冲孔等加工采用 1064nm 红外激光器作为光源, 而最近几年逐渐兴起的 355nm 紫外激光加工系统广泛

用于 LED 显示屏、手机面板、液晶面板、陶瓷、玻璃、PCB 板、太阳能电池片等非金属材料的切割、钻孔等加工应用<sup>[3-5]</sup>。两种波长的激光都无法既加工金属又加工非金属材料。但工业应用中, 常常需要能加工两种材料的设备, 或者用于两种材料复合加工的设备, 这就需要 1064nm 和 355nm 两波长能自由切换的双波长激光器, 为加工设备提供激光光源。

目前激光器通常是单一激光波长输出, 或者是多个波长同时输出, 不同的激光波长无法轮流应用, 满足不了激光加工多样性的需要, 不利于工业化的应用。虽然早在 1990 年, H, Y. Shen 等人<sup>[6]</sup>就开始研究双波长振荡, 但相关工作多在医学、通信、光谱等应用

收稿日期: 2017-02-17

基金项目: 广东省产学研资助项目 (2015B090901014); 广州市产学研协同创新资助项目 (201508010021)

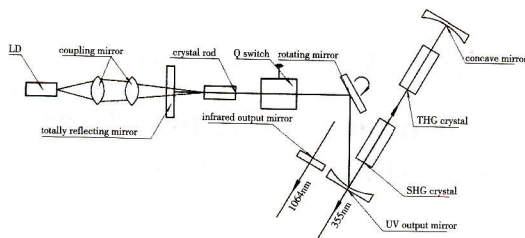
作者简介: 何铁锋 (1977-), 男, 工程师, 硕士, 主要从事激光器和激光设备的研究。E-mail: gch97@126.com

领域,用于工业加工用的 1064nm 和 355nm 双波长激光器未见报道。本文采用旋转反射镜作为波长自由切换系统,无需增加过多波长切换的元器件,减少了功率损耗环节,简单而有效的实现了一棒双波长的稳定激光输出,输出的激光波长可根据需要改变,满足加工的多样性需要。

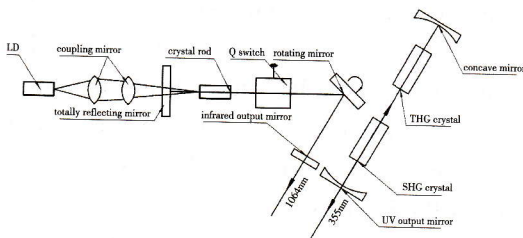
## 1 双波长激光器的系统设计和参数的计算

### 1.1 双波长激光器的系统设计

LD 端面泵浦 1064nm 和 355nm 双波长激光器如图 1 所示,主要由 LD、耦合镜、全反镜、晶体、Q 开关、旋转反射镜、红外输出镜、紫外输出镜、二倍晶体、三倍晶体、凹面镜构成。



(a) the output of 355nm laser



(b) the output of 1064nm laser

图 1 激光器系统图

如果旋转反射镜转到如图 1 (a) 所示位置时,1064nm 基频光则被反射到紫外输出镜。此时全反镜、晶体、Q 开关、紫外输出镜、二倍晶体、三倍晶体、凹面镜一起构成一个折叠式的紫外激光谐振腔,基频光经过二倍和三倍晶体倍频与和频后变为 355nm 紫外激光<sup>[7-13]</sup>;如果旋转反射镜转到如图 1 (b) 所示位置,此时全反镜、晶体、Q 开关、红外输出镜构成一个红外谐振腔,激光在谐振腔里来回震荡,最终从红外输出镜输出 1064nm 红外激光。两波长之间的切换只需要通过简单的旋转反射镜就可以,简单而有效。

### 1.2 谐振腔参数的计算及分析

激光谐振腔是激光器的重要组成部分,是由两个或者两个以上光学反射镜组成。用于提供光学正反馈和对振荡光束的控制,有效地控制腔内实际振荡的模式数目、光斑大小、谐振频率、光束发散角及输出功率等。本文以标准的 ABCD 传输矩阵理论为基础<sup>[14-15]</sup>,分别对 355nm 折叠腔和 1064nm 红外谐振腔

进行理论分析,设计了谐振腔参数。由于 355nm 紫外谐振腔需要确定的参数相对 1064nm 红外谐振腔多,计算更为复杂,因此本文先从 355nm 谐振腔开始计算,从而减少 355nm 紫外谐振腔的限定条件,再设计 1064nm 红外谐振腔,这样可降低设计的复杂度。参数经过优化设计,所得结果须满足谐振腔的稳定性条件<sup>[16-17]</sup>,且激光晶体热透镜焦距变化时,基模光斑变化不大,可实现动态热稳定输出。

双波长激光器中的 355nm 紫外谐振腔等效于图 2 (a) 所示折叠腔,以  $M_1$  为参考面开始,计算往返矩阵  $M$ :

$$M = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = L_1 \times h_1 \times f_T \times h_2 \times L_2 \times M_2 \times L_3 \times M_3 \times L_3 \times M_2 \times L_2 \times h_2 \times f_T \times h_1 \times L_1 \times M_1$$

双波长激光器中的 1064nm 红外谐振腔等效于图 2 (b) 所示直腔,以  $M_1$  为参考面开始,计算往返矩阵  $S$ :

$$S = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = L_1 \times h_1 \times f_T \times h_2 \times L_4 \times M_4 \times L_4 \times h_2 \times f_T \times h_1 \times L_1 \times M_1$$

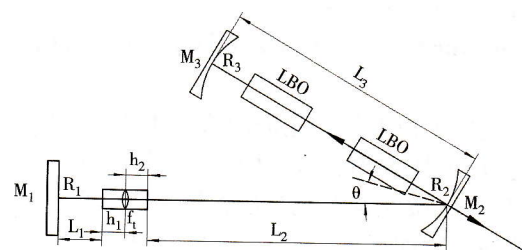
$$\text{式中: } L_1 = \begin{bmatrix} 1 & L_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, L_2 = \begin{bmatrix} 1 & L_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, L_3 = \begin{bmatrix} 1 & L_3 \\ 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$L_4 = \begin{bmatrix} 1 & L_4 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, M_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, M_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -2 & 1 \end{bmatrix},$$

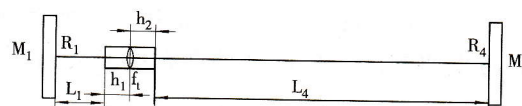
$$M_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -2 & 1 \end{bmatrix}, M_4 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -2 & 1 \end{bmatrix}, f_T = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}, h_1 =$$

$$\begin{bmatrix} 1 & h_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, h_2 = \begin{bmatrix} 1 & h_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, R_i \text{ 为反射镜的曲率半径, } \theta \text{ 为}$$

折叠角的半角,  $h_1, h_2$  均为  $\frac{1}{2}nL_0, L_0$  为晶体长度,  $n$  为晶体折射率。



(a) the equivalent chart of the 355nm UV laser



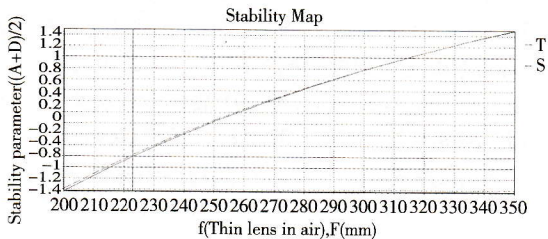
(b) the equivalent chart of 1064nm infrared laser

图 2 谐振腔等效图

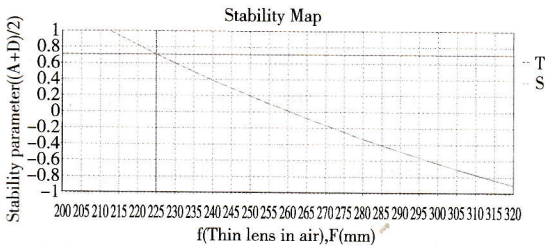
选用 Nd:YAG 晶体作为增益介质,晶体棒直径为  $\varphi = 3\text{mm}$ ,长为  $L_0 = 69\text{mm}$ 。经测量,所用的激光晶体热

透镜焦距变化范围为 225mm 至 300mm<sup>[18-19]</sup>。经过计算,如果  $R_1$  无限大(平面镜),  $L_1 = 0\text{mm}$ ,  $L_2 = 230\text{mm}$ ,  $L_3 = 140\text{mm}$ ,  $R_2 = 100\text{mm}$ ,  $R_3 = 125\text{mm}$ ,  $\theta = 6^\circ$ , 则双波长激光器中 355nm 紫外谐振腔的稳定性参量  $G$  ( $G = \frac{A+D}{2}$ ) 在子午面和弧矢面的矩阵值分别为  $M_T = -0.876$ ,  $M_S = -0.843$ , 满足谐振腔的稳定性条件  $-1 \leq 1/2(A+D) \leq 1$ 。从图 3(a) 可以看出,谐振腔的稳定性参量  $G$  从 -1 变化到 1 时,热焦距从 215mm 增加到 314mm,其中  $f_T$  为 225mm 和 300mm 所对应的参量  $G$  分别为 -0.724 和 0.773,说明所用激光晶体热透镜焦距变化范围内,355nm 紫外谐振腔是稳定的。

保持  $R_1$ 、 $L_1$ 、 $h_1$ 、 $f_T$ 、 $h_2$  值不变,计算双波长激光器中 1064nm 红外谐振腔参数,可得在  $L_4 = 265\text{mm}$ ,  $R_4 = 115\text{mm}$  时,其稳定性参量  $G$  在子午面和弧矢面的矩阵值分别为  $S_T = S_S = 0.823$ ,也可满足谐振腔稳定条件。从图 3(b) 可以看出,谐振腔的稳定性参量  $G$  从 -1 变化到 1 时,热焦距从 212mm 增加到 327mm,其中  $f_T$  为 225mm 和 300mm 所对应的参量  $G$  分别为 0.719 和 -0.642,说明所用激光晶体热透镜焦距变化范围内,1064nm 红外谐振腔是稳定的。



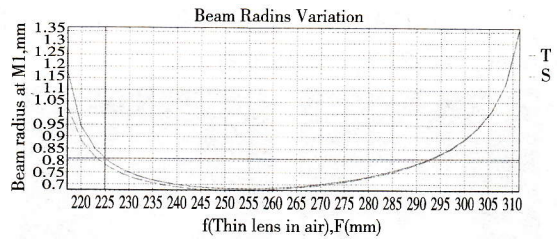
(a) the resonant cavity of 355nm UV laser



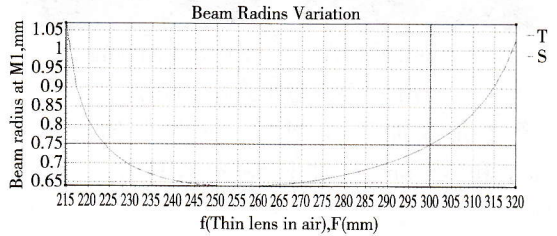
(b) the resonant cavity of 1064nm infrared laser

图 3 参量  $G$  随热焦距变化

经过运算得到,紫外谐振腔中基频光在晶体棒中心位置子午面和弧矢面的基模半径分别为 0.942×0.884mm,发散角分别为 0.021×0.022°。当热焦距波动时,晶体棒中心位置的基模光斑的变化如图 4(a) 所示:最大光斑半径出现在 225mm 处,为 0.808mm,而当热焦距为 255mm 时候,具有最小光斑半径 0.677mm,是最大光斑半径的 0.84 倍,并且其变化率最低,当热焦距在 255mm 左右波动时基模光斑的变化不大,即对热焦距不灵敏,能实现动态热稳定输出。说明热效应对模式匹配影响不是很大,可以获得稳定的紫外激光输出。



(a) the resonant cavity of 355nm UV laser



(b) the resonant cavity of 1064nm infrared laser

图 4 热焦距-基模光斑关系图

同理也可以计算出红外谐振腔中晶体棒中心位置子午面和弧矢面的基模半径 0.813×0.813 mm,发散角为 0.024×0.024 度。当热焦距波动时,晶体棒中心位置的基模光斑的变化如图 4(b) 所示:最大光斑半径出现在 300mm 处,为 0.752mm,而当热焦距为 255mm 时候,具有最小光斑半径为 0.639mm,是最大光斑半径的 0.85 倍,并且其变化率最低,当热焦距在 255mm 左右波动时基模光斑的变化不大,即对热焦距不灵敏,能实现动态热稳定输出。同样表明热效应对模式匹配影响不是很大,可稳定地输出红外激光。

## 2 实验及结果分析

根据前面的分析结果,进行了激光实验。在实验中,采用最大泵浦功率 40W 的带光纤输出的激光二极管模块,光纤纤芯为 400μm, NA = 0.22;经过放大比例为 1 : 2 的耦合透镜,泵浦光耦合到增益介质 Nd:YAG 晶体上,晶体尺寸为 φ3mm×69mm,晶体靠近泵浦模块一面镀 808nm 增透膜和 1064nm 全反膜,作为谐振腔的全反镜;倍频晶体采用 I 类角度匹配 LBO,尺寸为 3mm×3mm×20mm;和频晶体采用 II 类角度匹配 LBO,尺寸为 3mm×3mm×10mm;并在基频谐振腔中采用中心频率为 40.68MHz 声光 Q 开关<sup>[20-21]</sup>,该声光 Q 开关通过射频功率为 20W 的声光驱动电源驱动,频率在 1kHz 至 100kHz 范围内可调。

355nm 和 1064nm 两波长的激光输出功率、脉宽、光斑直径均随着泵浦功率的增加而增加,光光转换效率基本不随之变化。在泵浦功率最大为 40W 时,获得 355nm 紫外激光输出功率 5.5W,光光转换效率 13.7%,脉宽 8ns; 1064nm 红外激光输出功率 18.1W,光光效率 45%,脉宽 21ns,输出功率稳定度为 2.14%。通过激光光束质量分析仪测试紫外和红外激光输出的光束质量,光束质量因子值分别为  $M^2 =$

1.11,  $M^2 = 1.3$ , TEM<sub>00</sub> 模, 图 5 为测得 355nm 紫外激光和 1064nm 红外激光光斑分布图。

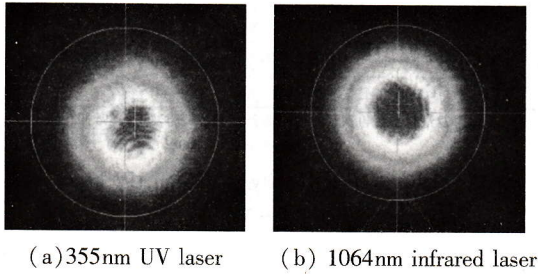


图 5 激光输出光斑分布图

经过机械加工及组装, 获得了如图 6 所示 1064nm 和 355nm 双波长激光器样机, 当旋钮上“1064”白线中间位置对应外壳上“wavelength”中线位置时, 如左图所示, 激光器将从右图标有“1064”端口输出 1064nm 红外激光, 而当转动旋钮使“355”白线中间位置对应外壳上“wavelength”中线位置, 激光器将从右图标标有“355”端口发出 355nm 紫外激光。

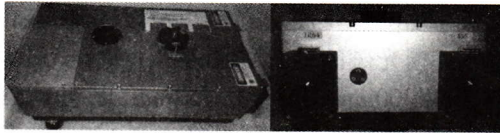


图 6 双波长激光器样机

图 7 所示为该激光器为光源的设备加工效果图, 其中图 7(a) 所示为 1064nm 红外波长在 2.5mm 钢板上加工的字母和图案, 图 7(b) 所示为 355nm 紫外波长在 1mm 玻璃上加工的二维码及数字, 由图可看出, 激光加工效果清晰, 加工精度高。

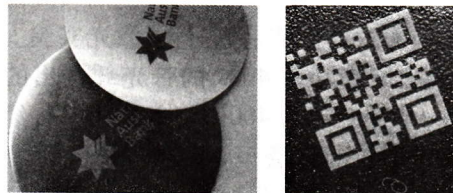


图 7 加工效果

### 3 小结

采用高功率激光二极管端面泵浦 Nd:YAG 激光晶体、声光调 Q 实现了高功率、高光束质量基频光输出, 选用 I 类相位匹配 LBO 晶体和 II 类相位匹配 LBO 晶体分别进行腔内倍频与和频, 获得了光斑质量好、输出稳定的紫外激光; 以此谐振腔为基础, 又计算获得红外谐振腔参数, 构成了相应的红外激光器; 同时设计了一套波长自由切换系统, 该系统通过旋转反射镜实现了 1064nm 和 355nm 波长自由切换。最终在泵浦功率 40W 下, 获得最大 5.5W 的紫外激光输出以及最大 18.1W 红外激光输出。

### 参考文献

- [1] 袁根福, 等. 激光加工技术的应用与发展现状[J]. 安徽建筑工业学院学报(自然科学版), 2004, 12(1): 30-33.
- [2] Chen Yihong, et al. Review of Laser Processing Systems in China [J], LIA Today (the official newsletter of the Laser Institute of America), 2007, 15(4): 8-9.
- [3] 郑启光. 激光先进制造技术[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2002.
- [4] 猛永刚. 激光加工技术[M], 北京: 国防工业出版社, 2008.
- [5] 何铁锋, 陈义红, 陈振强, 等. 长尺寸回转体的激光旋转拼接加工系统设计[J]. 激光杂志, 2016, 37(1): 16-18.
- [6] HY Shen, et al. Simultaneous multiple wavelength laser action in various neodymium host crystals[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1991, 27(10): 2315-2318.
- [7] 谭成桥, 郑权, 薛庆华, 等. LD 端泵 Nd:YAG/Cr:YAG 腔外变频产生高功率紫外[J]. 激光与红外, 2005, 35(7): 490-492.
- [8] 张晶, 樊仲维, 亓岩, 等. 高效腔内色散调 Q Nd:YAG 紫外激光器[J]. 光电子·激光, 2006, 17(12): 1474-1476.
- [9] 石朝辉, 樊仲维, 张瑛, 等. 高效率全功率全固态紫外激光器[J]. 中国激光, 2007, 34(1): 29-32.
- [10] 柳强, 闫兴鹏, 陈海龙, 等. 高功率全固态紫外激光器研究新进展[J]. 中国激光, 2010, 37(9): 2289-2298.
- [11] 张玉峰, 王运谦, 马莹, 等. LD 端泵全固态紫外激光器[J]. 激光与红外, 2007, 37(12): 1262-1264.
- [12] 柯达, 翟苏亚, 王小蕾, 等. 腔内四倍频激光增强反射腔设计[J]. 激光技术, 2016, 40(2): 195-198.
- [13] 刘慧, 姚育成, 黄楚云. LD 侧面抽运全固态 Nd:YAG 紫外激光器的研究[J]. 激光技术, 2016, 40(2): 303-306.
- [14] 吕百达. 激光光学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003.
- [15] 周炳琨, 高以智, 陈倜嵘, 等. 激光原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003.
- [16] 克希耐尔. 固体激光工程[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [17] 郑家安, 赵圣之, 张行愚, 等. LD 纵向泵浦固体激光器参数优化[J]. 光电子·激光, 2000, 11(5): 476-481.
- [18] 刘畅, 曹泽新, 刘玲, 等. 端面研磨 Nd:YAG 晶体棒热透镜焦距测量[J]. 沈阳师范大学学报, 2012, 30(1): 45-47.
- [19] 杨永明, 文建国, 王石语, 等. LD 端面泵浦 Nd:YAG 激光器中的热透镜焦距[J]. 光子学报, 2005, 34(12): 1769-1772.
- [20] 陈鹏飞, 伍波, 沈琪皓, 等. 高重频风冷声光调 Q 光纤激光器实验研究[J]. 激光技术, 2015, 39(6): 780-784.
- [21] 张枢, 金尚忠, 范夏雷, 等. 可时序控制的激光功率稳定系统[J]. 激光技术, 2016, 40(4): 461-465.