

## 双端键合复合结构被动调 Q 微型测距用激光器

班晓娜, 惠勇凌, 郭娜, 姜梦华, 雷 訇, 李 强

(北京工业大学 激光工程研究院, 北京 100124)

**摘要:** 报道了一种双端键合复合结构被动调 Q 人眼安全微型测距用激光器。实验将  $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}:\text{glass}$  和  $\text{F}_2$  glass 以及被动调 Q 晶体  $\text{Co}^{2+}:\text{MgAl}_2\text{O}_4$  三种材料进行光学热复合, 构成双端键合复合结构。实验对比了双端键合复合结构和非复合结构激光器的输出特性, 前者的激光性能参数均大幅优于后者。其中双端键合复合结构实现了重复频率 10 Hz, 单脉冲能量 330  $\mu\text{J}$ 、脉冲宽度 5.5 ns, 光束质量为 1.4 的人眼安全激光输出; 而非复合结构激光器的单脉冲能量为 245  $\mu\text{J}$ 、脉冲宽度 6.5 ns, 光束质量为 1.9。对双端键合复合结构增益介质和单块  $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}:\text{glass}$  进行热模拟, 前者的热焦距相对于后者增长了 51.2%, 双端键合复合结构热效应明显改善。综合表明双端键合复合技术可以降低增益介质内部温度梯度, 使热焦距变长, 模体积增加, 振荡光与泵浦光的模式匹配度提高, 单脉冲能量增加。

**关键词:** 双端键合复合结构; 被动调 Q; 微型化激光器

中图分类号: TN248.1 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201948.0405003

## Double-end bonded composite structure passively Q-switched micro ranging laser

Ban Xiaona, Hui Yongling, Guo Na, Jiang Menghua, Lei Hong, Li Qiang

(Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

**Abstract:** A passively Q-switched human-eye safety micro-ranging laser with a double-end bonded composite structure was reported. The double-end bonded structure was formed by the heterogeneous material composite technology, including the gain medium  $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}:\text{glass}$ ,  $\text{F}_2$  glass and passively Q-switched crystal  $\text{Co}^{2+}:\text{MgAl}_2\text{O}_4$ . The output characteristics of the double-bonded composite structure and the non-composite structure were compared in the experiment. The former laser performance parameters are significantly better than the latter. The double-bonded composite structure achieved a human eye-safe laser output of pulse energy 330  $\mu\text{J}$ , beam quality 1.4, pulse width 5.5 ns with 10 Hz repetition frequency; the non-composite structure laser had a single pulse energy 245  $\mu\text{J}$ , pulse width 6.5 ns, and the beam quality 1.9. The thermal simulation of double-bonded composite structure gain media and monolithic  $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}:\text{glass}$  shows that the former has a 51.2% increase in thermal focal length relative to the latter, and the thermal effect of the double-bonded composite structure is significantly improved. The above

收稿日期: 2018-11-16; 修订日期: 2018-12-21

基金项目: 国家自然科学基金(61378023); 北京市自然科学基金(4174085); 国家重大科研装备研制项目(ZDYZ2013-2)

作者简介: 班晓娜(1992-), 女, 硕士生, 主要从事固体激光器方面的研究。Email: banxiaona@emails.bjut.edu.cn

导师简介: 雷訇(1970-), 男, 副教授, 博士, 主要从事固体激光技术方面的研究。Email: leihong@bjut.edu.cn

shows that the double-bonded composite technology can reduce the temperature gradient inside the gain medium, make the thermal focal length longer, increase the volume of the mold, and improve the mode matching of the oscillating light and the pump light, so that the single pulse energy is increased.

**Key words:** double-end bonded composite structure; passive Q-switching; miniaturized laser

## 0 引言

1.5  $\mu\text{m}$  波段激光正好处于大气传输窗口,对烟雾等穿透能力强,且对人眼的透过率低,安全系数极高,可作为理想的人眼安全激光波段应用于激光测距<sup>[1-4]</sup>。目前开发的紧凑性高、体积小、温度适应性强、成本低<sup>[5-6]</sup>的 1.5  $\mu\text{m}$  波段微型测距激光器,在工程勘探、地质研究等民用市场有着广泛的应用。此外,提高其激光输出能量和峰值功率,增加测距范围,可极大地应用于低空导弹、无人机、单兵狙击作战等军事领域<sup>[7-9]</sup>。

随着人眼安全激光波段测距应用要求的提升,国内外对微型化激光器也在不断开发探索:2002年,美国 Kigre 公司研究员 Ruikun Wu 等人采用端面泵浦钕镜共掺磷酸盐玻璃,被动调 Q 晶体为掺  $\text{Co}^{2+}$  的尖晶石,实现了单脉冲能量 100  $\mu\text{J}$ 、脉宽 2 ns 的人眼安全激光输出<sup>[10]</sup>。VOXTEL 公司在售的小型化人眼安全激光器重复频率 10 Hz,脉宽 7 ns,峰值功率为 42.8 kW<sup>[11]</sup>。2017 年,张宇露等人研制的 LD 端面泵浦  $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}:\text{glass}$  被动调 Q 激光器,被动调 Q 元件为  $\text{Co}^{2+}:\text{MgAl}_2\text{O}_4$ ,其重复频率 10 Hz,脉宽 6 ns,单脉冲能量 113  $\mu\text{J}$ ,峰值功率为 18.8 kW<sup>[12]</sup>。此外,高意科技有限公司出售的微型化人眼安全激光器重复频率 10 Hz,脉宽 4 ns,峰值功率为 12.5 kW<sup>[13]</sup>。上述研究普遍采用分离元件,在实际使用中容易受震动的影响导致激光输出不稳定,可靠性低,且增益介质的热效应严重,无法满足大脉冲能量应用需求。2015 年,波兰军事科技大学光电子学研究所 Jaroslaw Mlynczak 等人采用  $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}:\text{glass}$  和  $\text{Co}^{2+}:\text{MgAl}_2\text{O}_4$  键合的方式,实现了重复频率 0.833 kHz,脉宽 3.2 ns,单脉冲能量 5.95  $\mu\text{J}$ ,峰值功率为 10.18 kW 的人眼安全激光输出<sup>[14]</sup>。2017 年,蔡瑾鹭等人采用  $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}:\text{glass}$  和  $\text{Co}^{2+}:\text{MgAl}_2\text{O}_4$  光学热键合的方式,获得了单脉冲能量

210  $\mu\text{J}$ ,重复频率 10 Hz,脉冲宽度 2.8 ns 的激光输出<sup>[15]</sup>。单端键合将增益介质和被动调 Q 晶体通过键合的方式整合为一整体,避免了震动等因素带来的不利影响,但增益介质带来的热效应并没有得到很大的改善,实现输出大脉冲能量激光受到限制。

文中采用  $\text{F}_2 \text{ glass}/\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}:\text{glass}/\text{Co}^{2+}:\text{MgAl}_2\text{O}_4$  双端键合复合结构,降低了  $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}:\text{glass}$  的热效应,提高的激光输出能量,加强了结构的稳定性。最终实现了单脉冲能量 330  $\mu\text{J}$ ,脉宽 5.5 ns,峰值功率 60 kW 的 1.5  $\mu\text{m}$  波段激光输出,其光束质量为 1.4,能量稳定性波动为 6%,能量得到了进一步的提高。

## 1 实验结果与分析

### 1.1 实验装置

双端键合复合结构激光器实验装置图如图 1 所示,由 LD 泵浦源、聚焦镜、 $\text{F}_2 \text{ glass}/\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}:\text{glass}/\text{Co}^{2+}:\text{MgAl}_2\text{O}_4$  复合异种材料组成。

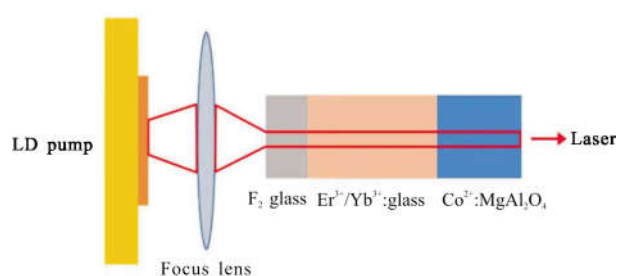


图1 双端键合复合结构的被动调 Q 激光器实验装置  
Fig.1 Experimental device of double-end bonded composite structure passively Q-switched laser

实验将中心波长 940 nm 的二极管激光器作为泵浦源<sup>[12]</sup>,经快轴准直和  $f=5 \text{ mm}$  的平凸透镜聚焦后,泵浦光斑束腰半径变为 90  $\mu\text{m}$ 。实验所用的  $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}:\text{glass}$  的掺杂浓度是 1 wt.%  $\text{Er}^{3+}$  和 21 wt.%  $\text{Yb}^{3+}$ ,尺寸为 1 mm $\times$ 1 mm $\times$ 5 mm。增益介质  $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}:\text{glass}$  采用双端键合的方式,近泵浦源侧键合一块 1 mm $\times$

1 mm×1.5 mm 的 F<sub>2</sub> glass, 主要起热沉作用, 且在其端面镀 940 nm 波长增透及 1 535 nm 波长全反膜; 近输出端键合一块 1 mm×1 mm×3.5 mm 的 Co<sup>2+</sup>:MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 晶体, 作为被动调 Q 元件, 吸收系数 α=1.23, 镀 940 nm 波长全反膜及 1 535 nm 波长透过率 20% 的部分反射膜。Er<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup>:glass 中 Er 离子的上能级寿命约为 8 ms, 为了尽可能增加泵浦光利用率, 实验通过外触发系统调制泵浦脉宽为 6 ms, 且重复频率为 10 Hz。复合结构尺寸为 1 mm×1 mm×10 mm, 总腔长为 10 mm。

### 1.2 实验结果

采用 F<sub>2</sub> glass/Er<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup>:glass/Co<sup>2+</sup>:MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 复合异种材料进行实验, 实验结果如下: 泵浦光功率为 252 mW, 泵浦脉宽 6 ms 条件下, 激光器实现稳定输出, 如图 2 所示。其中单脉冲能量 330 μJ, 脉宽 5.5 ns, 光束质量 M<sup>2</sup> 为 1.4, 输出能量稳定性波动为 6%, 光-光转换效率为 1.3%。

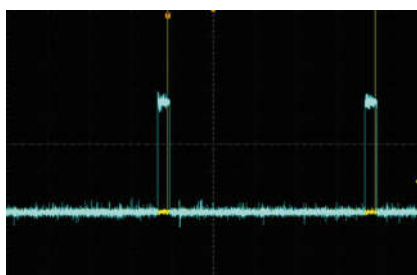


图 2 激光稳定输出时的脉冲序列

Fig.2 Stable output laser pulse sequence

为了进一步说明双端键合复合结构激光器输出激光特性的优势, 在相同的谐振腔参数条件下(即各个元件均相同且位置不变, 唯一改变的是采用尺寸相同、分离的 F<sub>2</sub> glass/Er<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup>:glass/Co<sup>2+</sup>:MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, 同时在 F<sub>2</sub> glass 靠近泵浦源一侧镀 940 nm 波长增透及 1 535 nm 波长全反膜, Co<sup>2+</sup>:MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 靠近输出端侧镀 940 nm 波长全反膜及 1 535 nm 波长透过率 20% 的部分反射膜, 为了尽可能创造相同的实验环境, 其余端面均镀 1 535 nm 增透膜, 以减小端面损耗)与非复合结构激光器的输出功率、能量稳定性、脉冲宽度、光束质量等参量进行对比。

双端键合复合结构激光器和非复合结构激光器的输出功率随着泵浦光功率的增加而增加, 如图 3 所示。其中, 复合结构激光器的阈值为 180 mW, 较非

复合结构低, 说明其激光腔内部损耗小; 当达到稳定状态时, 复合结构激光器输出功率为 3.3 mW, 光-光转换效率达到 1.3%, 而非复合结构激光器的阈值为 218 mW, 输出功率为 2.45 mW, 光-光转换效率较复合结构低, 为 0.875%。该类激光器光-光转换效率低的原因主要有: (1) 激光器的增益介质是钕镱共掺的磷酸盐玻璃, 镱离子吸收泵浦光, 再通过能量转换的方式将能量传递给钕离子, 转换效率为 90%, 存在能量损耗; (2) 被动调 Q 激光器存在能量积累的过程, 会发生寄生振荡; (3) 该激光器为了得到较高的输出能量和峰值功率, 选择的钕玻璃长度较长, 可能存在再吸收和粒子上转换的问题。

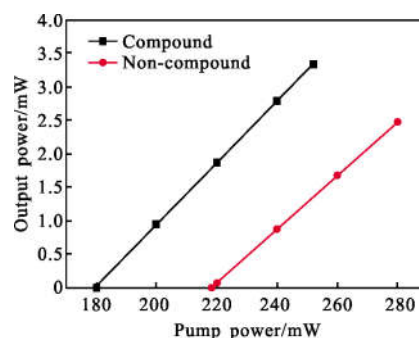


图 3 复合结构和非复合结构激光输出平均功率与泵浦光功率的关系

Fig.3 Average output power vs pump power for compound structure and non-compound structure laser

通过能量计多次测量激光器的输出激光脉冲, 得到双端键合复合结构与非复合结构激光器的输出能量稳定性波动图, 如图 4 所示。由图中可知, 双端键合复合结构激光器输出能量明显高于非复合结构

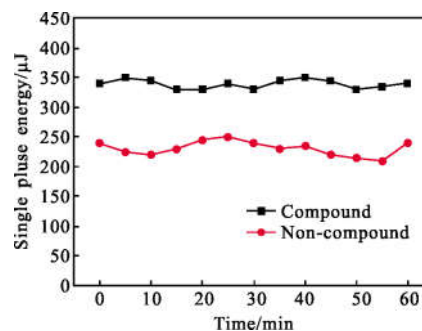


图 4 复合结构与非复合结构激光器输出稳定性图

Fig.4 Laser output stability diagram of compound structure and non-compound structure

激光器输出能量。其中,非复合结构激光器输出能量在 220~250  $\mu\text{J}$  之间,稳定性波动幅度较大,约为 13%,而复合结构激光器输出能量在 330~350  $\mu\text{J}$  之间,稳定性波动幅度较小,约为 6%。

图 5 为示波器输出两种结果脉冲宽度结果图。双端键合复合结构激光器的脉宽为 5.5 ns,非复合结构激光器的脉宽为 6.4 ns,相对应的峰值功率分别为 60 kW 和 38.3 kW。两者的波形拖尾有较大差异,主要是因为测量过程中衰减程度不一样,导致放大率不同,但并不影响 FWHM 的测量结果。

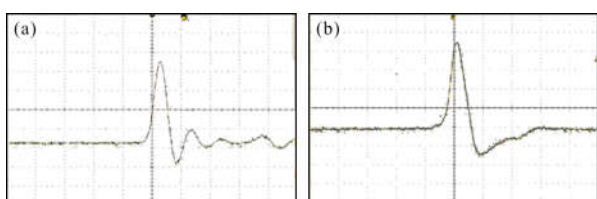


图 5 复合结构激光器输出脉宽(a);非复合结构激光器输出脉宽(b)

Fig.5 Output pluse width of compound structure laser (a) and output pluse width of non-compound structure laser (b)

实验对比了双端键合复合激光器和非复合激光器达到稳定输出时输出光的远场光斑形状和光束质量。测光束质量的具体方法是在输出镜后加入  $f=100\text{ mm}$  的透镜对输出光进行压缩,利用刀口测出光束束腰前后对称位置光斑的直径,输入软件求得光束质量  $M^2$ 。结果如图 6 所示。从图中可以看出,复合结构输出的光斑基本呈圆形,光斑光束质量  $M^2$  为 1.4;非复合结构输出的光斑光束质量  $M^2$  为 1.9。

综上所述,复合结构激光器的输出特性均大幅优于非复合结构,其原因是:双端键合复合结构中的  $\text{F}_2$  玻璃起到了热沉的作用,使增益介质的热效应降低,提高了激光单脉冲能量和改善了光束质量。同

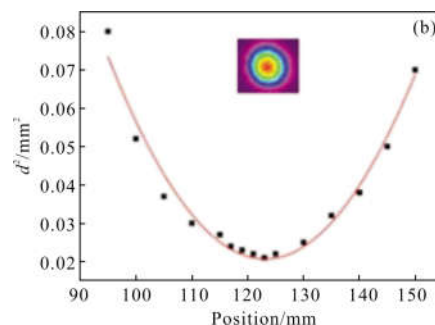
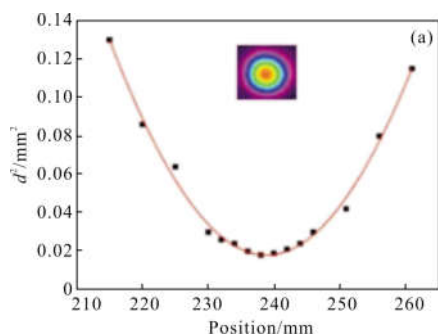


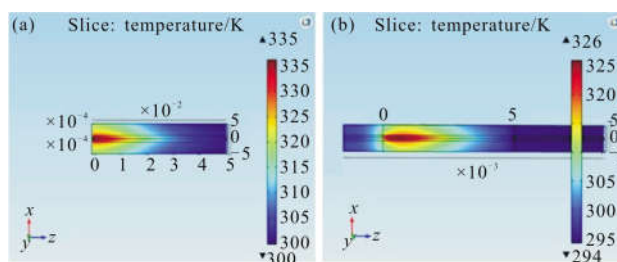
图 6 复合结构激光器光束质量(a);非复合结构激光器光束质量(b)

Fig.6 Beam quality of compound structure laser (a) and beam quality of non-compound structure laser (b)

时,双端键合复合结构减小了腔内损耗,腔内的粒子数密度提高,Q 开关灵敏性增强使得脉宽变窄,有利于提高输出激光峰值功率。而非复合的激光器由于各个分离元件之间存在微米量级的间隔,腔内振荡光每次经过时均会发生界面损耗,增加了激光器的阈值,导致激光输出能量减小。

### 1.3 结果分析

为了更加直观地说明双端键合复合结构在热性能上的优势,利用 COMSOL 软件,在相同泵浦功率下分别对单块非复合  $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}:\text{glass}$  和双端键合复合  $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}:\text{glass}$  的温度场和应力场进行模拟。单块非复合结构的规格为  $1\text{ mm}\times 1\text{ mm}\times 5\text{ mm}$ ,双端键合复合结构的规格为  $1\text{ mm}\times 1\text{ mm}\times 10\text{ mm}$  (其中,  $\text{F}_2\text{ glass}/\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}:\text{glass}/\text{Co}^{2+}:\text{MgAl}_2\text{O}_4$  的规格分别为  $1\text{ mm}\times 1\text{ mm}\times 1.5\text{ mm}$ ,  $1\text{ mm}\times 1\text{ mm}\times 5\text{ mm}$ ,  $1\text{ mm}\times 1\text{ mm}\times 3.5\text{ mm}$ )。设定泵浦区域  $\Phi 0.2\text{ mm}\times 5\text{ mm}$ ,四周金属冷却,泵浦平均功率为 252 mW,初始温度设为 293.15 K。利用 COMSOL 给出了  $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}:\text{glass}$  长度方向中心线(Z 轴)的温度场分布曲线,泵浦面截面的温度场分布曲线,因其温度呈对称分布,只分析了  $y=0$  情况下  $x$  轴方向的温度分布,结果如图 7 所示。



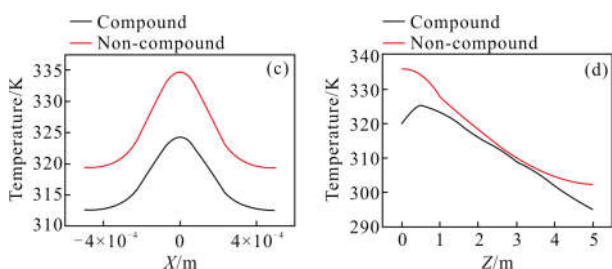


图 7 非复合结构(a)和复合结构(b)温度分布;x 轴方向的温度分布曲线(c);z 轴方向的温度分布曲线(d)

Fig.7 Temperature distribution of a non-composite structure (a) and a double-end composite structure (b); temperature distribution along the x-axis (c); temperature distribution along the z-axis (d)

对比得出,双端键合复合的  $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}:\text{glass}$  在相同泵浦功率下较单块非复合  $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}:\text{glass}$  内部温度低了  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,说明双端键合结构能够有效地降低  $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}:\text{glass}$  升温。其中,  $\text{F}_2$  玻璃起到了热沉的作用,  $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}:\text{glass}$  中高增益区域的热量通过  $\text{F}_2$  玻璃大量传导出,增强了整体的散热性能,改善了增益介质内部的热分布。

进一步通过热焦距定性分析铒玻璃内部的热透镜效应。增益介质热焦距与光程差 OPD 存在以下关系<sup>[16]</sup>:

$$\text{OPD}(x, y, z) = \int_0^l \frac{\partial n}{\partial T} T(x, y, z) dz + (n_0 - 1) \Delta l + \sum_{i,j=1}^l \frac{\partial n}{\partial \sigma_{i,j}}(x, y, z) dz \quad (1)$$

将光程差写成泰勒级数展开的形式:

$$\text{OPD}(s) = p_0 + p_1 s + p_2 s^2 + p_3 s^3 + \dots + p_n s^n \quad (2)$$

式中:二次项系数  $p_2$  与热透镜焦距有关。关系表达式如下:

$$f_{\text{thermal}} = -\frac{1}{2p_2} \quad (3)$$

通过 COMSOL 和 MATLAB 联合模拟得到  $p_2$ , 继而得到不同功率下的热焦距,结果如图 8 所示。复合结构的热焦距在相同泵浦光功率的条件下较非复合结构的热焦距大,说明复合结构对于减弱增益介质的热效应有明显作用。

综上所述:双端键合复合结构在降低  $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}:\text{glass}$  整体温度的同时也降低了内部的温度梯度,使热焦距变长,模体积增加,有利于复合结构振荡光与泵浦光更好地匹配,增加单脉冲能量,提高光束质量。

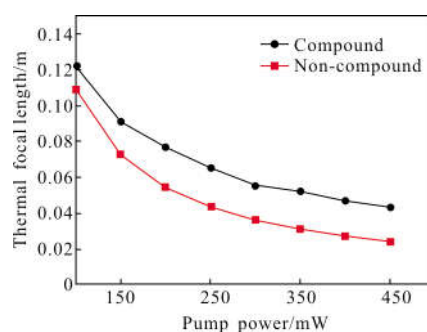


图 8 复合结构激光器和非复合结构激光器热焦距对比图

Fig.8 Comparison of thermal focal lengths of compound structure laser and non-compound structure laser

图 9 为该激光器的封装剖面图:1 为泵浦源卡具;2 为整形透镜卡具;3 为透镜;4 和 5 为键合晶体固定底座和卡具;6、7、8 为双端键合晶体(分别为  $\text{F}_2$  玻璃、增益介质、调 Q 晶体);9 为泵浦源电极。晶体支架采用紫铜材料,增强了整体的散热性能。

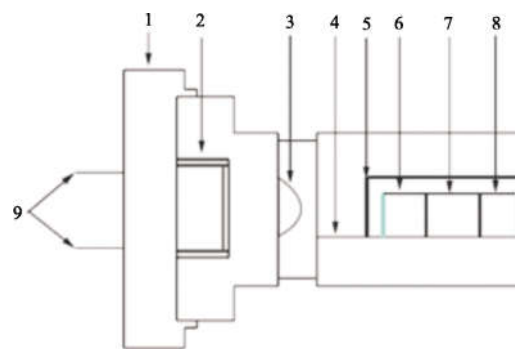


图 9 微型化人眼安全激光器剖面图

Fig.9 Frontal plane of miniaturized human eye safety laser

该激光器采用常规接收孔径,可对不同大小的目标测距,主要有:建筑物类目标测距范围可达 20 km 以上,标准车目标测距约 12 km,人体目标接近 4 km。

## 2 结论

报道了一种采用双端键合复合结构的新型人眼安全微型激光测距用激光器。采用  $\text{F}_2 \text{ glass}/\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}:\text{glass}/\text{Co}^{2+}:\text{MgAl}_2\text{O}_4$  进行实验,对比了双端键合复合结构与非复合结构激光器输出性能参量,结果表明前者的各项输出特性均大幅优于后者,其中双端键合复合结构激光器在泵浦功率 252 mW、重复频率 10 Hz 时,获得脉宽 5.5 ns、单脉冲能量 330  $\mu\text{J}$ 、峰值

功率 60 kW, 光束质量  $M^2$  为 1.4 的 1.5  $\mu\text{m}$  波长激光输出, 且能量稳定性波动为 6%、光-光转换效率达到 1.3%。在此基础上, 对两种激光器的增益介质进行 COMSOL、MATLAB 联合模拟分析, 在相同泵浦功率下, 双端键合复合结构的增益介质温度更低且热焦距更长, 热效应明显改善。研究表明  $\text{F}_2$  glass/ $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ :glass/ $\text{Co}^{2+}$ : $\text{MgAl}_2\text{O}_4$  三者键合的复合结构减小了激光器增益介质的热效应, 有利于激光输出能量和光束质量的提高。

### 参考文献:

- [1] Zhou Bingkun, Gao Yizhi, Chen Tirong, et al. Laser Principle [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2000: 4-24. (in Chinese)  
周炳琨, 高以智, 陈倜嵘, 等. 激光原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2000: 4-24.
- [2] Li Shaoyu. Eye safety lasers overview [J]. *Laser Journal*, 1996, 17(2): 53-57. (in Chinese)  
李绍育. 人眼安全激光器综述[J]. 激光杂志, 1996, 17(2): 53-57.
- [3] Feng Yutong, Meng Junqing, Chen Weibiao. Research development of eye-safe all-solid-state lasers [J]. *Laser and Optoelectronics Progress*, 2007, 44(10): 33-38. (in Chinese)  
冯宇彤, 孟俊清, 陈卫标. 人眼安全全固态激光器研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2007, 44(10): 33-38.
- [4] Xu Cuilian, Wang Binke, Liu Jing. Study on output characteristics of  $\text{Er}^{3+}, \text{Yb}^{3+}$  codoped phosphate glass laser [J]. *Study on Optical Communication*, 2013, 175(1): 36-38. (in Chinese)  
徐翠莲, 王斌科, 刘静.  $\text{Er}^{3+}, \text{Yb}^{3+}$ 共掺磷酸盐玻璃激光器输出特性研究[J]. 光通信研究, 2013, 175(1): 36-38.
- [5] Xu Jia, Wu Sida, Liu Jiang, et al. Passively Q-switched erbium-doped fiber laser with grapheme oxide saturableabsorber[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2012, 24(12): 2783-2786. (in Chinese)  
徐佳, 吴思达, 刘江, 等. 氧化石墨烯被动调 Q 掺铒光纤激光器[J]. 强激光与粒子束, 2012, 24(12): 2783-2786.
- [6] Zhang Hui, Chen Yu, Wang Zhiteng, et al. Wavelength-tunable passively Q-switched erbium-doped fiber laser with grapheme-based saturableabsorber[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2012, 24(12): 2807-2810. (in Chinese)  
张慧, 陈宇, 王志腾, 等. 石墨烯可调谐被动调 Q 掺铒光纤激光器[J]. 强激光与粒子束, 2012, 24(12): 2807-2810.
- [7] Liu Liping. Military prospect of 1.57  $\mu\text{m}$  OPO eye-safe laser [J]. *Laser & Infrared*, 2003, 33(4): 300-303. (in Chinese)  
刘莉萍. 1.57  $\mu\text{m}$  OPO 人眼安全激光技术的军用前景分析[J]. 激光与红外, 2003, 33(4): 300-303.
- [8] Luo Juping, He You. Discussing the exploitation of the 1.5  $\mu\text{m}$  laser rangefinder applied in artillery safety[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(s): 242-244. (in Chinese)  
罗举平, 贺有. 开发炮兵 1.5  $\mu\text{m}$  安全型激光测距机浅析[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(s): 242-244.
- [9] Song Xinxiang, Zhang Xiaoxia, Dong Fengmei, et al.  $\text{Er}^{3+}, \text{Yb}^{3+}$  co-doped phosphate glass laser and its applications [J]. *Laser and Optoelectronics Progress*, 2004, 41(9): 33-36. (in Chinese)  
宋新祥, 张晓霞, 董峰梅, 等.  $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺的磷酸盐激光玻璃及其应用[J]. 激光与光电子学进展, 2004, 41(9): 33-36.
- [10] Wu Ruikun, Myers J D, Myers M J, et al. Diode pumped miniature eye-safe laser Q-switched by  $\text{U}_2:\text{CaF}_2$  and  $\text{CO}_2:\text{MgAl}_2\text{O}_4$ [C]//SPIE, 2002, 4723: 94-99.
- [11] VOXTELOPTO. Laser-Eyesafe DPSS[EB/OL]. [2018-11-16] <http://voxtel-inc.com/products/lasers-eyesafe-dpss>.
- [12] Zhang Yulu, Hui Yongling, Jiang Menghua, et al. Experimental study on passively Q-switched microlaser of LD pumped codoped phosphate glass[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(3): 0305004. (in Chinese)  
张宇露, 惠勇凌, 姜梦华, 等. LD 泵浦钕共掺磷酸盐玻璃被动调 Q 微型激光器实验研究 [J]. 红外与激光工程, 2017, 46(3): 0305004.
- [13] II-VI SUWTECH. Products/Q-Switched Laser [EB/OL]. [2018-11-16]. <http://www.ii-vi-suwtech.com/products/q-switched-laser.html>.
- [14] Jaroslaw M, Nabil B. Monolithic thermally bonded  $\text{Er}^{3+}, \text{Yb}^{3+}$ : glass/ $\text{Co}^{2+}$ : $\text{MgAl}_2\text{O}_4$  microchip lasers[J]. *Optics Communications*, 2015, 356: 166-169.
- [15] Cai Jinlu, Zhang Yulu, Guo Na, et al. LD pumped  $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ :glass/ $\text{Co}^{2+}$ : $\text{MgAl}_2\text{O}_4$  composite material passively Q-switched miniature laser[J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2017, 28(9): 946-950. (in Chinese)  
蔡瑾鹭, 张宇露, 郭娜, 等.  $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ : glass /  $\text{Co}^{2+}$ :  $\text{MgAl}_2\text{O}_4$  复合材料 LD 泵浦被动调 Q 微型激光器[J]. 光子·激光, 2017, 28(9): 946-950.
- [16] Pfistner C, Weber R, Weber H P, et al. Thermal beam distortions in end-pumped Nd:YAG, Nd:GSGG, and Nd:YLF rods[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1994, 30(7): 1605-1615.