

# 单频 2 $\mu\text{m}$ 波段全固态脉冲激光器技术进展

陈忆兰<sup>1,2\*\*</sup>, 朱小磊<sup>1,2\*</sup>, 张俊旋<sup>3</sup>, 刘继桥<sup>2,3</sup>, 陈卫标<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>中国科学院上海光学精密机械研究所空间激光传输与探测技术重点实验室, 上海 201800;

<sup>2</sup>中国科学院大学材料与光电研究中心, 北京 100049;

<sup>3</sup>中国科学院上海光学精密机械研究所空间激光工程技术实验室, 上海 201800

**摘要** 2  $\mu\text{m}$  波段单频脉冲激光是用于大气风场及大气 CO<sub>2</sub> 浓度探测激光雷达的核心光源, 根据不同的应用需求, 系统阐述了 2  $\mu\text{m}$  波段连续单频激光器、高重复频率脉冲激光器、低重复频率脉冲激光器的研究历程, 并着重分析了各自的技术特点, 最后对单频 2  $\mu\text{m}$  波段全固态激光器的发展趋势作了展望。

**关键词** 全固态激光器; 单频激光器; 高重复频率脉冲激光器; 低重复频率脉冲激光器

中图分类号 TN21

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.050006

## Development of Pulsed Single-Frequency 2 $\mu\text{m}$ All-Solid-State Laser

Chen Yilan<sup>1,2\*\*</sup>, Zhu Xiaolei<sup>1,2\*</sup>, Zhang Junxuan<sup>3</sup>, Liu Jiqiao<sup>3</sup>, Chen Weibiao<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Space Laser Communication and Detection Technology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

<sup>2</sup>Center of Materials Science and Optoelectronics Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

<sup>3</sup>Laboratory of Space Laser Engineering, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

**Abstract** 2  $\mu\text{m}$  single-frequency pulse laser is the key light source of lidar for the detection of the atmospheric wind field and CO<sub>2</sub> concentration. In the paper, the research progress of the continuous-wave 2  $\mu\text{m}$  single-frequency laser, pulsed high-repetition-frequency laser and pulsed low-repetition-frequency laser are summarized respectively, according to different application requirements. Their technical characteristics are analyzed as well. The development tendency of the pulsed single-frequency 2  $\mu\text{m}$  all-solid-state laser is prospected.

**Key words** all solid state laser; single-frequency laser; pulsed high-repetition-frequency laser; pulsed low-repetition-frequency laser

**OCIS codes** 140.3580; 140.3570; 140.3460

## 1 引言

在大气中传输的 2  $\mu\text{m}$  波段窄线宽激光有较高的透射率, 且对人眼的安全性优于 1  $\mu\text{m}$  波段激光, 因而作为发射光源被应用于多普勒测风雷达中<sup>[1]</sup>。由于 2  $\mu\text{m}$  波段覆盖水分子和 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> 等温室气体分子的光谱吸收峰, 使其对应的窄线宽激光在穿透大气的过程中, 因气体分子共振吸收而发生明显

的强度衰减。这类衰减现象被广泛应用于特种气体分子浓度的精确反演, 极大促进了单频 2  $\mu\text{m}$  激光在大气温室气体探测<sup>[2-3]</sup>、激光主动遥感<sup>[4-5]</sup>和军事战场环境监测<sup>[6]</sup>等领域的应用。随着中红外激光技术应用领域不断拓展, 为了获得高脉冲能量、可调谐中红外激光输出, 单频大能量 2  $\mu\text{m}$  脉冲激光器作为中红外激光的泵浦光源, 广泛应用于中红外晶体参量振荡器中<sup>[7-9]</sup>。在现代智能制造的激光精细加

收稿日期: 2019-07-08; 修回日期: 2019-08-06; 录用日期: 2019-09-02

基金项目: “十三五”测风项目

\* E-mail: xlzhu@siom.ac.cn; \*\* E-mail: chenyan@siom.ac.cn

工领域,因金属材料对  $2\ \mu\text{m}$  波段激光具有高吸收性,可避免激光加工过程中添加强毒性添加剂,大大简化了材料加工步骤,并显著减少对环境的污染,在工业加工中接受度越来越高<sup>[10-11]</sup>。同样,在激光医学领域,由于  $2\ \mu\text{m}$  波段窄线宽激光能够与人体细胞组织内水分子的吸收线相匹配,使得高功率  $2\ \mu\text{m}$  激光在外科手术中组织切割、结石摘除等方面,也展现出其独特的优势和应用潜力<sup>[12-14]</sup>。

获得  $2\ \mu\text{m}$  波段激光输出有两种典型方法:第一种方法采用  $1\ \mu\text{m}$  激光抽运光参量振荡(OPO)的非线性频率变换技术获得  $2\ \mu\text{m}$  激光输出<sup>[15]</sup>;第二种方法采用抽运掺杂稀土离子( $\text{Tm}^{3+}$ 、 $\text{Ho}^{3+}$ )增益介质直接获得  $2\ \mu\text{m}$  激光输出。通常情况下,由非线性晶体 OPO 技术产生的  $2\ \mu\text{m}$  激光,在无单频种子注入的情况下,输出的激光光谱线宽较宽,尤其在高能量脉冲输出时更是如此。第二种方法则可以通过在腔内插入色散元件的方法获得窄线宽的单频激光输出,显著减小了激光器的复杂度,同时提升了激光器输出的稳定性。

围绕  $2\ \mu\text{m}$  波段单频激光器技术发展,综述了连续单频激光器、高重复频率低能量脉冲激光器、低重复频率高能量脉冲激光器的技术发展,分析了三类典型激光器的技术特点和关键所在,最后结合应用需求,对  $2\ \mu\text{m}$  波段单频全固态激光器的技术发展进行了展望。

## 2 $2\ \mu\text{m}$ 波段单频全固态激光器

要实现激光振荡器的单纵模输出,必须对激光谐振腔引入选模措施。目前激光谐振腔最常用的选模方法有:Fabry-Perot(F-P)标准具法<sup>[16]</sup>、扭转腔模法<sup>[17]</sup>、单块晶体非平面环形腔(NPRO)法<sup>[18]</sup>以及环形波腔法<sup>[19]</sup>等。

F-P 标准具法是通过在谐振腔内加入 F-P 标准具调节纵模损耗,使所选择的纵模在模式竞争中占优势,抑制其他纵模的产生,从而实现单纵模输出。通过调节标准具的角度或温度,实现激光器波长的可调谐输出<sup>[20]</sup>。虽然实现容易,但在抽运光功率较高的情况下会出现多纵模输出<sup>[21]</sup>,存在系统稳定性问题。

扭转腔模法是通过在激光增益晶体两端各放置一个  $\lambda/4$  波片,使激光通过晶体时偏振态发生旋转,从而消除腔内光场的驻波模式,通过抑制空间烧孔效应达到选模的目的。但当增益介质出现双折射效应时,扭转腔模法无法得到稳定的单纵模运转,易发

生跳模现象<sup>[22]</sup>。

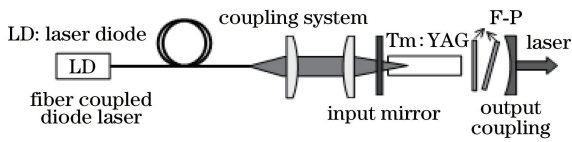
NPRO 法是利用增益介质全反射面的相位延迟效应,增加晶体入射面特殊膜层的偏振选择作用,额外施加外磁场的法拉第旋光效应,使激光在增益介质内实现单向运转<sup>[23]</sup>。单块 NPRO 激光器具有良好的稳定性,已实现 W 级激光功率输出<sup>[18]</sup>,但目前仅局限于各向同性的增益介质。

环形波腔法是通过强迫激光在腔内单向运转,抑制腔内增益介质的空间烧孔效应,实现单纵模输出。不同于 NPRO 技术,该方法对晶体的加工精度要求不高,且便于在谐振腔内插入其他分立元件。

尽管上述几种技术手段都可以获得单频激光输出,但其激光输出功率有限。要实现更高功率或更大脉冲能量的单频激光输出,则需引入功率放大技术。目前单频激光常用的放大技术有主振荡功率放大(MOPA)技术<sup>[24]</sup>和注入锁定放大技术<sup>[25]</sup>。由于 MOPA 技术是直接将单频种子激光信号导入到激光放大器链路中,实现激光功率或脉冲能量的定标放大,具有结构简单、光谱稳定性好的优点,应用前景广泛。

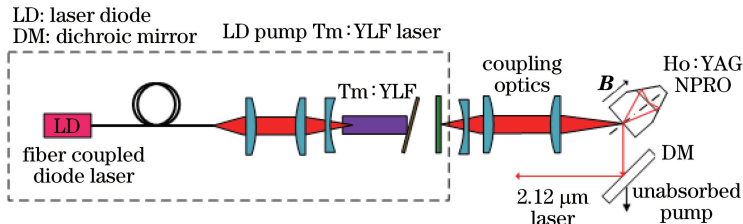
### 2.1 连续 $2\ \mu\text{m}$ 波段单频激光器

连续运转的单频  $2\ \mu\text{m}$  激光器通常采用 F-P 标准具、NPRO、扭转腔模法等方式进行选模以实现单频输出。哈尔滨工业大学于 2011 年率先研制了室温工作的单频  $\text{Tm}:\text{YAG}$  激光器,设计腔内插入的两个标准具厚度分别为  $0.1\ \text{mm}$  和  $1\ \text{mm}$  时,实现了  $2013.91\ \text{nm}$  波长、 $60\ \text{mW}$  平均功率的单频输出<sup>[16]</sup>。2012 年,该课题组在  $\text{Tm}:\text{GdVO}_4$  激光谐振腔中,插入厚度分别为  $0.05\ \text{mm}$  和  $1\ \text{mm}$  的两个标准具,实现了  $1897.6\ \text{nm}$  波长、 $34\ \text{mW}$  的平均功率单频连续激光输出<sup>[26]</sup>。为了获得波长可调谐输出,2012 年,北京理工大学设计了可精确控温的标准具,在如图 1 所示的双 F-P  $\text{Tm}:\text{YAG}$  激光器中,成功实现了  $681\ \text{mW}$  平均功率的单频激光输出,斜率效率约为  $20.5\%$ ,光谱线宽为  $40\ \text{kHz}$ 。实验中通过调节标准具的温度,实现了输出波长的可调谐,调谐系数约为  $2.57\ \text{GHz}/^\circ\text{C}$ <sup>[26]</sup>。2017 年,哈尔滨工程大学报道了双 F-P  $\text{Ho}:\text{Sc}_2\text{SiO}_5$  单纵模激光器,采用  $\text{Tm}:\text{YAP}$  激光器作为抽运光源,获得最大输出功率约为  $590\ \text{mW}$  的连续单频激光输出,中心波长约为  $2111.91\ \text{nm}$ ,光光转换效率和斜率效率分别达到  $5.8\%$  和  $9.7\%$ <sup>[27]</sup>。洛阳光电设备研究所于 2018 年研制了双 F-P  $\text{Tm},\ \text{Ho}:\text{LuAG}$  激光器,当标准具的厚度分别为  $0.1\ \text{mm}$  和  $1\ \text{mm}$  时,激

图1 腔内双标准具 Tm:YAG 单频激光器示意图<sup>[26]</sup>Fig. 1 Schematic diagram of the single-frequency Tm:YAG laser with two intra-cavity etalons<sup>[26]</sup>

光器在波长为 2022.64 nm 处的最大输出功率可达到 93 mW,斜率效率为 4.1%<sup>[28]</sup>。由于腔内 F-P 易引入严重的插入损耗,使得该类激光器输出功率被局限在几十 mW 到几百 mW 之间。

基于 NPRO 及扭转腔模法的 2 μm 连续单频激光器研究工作相对较少。图 2 为北京理工大学于 2013 年研制的 2 μm 连续单频 NPRO Ho:YAG 激光器结构示意图,单块激光晶体处于一定磁场  $B$  中,利用法拉第旋光效应使激光单向运转,实现单纵模输出。以 Tm:YLF 激光器作为泵浦源,获得最大输出功率为 8 W 的连续单频激光,是如今文献可查到的 2 μm 波段连续单频激光器能够达到的最大输出功

图2 单频 NPRO Ho:YAG 激光器结构示意图<sup>[18]</sup>Fig. 2 Experimental setup of single-frequency NPRO Ho:YAG laser<sup>[18]</sup>

研究发现,不同腔结构的 2 μm 波段连续单频激光器,主要通过在腔内插入单个或双 F-P 标准具实现。尽管在提升输出功率方面做出了很多努力,并在实验上实现了 2 μm 波段连续单频激光器输出功率的逐渐提高,但由于 F-P 是高损耗部件,加上在高功率运转下全固态激光器易出现光损伤及热致双折射等问题,会导致激光器出现非单纵模运转现象,输出稳定性下降。这也正是该类激光器输出光功率和光光转换效率未见显著突破的主要原因。中小功率的 2 μm 波段连续单频激光器,因其输出光谱线宽较窄、稳定性好的特点,被普遍应用于单频激光放大系统的窄线宽种子光源。若想进一步提升 2 μm 连续单频激光器的输出功率和稳定性,则需要设计新的谐振腔结构及采用注入锁定放大技术。

## 2.2 高重复频率 2 μm 波段单频激光器

在激光雷达(如多普勒测风雷达)应用中,高重复频率激光脉冲是提高雷达探测时间和空间分辨率

率。斜率效率达到 61.4%,光光效率约为 50%,通过调节 Ho:YAG 增益晶体的温度,实现了激光器波长的可调谐输出。该激光器在  $x$  和  $y$  方向上输出的光束质量因子  $M^2$  皆优于 1.1<sup>[18]</sup>。2012 年,北京理工大学采用扭转腔模法首次实现了 2 μm 波段连续单频激光器的高功率输出,在特殊设计的“L”型谐振腔结构中,通过在 Tm:YAG 晶体两端各加入一个  $\lambda/4$  波片以抑制空间烧孔效应,获得 1.64 W 平均功率的连续激光输出,光束质量  $M_x^2$ 、 $M_y^2$  分别为 1.40 和 1.38<sup>[17]</sup>。2017 年,洛阳光电设备研究所报道了基于扭转腔模法的 Tm, Ho:YAG 单纵模激光器,该激光器在波长为 2090.9 nm 处最大输出功率可达 200 mW,斜率效率为 6.95%<sup>[29]</sup>。南京信息工程大学于 2019 年研制了一种环形腔 Tm, Ho:YAP 单频激光器,通过采用一个法拉第旋光器和一个  $\lambda/2$  波片组成单向器迫使激光在谐振腔内单向运转。最大输出功率可达 231 mW,斜率效率为 23%。通过在谐振腔内额外插入一个 F-P 标准具,实现了 2053~2058 nm 波长范围内的可调谐输出<sup>[30]</sup>。

的核心参数。目前,高重复频率 2 μm 波段单频脉冲激光器通常以小功率单频连续激光器作为种子源,采用注入锁定振荡输出或多级定标放大的 MOPA 结构,实现高重复频率激光脉冲输出。2009 年,美国科学系统与应用公司就采用了注入锁频的方式以 Ho:YLF 为增益介质,采用“8”字型谐振腔,通过调 Q 的方式实现了 1 kHz 的激光脉冲输出<sup>[31]</sup>。2012 年,哈尔滨工业大学研制了重复频率为 100 Hz 的注入锁定式单频 Tm, Ho:YAG 激光器,当单频种子源的输出功率为 60 mW、中心波长为 2090.9 nm 时,采用“ramp-hold-fire”谐振探测技术,通过主动反馈控制压电传感器(PZT)电压,使得主振荡器环形谐振腔某一纵模波长与种子光波长匹配而获得振荡输出,单脉冲能量达到 7.6 mJ,脉冲宽度为 132 ns,光谱线宽约为 3.5 MHz<sup>[32]</sup>。2013 年,该课题组以 Ho:YAlO<sub>3</sub> 为增益介质,采用类似的激光器结构设计,实现了 2118 nm 波长的单频激光

输出,单脉冲能量达到 8 mJ,脉冲宽度为 151 ns,激光光谱线宽为 3.7 MHz<sup>[33]</sup>。

2015 年,法国国家科研中心动力气象实验室研制了平均功率达 20 W 的注入锁定式 2  $\mu\text{m}$  波段单频激光脉冲输出,以 Ho : YAG 晶体为增益介质,选用分布式反馈(DFB)单频半导体激光作为种子源,当振荡器重复频率为 2 kHz 时,最终获得 10 mJ 激光脉冲能量输出,脉冲宽度为 40 ns,激光光谱线宽优于 10 MHz<sup>[34]</sup>。2015 年,北京理工大学以 NPRO Ho : YAG 单频激光器作为种子光源,注入“L”型折叠谐振腔结构,实现了 200 Hz 重复频率下 Ho : YAG 晶体激光器 15.15 mJ 的脉冲能量输出,脉冲宽度为 109 ns,光谱线宽优于 4.19 MHz,连续 1 h 输出激光光谱不稳定性优于 1.52 MHz,激光束在  $x$  和  $y$  方向上的光束质量因子  $M_x^2$  和  $M_y^2$  分别为 1.12 和 1.22<sup>[35]</sup>。采用 Ho : YAG 陶瓷为增益介质,在同一激光器结构中,采用注入锁定技术,在 200 Hz 重复频率下,获得了与 Ho : YAG 晶体激光器类似的单频激光输出<sup>[36]</sup>。2017 年,该课题组又研制了脉冲重复频率可调的 Ho : YAG 单频激光器,采用 NPRO 种子注入振荡器复合一级放大器结构,

当重复频率在 150~750 Hz 范围内变化时,对应的输出脉冲能量在 31.4~12.7 mJ 之间变化,平均功率小于 10 W,对应的脉冲宽度在 102~215 ns 范围变化,光束质量因子  $M^2$  为 1.11<sup>[37]</sup>。2018 年,哈尔滨工业大学以 Ho : YLF 为增益晶体,采用腔内双 F-P Tm, Ho : YLF 晶体单频激光作为种子源,结构如图 3 所示。当种子激光的中心波长为 2050.967 nm 时,其连续单频激光输出功率为 76 mW。将种子光注入“8”字形主振荡腔中,在 200 Hz 重复频率下,振荡器输出的单频激光脉冲能量达到 4.4 mJ,脉冲宽度约为 65 ns,光谱线宽为 4.1 MHz,光束质量因子  $M^2$  为 1.07,非常接近基横模<sup>[38]</sup>。

研究发现,当单频种子注入采用“ramp-fire”谐振探测技术时,有助于提升重复频率大于 kHz 的单频 2  $\mu\text{m}$  激光输出的可靠性和稳定性<sup>[19, 39]</sup>。2018 年,北京理工大学发现在“8”字形激光谐振腔结构中,采用“ramp-fire”技术,可获得 1.25 kHz 重复频率的稳定的单频输出,平均输出功率约 17.2 W,最大单脉冲输出能量达到 13.76 mJ,输出激光光谱线宽优于 2.65 MHz,接近变换极限值因子,光束质量因子  $M^2$  优于 1.20<sup>[39]</sup>。

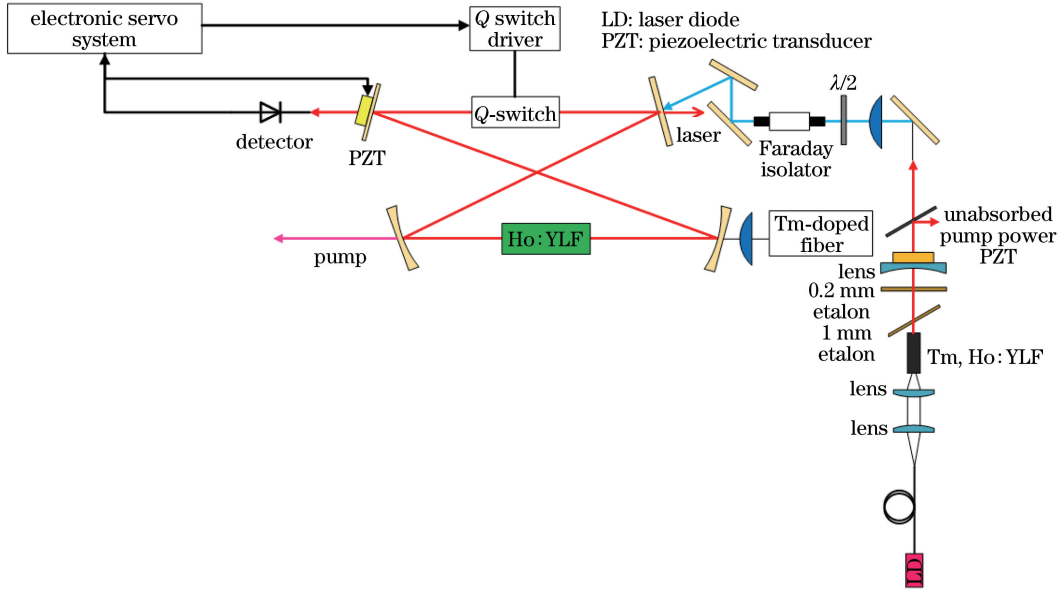


图 3 种子注入单频 Ho : YLF 激光器结构示意图<sup>[38]</sup>

Fig. 3 Experimental setup of the injection-seeded single-frequency Ho : YLF laser<sup>[38]</sup>

为进一步提升高重复频率单频 2  $\mu\text{m}$  激光脉冲的能量,种子注入锁定复合 MOPA 结构的技术路线日益受到重视。2017 年,北京理工大学采用该技术在 200 Hz 的重复频率下,成功从 Ho : YAG 激光系统中获得 55.64 mJ 脉冲能量输出,光谱线宽为 3.96 MHz,输出激光在  $x$  和  $y$  方向上的光束质量因

子  $M_x^2$  和  $M_y^2$  分别为 1.65 和 1.72<sup>[40]</sup>。2018 年,法国国家科学研究中心在种子注入锁定的 MOPA 激光器系统中,以 Ho : YLF 晶体为增益介质,获得了单频双脉冲激光输出。该激光器在脉冲重复频率为 303.5 Hz 条件下,双脉冲能量分别为 12 mJ 和 42 mJ,对应的波长分别为 2051.01 nm 和

2051.25 nm。这种具备输出双波长、双脉冲能力的单频激光源,在路径积分差分吸收 CO<sub>2</sub> 浓度探测激光雷达上具有重要应用<sup>[41]</sup>。同年,日本国家信息与通信技术研究所将单频种子注入 Ho: YLF 晶体环形腔振荡器复合 MOPA 结构中,实现了 300 Hz 重复频率下单脉冲最大能量为 16 mJ 的单频激光输出<sup>[42]</sup>。

对于高重复频率系统,热效应问题是影响单频激光器性能的关键,因此,相较于 Tm<sup>3+</sup>、Ho<sup>3+</sup> 共同掺杂的离子晶体而言,单掺 Ho<sup>3+</sup> 离子晶体因其热负载较小的优势被广泛应用于 2 μm 波段高重复频率脉冲激光器中。这类研究中,激光增益介质主要选用掺 Ho<sup>3+</sup> 离子晶体,实现单频输出的机制主要采用注入锁定技术方式。高重复频率 2 μm 单脉冲激光输出能量最大已实现了数十 mJ 的输出,并能保持光谱线宽优于 5 MHz,同时具有较好的频率稳定性和光束质量。针对特定的应用需求,未来发展通过与采用种子注入的 MOPA 相结合的技术路线,增加 MOPA 系统的放大级数量,获得所需要的 2 μm 波段高重复频率的单频激光器输出脉冲能量值,是实现脉冲能量定标放大的有效手段。

### 2.3 低重复频率高能量 2 μm 波段单频激光

高重复频率激光器输出的脉冲能量因热功耗而受限,而低重复频率激光器在获得大脉冲能量输出方面具有独特的优势,可以保障激光雷达的远程探测功能,也成为 2 μm 波段单频激光器的重要发展方向。1997 年,美国国家航空航天局(NASA)兰利研究中心以微片 Tm, Ho: YLF 激光器作为种子源,在“8”字形环形谐振腔双掺 Tm, Ho: YLF 晶体激光器中,获得 10 Hz 脉冲重复频率下的 35 mJ 脉冲能量输出,振荡级输出脉冲经五级激光放大器放大后,最终成功实现了 700 mJ 的脉冲能量输出<sup>[43]</sup>。第二年,该研究中心将精密温控系统引入双掺微片 Tm, Ho: YLF 单频激光器中,通过调节微片晶体的温度,使种子激光器输出中心频率具有 22.5 GHz 的可调谐范围,进一步通过 PZT 调节主振荡器腔长,使之与种子光波长相匹配,实现单频输出。激光主振荡器在重复频率为 6 Hz 情况下,输出脉冲能量达到 125 mJ,光光转换效率为 3%,单频脉冲输出光谱线宽接近变换极限<sup>[25]</sup>。主振荡器输出脉冲经过四级 Tm, Ho: LLF 晶体放大器后,获得了 600 mJ 的脉冲能量输出<sup>[44]</sup>。

2002 年,兰利研究中心在双掺 Tm, Ho: LLF 晶体单频 2 μm 波段激光器中,通过将种子激光波

长锁频在 CO<sub>2</sub> 特征光谱吸收线上,进一步提升了激光输出波长的稳定性,最终该激光器实现了 2050.4 nm 波长稳定输出,其光谱频率在 1 h 内的波动小于 18.5 MHz。当激光器工作在 5 Hz 重复频率时,获得了单脉冲能量大于 100 mJ 的单频激光输出<sup>[45]</sup>。2005 年,该研究中心又在传导冷却的 Tm, Ho: YLF 晶体 MOPA 系统中,引入双程放大结构设计,脉冲重复频率为 10 Hz 时,获得 400 mJ 脉冲能量输出,光光转换效率提高到 8%,激光脉冲宽度约 800 ns<sup>[46]</sup>。

2006 年出现有关 2 μm 波段单频激光器最大输出脉冲能量的研究,单脉冲能量输出达到 1.1 J,图 4 是该 2 μm 单频双掺 Tm, Ho: LLF 晶体 MOPA 激光器系统原理示意图。该激光器系统包含一个振荡器和三个放大器,振荡器和放大器采用了相似的 LD 侧面抽运结构设计,通过循环水冷方式将晶体温度控制在 8 °C 左右,确保光束质量因子优于 1.4,光光转换效率达到 5%<sup>[47]</sup>。

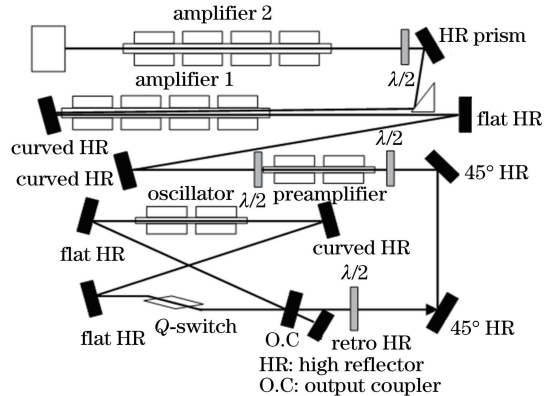


图 4 Tm, Ho: LLF 晶体 2 μm 脉冲单频 MOPA 系统光路示意图<sup>[47]</sup>

Fig. 4 Schematic diagram of 2 μm single-frequency Tm, Ho: LLF MOPA system<sup>[47]</sup>

此外,采用单掺晶体的低重复频率大能量单频 2 μm 波段激光器也得到一定的发展,2011 年,南非科学与工业研究理事会研制了以 Ho: YLF 晶体为增益介质的 MOPA 激光器系统,采用 Tm: YLF 板条激光器作为抽运光源,单频种子脉冲注入能量为 69 mJ 时,获得 200 mJ 的放大脉冲输出,中心波长为 2064 nm,激光脉冲重复频率为 60 Hz<sup>[48]</sup>。2013 年,在优化放大器结构参数的基础上,采用双程放大设计,使放大器的放大能力得到进一步提升,在波长为 2064 nm 处,最大激光脉冲能量提高至 330 mJ,平均功率达到 19.8 W<sup>[49]</sup>。

中科院上海光学精密机械研究所持续开展了窄

线宽大能量  $2\ \mu\text{m}$  波段全固态激光器技术研究, 基于“8”字型环形腔振荡器复合一级功率放大的 MOPA 结构设计, 主振荡器采用声光调 Q 的方式, 在重复频率分别为 1 Hz 和 5 Hz 时, 振荡器输出的脉冲能量分别达到 106 mJ 和 68 mJ, 光光转换效率分别达到 2.3% 和 1.5%<sup>[50]</sup>。在此基础上, 采用单频种子注入的“ramp-fire”技术实现  $2\ \mu\text{m}$  波段激光器的单频高能输出, 系统结构示意图如图 5 所示。当激光器重复频率为 5 Hz 时, 主振荡器输出的单频激光脉冲, 经过一级放大后激光单脉冲能量达到 100 mJ, 脉宽约为 100 ns, 整个系统的光光转换效率约为 1.1%<sup>[51]</sup>。

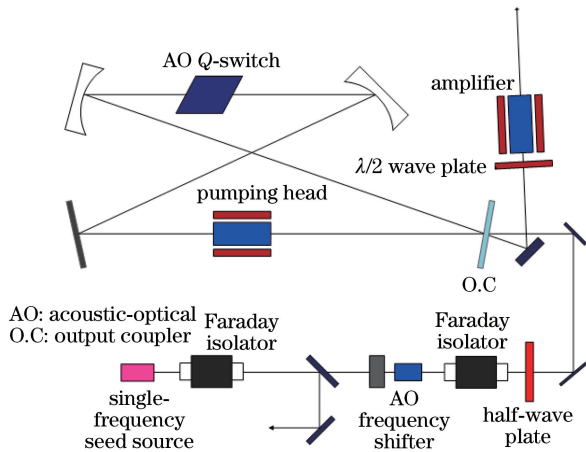


图 5  $2\ \mu\text{m}$  单频侧泵脉冲激光器结构示意图<sup>[51]</sup>

Fig. 5 Schematic diagram of the single-frequency side-pumped  $2\ \mu\text{m}$  laser<sup>[51]</sup>

由于  $\text{Tm}^{3+}$ 、 $\text{Ho}^{3+}$  共同掺杂晶体具有上能级寿命长的特征, 在大能量激光脉冲输出方面有独特的优势。已有的单频  $2\ \mu\text{m}$  波段低重复频率、高能量脉冲激光器研究工作, 主要集中在以  $\text{Tm}^{3+}$ 、 $\text{Ho}^{3+}$  共同掺杂晶体作为增益介质的 MOPA 系统。而在 MOPA 系统中, 增益导引效应能够与晶体内热畸变效应相互抵消<sup>[52]</sup>, 进一步通过匹配信号光束与抽运光束之间的重叠区域, 使得由 MOPA 技术输出的单频  $2\ \mu\text{m}$  波段低重复频率、高能量脉冲激光能够获得较好的光束质量。但由于  $\text{Tm}^{3+}$ 、 $\text{Ho}^{3+}$  共同掺杂晶体属于准三能级系统, 在低温条件下具有高转换效率, 在常温下光光转换效率相对较低, 这在一定程度上限制了激光脉冲能量的进一步提升。就现有的  $2\ \mu\text{m}$  波段激光晶体而言, 进一步优化冷却方式以提高激光器系统转换效率将是  $2\ \mu\text{m}$  波段低重复频率、大能量脉冲激光器的一个持续的研究热点。另外, 循环水冷的的方式通常不适用于空基或星载激光雷达, 因此,  $2\ \mu\text{m}$  波段低重复频率、高能量脉冲激光器要实现空基或星载的工程化应用, 需要深入研究基于传导冷却机制的

$2\ \mu\text{m}$  波段脉冲激光器特性。

### 3 结 论

根据单频  $2\ \mu\text{m}$  波段全固态激光器的应用需求和技术发展路线, 综述了  $2\ \mu\text{m}$  波段连续单频激光器技术、高重复频率单频脉冲激光器技术、低重复频率大能量单频脉冲激光器技术的研究进展。尽管单频  $2\ \mu\text{m}$  波段全固态脉冲激光器在输出脉冲能量、光谱线宽窄及稳定性等方面取得了显著进展, 并在大气探测激光雷达上得到应用, 但就其技术本身, 依然存在一些技术瓶颈有待突破:

1)  $2\ \mu\text{m}$  波段单频连续激光器输出功率未见显著突破, 需要创新设计激光器结构以提高单频连续种子光源的输出功率并保持稳定的单频输出。

2) 目前常用的  $2\ \mu\text{m}$  激光增益介质在高功率运转下易出现热致双折射、激光材料损伤等问题, 这制约了  $2\ \mu\text{m}$  激光器的转换效率和输出功率进一步提升。

3)  $\text{Tm}^{3+}$ 、 $\text{Ho}^{3+}$  离子皆为准三能级系统, 在常温下易出现上转换过程和再吸收损耗, 导致激光阈值升高、激光转换效率降低等问题。  $2\ \mu\text{m}$  单频脉冲激光器要进一步提升脉冲能量并走向工程化应用, 对冷却方式需要提出比较高的要求。

因此, 未来单频  $2\ \mu\text{m}$  波段全固态技术发展需要在优化冷却方式、提高激光器转换效率、改善掺杂基质的光学物理性能、寻找新的激光增益材料以及创新设计激光器结构等方面实现新的突破, 进一步提升单频  $2\ \mu\text{m}$  全固态激光器综合性能, 以满足不同的应用需求。

### 参 考 文 献

- [1] Shuman T, Hovis F E, Singh U N, et al. Development of a TRL-5 conductively-cooled 2-micron laser transmitter for coherent Doppler wind lidar system[J]. Proceedings of SPIE, 2013, 8872: 887205.
- [2] Koch G J, Barnes B W, Petros M, et al. Coherent differential absorption lidar measurements of  $\text{CO}_2$  [J]. Applied Optics, 2004, 43(26): 5092-5099.
- [3] Engin D, Chuang T, Litvinovitch S, et al. Compact, highly efficient, single-frequency 25 W, 2051 nm  $\text{Tm}$  fiber-based MOPA for  $\text{CO}_2$  trace-gas laser space transmitter[J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10406: 1040606.
- [4] Singh U N, Kavaya M, Koch G, et al. Solid-state 2-micron laser transmitter advancement for wind and carbon dioxide measurements from ground, airborne,

- and space-based lidar systems [J]. Proceedings of SPIE, 2008, 7111: 711104.
- [5] Singh U N, Walsh B M, Yu J R, et al. Twenty years of Tm : Ho : YLF and LuLiF laser development for global wind and carbon dioxide active remote sensing[J]. Optical Materials Express, 2015, 5(4): 827-837.
- [6] Wulfmeyer V, Randall M, Brewer A, et al. 2- $\mu\text{m}$  Doppler lidar transmitter with high frequency stability and low chirp [J]. Optics Letters, 2000, 25(17): 1228-1230.
- [7] Henriksson M, Tiihonen M, Pasiskevicius V, et al. ZnGeP<sub>2</sub> parametric oscillator pumped by a linewidth-narrowed parametric 2  $\mu\text{m}$  source [J]. Optics Letters, 2006, 31(12): 1878-1880.
- [8] Wang Q, Geng J H, Jiang S B. 2- $\mu\text{m}$  fiber laser sources for sensing[J]. Optical Engineering, 2014, 53(6): 061609.
- [9] Henriksson M, Tiihonen M, Pasiskevicius V, et al. Mid-infrared ZGP OPO pumped by near-degenerate narrowband type-I PPKTP parametric oscillator[J]. Applied Physics B, 2007, 88(1): 37-41.
- [10] Mingareev I, Weirauch F, Olowinsky A, et al. Welding of polymers using a 2  $\mu\text{m}$  thulium fiber laser [J]. Optics & Laser Technology, 2012, 44(7): 2095-2099.
- [11] Mamuschkin V, Olowinsky A, van der Straeten K, et al. Laser transmission welding of absorber-free thermoplastics using dynamic beam superposition[J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9356: 93560Y.
- [12] Fried N M, Murray K E. High-power thulium fiber laser ablation of urinary tissues at 1.94  $\mu\text{m}$  [J]. Journal of Endourology, 2005, 19(1): 25-31.
- [13] Theisen D, Ott V, Bernd H W, et al. CW high power IR-laser at 2  $\mu\text{m}$  for minimally invasive surgery [C]//Therapeutic Laser Applications and Laser-Tissue Interactions, June 22, 2003, Munich, Germany. Washington, D. C.: OSA, 2003, 5142: 96-100.
- [14] Girard B, Yu D, Armstrong M R, et al. Effects of femtosecond laser irradiation on osseous tissues [J]. Lasers in Surgery and Medicine, 2007, 39(3): 273-285.
- [15] Guo J, He G Y, Zhang B F, et al. Compact Efficient 2.1- $\mu\text{m}$  intracavity MgO : PPLN OPO with a VBG output coupler [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2015, 27(6): 573-576.
- [16] Chen F, Yao B Q, Yuan C, et al. Diode-pumped single-frequency Tm : YAG laser with double etalons [J]. Laser Physics, 2011, 21(5): 851-854.
- [17] Gao C, Wang R, Lin Z, et al. 2  $\mu\text{m}$  single-frequency Tm : YAG laser generated from a diode-pumped L-shaped twisted mode cavity[J]. Applied Physics B, 2012, 107(1): 67-70.
- [18] Wang L, Gao C Q, Gao M W, et al. Resonantly pumped monolithic nonplanar Ho : YAG ring laser with high-power single-frequency laser output at 2122 nm[J]. Optics Express, 2013, 21(8): 9541-9546.
- [19] Na Q X, Gao C Q, Wang Q, et al. 1 kHz single-frequency 2.09  $\mu\text{m}$  Ho : YAG ring laser[J]. Applied Optics, 2017, 56(25): 7075-7078.
- [20] Li M L, Gao L, Shi W Z, et al. Progress in all-solid-state single-frequency lasers [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(8): 080003. 李梦龙, 高龙, 史文宗, 等. 全固态单频激光器研究进展 [J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(8): 080003.
- [21] Ju Y L, Liu W, Yao B Q, et al. Diode-pumped tunable single-longitudinal-mode Tm, Ho : YAG twisted-mode laser [J]. Chinese Optics Letters, 2015, 13(11): 111403.
- [22] Wang R, Gao C Q. Progress of 1.6  $\mu\text{m}$  region single-frequency lasers [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(8): 080006. 王然, 高春清. 1.6  $\mu\text{m}$  波段单频激光器技术研究进展 [J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(8): 080006.
- [23] Feng T, Zhang X J, Ren Z Y, et al. Frequency stabilization laser based on non-planar ring oscillator [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(10): 1014001. 冯滔, 张雪洁, 任志远, 等. 频率稳定的非平面环形腔激光器 [J]. 光学学报, 2013, 33(10): 1014001.
- [24] Schellhorn M. High-energy, in-band pumped Ho : LLF MOPA system [C]//Lasers, Sources, and Related Photonic Devices, January 29-February 1, 2012, San Diego, California, United States. Washington, D. C.: OSA, 2012: AW4A.4.
- [25] Yu J R, Singh U N, Barnes N P, et al. 125-mJ diode-pumped injection-seeded Ho : Tm : YLF laser [J]. Optics Letters, 1998, 23(10): 780-782.
- [26] Chen F, Liu X L, Yu L X, et al. Diode-pumped single-frequency Tm : GdVO<sub>4</sub> laser at 1897.6 nm [J]. Laser Physics, 2012, 22(1): 152-154.
- [27] Yang X T, Liu L, Zhang P, et al. A resonantly pumped single-longitudinal mode Ho : Sc<sub>2</sub>SiO<sub>5</sub> laser with two Fabry-Perot etalons[J]. Applied Sciences, 2017, 7(5): 434.
- [28] Chen F, Cai M, Zhang Y S. Room temperature diode-pumped single-frequency Tm : LuYAG laser at

- 2023 nm [J]. Proceedings of SPIE, 2018, 10844: 108440E.
- [29] Li L D V M, Li Y J, Chen F. A single-longitudinal-mode Tm, Ho : YAG laser [J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10457: 104572T.
- [30] Wu J, Wu Y F, Dai T Y, et al. Diode pumped high efficiency single-longitudinal-mode Tm, Ho : YAP ring laser [J]. Optical Engineering, 2019, 58(1): 016116.
- [31] Bai Y X, Yu J R, Petros M, et al. High repetition rate and frequency stabilized Ho : YLF laser for CO<sub>2</sub> differential absorption lidar [C]//Advanced Solid-State Photonics, February 1-4, 2009, Denver, Colorado, United States. Washington, D.C.: OSA, 2009: WB22.
- [32] Dai T Y, Ju Y L, Yao B Q, et al. Single-frequency, Q-switched Ho : YAG laser at room temperature injection-seeded by two F-P etalons-restricted Tm, Ho : YAG laser [J]. Optics Letters, 2012, 37(11): 1850-1852.
- [33] Dai T Y, Ju Y L, Duan X M, et al. Single-frequency, injection-seeded Q-switched operation of a resonantly pumped Ho : YAlO<sub>3</sub> laser at 2, 118 nm [J]. Applied Physics B, 2013, 111(1): 89-92.
- [34] Hemmer M, Sánchez D, Jelínek M, et al. 2- $\mu$ m wavelength, high-energy Ho : YLF chirped-pulse amplifier for mid-infrared OPCPA [J]. Optics Letters, 2015, 40(4): 451-454.
- [35] Gibert F, Edouart D, Cénac C, et al. 2- $\mu$ m Ho emitter-based coherent DIAL for CO<sub>2</sub> profiling in the atmosphere [J]. Optics Letters, 2015, 40(13): 3093-3096.
- [36] Zhang Y X, Gao C Q, Wang Q, et al. Single-frequency, injection-seeded Q-switched Ho : YAG ceramic laser pumped by a 1.91  $\mu$ m fiber-coupled LD [J]. Optics Express, 2016, 24(24): 27805-27811.
- [37] Wang Q, Gao C Q, Na Q X, et al. Single-frequency injection-seeded Q-switched Ho : YAG laser [J]. Applied Physics Express, 2017, 10(4): 042701.
- [38] Dai T Y, Wang Y P, Wu X S, et al. An injection-seeded Q-switched Ho : YLF laser by a tunable single-longitudinal-mode Tm, Ho : YLF laser at 2050.96 nm [J]. Optics & Laser Technology, 2018, 106: 7-11.
- [39] Zhang Y X, Gao C Q, Wang Q, et al. High-repetition-rate single-frequency Ho : YAG MOPA system [J]. Applied Optics, 2018, 57(15): 4222-4227.
- [40] Zhang Y X, Gao C Q, Wang Q, et al. High-energy, stable single-frequency Ho : YAG ceramic amplifier system [J]. Applied Optics, 2017, 56(34): 9531-9535.
- [41] Gibert F, Pellegrino J, Edouart D, et al. 2- $\mu$ m double-pulse single-frequency Tm : fiber laser pumped Ho : YLF laser for a space-borne CO<sub>2</sub> lidar [J]. Applied Optics, 2018, 57(36): 10370-10379.
- [42] Mizutani K, Ishii S, Aoki M, et al. 2  $\mu$ m Doppler wind lidar with a Tm : fiber-laser-pumped Ho : YLF laser [J]. Optics Letters, 2018, 43(2): 202-205.
- [43] Singh U N, Williams-Byrd J A, Barnes N P, et al. Diode-pumped 2- $\mu$ m solid state lidar transmitter for wind measurements [J]. Proceedings of SPIE, 1997, 3104: 173-178.
- [44] Singh U N. Development of high-pulse energy Ho : Tm : YLF coherent transmitters [J]. Proceedings of SPIE, 1998, 3380: 70-74.
- [45] Koch G J, Petros M, Yu J R, et al. Precise wavelength control of a single-frequency pulsed Ho : Tm : YLF laser [J]. Applied Optics, 2002, 41(9): 1718-1721.
- [46] Trieu B, Yu J R, Petros M, et al. Design of a totally conductively cooled diode-pumped 2  $\mu$ m-laser amplifier [J]. Proceedings of SPIE, 2005, 5887: 58870M.
- [47] Yu J R, Trieu B C, Modlin E A, et al. 1 J/pulse Q-switched 2  $\mu$ m solid-state laser [J]. Optics Letters, 2006, 31(4): 462-464.
- [48] Strauss H J, Koen W, Bollig C, et al. Ho : YLF & Ho : LuLF slab amplifier system delivering 200 mJ, 2  $\mu$ m single-frequency pulses [J]. Optics Express, 2011, 19(15): 13974-13979.
- [49] Strauss H J, Preussler D, Esser M J D, et al. 330 mJ single-frequency Ho : YLF slab amplifier [J]. Optics Letters, 2013, 38(7): 1022-1024.
- [50] Shu S J, Yu T, Liu R T, et al. Diode-side-pumped AO Q-switched Tm, Ho : LuLF laser [J]. Chinese Optics Letters, 2011, 9(9): 091407.
- [51] Shu S J, Yu T, Zang H G, et al. 2  $\mu$ m diode-side-pumped injection-seeded solid-state laser [J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(8): 1442-1447. 舒仕江, 余婷, 臧华国, 等. 2  $\mu$ m 激光二极管侧面泵浦种子注入固体激光器 [J]. 红外与激光工程, 2011, 40(8): 1442-1447.
- [52] Liu Q, Yan X P, Fu X, et al. 183 W TEM<sub>00</sub> mode acoustic-optic Q-switched MOPA laser at 850 kHz [J]. Optics Express, 2009, 17(7): 5636-5644.