

人眼安全波段全固态单频激光器研究进展

王庆^{1,2,3**}, 高春清^{1,2,3*}¹北京理工大学光电学院, 北京 100081;²信息光子技术工业和信息化部重点实验室, 北京 100081;³光电成像技术与系统教育部重点实验室, 北京 100081

摘要 人眼安全波段单频激光可作为相干多普勒测风、相干成像及大气中甲烷、二氧化碳等气体浓度差分探测激光雷达的光源。针对激光雷达对单频激光器的应用需求,本文综述了 1.6 μm 波段、2 μm 波段连续及脉冲全固态单频激光器的研究进展;对单频激光的不同纵模选择方法、不同注入锁定控制方法、种子注入锁定及主振荡功率放大技术的特点进行了对比分析;对人眼安全波段全固态单频激光器的未来发展前景进行了展望。

关键词 激光器; 单频激光器; 人眼安全波段; 注入锁定; 主振荡功率放大器

中图分类号 TN21

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202148.0501004

1 引言

单频激光由于输出光谱范围窄的特性,具有相干长度长的优点,被广泛应用于相干激光探测领域。近年来,对大气气溶胶^[1]、风场信息^[2]、大气成分浓度分布^[3-5]、相干成像^[6-7]的探测需求变得迫切。单频脉冲激光光源是相干激光探测的核心光源。针对相干激光雷达的探测需求,探测光源需要有较高的能量输出。

为了避免单频脉冲激光在大气传输时的少量散射进入到人眼,激光雷达光源也需要考虑到激光辐射在人眼安全方面的问题。根据国际电工委员会 IEC60825 国际应用标准及激光安全等级分类方法^[8], 1.4~2.6 μm 激光相对于同样能量的 1.06 μm 激光,对人眼伤害较小,因此这一波段被称为人眼安全波段。人眼安全波段激光以掺铒(Er)增益介质输出的 1.6 μm 波段以及掺钬(Ho)增益介质输出的 2 μm 波段为代表。近年来,1.4~1.5 μm 、1.9 μm 波段半导体激光器及谐振泵浦技术的发展,推动了 1.6 μm 波段掺 Er³⁺ 单频激光及 2 μm 波段掺 Ho³⁺ 单频激光技术的快速发展。

1.6 μm 波段既属于通信波段,又位于大气窗口,在大气中传输时具有较高的大气透过率,相应器件如探测器等较成熟,因此这一波段更适用于远程长距离的激光雷达,并且 Er³⁺ 的激光输出在 1.65 μm 附近,而在 1.65 μm 附近有 CH₄ 气体的特征吸收峰^[3],因此单频的 1.6 μm 激光器可以用于 CH₄ 气体的差分吸收探测。2 μm 波段的掺 Tm³⁺、Ho³⁺ 激光同样位于大气窗口,并且比 1.6 μm 波段具有更高的大气透过率,并且 Ho³⁺ 激光在 2.05 μm 附近有 CO₂ 气体的特征吸收峰,可以用作 CO₂ 气体的差分吸收探测激光雷达光源^[5]。

连续运转的单频激光通常是通过在驻波谐振腔内插入纵模选择器件或者单向运转的环形腔来实现。脉冲运转的单频激光通常是将连续窄线宽的种子激光注入到从动激光器中实现放大和单频脉冲激光输出,并通过主振荡功率放大(MOPA)实现功率的提升。本文结合单频激光器在激光雷达方面的应用需求,综述了人眼安全波段连续、脉冲输出的全固态单频激光器的技术发展情况,对比分析了 1.6 μm 波段及 2 μm 波段单频激光输出特性,讨论了不同注入锁定方式的技术特点,最后结合激光雷达的应

收稿日期: 2020-10-30; 修回日期: 2020-12-13; 录用日期: 2020-12-28

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB0405203)

* E-mail: gao@bit.edu.cn; ** E-mail: qingwang@bit.edu.cn

用需求,对人眼安全波段全固态单频脉冲激光器的未来发展方向和前景进行了展望。

2 连续单频激光器

连续输出的单频激光器主要包括分布式反馈(DFB)半导体激光器以及基于纵模选频技术的光纤激光器和全固态激光器。连续单频全固态激光器主要采用短腔法^[9-11]、腔内插法布里-珀罗(F-P)标准具法^[12-23]、环形腔法^[24-25]、单块非平面环形腔法(NPRO)^[26-36]、扭转腔模法^[37-38]和耦合腔法等。对于单频激光器来说,其输出特征参数主要包括输出功率、中心波长、频谱宽度(线宽)、光束质量、频率稳定性等。

2.1 DFB 半导体激光器

DFB 激光器通过在半导体激光器内放置布拉格光栅实现单频激光输出。DFB 激光器具有体积小、电光转换效率高的特点,线宽可达 100 kHz,具有非常高的边模抑制比,非常适合用于种子注入以及雷达系统的集成^[39]。如 1617 nm DFB 半导体激光器已经被当作种子激光应用到相干激光测风雷达系统的 Er:YAG 注入锁定激光器中^[40];1645 nm DFB 半导体激光器也被用作 CH₄ 气体的探测^[41];2051 nm DFB 半导体激光器也被用作注入锁定单频脉冲激光的种子源,并用于 CO₂ 气体的差分吸收相干探测^[5]。DFB 激光器的缺点是功率较低,不适用于高重复频率下的注入锁定。

2.2 短腔法

短腔法是通过压缩驻波激光器腔长以增加纵模间隔的方法,其在激光增益介质的增益谱线之内只有一个纵模振荡,可实现连续的单频激光输出。短腔法采用较短的增益介质和谐振腔,因此这类激光器也常被称为微片激光器。2018 年,中国科学院福建物质结构研究所的 Huang 等^[10]采用 976 nm 二极管激光泵浦厚度只有 1.2 mm 的 Er:Yb:Lu₂Si₂O₇(Er:Yb:LPS;其中 Er 和 Yb 的原子数分数分别为 0.5%和 5.0%)三明治冷却结构的晶体,如图 1 所示,最终实现了功率为 440 mW、中心波长为 1536.86 nm、线宽为 0.07 nm 的单纵模激光输出。短腔法虽然可以实现单频激光输出,但为了压缩腔长,无法在腔内插入其他选频元件,因此输出单频激光的线宽相对于其他方法较宽;并且由于较短的增益介质对泵浦光吸收较弱,输出功率较低^[11]。

2.3 腔内插 F-P 标准具法

腔内插 F-P 标准具法是在谐振腔内插入一片

IM: input mirror; OM: output mirror.

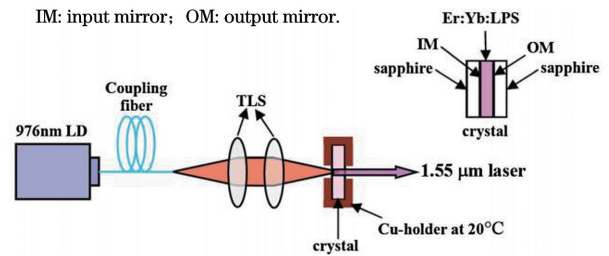


图 1 976 nm 端面泵浦的 Er:Yb:LPS 微片激光器实验装置^[10]

Fig. 1 Experimental setup for 976 nm end-pumped Er:Yb:LPS microchip laser^[10]

或者多片 F-P 标准具,并对标准具镀膜透过率进行设计,通过改变标准具的角度实现波长的选择和线宽压窄,从而获得可调谐的窄线宽单频激光输出^[13-23]。2019 年,北京理工大学的 Shi 等^[23]通过在腔内插入厚度分别为 0.1 mm 和 1 mm 的标准具,在 Er:YAG 激光器上实现单频可调谐激光输出,如图 2 所示。该实验通过调节标准具的角度实现了 1617 nm(296 mW)、1620 nm(478 mW)、1645 nm(587 mW)和 1656 nm(276 mW)的连续单频激光输出。腔内插 F-P 标准具法可以实现功率为数百 mW、线宽为几十 kHz 的连续单频激光输出,但波长调谐范围小,并且为了提高频率稳定性,还需要对标准具实行精确控温等^[15]。

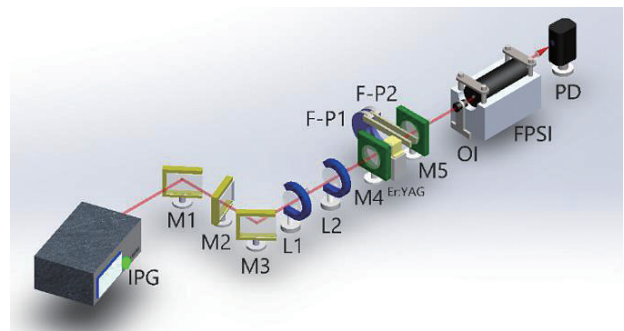


图 2 光纤激光器谐振泵浦 Er:YAG 短腔插 F-P 单频激光器^[23]

Fig. 2 Experimental setup for fiber laser resonantly pumped Er:YAG single-frequency laser with F-Ps^[23]

2.4 环形腔法

单向运转的环形腔法可实现高功率、线宽在 kHz 量级的连续单频激光输出。通过在环形腔内加入单向器改变环形腔不同方向激光的损耗,强迫激光单向运转,激光腔为行波腔,在增益介质中不存在空间烧孔效应,在模式竞争下最终实现单频激光输出。单向器包括基于法拉第效应的光隔离器以及基于衍射效应的声光调制器等^[12, 24-25]。2008 年,

南安普顿大学的 Kim 等^[24]采用平面环形腔内插入声光调制器作为单向器得到了连续 Er:YAG 单频激光输出,如图 3 所示。插入声光调制器可以降低环形腔不同方向传播激光的损耗,从而实现腔内激光的单向运转。采用输出功率为 14 W 的 1532 nm 光纤激光泵浦掺杂浓度(原子数分数,下同)为 0.5%、长度为 29 mm 的 Er:YAG 晶体,获得了 4.7 W 的 1645 nm 单频激光输出。此外,采用环形腔法结合双折射滤光片、F-P 标准具,可实现进一步的波长选择和线宽压窄^[25]。

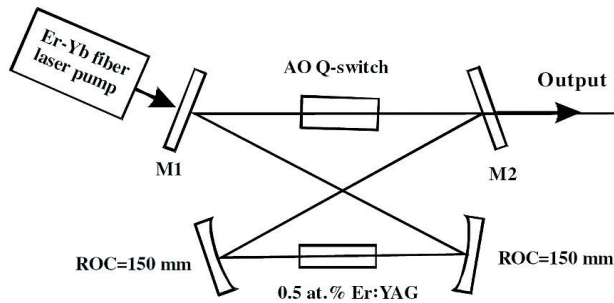


图 3 8 字环形腔 Er:YAG 单频激光器结构示意图^[24]
Fig. 3 Structure of 8-type Er:YAG single-frequency laser with ring cavity^[24]

单块非平面环形腔(NPRO)激光器属于环形腔单频激光器的一种。如图 4 所示,NPRO 是由泵浦源、单块增益晶体和外加磁场(图 4 中 H 旁边箭头所示方向为磁场方向)组成,增益介质同时作为激光谐振腔,通过外加磁场的法拉第旋转效应结合非平面单块增益介质不同面的反射特性来实现激光的单向运转,这种紧凑结构的激光器可实现线宽在 kHz 量级、高频率稳定性、高功率连续单频激光输出^[26-36]。NPRO 单频激光器由于具有优异的特性也被用作引力波探测干涉仪的种子光源^[42]。

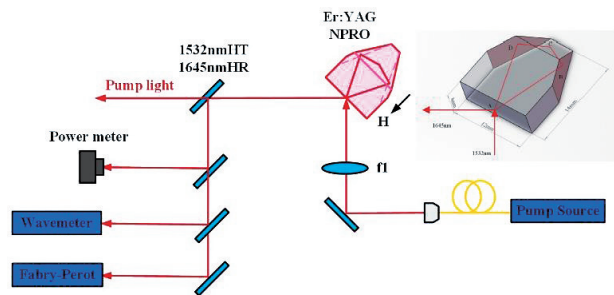


图 4 Er:YAG 晶体 NPRO 单频激光器^[36]
Fig. 4 Er:YAG NPRO single-frequency laser^[36]

2013 年,北京理工大学的 Wang 等^[30]采用自制的输出波长为 1907 nm 的 Tm:YLF 激光作为泵浦源,实现了输出波长为 2122 nm、输出功率为 8.0 W 的 Ho:YAG NPRO 连续单频激光输出。这也是到

目前为止在 2 μm 波段固体单频激光器中实现的最高输出功率。2018 年,北京理工大学的 Zhang 等^[36]采用输出功率为 32 W、中心波长为 1532 nm 的光纤激光泵浦掺杂浓度为 0.5% 的 Er:YAG 陶瓷 NPRO,实现了中心波长为 1645 nm、输出功率为 16.10 W、线宽为 4.4 kHz 的高功率单频激光输出,这是截止到目前为止在 1.6 μm 波段实现的最高连续单频激光输出。

NPRO 单频激光器主要适用于各向同性的增益介质,如 YAG 晶体、陶瓷等。此外,该类激光器的波长虽然可通过温度进行调节,但调谐速率慢,调谐范围较窄。

2.5 扭转腔模法

扭转腔模法是通过在增益介质两端各加上一个 1/4 波片,把增益介质处的光场转换为圆偏振光来消除增益晶体内的空间烧孔效应,从而使激光谐振腔两个方向传播的光波无法形成干涉,从而达到消除空间烧孔效应的目的,通过模式竞争最终实现单频激光输出。这种方法可实现高功率的连续单频激光输出^[37-38]。如 2015 年,哈尔滨工业大学的 Yao 等^[38]采用扭转腔模结合标准具的方法实现了 315 mW 的 1645.3 nm 单频激光输出和 130 mW 的 1617.2 nm 的单频激光输出,实验装置如图 5 所示,腔内插入一个布儒斯特窗口片(B-P),强制输出光的偏振态为线偏振,并通过在 Er:YAG 晶体两边各加上一个 1/4 波片,把 Er:YAG 介质内的光转变成圆偏振光,最终实现单频运转。

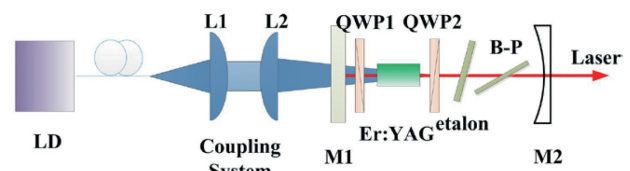


图 5 扭转腔模法 Er:YAG 单频激光实验装置图^[38]
Fig. 5 Experimental setup for single-frequency twisted-mode-cavity Er:YAG laser^[38]

腔内插 F-P 标准具、环形腔、单块非平面环形腔、扭转腔模等方法结合不同掺杂浓度的增益介质,可以实现多样化的单纵模激光输出。其中,基于单块非平面环形腔的连续单频激光器输出功率已经达到 16 W,但相对于远程相干激光雷达探测的应用需求,其峰值功率还远不够。为了进一步提高单频激光输出的峰值功率,还需要对种子激光进行放大。单频激光的主要放大技术有注入锁定放大技术和 MOPA 技术。

2.6 光纤单频激光器

单频光纤激光器根据选频原理可以分为分布式布拉格反射器 (DBR) 型、DFB 线性腔型和环形腔型^[43]。其中实现单频运转最常用的激光器为基于分布式布拉格反射器的线性腔光纤激光器。这种激光器通常由一段高掺杂浓度、长度较短的增益光纤, 一个宽带、高反射率的光纤布拉格光栅 (FBG) 和一个等效于耦合输出的窄带、部分透射的 FBG 组成。为了实现单频激光输出, 要求增益光纤的长度较短, 并且耦合输出的 FBG 具有窄的反射带宽。2019 年, Rybaltovsky 等^[44] 实现了基于分布式布拉格反射器的光纤单频激光输出, 整个腔长为 21 mm, 输出功率为 0.8 mW, 中心波长为 1565 nm (图 6)。

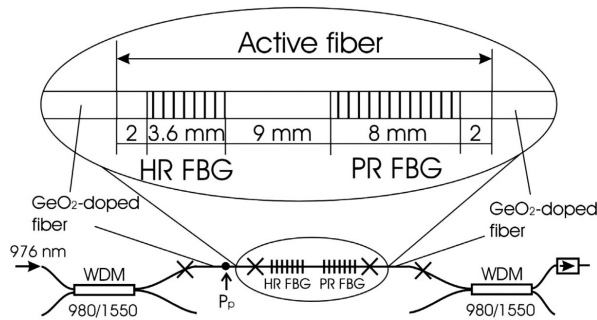


图 6 基于分布式布拉格反射器的光纤单频激光器^[44]

Fig. 6 Single-frequency fiber laser based on distributed Bragg reflector^[44]

3 注入锁定单频脉冲激光器

注入锁定放大技术是通过将窄线宽的连续单频种子激光注入到从动激光振荡器中, 同时探测从动激光器谐振腔对种子激光的共振信号, 通过压电陶瓷、腔内插入 RTP 等电光器件实现从动激光器的腔长与种子激光频率的匹配与锁定, 采用 Q 开关技术使种子激光在谐振腔内实现多次放大, 实现高能量的脉冲激光输出。注入锁定单频脉冲激光器可以实现重复频率在 kHz 量级、能量在 mJ 量级的单频脉冲激光输出。

3.1 注入锁定方法

单频注入锁定技术按照从动激光器的腔型可分为环形腔种子激光注入锁定和驻波腔种子激光注入锁定。驻波腔结构简单, 但由于存在空间烧孔效应, 在大能量单频脉冲输出情况下很难实现单频注入锁定, 容易出现多脉冲的现象; 而环形腔为行波腔, 激光单向运转, 不存在空间烧孔效应, 有利于种子激光的注入锁定。

实现注入锁定的方法可分为 Q 脉冲最小时间

建立法、扫描-保持-触发法 (Ramp-Hold-Fire)、扫描-触发法 (Ramp-Fire) 和 Pound-Drever-Hall 法。

Q 脉冲最小时间建立法通过监测激光调 Q 脉冲的建立时间, 不断反馈控制从动激光器的腔长来实现与种子激光的匹配, 使脉冲建立的时间最小化, 从而实现单频脉冲激光输出^[6, 45-47]。这种方法可以实现重复频率达 10 kHz 的注入锁定, 但该方法对环境振动等影响的抗干扰能力较弱, 锁定精度差^[6]。

Ramp-Fire 技术的原理是通过腔长控制器件如压电陶瓷 (PZT) 或者电光晶体快速扫描从动激光器的腔长, 当扫描到谐振信号的极大值时迅速打开 Q 开关, 从而实现单频脉冲输出^[48-60]。该技术的优点是控制系统简单、技术原理清晰及抗干扰能力强, 但缺点是在脉冲 Q 开关打开后单频脉冲激光的建立过程中, 从动激光器的腔长因腔长控制器件的影响还在变化中, 从而导致单频脉冲激光的频率稳定性较差。为了提高单频脉冲激光频率的稳定性, 在 Ramp-Fire 技术的基础上, 衍生出 Ramp-Hold-Fire 技术, 它的特点是当探测到谐振信号峰值后, 退回到种子激光谐振点并保持从动激光器谐振腔的长度不变, 打开 Q 开关, 使得腔长在单频脉冲激光器的建立过程中保持不变^[61-70]。基于 Ramp-Hold-Fire 注入锁定单频脉冲激光的频率稳定性更优, 缺点是不适用于高重复频率条件下的注入锁定。

Pound-Drever-Hall 技术被广泛应用到连续激光的腔长锁定中, 被改进后还可用于脉冲激光器的注入锁定。其原理是: 首先通过调制器以种子激光频率为中心调制出两个对称的频率边带, 将调制后的种子激光注入到从动激光器腔内, 并采用探测器探测谐振信号, 并通过滤波器及鉴频器后解调出误差信号, 通过误差信号反馈控制从动激光器的腔长, 在误差信号的零点附近打开 Q 开关从而实现单频脉冲输出^[5, 71-75]。该技术的优点是可实现从动激光器腔长的实时锁定, 其控制精度高, 输出的单频脉冲的功率、频率稳定性非常好。

将种子激光注入到从动激光器的方式主要包括通过声光 Q 开关衍射级注入、偏振注入以及输出镜注入等。通过声光 Q 开关衍射级注入的方法可以同时实现注入连续种子光的移频和调 Q 脉冲运转, 缺点是声光 Q 开关存在一定损耗且其布拉格衍射角较小, 调节难度大; 偏振注入通过偏振分光器件进行注入, 注入种子光的利用率高, 但种子激光需要进行额外移频; 通过输出镜注入, 光路调节难度较小, 缺点是由于输出镜透过率较低, 种子注入效率低, 且

出射单频脉冲激光中会一直有较强的种子光,影响相干探测的效果。

3.2 注入锁定单频脉冲激光研究进展

3.2.1 1.6 μm 波段注入锁定单频脉冲激光

最早在 2001 年,日本三菱公司的 Yanagisawa 等^[76]采用两根 Er/Yb 共掺玻璃作为增益介质,利用波长为 1.54 μm、线宽为 100 kHz 的外腔半导体激光器作为种子源,以偏振的形式注入到驻波腔从动激光器中,通过对单频脉冲与种子激光的拍频频率进行锁定,实现了重复频率为 15 Hz、单脉冲能量为 10.9 mJ、脉冲宽度为 228 ns、线宽为 1.4 MHz 的单频脉冲激光输出。他们测量得到的 10 min 内的拍频中心频率稳定性方均根(RMS)为±1.9 MHz。

2005 年,美国 CTI 公司开展了 Er:YAG 注入锁定激光器的研究工作,如图 7 所示,通过高稳定性 1645 nm Er:YAG 单频连续种子激光从声光调制器(图 7 中 AO Q-Switch)的衍射级注入,实现了输出波长为 1645 nm,重复频率在 250~1000 Hz 可调,脉冲宽度为 100~400 ns,单脉冲能量为 6.3~16 mJ 的单频脉冲激光输出^[45]。CTI 公司最终将研制的 Er:YAG 注入锁定激光器用于相干测风激光雷达。

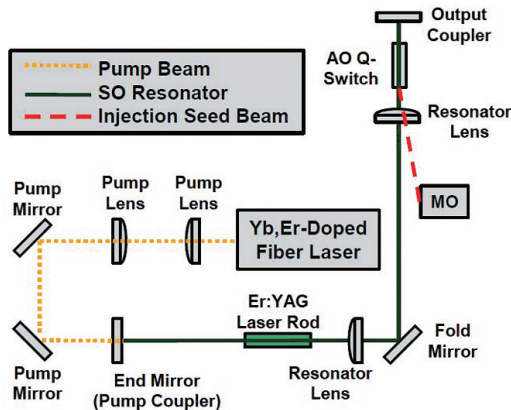


图 7 CTI 公司研制的 1645 nm Er:YAG 注入锁定单频激光器^[45]

Fig. 7 Injection seeded Er:YAG single-frequency laser at 1645 nm fabricated by CTI Inc.^[45]

2007 年,CTI 公司使用环形腔的方案实现了高重复频率注入锁定 Er:YAG 激光输出,如图 8 所示,采用 1617 nm 的 DFB 激光器作为种子源,并通过偏振的方式注入到环形腔中。在环形腔内插入一个标准具,将输出波长选定在 1617 nm,避免出现 1645 nm 激光振荡。通过 Q 脉冲最小建立时间法,实现了重复频率为 10 kHz、单脉冲能量为 0.22 mJ、脉冲宽度为 1.1 ns、波长为 1617 nm 的单频脉冲激

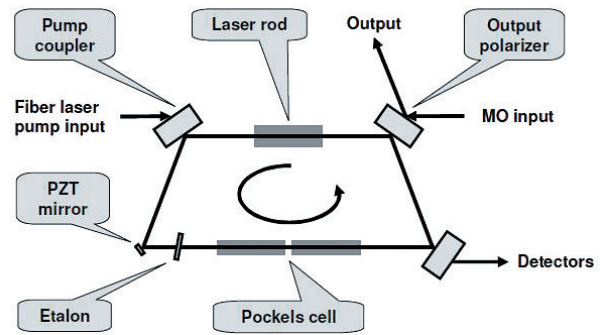


图 8 高重复频率的 1617 nm Er:YAG 注入锁定单频激光器^[40]

Fig. 8 High repetition frequency injection seeded Er:YAG single-frequency laser at 1617 nm^[40]

光输出^[6]。2009 年,CTI 公司报道了基于 Er:YAG 激光器的测风激光雷达系统 WindTracer,测风系统的单频脉冲激光光源为注入锁定 Er:YAG 单频脉冲激光,输出参数如下:单脉冲能量为 2.5 mJ,重复频率为 750 Hz,脉冲宽度为 250 ns。利用此单频脉冲激光系统实现了最远 24 km 的径向风速测量^[40]。

2011 年澳大利亚阿德莱德大学的 Heintze 等^[46]采用 976 nm 准连续半导体激光器泵浦的共掺 Cr³⁺、Er³⁺ 和 Yb³⁺ 的磷酸盐玻璃板条作为增益介质,将线宽为 10 kHz 的掺铒光纤单频激光器作为种子源,通过偏振注入的方式注入到从动激光器中,通过 Q 脉冲最小时间建立法实现注入锁定,最终在重复频率为 1 Hz 条件下获得了能量为 1.1 mJ、中心波长为 1535 nm、线宽为 0.9 MHz、脉冲宽度为 450 ns 的单频脉冲激光输出,该激光器被用于径向风速的测量,并获得了最远 2.2 km 的径向风速测量结果。2013 年,德国夫琅禾费研究所的 Meissner 等^[49]报道了 Er:YLuAG 注入锁定单频脉冲激光器,以中心波长为 1645 nm 的 DFB 激光器作为种子源,并采用 Ramp-Fire 注入锁定方式,在 100 Hz 重复频率下,实现了最大单脉冲能量为 2.3 mJ、脉冲宽度为 84 ns、线宽为 12 MHz、光束质量因子 M² 为 1.02 的单频脉冲激光输出。

2014 年,北京理工大学的 Wang 等^[47]报道了输出波长为 1645 nm 的 Er:YAG 单频注入锁定激光器,采用单块非平面环形腔 Er:YAG 激光作为种子激光,从 AOM 的衍射级注入到 U 型驻波腔 Er:YAG 从动激光器中,并通过 Q 脉冲最小时间建立法实现注入锁定。最终在 200 Hz 的重复频率下,获得了单脉冲能量为 4.75 mJ、脉冲宽度为 336 ns 的单频脉冲激光输出。2016 年,Ye 等^[65]在此工作

的基础上,改用 Ramp-Hold-Fire 注入锁定技术实现了稳定的单频调 Q 脉冲激光运转,在 200 Hz 的重复频率下实现了单脉冲能量为 4.7 mJ、脉冲宽度为 250 ns、线宽为 2.52 MHz 的单频脉冲激光输出。2018 年,Gao 等^[69-70]将从动激光器的泵浦源更换成输出功率为 45 W 的 1470 nm 半导体激光器后,在类似激光器结构下将单脉冲能量提高到 11.1 mJ,脉冲宽度为 183 ns。

2014 年,哈尔滨工业大学的 Deng 等^[77]采用 LD 双端泵浦 Er:YAG 的环形腔方案开展了 1645 nm 的注入锁定激光实验。种子激光采用 Er:YAG NPRO 激光,通过透过率为 8% 的输出镜注入到环形腔从动激光器中,通过 Ramp-Hold-Fire 注入锁定技术,实现了重复频率为 100 Hz、单脉冲能量为 3.5 mJ、脉冲宽度为 195 ns 的单频脉冲激光输出。

2016 年,美国 Fibertek 公司针对大气中甲烷和水分子浓度探测,开展了高重复频率的 Er:YAG 单频脉冲激光的研究工作。种子激光为 1645 nm 的 DFB 激光器出射激光,线宽小于 5 MHz,以偏振的方式从偏振分光棱镜注入,通过 Pound-Drever-Hall 技术实现种子激光的注入锁定,最终实现了甲烷气体 on-line 和 off-line 的波长可捷变、重复频率为 1~8 kHz、单脉冲能量为 500~2000 μ J,脉冲宽度为 100~400 ns 的单频脉冲激光输出^[72-73]。2018 年,Fibertek 公司为了进一步提高单脉冲能量,在环形腔内加入两块掺杂浓度为 0.5% 的 Er:YAG,分别由两台 35 W 的 1532 nm 半导体激光器进行泵浦。在 22% 的输出透过率下,实现了重复频率为 1 kHz、单脉冲能量为 6 mJ、脉冲宽度为 120 ns、线宽为 19 MHz 的单频脉冲激光输出^[74]。

2019 年,北京理工大学的 Shi 等^[55]开展了大能量单频 Er:YAG 激光的研究工作,采用双 Er:YAG 陶瓷实现大能量单频 1645 nm 激光脉冲的注入锁定。采用 Ramp-Fire 注入锁定方式,最终在 200 Hz 重复频率下实现了单脉冲能量为 20.3 mJ、脉冲宽度为 110 ns、线宽为 4.59 MHz 的单频脉冲激光输出。2020 年,Li 等^[60]通过分析 Er³⁺ 的能级特性,发现采用 1470 nm 激光泵浦相对于 1532 nm 激光泵浦更有利于激光储能,因而改用 2 台输出功率为 40 W 的 1470 nm 的 LD 泵浦相同参数的 Er:YAG 陶瓷,实现了最高单脉冲能量为 28.6 mJ(200 Hz 重复频率)的 1645 nm 单频脉冲激光输出。

2019 年,北京理工大学的 Zhang 等^[58]以

Er:YAG NPRO 作为种子源,采用环形腔从动激光器实现了 kHz 量级重复频率的单频激光输出。注入锁定采用 Ramp-Fire 方式,最终在 1 kHz 重复频率下实现了单脉冲能量为 5.52 mJ、脉冲宽度为 500 ns、线宽为 1.47 MHz 的稳定单频激光输出;并利用同一谐振腔双增益晶体的方法,在重复频率为 500 Hz/1 kHz 的情况下将单脉冲能量提高到了 21.0 mJ/14.4 mJ,对应脉冲宽度为 93.2 ns/130 ns、线宽为 5.67 MHz/3.71 MHz^[56]。为了实现更高重复频率的单频脉冲输出,创新性设计了激光在 PZT 所在反射镜上反射两次或者更多次的方法,在不改变 PZT 驱动电压的情况下增大了 PZT 的行程,从而提高了高重复频率注入锁定时 PZT 的响应速率。如图 9 所示,通过采用具有多次反射结构的环形腔从动激光器,实现了重复频率为 2 kHz、单脉冲能量为 4.2 mJ、脉冲宽度为 418 ns、线宽为 2.05 MHz^[57],以及重复频率为 3 kHz、单脉冲能量为 6.1 mJ、脉冲宽度为 318 ns、线宽为 1.71 MHz 的单频脉冲激光输出^[59]。

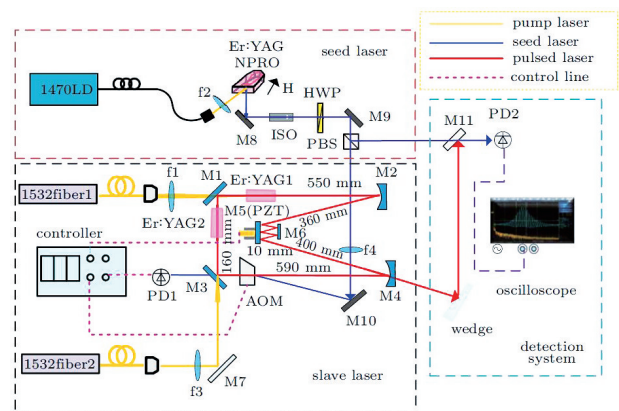


图 9 具有多次反射结构的单频注入锁定激光器^[59]

Fig. 9 Injection seeded Er:YAG single-frequency laser with multi-reflection architecture^[59]

2020 年,北京理工大学采用研制的重复频率为 300 Hz、单脉冲能量为 10.1 mJ、脉冲宽度为 179 ns 的 1645 nm 单频脉冲注入锁定激光器进行测风实验,实现了最远 25 km 的径向风速测量^[2]。为了进一步提高稳定性,获得更好的风速测量结果,Chen 等^[75]将 Pound-Drever-Hall 注入锁定技术引入单频脉冲激光器中,最终在重复频率为 1 kHz 的情况下,实现了单脉冲能量为 10.31 mJ、脉冲宽度为 310 ns、线宽为 1.29 MHz 的 1645 nm 单纵模脉冲激光输出,如图 10 所示。测量得到 30 min 的平均功率不稳定性小于 0.52%,通过种子与脉冲的拍频测量得到 30 min 的频率稳定性小于 525 kHz,这是

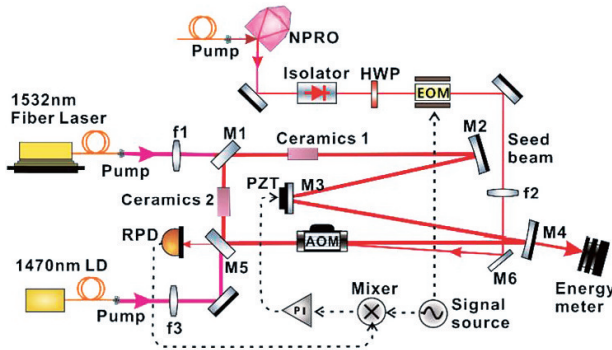


图 10 基于 Pound-Drever-Hall 锁定技术的 Er:YAG 单频脉冲激光器实验装置^[75]

Fig. 10 Experimental facility of Er:YAG single-frequency laser based on Pound-Drever-Hall locking technique^[75]

到目前为止注入锁定脉冲激光器中报道的最优的频率稳定性结果。

3.2.2 2 μm 波段注入锁定单频脉冲激光

1998 年,美国国家航空和宇宙航行局(NASA)的 Yu 等^[48]针对探测 CO₂ 分布星载激光雷达的应用需求,利用 LD 侧面泵浦的 Tm:Ho:YLF 激光器开展了 2052 nm 单频脉冲激光研究工作。种子源为线宽小于 300 kHz、输出功率为 10 mW 的 Ho:Tm:YLF 薄片短腔法单频激光器。通过 Ramp-Fire 注入锁定方式,在 6 Hz 的重复频率下,获得了中心波长为 2052 nm、单脉冲能量为 125 mJ、脉冲宽度为 170 ns 的单频脉冲激光输出。

2001 年,日本 NICT 的 Fukuoka 等^[78]报道了 Tm:Ho:YLF 注入锁定激光器,采用“8”字形环形腔结构,通过对脉冲与种子拍频的中心频率进行锁定,最终获得了中心波长为 2.0508 μm 、重复频率为 10 Hz、单脉冲能量为 5 mJ、脉冲宽度为 326 ns、线宽为 1.5 MHz 的单频脉冲激光输出。2002 年,美国 NASA 的 Koch 等^[79]报道了将腔内插 F-P 的 Tm:Ho:YLF 激光器为种子源,通过输出镜注入到从动激光器中,通过 Ramp-Fire 方式进行锁定,当重复频率为 5 Hz 时获得了中心波长为 2050.428 nm、单脉冲能量为 100 mJ、脉冲宽度为 190 ns 的单频激光输出,测得在 1 h 内的单频激光脉冲中心频率稳定性为 18.5 MHz(RMS)。2008 年,他们将种子源换成 DFB 激光器,输出能量为 90 mJ,通过多个锁定环路将输出 on-line 激光的中心频率稳定性提升到 1.9 MHz^[80]。2008 年,法国巴黎理工大学的 Gibert 等^[81]报道了一台 Tm:Ho:YLF 注入锁定激光器,并将该激光器用于 CO₂ 差分吸收激光雷达。通过 Ramp-Fire 锁定技

术,实现了输出波长为 2064.41 nm/2064.10 nm (on-line/off-line)、脉冲能量为 10 mJ、重复频率为 5 Hz、脉冲宽度为 230 ns、脉冲线宽为 2.5 MHz 的单频脉冲激光输出。

2009 年,哈尔滨工业大学的 Wang 等^[82]报道了将输出功率为 97.6 mW 的 Tm:Ho:GdVO₄ 微片激光器作为种子源,在 20 Hz 的重复频率下,获得了能量为 2 mJ、脉冲宽度为 170 ns 的单频激光输出。同年,南非国家激光研究中心的 Botha 等^[83]报道了 Ho:YLF 单频激光器,采用 DFB 激光器出射激光作为种子激光注入到环形腔从动激光器中,采用 Pound-Drever-Hall 锁定技术,最终在重复频率为 50 Hz 时获得了波长为 2.05 μm 、脉冲能量为 50 mJ、脉冲宽度为 366 ns 的单频激光输出。2009 年,美国 NASA 的 Bai 等^[84]成功研制出 2.05 μm 波段高重复频率单频注入锁定 Ho:YLF 脉冲激光器,其从动激光器采用“8”字形环形腔结构,在 1 kHz 重复频率下实现了 5.8 mJ 的单频激光输出,在 200 Hz 重复频率下实现了单脉冲能量为 34 mJ 的单频激光输出^[50]。

2012 年,哈尔滨工业大学 Dai 等^[85]报道了 Tm:Ho:YAP 注入锁定激光器实验,种子源为 37 mW 输出功率的 Tm:Ho:YAP 微片激光器,对应的波长为 2130.7 nm,在 100 Hz 的重复频率下,获得了单脉冲能量为 2.8 mJ、脉冲宽度为 289 ns、线宽为 4.5 MHz 的单频激光输出。同年,该课题组采用 Ho:YAG NPRO 激光器作为种子源,在 110 Hz 重复频率下,获得了波长为 2090 nm、单脉冲能量为 11 mJ、脉冲宽度为 110 ns 的单频激光输出^[61]。2013 年,该课题组报道了基于 Ho:YAlO₃ 增益介质的注入锁定激光器,种子源为腔内插 F-P 的 Tm:Ho:YAlO₃ 激光器,在 100 Hz 重复频率下,获得了单脉冲能量为 8 mJ 的单频激光输出,对应的脉冲宽度为 151 ns^[63]。

2014 年,法国巴黎理工大学的 Gibert 等^[5]针对大气中 CO₂ 浓度差分吸收探测,在之前工作^[81]的基础上改用 Pound-Drever-Hall 注入锁定技术实现了重复频率为 2 kHz 的 Ho:YLF 单频激光的注入锁定,实验装置如图 11 所示。该激光器以 DFB 激光器为种子源(10 mW, 2050.97 nm),通过声光 Q 开关衍射级注入,实现了单脉冲能量为 13.5 mJ、脉冲宽度为 42 ns、线宽为 11 MHz 的单频激光输出。

2016 年德国夫琅禾费研究所的 Kucirek 等^[86]将波长为 2051 nm 的 DFB 激光器作为种子源,采用 Ramp-Fire 注入锁定方式,在重复频率为

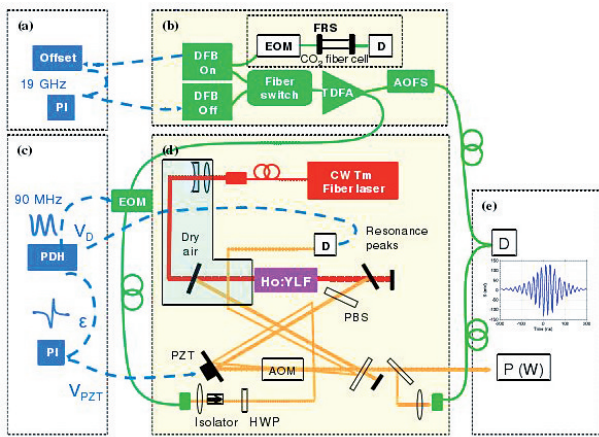


图 11 Ho:YLF 注入锁定激光器^[5]

Fig. 11 Injection seeded Ho:YLF single-frequency laser^[5]
 1 kHz/100 Hz 条件下获得了 2.7 mJ/6.7 mJ 的单频激光输出,对应的脉冲宽度均为 10 ns。

2016 年,北京理工大学采用 Ho:YAG NPRO 单频激光作为种子通过声光 Q 开关的衍射级注入到从动激光器中,采用波长为 1908 nm 的半导体激光器作为泵浦源,采用 Ramp-Hold-Fire 锁定方式在 200 Hz 的重复频率下实现了中心波长为 2090 nm、单脉冲能量为 15.15 mJ、脉冲宽度为 109 ns、线宽为 4.19 MHz、光束质量因子 $M^2 < 1.22$ 、中心频率稳定性优于 1.52 MHz(RMS, 1 h)的单频脉冲激光输出^[64]。2017 年,本课题组报道了脉冲重复频率可调的 Ho:YAG 注入锁定单频激光器,实现了重复频率为 150~750 Hz、单脉冲能量为 19.9~8.2 mJ、脉冲宽度为 109~221 ns、光束质量因子 M^2 优于 1.11 的单频脉冲激光输出,并测量对比了不同频率下的中心频率稳定性等参数^[67]。2018 年,通过改用环形腔从动激光器方案和 Ramp-Fire 注入锁定技

术,实现了重复频率为 1 kHz/1.25 kHz 的高平均功率的单频脉冲激光输出^[51, 54]。

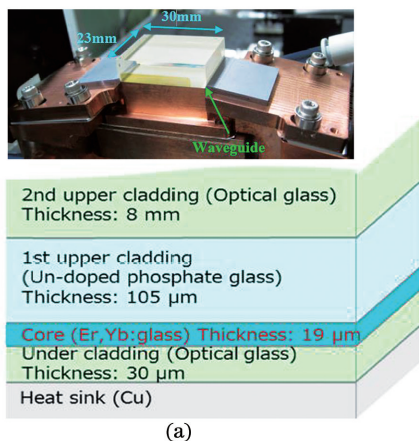
4 单频脉冲激光 MOPA 放大的研究进展

注入锁定技术虽然能实现较大能量的单频脉冲激光输出,但是单脉冲能量受限于腔内器件的损伤阈值,很难实现更高能量的单频脉冲激光输出,而对于星载相干激光雷达等超远程探测应用需求,仅由振荡级输出的激光能量和峰值功率并不能满足探测需求。MOPA 技术可以将连续的种子激光通过电光调制成不同频率、不同脉冲宽度的脉冲激光,或者直接将注入锁定得到单频脉冲激光,通过单程或者多程放大器进行放大。相比具有谐振腔的注入锁定技术,MOPA 方案虽然能量利用效率低,但结果简单,能够进一步提升单频脉冲的脉冲能量。

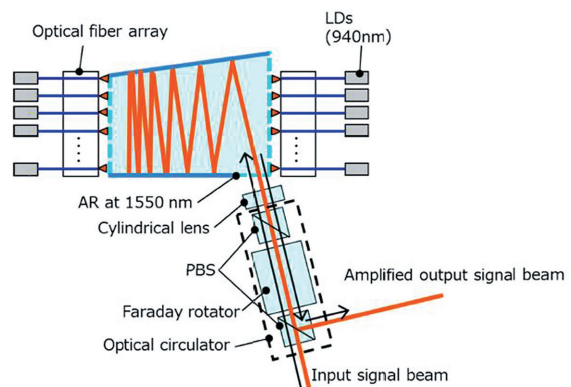
4.1 1.6 μm 波段单频脉冲激光 MOPA 放大的研究进展

掺钕激光器在 1.6 μm 处的激光发射属于准三能级结构,下能级为钕离子能级的基态子能级,根据玻尔兹曼分布,激光下能级会分布有一定数量的粒子,这会导致激光在放大过程中出现较强的再吸收,加上钕离子的能量上转换效应,使得 1.6 μm 波段激光的 MOPA 行波放大效率很低。若要实现高增益的 MOPA 放大,需要提高泵浦强度或者增加增益介质的长度,常用的放大方式有多程放大和板条放大等。

2012 年,日本三菱公司 Sakimura 等^[87]为了获得高重复频率、高平均功率的单频脉冲激光,研制了基于 Er、Yb 共掺玻璃平面波导的单频激光放大系统。如图 12 所示,平面波导激光玻璃放大器的芯



(a)



(b)

图 12 三菱公司的平面波导放大器^[87-88]。(a)波导结构;(b)平面波导放大光路示意图

Fig. 12 Planar waveguide amplifier of Mitsubishi Inc.^[87-88]。(a) Waveguide structure; (b) schematic of planar waveguide amplifier

层在波导方向上的厚度仅为 $19\ \mu\text{m}$,这保证了激光在脉冲放大过程中具有良好的光束质量,且保证了单模条件。放大器采用 $940\ \text{nm}$ 的 LD 作为泵浦源,种子光在波导结构中进行多程 MOPA 放大。种子光为 $1549\ \text{nm}$ 的 DFB 半导体激光器出射激光,经过声光调制器调制成脉冲激光输出,重复频率为 $4\ \text{kHz}$,经过二级掺铒光纤放大后平均功率为 $60\ \text{mW}$ 。将预放大后的脉冲注入到 MOPA 放大器中,获得了平均功率为 $7.6\ \text{W}$ 、单脉冲能量为 $1.9\ \text{mJ}$ 、脉冲宽度为 $579\ \text{ns}$ 的单频脉冲激光输出。2019年,通过进一步优化最终实现了 $3.2\ \text{mJ}$ 的单频脉冲激光输出,光束质量因子 M^2 为 1.59 (水平方向)和 1.05 (波导方向)^[88]。

2018年,北京理工大学的 Wang 等^[70]将注入锁定后得到的单脉冲能量为 $11.10\ \text{mJ}$ 的 $1645\ \text{nm}$ 单频脉冲激光,经过一级 Er:YAG MOPA 放大器后,单脉冲能量提升到 $14.33\ \text{mJ}$,实现了 1.34 倍的增益。铒离子的准三能级和能量上转换效应导致单程放大的增益很低。为了进一步提高增益倍数,2020年,北京理工大学的 Li 等^[89]设计了通过偏振控制的方式在单 Er:YAG 晶体上的四程放大实验,验证了多程放大(即增加增益介质长度的方法)可以有效提升增益,在 $1\ \text{mJ}$ 单频脉冲激光的注入情况下,最高实现了 4 倍的放大增益。

4.2 $2\ \mu\text{m}$ 波段单频脉冲激光 MOPA 放大的研究进展

掺铽激光器在 $2\ \mu\text{m}$ 处的增益截面相对于 $1.6\ \mu\text{m}$ 更大,可以达到 $10^{-20}\ \text{cm}^{-2}$,激光的上能级寿命近 $10\ \text{ms}$,有利于激光储能实现大能量脉冲激光输出。因此,采用掺铽或者共掺铽、铽增益介质进行 MOPA 放大的方法被广泛应用于 $2\ \mu\text{m}$ 单频激光的能量放大中。

2006年美国 NASA 的 Yu 等^[90]开展了 Tm:Ho:LuLF 的激光功率放大实验,注入光为单频脉冲激光,其重复频率为 $2\ \text{Hz}$,脉冲能量为 $100\ \text{mJ}$,脉冲宽度为 $187\ \text{ns}$ 。采用了三级共计四程的半导体侧面泵浦 Tm:Ho:LuLF 进行脉冲能量放大,得到了 $1.1\ \text{J}$ 的单频脉冲输出。

2011年南非激光研究中心的 Strauss 等^[91]将波长为 $2064\ \text{nm}$ 、重复频率为 $50\ \text{Hz}$ 、单脉冲能量为 $73\ \text{mJ}$ 、脉冲宽度为 $365\ \text{ns}$ 的单频激光脉冲,经过 Tm:YLF 板条激光泵浦的 Ho:YLF 和 Ho:LuLF 板条进行能量放大,可将单脉冲能量提升到 $210\ \text{mJ}$,脉冲宽度缩短为 $350\ \text{ns}$ 。2013年,该课题

组通过二级 Ho:YLF 板条功率放大器,在 $30\ \text{Hz}$ 重复频率下,获得了最高 $333\ \text{mJ}$ 单脉冲能量的 $2064\ \text{nm}$ 单频脉冲激光输出,并且光束质量因子 M^2 仍保持在 1.5 的水平上^[92]。

2017年北京理工大学的 Wang 等^[67]报道了 Ho:YAG 功率放大器。当输入的单频脉冲激光重复频率为 $150\sim 750\ \text{Hz}$ 、单脉冲能量为 $19.9\sim 8.2\ \text{mJ}$ 、脉冲宽度为 $109\sim 221\ \text{ns}$ 时,经过一级 $37\ \text{W}$ $1908\ \text{nm}$ 半导体激光器泵浦的 Ho:YAG 进行 MOPA 放大,获得了重复频率为 $150\sim 750\ \text{Hz}$ 、单脉冲能量为 $31.4\sim 12.7\ \text{mJ}$ 、脉冲宽度为 $102\sim 215\ \text{ns}$ 、光束质量因子 M^2 优于 1.11 的单频脉冲激光输出,放大过程中还伴随有脉冲宽度变窄和光束质量优化的现象。同年,该课题组采用二级放大,在 $200\ \text{Hz}$ 的重复频率下将 $2090\ \text{nm}$ 单频单脉冲能量从 $15\ \text{mJ}$ 放大到 $44\ \text{mJ}$ 和 $55.64\ \text{mJ}$ ^[93-94]。2018年,在 $1.25\ \text{kHz}$ 的重复频率下,将 $2090\ \text{nm}$ 单脉冲能量从 $5.73\ \text{mJ}$ 放大到 $13.76\ \text{mJ}$,平均功率高达 $17.2\ \text{W}$,单程增益为 2.4 倍^[54]。

2018年,法国巴黎理工大学在 2014 年工作^[5]基础上,针对 CO_2 浓度的差分吸收探测应用,在 $303.5\ \text{Hz}$ 的重复频率下,通过 $1940\ \text{nm}$ 光纤激光泵浦 2 根 Ho:YLF 晶体的 MOPA 放大结构,实现了波长为 $2051.250\ \text{nm}/2051.009\ \text{nm}$ (off line/on line)、单脉冲能量为 $11.7\ \text{mJ}/42.1\ \text{mJ}$ 、脉冲宽度为 $74\ \text{ns}/33\ \text{ns}$ 的单频脉冲激光输出^[53]。

5 总结与展望

结合全固态单频激光器在激光雷达方面的应用需求,对人眼安全波段固体单频激光器的研究进展进行了综述,包括 $1.6\ \mu\text{m}$ 波段及 $2\ \mu\text{m}$ 波段连续单频固体激光器及脉冲单频固体激光器的研究进展;对比分析了连续单频固体激光的产生方法;对比分析了不同的注入锁定方法;综述了 $1.6\ \mu\text{m}$ 波段及 $2\ \mu\text{m}$ 波段单频脉冲激光 MOPA 放大的进展情况。近年来,得益于相干激光测风雷达和差分吸收激光雷达的迫切应用需求,人眼安全波段单频激光器在近年来得到了快速发展,单频连续激光技术、脉冲激光器技术、谐振泵浦技术、注入锁定技术及 MOPA 放大技术均取得了显著进步,但仍有一些问题需要进一步优化和研究。

1) 研究新型增益介质,通过腔内插 F-P 标准具、环形腔、单块非平面环形腔、扭转腔模等方法结合新型稀土离子掺杂的增益介质,可以实现输出波

长多样化的连续单频激光运转。

2) 尽管目前实现的 NPRO 单频激光器都是基于稀土离子掺杂的 YAG 晶体或者陶瓷,相信其他各向同性介质如稀土离子掺杂的 YGG、ZnSe 等基质材料也是可以实现 NPRO 单频激光输出的,这有助于拓展 NPRO 单频激光器的输出波长。

3) 由于 $\text{Er}^{3+}/\text{Ho}^{3+}$ 准三能级特性引起的再吸收和能量上转换等的影响,为了减弱热效应,通常采用谐振泵浦低掺杂增益介质,这就导致晶体在泵浦波段处的吸收系数较小。为了提高吸收效率并实现高功率激光输出,应对增益介质的掺杂浓度以及长度等参数进行优化。

4) 进一步提高单频激光在 MOPA 放大过程中的增益。要实现高增益的 MOPA 放大,需要提高泵浦强度或者增加增益介质的长度,多程放大技术、板条技术,及高功率泵浦的单晶光纤激光放大器将会具有很好的前景。

5) 提高注入锁定单频脉冲激光的频率稳定性。进一步优化 Ramp-Hold-Fire 法、Ramp-Fire 法和 Pound-Drever-Hall 法等注入锁定方法,实现单频脉冲激光频率稳定性的提升。

6) 针对星载及远程相干激光测风、差分吸收激光雷达的应用需求,需要进一步提高激光器的单脉冲能量,同时对脉冲宽度进行控制研究,进一步压缩激光器体积。

综上所述,人眼安全波段单频全固态激光器需要在注入锁定放大器的能量提升、MOPA 放大、脉冲宽度控制、新型增益介质以及激光器结构优化设计方面进一步开展研究,进一步提升全固态单频激光器的输出性能,从而满足远程相干激光测风、差分吸收激光雷达的应用需求。

参 考 文 献

- [1] Xu J J, Bu L B, Liu J Q, et al. Airborne high-spectral-resolution lidar for atmospheric aerosol detection[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(7): 0710003.
徐俊杰, 卜令兵, 刘继桥, 等. 机载高光谱分辨率激光雷达探测大气气溶胶的研究[J]. 中国激光, 2020, 47(7): 0710003.
- [2] Wang K X, Gao C Q, Lin Z F, et al. 1645 nm coherent Doppler wind lidar with a single-frequency Er:YAG laser[J]. Optics Express, 2020, 28(10): 14694-14704.
- [3] Kiemle C, Quatrevalet M, Ehret G, et al. Sensitivity studies for a space-based methane lidar mission[J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2011, 4(10): 2195-2211.
- [4] Riris H, Numata K, Li S, et al. Airborne measurements of atmospheric methane column abundance using a pulsed integrated-path differential absorption lidar[J]. Applied Optics, 2012, 51(34): 8296-8305.
- [5] Gibert F, Edouard D, Cénac C, et al. 2- μm high-power multiple-frequency single-mode Q-switched Ho:YLF laser for DIAL application [J]. Applied Physics B, 2014, 116(4): 967-976.
- [6] Stoneman R C, Hartman R, Schneider E A, et al. Eyesafe diffraction-limited single-frequency 1 ns pulse width Er:YAG laser transmitter[J]. Proceedings of SPIE, 2007, 6552: 65520H.
- [7] Marron J C, Kendrick R L, Thurman S T, et al. Extended-range digital holographic imaging [J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7684: 76841J.
- [8] International Electrotechnical Commission. Safety of laser products-Part 1: equipment classification and requirements (IEC 60825-1:2014) [S/OL]. [2020-09-15]. <https://webstore.iec.ch/publication/3587>.
- [9] Li Y J, Feng J X, Li P, et al. 400 mW low noise continuous-wave single-frequency Er, Yb:YAl₃(BO₃)₄ laser at 1.55 μm [J]. Optics Express, 2013, 21(5): 6082-6090.
- [10] Huang J H, Chen Y J, Lin Y F, et al. 940 mW 1564 nm multi-longitudinal-mode and 440 mW 1537 nm single-longitudinal-mode continuous-wave Er:Yb microchip lasers[J]. Optics Letters, 2018, 43(8): 1643-1646.
- [11] Kornev A F, Sobolev S S, Terekhov S S. Single-frequency microchip Nd:YAG laser for injection seeding [C] // 2018 International Conference Laser Optics (ICLO), June 4-8, 2018, St. Petersburg, Russia. New York: IEEE Press, 2018: 40.
- [12] Zhang G W. Tunable lasers[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002.
张国威. 可调谐激光技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.
- [13] Chang N W H, Hosken D J, Munch J, et al. Stable, single frequency Er:YAG lasers at 1.6 μm [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2010, 46(7): 1039-1042.
- [14] 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.
- [15] Wang L, Gao C Q, Gao M W, et al. A diode-pumped tunable single frequency Tm:YAG laser at room temperature using two etalons [J]. Laser Physics, 2012, 22(2): 398-402.

- [16] Zhu L N, Gao C Q, Wang R, et al. Resonantly pumped 1.645 μm single longitudinal mode Er:YAG laser with intracavity etalons [J]. *Applied Optics*, 2012, 51(10): 1616-1618.
- [17] Zhu L N, Gao C Q, Wang R, et al. Fiber-bulk hybrid Er:YAG laser with 1617 nm single frequency laser output [J]. *Laser Physics Letters*, 2012, 9(9): 674-677.
- [18] Yao B Q, Yu X, Ju Y L, et al. Room temperature diode-pumped tunable single-frequency Tm:YAG ceramic laser [J]. *Chinese Physics Letters*, 2013, 30(2): 024210.
- [19] Yu X, Yao B Q, Deng Y, et al. A room temperature diode-pumped single frequency Er:YAG laser at 1645 nm [J]. *Laser Physics*, 2013, 23(9): 095803.
- [20] Deng Y, Yao B Q, Ju Y L, et al. A diode-pumped 1617 nm single longitudinal mode Er:YAG laser with intra-cavity etalons [J]. *Chinese Physics Letters*, 2014, 31(7): 074202.
- [21] Dai T, Wu J, Zhang Z, et al. Diode-end-pumped single-longitudinal-mode Er:LuAG laser with intracavity etalons at 1.6 μm [J]. *Applied Optics*, 2015, 54(32): 9500-9503.
- [22] Li W J, Wang Q, Wang Y L, et al. Tunable single-longitudinal-mode Ho:YAG laser pumped by a 1.13 μm diode laser [J]. *Applied Optics*, 2017, 56(35): 9809-9813.
- [23] Shi Y, Gao C Q, Li S H, et al. Fiber-bulk hybrid Er:YAG laser with single frequency output at the wavelengths of 1620 nm and 1656 nm [J]. *Laser Physics Letters*, 2019, 16(7): 075001.
- [24] Kim J W, Sahu J K, Clarkson W A. Efficient single-axial-mode operation of an Er:YAG ring laser at 1645 nm [C]//2008 Conference on Lasers and Electro-Optics and 2008 Conference on Quantum Electronics and Laser Science, May 4-9, 2008, San Jose, CA, USA. New York: IEEE Press, 2008: 1-2.
- [25] 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.
- [26] Yao B Q, Duan X M, Fang D, et al. 7.3 W of single-frequency output power at 2.09 μm from an Ho:YAG monolithic nonplanar ring laser [J]. *Optics Letters*, 2008, 33(18): 2161-2163.
- [27] Gao C Q, Gao M W, Lin Z F, et al. LD pumped monolithic non-planar ring resonator single frequency lasers [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, 36(7): 1704-1709.
高春清, 高明伟, 林志锋, 等. LD 抽运单块非平面环形腔单频激光器 [J]. *中国激光*, 2009, 36(7): 1704-1709.
- [28] Chen D W, Belden P M, Rose T S, et al. Narrowband Er:YAG nonplanar ring oscillator at 1645 nm [J]. *Optics Letters*, 2011, 36(7): 1197-1199.
- [29] Gao C, Zhu L, Wang R, et al. 6.1 W single frequency laser output at 1645 nm from a resonantly pumped Er:YAG nonplanar ring oscillator [J]. *Optics Letters*, 2012, 37(11): 1859-1861.
- [30] 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.
- [31] Wang R, Gao C Q, Zheng Y, et al. A resonantly pumped 1645 nm Er:YAG nonplanar ring oscillator with 10.5 W single frequency output [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2013, 25(10): 955-957.
- [32] Yao B Q, Yu X, Liu X L, et al. Room temperature single longitudinal mode laser output at 1645 nm from a laser-diode pumped Er:YAG nonplanar ring oscillator [J]. *Optics Express*, 2013, 21(7): 8916-8921.
- [33] Zheng Y, Gao C Q, Wang R, et al. Single frequency 1645 nm Er:YAG nonplanar ring oscillator resonantly pumped by a 1470 nm laser diode [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(5): 784-786.
- [34] Wang L, Gao C Q, Gao M W, et al. Single-frequency and dual-wavelength Ho:YAG nonplanar ring oscillator resonantly pumped by a Tm:YLF laser [J]. *Optical Engineering*, 2014, 53(6): 061603.
- [35] Wang L, Ye Q, Gao M W, et al. Stable high-power Er:YAG ceramic single-frequency laser at 1645 nm [J]. *Optics Express*, 2016, 24(13): 14966-14973.
- [36] Zhang M, Gao C Q, Gao M W, et al. 16 W single-frequency laser output from an Er:YAG ceramic nonplanar ring oscillator [J]. *Laser Physics Letters*, 2018, 15(12): 125803.
- [37] 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.
- [38] Yao B Q, Dai T Y, Duan X M, et al. Tunable single-longitudinal-mode Er:YAG laser using a twisted-mode technique at 1.6 μm [J]. *Laser Physics Letters*, 2015, 12(2): 025004.
- [39] Klotzkin D J. Introduction to semiconductor lasers for optical communications [M]. 2nd ed. New York: Springer, 2014.
- [40] Hannon S M. Wind resource assessment using long

- range pulsed Doppler lidar [C]//15th Coherent Laser Radar Conference, June 22-26, 2009, Toulouse, France.[S.l.]:[s.n.], 2009: 59-62.
- [41] Weldon V, Phelan P, Hegarty J. Methane and carbon dioxide sensing using a DFB laser diode operating at 1.64 μm [J]. *Electronics Letters*, 1993, 29(6): 560-561.
- [42] Kwee P, Bogan C, Danzmann K, et al. Stabilized high-power laser system for the gravitational wave detector advanced LIGO[J]. *Optics Express*, 2012, 20(10): 10617-10634.
- [43] Yang C S, Cen X, Xu S H, et al. Research progress of single-frequency fiber laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 41(1): 0114002.
杨昌盛, 岑旭, 徐善辉, 等. 单频光纤激光器研究进展[J]. *光学学报*, 2020, 41(1): 0114002.
- [44] Rybaltovsky A A, Egorova O N, Zhuravlev S G, et al. Distributed Bragg reflector fiber laser directly written in a composite fiber manufactured by melting phosphate glass in a silica tube[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(14): 3518-3521.
- [45] Stoneman R C, Hartman R, Malm A I R, et al. Coherent laser radar using eyesafe YAG laser transmitters[J]. *Proceedings of SPIE*, 2005, 5791: 167-174.
- [46] Heintze M C, Chang N W H, Jeanneret F, et al. Single-pulse measurement of wind velocities using an Er:Yb coherent laser radar [J]. *Applied Optics*, 2011, 50(21): 4017-4023.
- [47] Wang R, Ye Q, Zheng Y, et al. Single-frequency operation of a resonantly pumped 1.645 μm Er:YAG Q-switched laser [J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 8959: 89590F.
- [48] Yu J R, Singh U N, Barnes N P, et al. 125-mJ diode-pumped injection-seeded Ho:Tm laser [J]. *Optics Letters*, 1998, 23(10): 780-782.
- [49] Meissner A, Kucirek P, Li J, et al. Simulations and experiments on resonantly pumped single-frequency erbium lasers at 1.6 μm [J]. *Proceedings of SPIE*, 2013, 8599: 85990H.
- [50] Bai Y X, Yu J R, Wong T H, et al. Single-mode, high repetition rate, compact Ho:YLF laser for space-borne lidar applications [C]//2014 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO)-Laser Science to Photonic Applications, June 8-13, 2014, San Jose, CA, USA. New York: IEEE Press, 2014: 1-2.
- [51] Na Q X, Gao C Q, Wang Q, et al. 1 kHz single-frequency 2.09 μm Ho:YAG ring laser[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(25): 7075-7078.
- [52] 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.
- [53] Gibert F, Pellegrino J, Edouard D, et al. 2- μm double-pulse single-frequency Tm:Fiber laser pumped Ho:YLF laser for a space-borne CO₂ lidar [J]. *Applied Optics*, 2018, 57(36): 10370-10379.
- [54] 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.
- [55] Shi Y, Gao C Q, Wang S, et al. High-energy, single-frequency, Q-switched Er:YAG laser with a double-crystals-end-pumping architecture[J]. *Optics Express*, 2019, 27(3): 2671-2680.
- [56] Zhang M, Gao C Q, Wang Q, et al. High-repetition rate, single-frequency laser with a double Er:YAG ceramics ring cavity[J]. *Optics Express*, 2019, 27(16): 23197-23203.
- [57] Zhang Y X, Gao C Q, Wang Q, et al. 2 kHz single-frequency, injection-seeded Q-switched laser with a 'double-reflection' architecture [J]. *Laser Physics Letters*, 2019, 16(11): 115002.
- [58] Zhang Y X, Gao C Q, Wang Q, et al. 1 kHz single-frequency, injection-seeded Er:YAG laser with an optical feedback[J]. *Chinese Optics Letters*, 2019, 17(3): 031402.
- [59] Huang S, Wang Q, Zhang M, et al. A 3-kHz Er:YAG single-frequency laser with a 'triple-reflection' configuration on a piezoelectric actuator[J]. *Chinese Physics B*, 2020, 29(8): 084204.
- [60] Li S H, Wang Q, Song R, et al. Laser diode pumped high-energy single-frequency Er:YAG laser with hundreds of nanoseconds pulse duration[J]. *Chinese Optics Letters*, 2020, 18(3): 031401.
- [61] Dai T Y, Ju Y L, Yao B Q, et al. Injection-seeded Ho:YAG laser at room temperature by monolithic nonplanar ring laser [J]. *Laser Physics Letters*, 2012, 9(10): 716-720.
- [62] 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.
- [63] Dai T Y, Ju Y L, Duan X M, et al. Single-frequency, injection-seeded Q-switched operation of a resonantly pumped Ho:YAlO₃ laser at 2118 nm[J]. *Applied Physics B*, 2013, 111(1): 89-92.
- [64] Na Q X, Gao C Q, Wang Q, et al. 15 mJ single-frequency Ho:YAG laser resonantly pumped by a 1.9 μm laser diode[J]. *Laser Physics Letters*, 2016, 13(9): 095003.

- [65] Ye Q, Gao C Q, Wang S, et al. Single-frequency, injection-seeded Q-switched operation of resonantly pumped Er:YAG ceramic laser at 1645 nm [J]. *Applied Physics B*, 2016, 122(7): 198.
- [66] 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 μm fiber-coupled LD [J]. *Optics Express*, 2016, 24(24): 27805-27811.
- [67] Wang Q, Gao C, Na Q, et al. Single-frequency injection-seeded Q-switched Ho:YAG laser [J]. *Applied Physics Express*, 2017, 10(4): 042701.
- [68] 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.
- [69] Gao C Q, Shi Y, Ye Q, et al. 10 mJ single-frequency, injection-seeded Q-switched Er:YAG laser pumped by a 1470 nm fiber-coupled LD [J]. *Laser Physics Letters*, 2018, 15(2): 025003.
- [70] Wang S, Gao C Q, Shi Y, et al. 1645-nm single-frequency, injection-seeded Q-switched Er:YAG master oscillator and power amplifier [J]. *Optical Engineering*, 2018, 57(2): 026120.
- [71] Gibert F, Edouard D, Cénac C, et al. 2- μm Ho emitter-based coherent DIAL for CO₂ profiling in the atmosphere [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(13): 3093-3096.
- [72] Chen M R, Burns P M, Litvinovitch V, et al. Er:YAG laser technology for remote sensing applications [J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 1000: 1000603.
- [73] Chen M R, Rudd W J, Hansell J, et al. Er:YAG methane lidar laser technology [J]. *Proceedings of SPIE*, 2019, 1100: 110050Q.
- [74] Burns P M, Chen M R, Pachowicz D, et al. Single frequency Er:YAG methane/water vapor DIAL source [C] // *Imaging and Applied Optics 2018* (3D, AO, AIO, COSI, DH, IS, LACSEA, LS&C, MATH, pcAOP), Orlando, Florida. Washington, D.C.: OSA, 2018: SW3H.2.
- [75] Chen C Y, Chen C Y, Wang Q, et al. Single-frequency Q-switched Er:YAG laser with high frequency and energy stability via the Pound-Drever-Hall locking method [J]. *Optics Letters*, 2020, 45(13): 3745-3748.
- [76] Yanagisawa T, Asaka K, Hirano Y. 10.9-mJ single-frequency diode-pumped Q-switched Er, Yb:glass laser for a coherent Doppler lidar [J]. *Proceedings of SPIE*, 2001, 4153: 86-92.
- [77] Deng Y, Yu X, Yao B Q, et al. Single-frequency, Q-switched Er:YAG at room temperature injection-seeded by an Er:YAG nonplanar ring oscillator [J]. *Laser Physics*, 2014, 24(4): 045809.
- [78] Fukuoka H, Kadoya M, Asaba K, et al. Injection-seeded Tm:Ho laser [J]. *Proceedings of SPIE*, 2001, 4153: 455-462.
- [79] 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.
- [80] Koch G J, Beyon J Y, Gibert F, et al. Side-line tunable laser transmitter for differential absorption lidar measurements of CO₂: design and application to atmospheric measurements [J]. *Applied Optics*, 2008, 47(7): 944-956.
- [81] Gibert F, Flamant P H, Cuesta J, et al. Vertical 2- μm heterodyne differential absorption lidar measurements of mean CO₂ mixing ratio in the troposphere [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2008, 25(9): 1477-1497.
- [82] Wang Z, Ju Y, Wu C, et al. Diode-pumped injection-seeded Tm, Ho:GdVO₄ laser [J]. *Laser Physics Letters*, 2009, 6(2): 98-101.
- [83] Botha L R, Bollig C, Esser M J D, et al. Ho:YLF pumped HBr laser [J]. *Optics Express*, 2009, 17(22): 20615-20622.
- [84] Bai Y X, Yu J R, Petzar P, et al. Single longitudinal mode, high repetition rate, Q-switched Ho:YLF laser for remote sensing [C] // *2009 Conference on Lasers and Electro-Optics and 2009 Conference on Quantum Electronics and Laser Science Conference*, June 2-4, 2009, Baltimore, MD, USA. New York: IEEE Press, 2009: 1-2.
- [85] Dai T Y, Ju Y L, Duan X M, et al. 2130.7 nm, single-frequency Q-switched operation of Tm, Ho:YAlO₃ laser injection-seeded by a microchip Tm, Ho:YAlO₃ laser [J]. *Applied Physics Express*, 2012, 5(8): 082702.
- [86] Kucirek P, Meissner A, Eiselt P, et al. A single-frequency double-pulse Ho:YLF laser for CO₂-lidar [J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 9726: 97260K.
- [87] Sakimura T, Watanabe Y, Ando T, et al. 1.5- μm high average power laser amplifier using an Er, Yb:glass planar waveguide for coherent Doppler lidar [J]. *Proceedings of SPIE*, 2012, 8526: 852604.
- [88] Sakimura T, Hirosawa K, Watanabe Y, et al. 1.55- μm high-peak, high-average-power laser amplifier using an Er, Yb:glass planar waveguide for wind sensing coherent Doppler lidar [J]. *Optics Express*, 2019, 27(17): 24175-24187.
- [89] Li S H, Li S H, Gao C Q, et al. Er:YAG MOPA system based on a polarization-multiplexing 4-pass

- structure[J]. Optics Express, 2020, 28(10): 15424-15431.
- [90] Yu J R, Trieu B C, Modlin E A, et al. 1 J/pulse Q-switched 2 μm solid-state laser[J]. Optics Letters, 2006, 31(4): 462-464.
- [91] Strauss H J, Koen W, Bollig C, et al. Ho:YLF & Ho:LuLF slab amplifier system delivering 200 mJ, 2 μm single-frequency pulses [J]. Optics Express, 2011, 19(15): 13974-13979.
- [92] 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.
- [93] 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.
- [94] Na Q X, Gao C Q, Wang Q, et al. 44 mJ, 2.1 μm single-frequency Ho:YAG amplifier [J]. Applied Optics, 2017, 56(4): 1257-1260.

Research Progress on Eye-Safe All-Solid-State Single-Frequency Lasers

Wang Qing^{1,2,3**}, Gao Chunqing^{1,2,3*}

¹ School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

² Key Laboratory of Information Photonics Technology, Ministry of Industry and Information Technology, Beijing 100081, China;

³ Key Laboratory of Photoelectronic Imaging Technology and System, Ministry of Education, Beijing 100081, China

Abstract

Significance Due to their narrow spectral range, single-frequency lasers have the advantage of long coherence length due; thus, such lasers are widely used in coherent detection. Recently, the demand for atmospheric aerosol detection, wind field information, atmospheric gas concentration distribution, and coherent imaging have become urgent. A pulsed single-frequency laser source is significant for coherent laser detection. Single-frequency laser pulses with high output pulse energy are required for long-distance coherent detection.

To avoid the scattering of a single-frequency-pulsed laser in the atmosphere from damaging the human eye, the light source of a lidar system must consider the safety of laser irradiation. According to the International Electrotechnical Commission IEC60825 international application standard and laser safety classification method, 1.4 – 2.6 μm laser irradiation is less harmful to human eyes than 1.06 μm laser irradiation under the same laser pulse energy. Thus, the 1.4 – 2.6 μm band is called eye safety band. The eye-safe laser is represented by the 1.6- μm band output generated with an erbium-doped gain medium and the 2- μm band output generated with a holmium-doped gain medium. In recent years, with the development of 1.4 – 1.5 μm and 1.9- μm laser diodes and resonant pumping technology, Er³⁺ doped single-frequency lasers \sim 1.6 μm and the Ho³⁺ doped single-frequency lasers \sim 2 μm have been greatly promoted. The 1.6- μm band locates in the communication band and the atmospheric window. The corresponding devices, such as detectors are more mature and efficient. Therefore, the 1.6 μm band is more suitable for long-distance lidar. One output line of Er:YAG is \sim 1.65 μm , and there are characteristic absorption peaks of CH₄ gas; therefore, a single-frequency laser at 1.645 μm can be used for differential absorption detection of methane. Tm³⁺ and Ho³⁺ lasers \sim 2 μm are also located in the atmospheric window and have higher atmospheric transmittance than 1.6 μm lasers. Additionally, Ho:YLF single-frequency lasers at a wavelength of 2.05 μm can be used for differential absorption detection of CO₂.

Aiming at the application requirements of lidar for single-frequency lasers, this article reviews the research progress of continuous and pulsed all-solid-state single-frequency lasers in the 1.6- and 2- μm bands.

Progress Typically, continuous-wave (CW) operation of a single-frequency laser is realized by inserting a longitudinal mode selection device in a standing wave resonator or a one-direction ring cavity while pulsed single-frequency lasers are usually obtained via a CW narrow linewidth seed laser injected into the driven laser to achieve amplification and single-frequency-pulsed laser output. In the latter case, power is increased through the main oscillation power amplification (MOPA). In this paper, considered the application requirements of single-frequency lasers in lidar systems, the technical developments of CW and pulsed all-solid-state single-frequency lasers are reviewed, and the output characteristics of single-frequency lasers in the 1.6- and 2- μm bands are compared and analyzed. The technical characteristics of different injection locking methods are discussed, and combined with the

application requirements of lidar systems, the future development of eye-safe all-solid-state single-frequency lasers is considered.

Conclusions and Prospects Given the requirements of coherent wind measurement lidar and differential absorption lidar, eye-safe single-frequency lasers have improved rapidly in recent years. CW single-frequency laser technology, pulsed laser technology, resonant pump technology, seed-injection locking technology, and MOPA amplification technology have made significant progress. However, eye-safe single-frequency all-solid-state lasers need to be further studied in terms of energy enhancement of the seed-injection regenerative amplifier, MOPA amplification, pulse width control, new type gain media, and laser structure optimization to further improve the characteristics of all-solid-state single-frequency lasers. Further studies are expected to improve the performance of long-range coherent laser wind measurement and differential absorption lidar, for example in terms of detection length and accuracy.

Key words lasers; single-frequency lasers; eye-safe range; injection locking; master oscillator power amplifier

OCIS codes 140.3580; 140.3570; 140.3520; 140.3280