

全固态单频激光器研究进展

李梦龙 高龙 史文宗 冯文 颜凡江 陶宇亮

北京空间机电研究所, 北京 100094

摘要 全固态单频激光器相干长度长、谱线宽度窄、效率高、寿命长,在科研、国防及工业领域得到越来越广泛的应用。由全固态单频激光器的核心——单纵模选择技术出发,结合扩展单频激光功率/能量的放大器技术,分析归纳了国内外全固态单频激光器的主流技术方案及研究进展,并对其进一步发展给予了展望。

关键词 激光器; 全固态激光器; 单频激光器; 进展

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP53.080003

Progress in All-Solid-State Single-Frequency Lasers

Li Menglong Gao Long Shi Wenzong Feng Wen Yan Fanjiang Tao Yuliang

Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, Beijing 100094, China

Abstract All-solid-state single-frequency lasers with long coherent length, narrow line width, high efficiency and long life time have been widely used in scientific, military and industrial fields in recent years. The key techniques to achieve the all-solid-state single-frequency laser output and improve the laser performance are single longitudinal mode selection and power amplification. The domestic and international progress in such lasers and the mainstream technology programs are analyzed and summarized. In addition, the prospect of the all-solid-state single-frequency laser is discussed.

Key words lasers; all-solid-state lasers; single-frequency lasers; progress

OCIS codes 140.3580; 140.3480; 140.3570

1 引言

单频激光器,又称单纵模激光器,输出的激光在频域上只有单一纵模,除具有普通激光器本身良好的特性外,相干长度更长、谱线宽度更窄。全固态激光器(DPSSL)单频技术利用固体激光器效率高、寿命长、体积小及光束质量高的优点,运用纵模选择技术实现激光器单频运转,普遍具有简单小巧的结构、较窄的激光线宽、较高的转换效率、多样化的选模方式以及灵活的稳频措施,显示了相当大的应用潜力。近年来,已在激光钠导星技术、引力波探测、测风激光雷达、相干光通信、光学频率基准、量子光学、高效非线性频率变换等众多科研、国防及工业领域引起越来越多的关注^[1-9]。

本文从全固态单频激光器的核心——单纵模选择技术出发,结合单频激光功率/能量扩展技术,分析并归纳了国内外全固态单频激光器的主流技术方案及研究进展,对其进一步发展给予了展望。

2 全固态单频激光技术

在全固态激光器中,实现单频运转的关键是采取有效的选模方法。近年来,多种模式选择理论与技术相继出现,促使全固态单频激光器向高功率、窄线宽、广光谱的方向不断发展,目前国内外主要有以下几种选模方法。

2.1 短腔法

缩短谐振腔的长度可以增大两相邻纵模的间隔,使落在激活介质有限增益宽度内可起振的纵模只有一个,由此实现单纵模振荡。

收稿日期: 2016-01-19; **收到修改稿日期:** 2016-03-05; **网络出版日期:** 2016-07-20

作者简介: 李梦龙(1988—),男,博士,工程师,主要从事全固态激光技术等方面的研究。E-mail: mlli@163.com

1979年 Kubodera 等^[10]首次利用激光二极管(LD)端面抽运 $300\ \mu\text{m}$ 长的 $\text{LiNdP}_4\text{O}_{12}$ (LNP) 微片晶体, 放置于 $10\ \text{mm}$ 长谐振腔中, 通过激光晶体自身的标准具效应选频, 分别得到了 $2\ \text{mW}$ 、 $1.05\ \mu\text{m}$ 和 $0.5\ \text{mW}$ 、 $1.32\ \mu\text{m}$ 的单频激光输出, 激光器结构如图 1 所示。

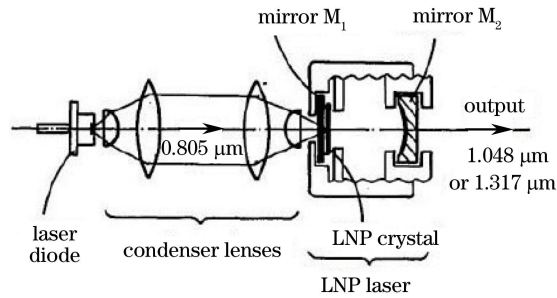


图 1 短腔法实现单频激光结构示意图

Fig. 1 Short cavity method schematic for single-frequency laser

1989年 Zayhowski 等^[11]利用厚为 $730\ \mu\text{m}$ 的 $\text{Nd}:\text{YAG}$ 微片得到了约 $8\ \text{mW}$ 的 $1.06\ \mu\text{m}$ 单频激光输出, 线宽优于 $5\ \text{kHz}$ 。5年后, 他们利用该技术结合被动调 Q 技术, 获得 $6\ \text{kHz}$ 、 $337\ \text{ps}$ 、 $66\ \text{mW}$ 脉冲单频激光输出^[12]。1991年 Taira 等^[13]报道了 LD 抽运的 $\text{Nd}:\text{YVO}_4$ 微片激光器, 实现了 $103\ \text{mW}$ 单模激光输出。两年后, 中国科学院上海光学精密机械研究所单振国等^[14]首次在国内通过 LD 抽运 $\text{Nd}:\text{YAG}$ 微片得到了单纵模输出。2009年, Sotor 等^[15]利用微片激光器获得了可以宽调谐的 $532\ \text{nm}$ 单频激光输出。2010年, 哈尔滨工业大学 Li 等^[16]报道了端面抽运 $\text{Tm}:\text{Ho}:\text{YVO}_4$ 微片在室温下获得 $2\ \mu\text{m}$ 激光输出。

在腔内插入标准具选模法, 原理类似于上述短腔驻波法, 即利用标准具的窄线宽透射谱对落在谱内的相邻间隔较大(与标准具透射带宽比较)的纵模进行选择, 使腔内可起振的纵模只有一个。此方法便于调节标准具的角度或温度, 获得单频激光波长的调谐。2013年北京理工大学 Wang 等^[17]运用端面抽运 $\text{Tm}:\text{LuAG}$ 晶体加腔内标准具法, 获得了 $616\ \text{mW}$ 、 $2021\ \text{nm}$ 单频激光, 且通过精细调节标准具的角度, 获得了 $2018.714\sim 2029.876\ \text{nm}$ 的调谐, 实验示意图如图 2 所示。同年山西大学 Li 等^[18]利用 $\text{Er}, \text{Yb}:\text{YAB}$ 微片, 在谐振腔内插入标准具选择纵模, 获得了 $400\ \text{mW}$ 、 $1.55\ \mu\text{m}$ 单频激光输出。

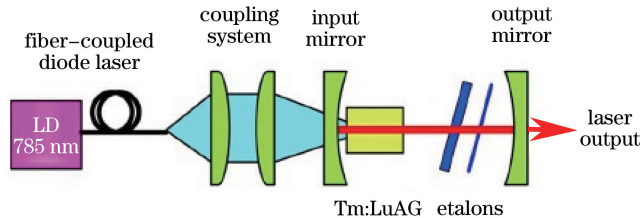


图 2 腔内标准具法实现单频激光示意图

Fig. 2 Schematic of single-frequency laser with etalon in cavity

以上方法由于增益介质较短或标准具损耗较大而无法获得高功率输出, 但其结构简单、元件紧凑, 是小型化激光器与激光种子源的发展方向。

2.2 行波谐振腔技术

在含有均匀加宽工作物质的普通固体激光器中, 虽然增益饱和效应导致的模式竞争有助于形成单纵模振荡, 但由于驻波谐振腔中空间烧孔的存在, 当抽运足够强时, 激光器仍然会出现多纵模运转。如果使光在腔中沿单一方向传播, 即构成行波谐振腔, 则可以消除空间烧孔效应, 使激光器输出单纵模。

1985年, Kane 等^[19]率先实现了 LD 抽运的 $\text{Nd}:\text{YAG}$ 单块非平面环形腔(NPRO)激光器。利用特殊切割的单块增益晶体内部全反射引入的相位延迟, 外加磁场引入的法拉第旋光效应及输出面上特定膜层引入的偏振选择作用, 保证晶体内部只有沿某一特定方向的一种偏振态的光起振, 进而形成非平面式环形行波谐振腔, 并获得了 $163\ \text{mW}$ 、 $1064\ \text{nm}$ 的单频激光输出。两年后, Kane 等^[20]提升了频率稳定性, 用相似的腔型与结构(图 3), 输出单频稳频激光($25\ \text{mW}$), 频率波动为 $40\ \text{kHz}/8\ \text{min}$ 。

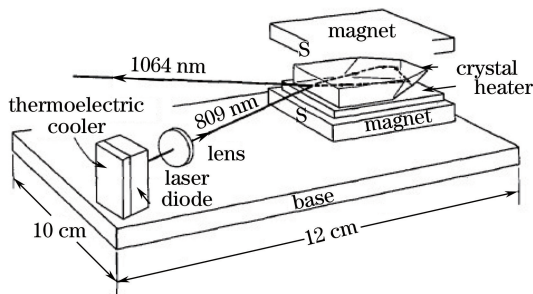


图3 NPRO单频激光器

Fig. 3 Schematic of NPRO single-frequency laser

该激光器结构简单,可方便地实现不同波长的单频激光输出。2007年,中国计量科学研究院 Zang 等^[21]利用 Nd:YAG 晶体单块非平面结构,实现了 1.25 W、1123 nm 的单频激光输出。2013 年北京理工大学高春清教授课题组 Wang 等^[22]利用相同的结构,在 Ho:YAG 晶体中实现了 9.66 W、2122 nm 的单频激光输出。同年,该课题组 Wang 等^[23]及 Gao 等^[24]分别在 Er:YAG 晶体和 Nd:YAG 晶体中获得 10.5 W、1645 nm 和 1.55 W、1319 nm 的单频激光。北京理工大学的研究结果代表了单块非平面全固态单频激光器的世界领先水平。

近年来,基于分立元件的环形谐振腔得到了迅速的发展,这种激光器不同于 NPRO 技术,不需要加工精度很高的晶体,且可以灵活地在腔中插入各种控制性元件。1996 年, Martin 等^[25]利用四镜环形腔获得了 4.2 W、1064 nm 的单频光输出。该方法可灵活地设计谐振腔腔型与抽运方式,有利于实现较高的振荡输出功率与转换效率。2009 年,哈尔滨工业大学 Zhao 等^[26]利用 Nd:YVO₄/YVO₄ 键合晶体,搭建四镜环形腔得到 13.6 W 的单频光输出,光光转换效率约为 43.2%。这种环形腔技术利用法拉第旋光器与半波片驱使振荡的偏振激光在谐振腔内单向运转,从而实现单纵模输出。同年 Shardlow 等^[27]利用边缘抽运 Nd:YVO₄ 板条晶体,通过构建三镜环形腔的方法实现了 17 W 的单频输出,斜效率为 44%。2010 年北京工业大学赵伟芳等^[28]利用四镜环形腔得到 12 W 单频 1064 nm 激光,光光转换效率高达 56%。

不仅如此,这种行波腔结构还有利于插入非线性晶体,以便实现高效的腔内非线性频率变换,从而将单频激光波长拓展到可见光区。2011 年,山西大学 Liu 等^[29]采用六镜环形行波腔配合双端抽运,采用腔内倍频技术得到了 12 W 单频 532 nm 激光输出,实验光路如图 4 所示。值得注意的是,行波腔内进行的倍频过程同时也有助于腔内振荡的基频光实现稳定的单频运转,因其可引入非线性损耗来抑制腔内基频光非激活纵模的振荡,进而减小多纵模振荡或模式跳变的可能性。同时,在腔内插入标准具(图 4)将增强这种抑制效果,进一步提升基频光的单频运转稳定性^[30]。

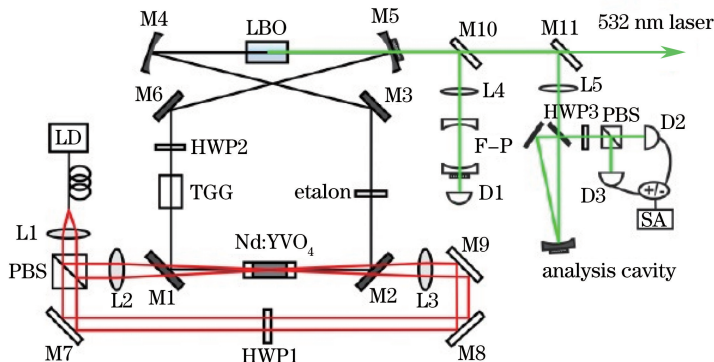


图4 六镜环形腔单频绿光激光器结构示意图

Fig. 4 Schematic of six mirror ring cavity single-frequency green laser

两年后,山西大学采用 888 nm 激光带内抽运方式结合四镜环形腔技术,实现了 13.5~25.3 W 可调谐单频 532 nm 激光输出,这代表了目前单振荡级全固态单频激光器输出功率的世界先进水平^[31]。

2.3 扭转腔模法

该方法是在腔内用起偏器起偏,并在增益介质两端放置 $1/4$ 波片,当这些元件的主方向满足特定条件时,增益介质中的光场不再是驻波模式,从而可以消除空间烧孔效应。2005 年华东师范大学 Wu 等^[32] 利用此方法获得了 2.1 W 单频 $1.06 \mu\text{m}$ 激光,实验结构如图 5 所示。2011 年,北京理工大学 Gao 等^[33] 报道了 $2 \mu\text{m}$ 激光输出,增益介质为 Tm:YAG 晶体的扭转模单频激光器,通过在谐振腔内插入 $1/4$ 波片和偏振片,获得了 1.46 W 单频激光输出,斜效率为 19.2%。

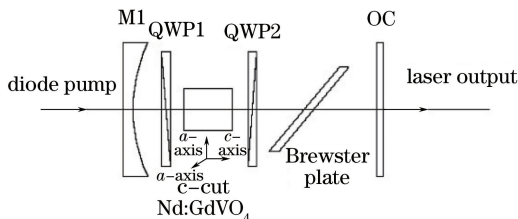


图 5 扭转腔模法实现单频激光器结构示意图

Fig. 5 Schematic of twisted-mode cavity single-frequency laser

3 全固态单频激光功率扩展技术

上述几种产生单频激光的技术均为振荡器直接输出激光,若要产生更高功率/能量的激光,需要借助种子光放大技术,这种体制以上述各种全固态单频激光器作为种子源,包括主振荡级功率放大器(MOPA)与注入锁定技术,或者两种方式的结合。

3.1 MOPA 系统

单纯的 MOPA 系统将种子产生的单频激光直接注入激光放大模块中,种子光通过在其中行进来提取放大模块贮存的能量,进而提升光功率或光能量,同时保持激光的单频特性不变。根据放大器数量划分,可分为单级/多级放大系统;根据增益介质结构划分,可分为棒状/块状/板条状放大器;根据通光方式划分,可分为单程/多程放大器。在实际应用中,可根据需要进行方案选择,多为以上几种方式的组合形式。

Frede 等^[34] 于 2007 年报道了 35 W、1064 nm 连续波单频激光实验,利用输出功率为 2 W 的 NPRO 作为振荡级,构建了四级端面抽运 Nd:YVO₄ 放大系统。放大器中晶体为块状结构,有利于良好充分的散热,并方便机械夹持。振荡激光依次单程通过串联的四级放大模块,获得足够的提取效率。若采用功率更高的种子振荡器(18 W),同样的放大器可以实现 65 W 的功率输出。2013 年,中国科学院理化技术研究所 Wang 等^[35] 利用 MOPA 技术,令环形行波腔振荡器中产生的重复频率为 500 Hz、平均功率为 61 W 的 1064 nm 单频激光单程通过侧面抽运结构的 Nd:YAG 晶体放大器,功率放大至 90.3 W。放大器中的晶体为圆棒状结构,加工方便,有利于 LD 阵列侧面环绕抽运。为实现高功率指标要求,采用两级放大模块提高放大增益;利用环形腔振荡器,产生 21.7 W、1319 nm 的激光,经过相似的 MOPA 系统放大至 59.8 W;最后通过三硼酸锂(LBO)晶体和频,获得了 33 W、589 nm 单频激光输出,技术路线如图 6 所示。

意大利帕维亚大学 Agnesi 等^[36] 采用了板条状晶体的放大器设计,可以有效地降低晶体的热效应。由 Nd:YAG 微片式晶体获得种子光,放大器采用单级双程放大结构,整体光路结构如图 7 所示。增益晶体为一块板条状 Nd:YVO₄ 晶体,尺寸为 $4 \text{ mm} \times 2 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$,掺杂浓度为 1% (原子数分数),激光在其中的抽运区呈掠入射状态,以获得较高的增益。板条晶体一个侧面由 40 W 的连续 808 nm LD 阵列抽运,种子光首次经过放大器后,由棱镜反射再次通过放大器,最终获得了 10 kHz、545 μJ 、577 ps 的单频 1064 nm 激光输出^[36]。此外,具有 Zig-Zag 光路结构的板条晶体常被用作单频激光的放大增益介质。在此结构中,光束入射进晶体后在介质的一对表面之间来回全反射地向前传播,整个光路呈 Z 形结构,热透镜和热退偏这两种效应在板条晶体内可以得到有效遏制。

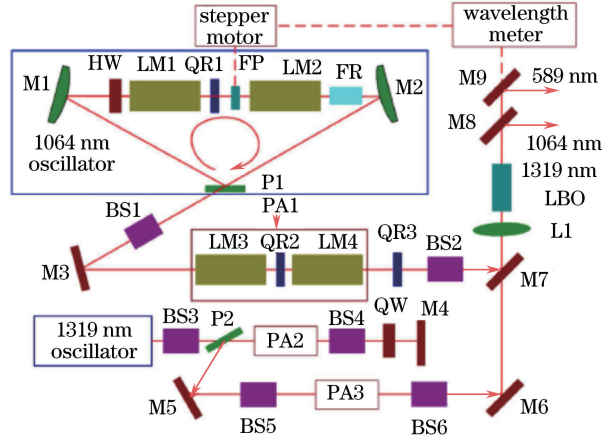


图 6 棒式晶体 MOPA 技术单频激光示意图

Fig. 6 Schematic of MOPA with rod crystal for single-frequency laser

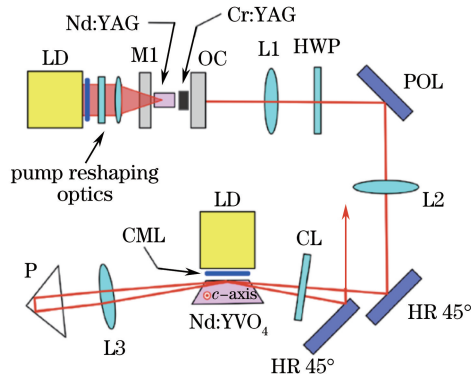


图 7 板条 MOPA 技术单频激光示意图

Fig. 7 Schematic of MOPA with slab crystal for single-frequency laser

3.2 注入锁定系统

注入锁定系统将一束弱的、稳定的种子单频激光注入到另一高功率/能量激光器中,注入的种子光在其中建立振荡,与注入频率相同或相近(与被注入谐振腔相关)的模式优先起振,抑制其他纵模,从而获得放大的高功率/能量单频输出。与单纯的 MOPA 方式相比,虽然系统较为复杂,但放大效率高、频率易锁定。2011 年,Winkelmann 等^[37]在其 MOPA 系统连续波 1064 nm 单频激光的基础上,将 35 W 种子激光注入端面抽运的含 4 块激光晶体的环形谐振腔中锁定并放大,在注入锁定腔中采用压电换能器进行腔长微调与频率锁定,实现了 220 W 单频激光输出,这是目前全固态连续波注入锁定技术领域世界领先的单频激光功率,实验结构如图 8 所示。

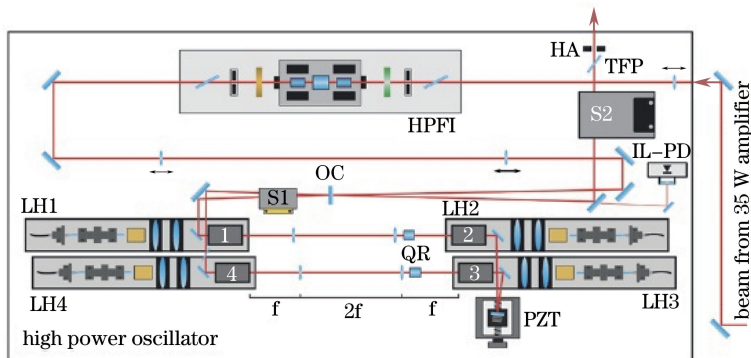


图 8 注入锁定系统实现高功率单频激光器结构示意图

Fig. 8 Schematic of injection-locking system for high power single-frequency laser

在注入锁定的谐振腔内,可以方便地加入调Q控制元件(电光Q开关、声光Q开关等),因此这种方式也有利于构建大能量脉冲运转的单频激光系统。2007年Fibertek公司Hovis等^[38]为空间测风雷达项目研制了大能量紫外光单频激光器,激光器构造如图9所示。将1 μm的单频种子光注入至含望远镜的环形谐振腔中进行频率锁定,并利用磷酸钛氧铷晶体实现电光调Q运转,获得输出能量为30~60 mJ、重复频率为50 Hz的脉冲光,随后进入两级单侧抽运的板条晶体预放大器进行单程放大,将能量提升至500 mJ,然后再次进入一级双侧抽运的板条放大器,将能量进一步放大至888 mJ,最终分别采用两块LBO晶体进行倍频及和频,获得了478 mJ、355 nm紫外激光输出,脉冲宽度为14 ns。

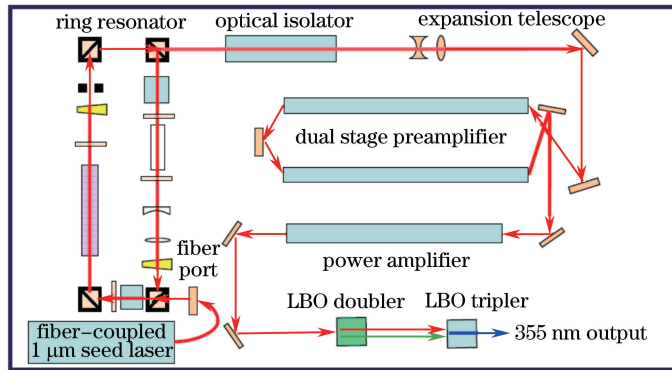


图9 Fibertek公司的大能量紫外单频激光器

Fig. 9 Schematic of high energy ultraviolet single-frequency laser from Fibertek Inc.

2008年,Science and Technology公司联合美国国家航空航天局,研制了一款大能量单频激光器,并将其应用于机载测风雷达,获得了高达350 mJ的脉冲单频激光,重复频率为10 Hz,脉冲宽度为200 ns,此系统以线宽13 kHz的连续波激光器为单频种子光,注入到含有Ho:Tm:LuLiF₄晶体的环形谐振腔中锁定放大,以声光Q开关作为脉冲调制器件,随后进行了一级双通MOPA放大以实现指标能量^[39]。2013年中国科学院上海光学精密机械研究所Lu等^[40]采用输出线宽数为千赫兹量级的NPRO作为种子源,注入到含有电光调Q开关的折叠型谐振腔中进行锁定放大,并插入LBO晶体进行腔内倍频,实现了重复频率为1 kHz、能量为6.3 mJ的532 nm单频绿光输出,脉冲宽度小于10 ns。

随着光纤技术的发展,近年来出现了多样化的光纤振荡器、光纤放大器和全光纤振荡放大器,散热便利、损耗低、转换效率高、光束质量优越且稳定性高,逐渐成为研究热点^[41-45]。其中,基于光纤放大器的单频激光器在功率上取得了较大突破,平均功率可达上百瓦。这些基于光纤技术的单频激光振荡器和放大器必将是未来高功率单频激光研究的热点,也是应用化、产品化的高功率单频激光器的一个重要发展方向。

4 结束语

综述了全固态单频激光器的核心——单纵模选择技术,介绍了目前主流的多种技术方案及特性,并对国内外的研究进展进行了归纳。针对单频激光功率/能量的提高,分析了主振荡级功率放大器与注入锁定两种技术路线,并对国内外较为先进的研究成果进行了总结。随着科学研究的深入与工业技术的不断进步,对多种指标的全固态单频激光器的需求将持续增加,必将使这种激光器向着窄线宽、高稳定性、高效率、大功率/能量的方向快速、持续地发展,在更多的领域实现其应用价值。

目前,国外已建立了完善的研发机制并培育了相关的研究机构与企业,已有成熟的工业级单频激光产品开始应用,并积累了丰富的研制经验。国内起步较晚,大多数仍处于实验室阶段,尚未开展工程化研发。单频激光器因其独特的纵模选择技术,工作条件较为苛刻,力、热、电磁等环境条件的变化都可能引发模式的跳变或波动,降低激光稳定性。如何提升现有指标单频激光器的稳定性,让激光器走出实验室,实现工程化、产品化,满足实际应用需求,是当前发展的趋势。例如,在单频激光器光学设计中,需深入研究低失调灵敏度谐振腔以及放大器,降低激光器对结构变形的敏感度;在激光器结构设计中,应探索如何在苛刻的力学、热学、真空环境甚至失重环境中,减小结构的形变,并对光学元件采取可靠的调节固定措施,避免谐振腔的失谐;在

激光器热学设计中,需要发展新型的小体积、低质量高效传导散热技术(如热管散热技术),以提升光束质量,避免抽运 LD 波长的热啾啾等。相信在各种需求的牵引下,在研究基础的推动下,我国全固态单频激光技术将得到快速、长足的发展。

参 考 文 献

- 1 Wang C H, Zhang X, Ye Z B, *et al.* 180 mJ, long-pulse-duration, master-oscillator power amplifier with linewidth less than 25.6 kHz for laser guide stars[J]. *Applied Optics*, 2013, 52(19): 4693-4697.
- 2 Mavalvala N, McClelland D E, Mueller G, *et al.* Lasers and optics: Looking towards third generation gravitational wave detectors[J]. *General Relativity & Gravitation*, 2011, 43(2): 569-592.
- 3 Ishii S, Iwasaki T, Sato M, *et al.* Future Doppler lidar wind measurement from space in Japan[C]. *SPIE*, 2012, 8529: 85290A.
- 4 Meier T, Willke B, Danzmann K. Continuous-wave single-frequency 532 nm laser source emitting 130 W into the fundamental transversal mode[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(22): 3742-3744.
- 5 Wang Ran, Gao Chunqing. Progress of 1.6 μm region single-frequency lasers[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(8): 080006.
王 然, 高春清. 1.6 μm 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.
- 6 Liu Chong, Zhang Xiang, Ye Zhibin, *et al.* Single frequency laser with 100 MHz repetition rate and 1 ns pulse width using combined amplification[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(4): 0402006.
刘 崇, 张 翔, 叶志斌, 等. 混合放大 100 MHz 高重复频率窄脉宽单频激光器[J]. *中国激光*, 2014, 41(4): 0402006.
- 7 Li Peng, Ma Yayun, Nie Dandan, *et al.* Continuous-wave single-frequency 1.5 μm laser generated by a singly resonant optical parametric oscillator[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(8): 0802008.
李 鹏, 马亚云, 聂丹丹, 等. 利用单共振光学参量振荡器产生 1.5 μm 连续单频激光[J]. *中国激光*, 2014, 41(8): 0802008.
- 8 Dai Shutao, Li Jinhui, Shi Fei, *et al.* High repetition rate high pulse energy single longitudinal mode master oscillator laser[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(12): 1202001.
戴殊韬, 李锦辉, 史 斐, 等. 高重复频率大能量单纵模主振荡激光器[J]. *中国激光*, 2014, 41(12): 1202001.
- 9 Jiang Jiabin, Li Shiguang, Ma Xiuhua, *et al.* Investigation on spectral purity frequency pulsed optical of injection seeding single parametric oscillator[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(7): 0702011.
姜佳欣, 李世光, 马秀华, 等. 种子注入单频脉冲光参量振荡器的光谱纯度研究[J]. *中国激光*, 2015, 42(7): 0702011.
- 10 Kubodera K, Otsuka K. Efficient LiNdP₄O₁₂ lasers pumped with a laser diode[J]. *Applied Optics*, 1979, 18(23): 3882-3883.
- 11 Zayhowski J J, Mooradian A. Single-frequency microchip Nd lasers[J]. *Optics Letters*, 1989, 14(1): 24-26.
- 12 Zayhowski J J, Dill III C. Diode-pumped passively Q-switched picosecond microchip lasers[J]. *Optics Letters*, 1994, 19(18): 1427-1429.
- 13 Taira T, Mukai A, Nozawa Y, *et al.* Single-mode oscillation of laser-diode-pumped Nd:YVO₄ microchip lasers[J]. *Optics Letters*, 1991, 16(24): 1955-1957.
- 14 Shan Zhenguang, Shen Xiaohua, Huang Guosong, *et al.* Single longitudinal mode operation of LD pumped Nd:YAG microchip laser[J]. *Laser & Infrared*, 1993, 23(6): 22-23.
单振国, 沈小华, 黄国松, 等. LD 抽运 Nd:YAG 微片激光器的单纵模运转[J]. *激光与红外*, 1993, 23(6): 22-23.
- 15 Sotor J Z, Antończak A J, Abramski K M. Single frequency, widely tuneable green microchip laser[C]. 11th International Conference on Transparent Optics Networks, Graz, 2009: 1-4.
- 16 Li G, Yao B Q, Zhang C H, *et al.* Diode pumped operation of Tm, Ho:YVO₄ microchip laser[J]. *Chinese Physics Letters*, 2010, 27(3): 034201.
- 17 Wang L, Gao C Q, Gao M W, *et al.* Diode-pumped 2 μm tunable single-frequency Tm:LuAG laser with intracavity etalons[J]. *Applied Optics*, 2013, 52(6): 1272-1275.
- 18 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 Letters*, 2013, 21(5): 6082-6090.
- 19 Kane T J, Byer R L. Monolithic, unidirectional single-mode Nd:YAG ring laser[J]. *Optics Letters*, 1985, 10(2): 65-67.
- 20 Kane T J, Nilsson A C, Byer R L. Frequency stability and offset locking of a laser-diode-pumped Nd:YAG monolithic

- nonplanar ring oscillator[J]. *Optics Letters*, 1987, 12(3): 175-177.
- 21 Zang E J, Cao J P, Li Y. Single-frequency 1.25 W monolithic lasers at 1123 nm[J]. *Optics Letters*, 2007, 32(3): 250-252.
- 22 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 Letters*, 2013, 21(8): 9541-9546.
- 23 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.
- 24 Gao M W, Zhao Y, Zhang L Y, *et al.* 1319-nm single-frequency output from diffusion-bonded monolithic nonplanar Nd:YAG ring resonator with undoped end[J]. *Chinese Physics Letters*, 2013, 11(4): 041406.
- 25 Martin K I, Clarkson W A, Hanna D C, *et al.* High-power single-frequency operation, at 1064 nm and 1061.4 nm of a Nd:YAG ring laser end-pumped by a beam-shaped diode bar[J]. *Optics Communications*, 1997, 135(1-3): 89-92.
- 26 Zhao J Q, Wang Y Z, Yao B Q, *et al.* High efficiency, single-frequency continuous wave Nd:YVO₄/YVO₄ ring laser [J]. *Laser Physics Letters*, 2010, 7(2): 135-138.
- 27 Shardlow P C, Damzen M J. High efficiency 17 W single frequency ring laser with feedback mirror [C]. *European Conference on Lasers and Electro-Optics 2009 and European Quantum Electronics Conference*, Munich, 2009: 1.
- 28 Zhao W F, Hou W, Guo L, *et al.* 12 W high efficiency single frequency ring laser[J]. *Laser Physics Letters*, 2010, 7(3): 210-212.
- 29 Liu J L, Wang Z Y, Li H, *et al.* Stable, 12 W, continuous-wave single-frequency Nd:YVO₄ green laser polarized and dual-end pumped at 880 nm[J]. *Optics Express*, 2011, 19(7): 6777-6782.
- 30 Martin K, Clarkson W, Hanna D. Self-suppression of axial mode hopping by intracavity second-harmonic generation[J]. *Optics Letters*, 1997, 22(6): 375-377.
- 31 Wang Y J, Yang W H, Zhou H J, *et al.* Temperature dependence of the fractional thermal load of Nd:YVO₄ at 1064 nm lasing and its influence on laser performance[J]. *Optics Express*, 2013, 21(15): 18068-18078.
- 32 Wu E, Pan H, Zhang S, *et al.* High power single-longitudinal-mode operation in a twisted-mode-cavity laser with a c-cut Nd:GdVO₄ crystal[J]. *Applied Physics B*, 2005, 80: 459-462.
- 33 Gao C, Wang R, Lin Z, *et al.* 2 μm single-frequency Tm:YAG laser generated from a diode-pumped L-shaped twisted mode cavity[J]. *Applied Physics B*, 2012, 107(1): 67-70.
- 34 Frede M, Schulz B, Wilhelm R, *et al.* Fundamental mode, single-frequency laser amplifier for gravitational wave detectors[J]. *Optics Express*, 2007, 15(2): 459-465.
- 35 Wang P Y, Xie S Y, Bo Y, *et al.* 33 W quasi-continuous-wave narrow-band sodium D_{2a} laser by sum-frequency generation in LBO[J]. *Chinese Physics B*, 2014, 23(9): 094208.
- 36 Agnesi A, Dallochio P, Pirzio F, *et al.* Sub-nanosecond single-frequency 10-kHz diode-pumped MOPA laser [J]. *Applied Physics B*, 2010, 98(4): 737-741.
- 37 Winkelmann L, Puncken O, Kluzik R, *et al.* Injection-locked single-frequency laser with an output power of 220 W[J]. *Applied Physics B*, 2011, 102(3): 529-538.
- 38 Hovis F E, Wang J X. High efficiency UV laser for space-based wind lidar[C]. *SPIE*, 2007, 6555: 655504.
- 39 Petros M, Yu H Y, Trieu B, *et al.* The selection of Q-switch for a 350 mJ air-borne 2 μm wind lidar[C]. *SPIE*, 2008, 7153: 715309.
- 40 Lu T T, Wang J T, Zhu Z L, *et al.* Highly efficient single longitudinal mode-pulsed green laser[J]. *Chinese Physics Letters*, 2013, 11(5): 051402.
- 41 Li S G, Ma X H, Li H H, *et al.* Laser-diode-pumped zigzag slab Nd:YAG master oscillator power amplifier[J]. *Chinese Physics Letters*, 2013, 11(7): 071402.
- 42 Ma P F, Zhou P, Ma Y X, *et al.* Single-frequency 332 W, linearly polarized Yb-doped all-fiber amplifier with near diffraction-limited beam quality[J]. *Applied Optics*, 2013, 52(20): 4854-4857.
- 43 Karow M, Basu C, Kracht D, *et al.* TEM₀₀ mode content of a two stage single-frequency Yb-doped PCF MOPA with 246 W of output power[J]. *Optics Express*, 2012, 20(5): 5319-5324.
- 44 Jeong Y C, Nilsson J, Sahu J K, *et al.* Power scaling of single-frequency ytterbium-doped fiber master-oscillator power-amplifier sources up to 500 W[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2007, 13(3): 546-551.
- 45 Su R T, Zhou P, Wang X L, *et al.* Active coherent beam combining of a five-element, 800 W nanosecond fiber amplifier array[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(19): 3978-3980.