

高功率低噪声全固态连续波单频激光器研究进展

张宽收^{1,2*}, 卢华东^{1,2}, 李渊骥^{1,2}, 冯晋霞^{1,2}

¹山西大学光电研究所量子光学与光量子器件国家重点实验室, 山西 太原 030006;

²山西大学极端光学协同创新中心, 山西 太原 030006

摘要 高功率低噪声全固态连续波单频激光器在量子科学与技术、冷原子物理、高精度精密测量以及光学传感等领域有着广泛的应用。为了满足应用需求,在泵浦功率增大的条件下,需克服激光晶体热效应的影响,提高激光器输出功率,同时保持单频输出特性和光束质量不变,降低激光器在低频段的强度噪声并扩展激光器的输出波长等。针对这些关键问题,本课题组开展了原理研究和器件设计,研制出一系列具有不同输出波长的高功率低噪声全固态连续波无跳模单频激光器。总结和介绍了本课题组在高功率低噪声全固态连续波无跳模单频激光器方面的研究进展,并展望了单频激光器的发展趋势。

关键词 激光器; 连续波; 单频; 高功率; 低噪声

中图分类号 TN248.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202148.0501002

1 引言

高功率低噪声全固态连续波单频激光器具有高转换效率、高光束质量、低噪声及高相干性等优点,在量子科学与技术^[1-2]、冷原子物理^[3-4]、高精度精密测量^[5-6]、高效率频率变换^[7-8]、相干通信^[9]、激光雷达^[10]以及光学传感^[11]等领域有着广泛的应用。该类激光器作为重要工具之一,有力推动了量子物理基础研究的发展和量子技术的实用化进程。例如,作为量子技术核心单元的量子纠缠源性能的提高,直接取决于泵浦激光器的性能。当泵浦激光器实现了稳定双波长连续波单频运转、光束质量接近衍射极限及强度噪声达到散粒噪声基准时,其可用于制备高纠缠度、多组份的量子纠缠光源^[12],是量子保密通信^[13]和量子计算^[14]等研究的重要技术基础。同时,该类激光器作为制备蓝失谐和红失谐偶极阱的优质光源,可用于偶极俘获冷原子并构建多维光晶格^[15]等,为冷原子物理研究的发展提供了重要技术手段。特别是该类激光器是实现基于激光干涉仪的高精度精密测量的基本光源。研究者在实验上探测到引力波信号^[16],高精度精密测量再次引起人们的关注,进而成

为研究热点。单频窄线宽运转、高光束质量和偏振度、低激光器噪声以及高激光器输出功率等有利于提高测量灵敏度。由于引力波装置的探测灵敏度与注入激光功率的均方根呈反比^[17],高级版激光干涉引力波天文台(Advanced LIGO)装置的注入激光功率希望达到 125 W,其探测灵敏度会比 LIGO 装置提高 10 倍,预期引力波探测效率会提高 1000 倍^[18]。

在全固态连续波单频激光器研制过程中,关键是利用有效的单纵模选择技术使激光器单纵模运转。单纵模选择技术主要有两类。一类是通过控制激光器相邻纵模之间的净增益差,使激光器实现单纵模运转,主要包括短腔法^[19]、耦合腔法^[20]、内腔标准具法^[21]以及内腔双折射滤波片法^[22]。另一类是通过消除空间烧孔效应,使激光器实现单纵模运转,主要包括短程吸收法^[23]、扭摆模腔法^[24]以及单向行波环形腔法^[25]。其中,单向行波环形腔法基于均匀加宽增益介质的环形激光谐振腔设计,通过在腔内插入起偏器及由半波片和法拉第旋转器组成的光学单向器,迫使振荡激光单向行波运转。该方法不会引起空间烧孔效应,可以通过模式竞争实现单纵模运转。虽然单向行波环形腔法中的内腔元件较多且激光器调节相

收稿日期: 2020-10-27; 修回日期: 2020-11-09; 录用日期: 2020-11-19

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB0405203, 2016YFA0301401)

*E-mail: kuanshou@sxu.edu.cn

对困难,但该方法的纵模抑制能力较强且激光器线宽较窄,可实现高功率激光输出,是研制高功率连续波单频激光器最常用的纵模选择技术。

目前,用于引力波探测装置的激光器代表了高功率低噪声全固态连续波单频激光器发展的最高水平。2011年,Winkelmann等^[26]以输出功率为2W的非平面环形激光器作为种子源,并将其注入到Nd:YVO₄环形振荡器中,通过采用Pound-Drever-Hall(PDH)技术^[27]锁定环形振荡器,获得了35W单频激光输出;再将此激光注入到以Nd:YAG激光晶体作为环形谐振腔增益介质的高功率工作台中,实验获得了输出功率为220W的连续波单频1.064 μm激光输出。2012年,Kwee等^[28]为高级版LIGO装置研制了输出功率达157W的超稳定、高功率连续波单频Nd:YAG激光系统,并采用不同的主动和被动方案,同时实现了激光输出功率、频率、光束指向和光束质量的稳定,并满足高级版LIGO装置对激光频率噪声的要求。2019年,Thies等^[29]基于单通Nd:YVO₄功率放大器,研制出输出功率达114W的1.064 μm线偏振连续波单频激光系统,该系统具有较低的强度噪声和频率噪声以及极高的空间模式纯度。将该放大器集成到引力波探测装置的稳定环境中,放大器系统可低噪声运行超过45d。2020年,Bode等^[30]基于级联Nd:YVO₄放大器,研制出输出功率达195W、偏振消光比大于18dB的1.064 μm连续波单频激光系统,并将其集成到一个典型的激光稳定环境中。该激光系统易于操作,对周围环境的变化有很强的鲁棒性,是引力波探测装置的可行性候选光源。

为了拓宽激光器的应用范围,研究人员利用不同激光增益介质和不同选模技术,进行了不同中心波长的高功率低噪声全固态连续波单频激光器的研制。2013年,Nunez等^[31]研制了一台中心波长为657nm的全固态内腔倍频Nd:YLF连续波单频环形激光器,并对激光器的强度和频率噪声进行了研究。该激光器可用于高分辨率光谱、量子光学和钙离子光钟等研究中。2015年,Koch等^[32]在高功率888nm激光二极管(LD)泵浦Nd:YVO₄环形激光器的基础上,采用注入锁定技术使环形激光器单向运转,实验获得了17.2W连续波单频1.34 μm激光输出,并通过生成单通二次谐波获得了5.7W连续波单频671.1nm激光输出。该工作为锂原子冷却实验提供了优质光源。2016年,Wang等^[33]利用Er:YAG陶瓷作为增益介质,采用单片非平面环

振荡器结构,研制出输出功率达10.7W、中心波长为1.645 μm的稳定运转高功率连续波单频激光器。该激光器可用于多普勒测风激光雷达中。2013年,Wang等^[34]利用1907nm Tm:YLF激光器共振泵浦单片非平面Ho:YAG环形振荡器,获得了输出功率达8.0W的稳定单频2122nm激光器。2019年,Dai等^[35]利用掺铋光纤泵浦Ho:GdTaO₄晶体,采用单向环形谐振腔结构,通过功率放大,实验获得了中心波长为2.068 μm、输出功率达1.02W的连续波单纵模激光输出。该波段单频激光器可用于雷达、遥感及高分辨率光谱等研究中。2020年,李萌萌等^[36]利用LD端面泵浦Nd:YVO₄晶体产生了1.06 μm和1.34 μm双波长激光,通过腔内和频以及双折射滤波片选频,实验获得了输出功率为30mW的连续波单纵模593.5 μm黄光激光器。该激光器可用于医学、检测和彩色显示等领域中。

本课题组从20世纪90年代中期就开始进行量子光学的实验研究。从量子光学实验研究的需求出发,长期开展了连续波单频固体激光器的研制,不断提高激光器的输出性能。研制的具有自主知识产权的激光器进一步推动了量子光学创新性基础研究的工作的发展。近年来,为了满足量子光学、量子信息、冷原子物理以及高精度精密测量等领域研究的需求,我们开展了高功率低噪声全固态连续波单频激光器的研制。本文结合本课题组的具体工作,总结和介绍了高功率低噪声全固态连续波无跳模单频激光器的研究进展,并展望了单频激光器的发展趋势。

2 LD端面泵浦的高功率固体激光器中的激光晶体热效应分析以及改善措施

2.1 激光器运转条件下的激光晶体热效应分析

对于高功率LD端面泵浦的固体激光器,泵浦能量密度非常大,激光上能级反转粒子数密度非常高。由于存在量子亏损(QD)、激发态吸收(ESA)、能量传输上转换(ETU)和交叉弛豫过程(CR)等无辐射跃迁过程,激光晶体吸收的泵浦光能量不能完全转换为输出激光^[37],部分泵浦光能量热沉积在激光晶体中,引起严重的激光晶体热效应。严重的热透镜效应会使激光谐振腔的稳区变窄、光束质量变差,热致衍射损耗会降低激光器转换效率,影响激光器的输出性能。研究表明,在激光器运转过程中,激光晶体的热效应不仅与激光晶体的参数有关,还与激光器的泵浦功率、转换效率、输出耦合镜透射率和

激光晶体边界温度有关。

为了提高高功率 LD 端面泵浦的固体激光器的输出性能并详细分析激光晶体的热透镜效应,我们建立了一个内部自洽的理论模型^[38],该模型考虑了 ETU 和 ESA 效应以及与晶体温度有关的参数(激光晶体中的温度分布、热负载比、与 ETU 和 ESA 效应有关的上能级布居数、激光输出功率、受激辐射截面、激发态吸收截面和上转换参数等)之间的耦合,采用迭代法数值计算了激光晶体内部的温度分布、激光晶体热焦距和激光器的输出功率。基于 880 nm LD 双端面泵浦的高功率连续波单横模 Nd:YVO₄ 激光器,从理论和实验上研究了激光晶体的边界温度、输出耦合镜透射率和注入泵浦功率对激光晶体热焦距和激光输出功率的影响。

图 1 为不同泵浦方式和激光晶体边界温度下,激光晶体热焦距与注入泵浦功率之间的关系。图 2

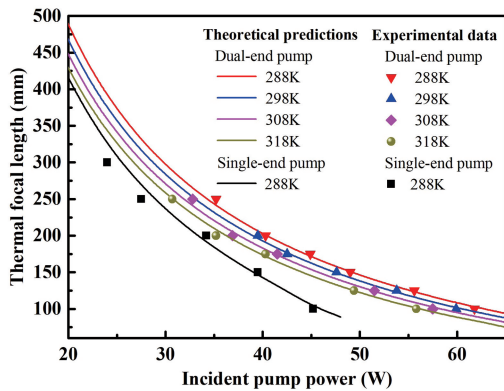


图 1 不同泵浦方式和激光晶体边界温度下激光晶体热焦距与注入泵浦功率之间的关系^[38]

Fig. 1 Thermal focal length of laser crystal versus incident pump power at different pump schemes and boundary temperatures of laser crystal^[38]

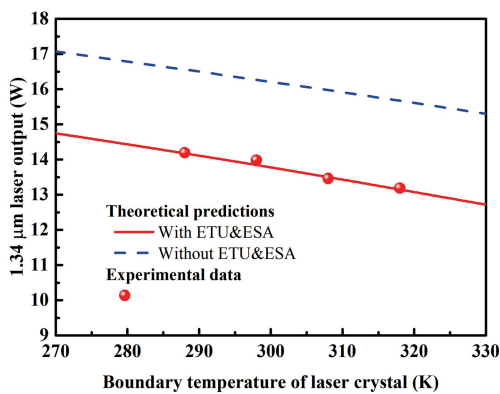


图 2 双端面泵浦条件下 1.34 μm 激光器输出功率随晶体边界温度的变化^[38]

Fig. 2 1.34 μm output power versus boundary temperature of laser crystal under dual-end pump^[38]

为双端面泵浦条件下,1.34 μm 激光器输出功率随晶体边界温度的变化曲线。实验结果和理论预测结果基本吻合。研究表明,通过采用双端面泵浦方式和降低激光晶体的边界温度,可以提高激光器的输出性能。

2.2 激光晶体热效应的改善措施

为了提高激光器的输出性能,我们在高功率低噪声全固态连续波单频激光器的研究过程中,主要采取了以下减轻和改善激光晶体热效应的方法。

1) 采用端面键合未掺杂晶体或贴合导热性能良好的晶体^[39-40]。在高功率端面泵浦的固体激光器中,准直聚焦后的泵浦光入射到晶体端面,导致激光晶体端面产生热致应力。端面膨胀效应不仅会产生热透镜效应,影响激光器的输出特性,而且当达到热损伤阈值时会损伤激光晶体。图 3 是不同制冷方案下理论计算的激光晶体内部泵浦区域中心沿通光方向的温度分布^[40]。可以看出,通过在激光晶体端面键合一段不掺杂的晶体或贴合导热性能良好的晶体,可有效增大掺杂端的散热。未掺杂晶体或贴合晶体相当于一个热沉,不仅可以有效降低激光晶体内部温度,有利于提高激光器的输出性能,还可以消除晶体的端面膨胀效应,减弱晶体的热透镜效应,提高晶体的损伤阈值。

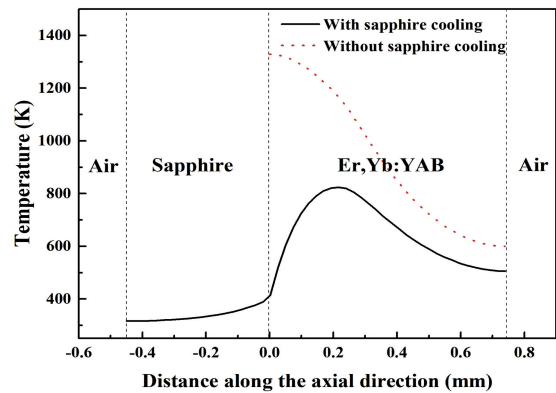


图 3 不同制冷方案下激光晶体内部的温度分布^[40]

Fig. 3 Temperature distributions in laser crystal under different cooling schemes^[40]

2) 采用直接泵浦方式^[41-42]。通过选择泵浦激光的波长,使泵浦上能级与激光上能级相同,可有效减小量子亏损导致的晶体热负载,并提高激光器的转换效率。例如:在 LD 泵浦的 Nd:YVO₄ 激光器中,使用中心波长为 880 nm 或 888 nm 的 LD,将处于基态的钕离子直接激发到⁴F_{3/2} 能级^[41-42],此时泵浦上能级与激光上能级是⁴F_{3/2} 能级的两个 Stark 子能级,它们之间的能级间隔比采用传统的中心波长为 808 nm LD 泵浦时小得多,更小的量子亏损可

以有效地减小晶体内部的产热量。

3) 采用双端端面偏振泵浦方式^[41-43]。在单端端面泵浦的情况下,晶体对泵浦光的吸收具有指数衰减的形式,激光晶体内部温度梯度较大,导致了严重的热透镜效应,限制了高功率激光器输出功率的提高。在同样的泵浦功率下,双端抽运增益晶体可使热量分布在晶体两端,晶体内部温度分布比单端端面泵浦时更加均匀,因此温度梯度更小,可以缓解增益晶体的热效应。采用双端端面泵浦的方式,允许注入更多的泵浦功率,进而提高激光器的输出功率。对于各向异性激光晶体,如 Nd:YVO₄ 晶体,其对偏振方向平行于激光晶体 c-轴的泵浦光的吸收系数要大于其对偏振方向垂直于 c-轴的泵浦光的吸收系数。通过控制泵浦光的偏振方向,可改变激光晶体对泵浦光的吸收系数,使激光晶体内部温度分布更均匀,从而提高激光器的输出性能。

3 高功率全固态连续波激光器实现无跳模单频运转的原理研究和实验设计

在高功率全固态连续波无跳模单频激光器的研制过程中,随着泵浦功率的增大,由于激光晶体严重

的热效应和非均匀掺杂等因素的影响,次振荡纵模以及主振荡纵模偏振方向垂直的纵模均会起振,仅依靠单向行波环形谐振腔选模,无法保证激光器单纵模运转。虽然通过在环形腔内插入标准具辅助选择单纵模,可使激光器单频运转,但单频运转时间较短^[44],且模式跳变现象严重^[45]。在谐振腔内插入非线性晶体,非振荡次模的和频非线性损耗是振荡主模倍频损耗的两倍,因此激光器的模式跳变得得到有效抑制^[46-47]。但在高功率泵浦条件下,抑制全固态连续波激光器多纵模振荡并使激光器无跳模单频运转的问题需要进一步研究。

我们首先将激光晶体设计成楔形并将其作为起偏器,在不插入腔内起偏元件的条件下,抑制了与主振荡纵模偏振方向垂直的纵模的起振,提高了激光器在高功率泵浦下的偏振度和单向运转稳定性^[48]。在此基础上,考虑 ETU 效应、ESA 效应以及热致衍射损耗等的影响,理论计算了谐振腔内起振的第 m 个纵模与主振荡模的增益差,同时计算了谐振腔内插入三硼酸锂(LBO)非线性晶体后,与主振荡模相邻的次模和主振荡模之间的非线性损耗差。利用增益差和非线性损耗差关系,给出了抑制激光器多纵模振荡并使激光器无跳模单频运转的充分条件^[49]:

$$\begin{cases} AKI^2(\omega_0) + AKI_0 I(\omega_0) - Bg_0^{\max} l_0 I(\omega_0) > CI_0 g_0^{\max} l_0 \\ A = 2\text{sinc}^2\left(1.39 \frac{\Delta\omega}{\Delta\omega_{\text{NL}}}\right) - 1 \\ B = \frac{(m\Delta\omega)^2}{(\Delta\omega_g/2)^2 + (m\Delta\omega)^2} \\ C = \frac{(m^2 - 1)(\Delta\omega)^2(\Delta\omega_g/2)^2}{[(\Delta\omega_g/2)^2 + (\Delta\omega)^2] \times [(\Delta\omega_g/2)^2 + m^2(\Delta\omega)^2]} \end{cases}, \quad (1)$$

式中: K 为倍频非线性转换系数; ω_0 为增益曲线的中心频率; $\Delta\omega_g$ 为增益介质的增益带宽; $\Delta\omega$ 为谐振腔的纵模间隔; m 为相邻纵模个数; $I(\omega_0)$ 为模式 ω_0 的强度; I_0 为中心频率处的饱和光强; g_0^{\max} 为中心频率处的小信号增益系数; l_0 为增益介质长度; $\Delta\omega_{\text{NL}}$ 为非线性晶体的非线性光谱带宽。

图 4 是泵浦功率为 50 W 时基于实验参数理论计算的高功率 1.34 μm Nd:YVO₄ 单向环形激光器单纵模运转的临界非线性转换系数 K_{critical} 随输出耦合镜透射率 T_{oc} 的变化。对于一个给定的 T_{oc} ,当实验中的 K 值大于 K_{critical} 时,激光器将稳定单频运转,否则激光器将会出现多模振荡。从图 4 中可以看出,随着输出耦合透射率的增加,需要增大 K 值以实现无跳模单频激光运转。

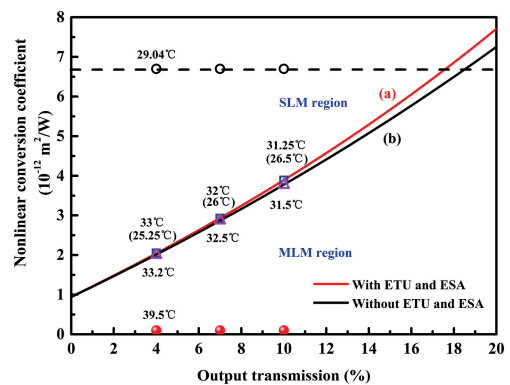


图 4 高功率 1.34 μm Nd:YVO₄ 激光器稳定单纵模运转的临界非线性转换系数随输出耦合镜透射率的变化^[49]

Fig. 4 Critical nonlinear conversion coefficient versus output transmission of coupling mirror for stable SLM operation of high-power 1.34 μm Nd:YVO₄ laser^[49]

在实验上,设计出 LD 双端面偏振泵浦的 $1.34 \mu\text{m}$ Nd:YVO₄ 单向环形激光器^[48]。以一端端面切角、双端键合的 YVO₄-Nd:YVO₄-YVO₄ 晶体作为激光增益介质,采用 LBO 晶体作为内腔非线性晶体。在泵浦功率为 50 W 的条件下,实验研究了 T_{oc} 分别为 4%、7% 和 10% 时不同 LBO 晶体温度下的全固态 $1.34 \mu\text{m}$ Nd:YVO₄ 单向环形激光器的输出特性。当 T_{oc} 为 7%, LBO 晶体温度为 39.5 °C 时,基波与谐波在晶体中的相位失配较大,有 13 个纵模同时起振,激光器是多纵模运转状态,如图 4 中的实心圆球所示。LBO 晶体温度为 32.5 °C 时,非线性转化效率提高至临界值,激光器可以单纵模运转,但不时有跳模现象出现,如图 4 中的三角形所示。调节 LBO 晶体温度至 29.04 °C 时, LBO 晶体接近最佳相位匹配,激光器可长期无跳模单频运转。实验测得 $1.34 \mu\text{m}$ 激光的输出功率为 11.3 W, 3 h 内激光器稳定无跳模单频运转,功率和频率稳定性分别优于 $\pm 0.5\%$ 和 $\pm 88 \text{ MHz}$ 。

在研制高功率连续波单频内腔倍频 Nd:YVO₄/LBO 激光器时,利用内腔非线性损耗抑制激光器多纵模起振以实现无跳模单频运转,在插入腔内电光标准具并锁定标准具,连续扫描激光谐振腔的腔长,使激光器的连续调谐范围突破标准具自由光谱区的限制,在宽于标准具自由光谱区的范围内实现连续调谐^[50]。532 nm 连续波单频激光的连续调谐范围达 222.4 GHz,如图 5 所示,且在调谐过程中没有观察到跳模现象。该研究进一步验证

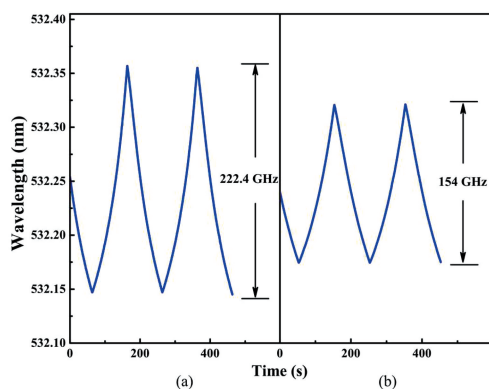


图 5 不同腔内线性损耗 L 和非线性损耗 η 下激光器的连续调谐曲线^[50]。(a) $L = 5.8\%$, $\eta = 1.87\%$;
(b) $L = 9.8\%$, $\eta = 1.2\%$

Fig. 5 Continuous tuning range of laser under different intra-cavity losses L and nonlinear losses η ^[50].
(a) $L = 5.8\%$, $\eta = 1.87\%$; (b) $L = 9.8\%$, $\eta = 1.2\%$

了利用腔内非线性损耗实现高功率全固态连续波激光器无跳模单频运转的原理。制备的激光器具有很宽的连续无跳模调谐范围,且可长期无跳模单频运转,为高分辨率光谱、冷原子物理及量子光学实验研究提供了优质光源。

4 高功率全固态连续波无跳模单频激光器的研究进展

根据基础研究工作需要和应用需求,本课题组开展了一系列高功率低噪声全固态连续波单频激光器的研究,激光器的输出性能得到不断提高。本节首先以全固态 Nd:YVO₄ $1.064 \mu\text{m}$ 和 532 nm 连续波单频激光器为例,介绍单频激光器输出功率的提高。其次介绍单频激光器噪声特性及噪声抑制。最后介绍单频激光器中心波长的拓宽。

4.1 连续波单频激光器输出功率的提高

利用中心波长为 880 nm 的 LD 双端面偏振泵浦双端键合 YVO₄ 晶体的 Nd:YVO₄ 晶体,采用图 6 所示的六镜单向行波环形谐振腔设计,制备了全固态 $1.064 \mu\text{m}$ 和 532 nm 连续波单频激光器^[41, 51]。880 nm LD 直接泵浦方式减小了量子亏损,双端面偏振泵浦结构和双端键合 YVO₄ 晶体的 Nd:YVO₄ 晶体使激光晶体内部温度分布更加均匀且温度梯度更小。通过优化激光晶体处的激光腰斑和内腔倍频晶体处的激光腰斑,获得了最佳激光转换效率和内腔倍频转换效率且该谐振腔更适合双端面泵浦结构。研制出的高功率全固态 $1.064 \mu\text{m}$ 连续波单频激光器的输出功率达 22 W, 光光转换效率达 46.3%^[51]。采用 LBO 晶体作为内腔倍频晶体,研制出的高功率全固态 532 nm 连续波单频激光器的输出功率达 12 W, 光光转换效率达 23.1%。

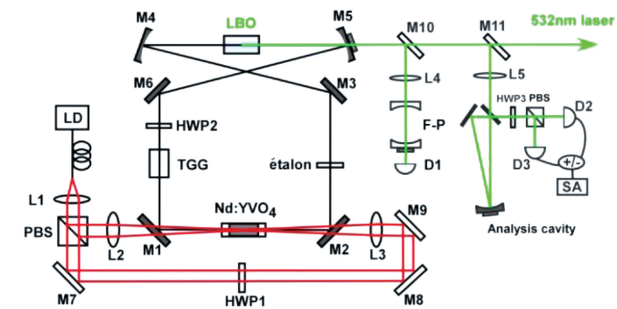


图 6 880 nm LD 双端面偏振泵浦 Nd:YVO₄ 连续波单频激光器实验装置^[41]

Fig. 6 Experimental setup of continuous wave single-frequency Nd:YVO₄ laser polarized and dual-end pumped by 880 nm LD^[41]

4.2 连续波单频激光器噪声特性的研究和抑制

随着全固态连续波单频激光器在量子科学与技术、冷原子物理及高精度精密测量等领域中的广泛应用,其输出激光的噪声特性也逐渐引起重视。例如,在非经典光场的制备中,要求其泵浦激光光源的噪声达到散粒噪声基准(SNL)^[67];在高灵敏光学测量中,需要激光源具有极低的强度噪声,以获取高信噪比^[68]。在高功率全固态连续波单频激光器的研制过程中,对激光器的强度和相位噪声也进行了测量和研究。在实验中,一个 50/50 分束器和一对具有高共模抑制比的低噪声光电探测器构成了平衡探测系统,利用该系统测量激光器的强度噪声^[69],两个探测器输出光电流的功率噪声为激光强度噪声,光电流的差的功率噪声为散粒噪声基准。利用一个分析腔将激光的相位噪声转化为强度噪声^[70],并用平衡探测系统测量激光相位噪声。实验测量的全固态连续波单频激光器的强度和相位噪声典型数据如图 11 所示^[40]。可以看出,激光器的强度和相位噪声在分析频率大于 4 MHz 的范围内达到散粒噪声基准。由于泵浦噪声、自发辐射噪声和偶极起伏噪声等的影响,在分析频率小于 4 MHz 的低频率范围内,激光器中仍存在高于散粒噪声基准的额外噪声。特别是在 100 kHz 附近的分析频率处,激光器中存在远高于散粒噪声基准的弛豫振荡(RRO)强度噪声。因此,在对激光器的强度和相位噪声进行分析研究的同时,需要采取措施抑制其强度噪声,使其接近散粒噪声基准。

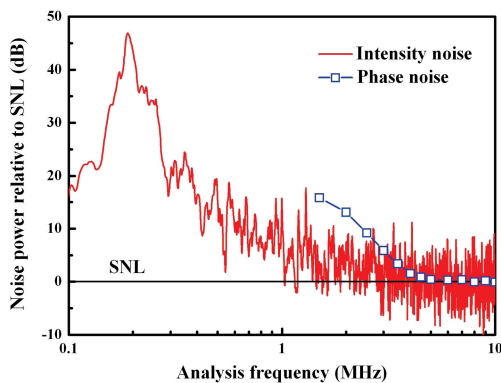


图 11 实测的 1.55 μm 连续波单频 Er, Yb : YAB 激光器的强度和相位噪声谱^[40]

Fig. 11 Measured relative intensity and phase noise of continuous wave single-frequency Er, Yb : YAB laser at 1.55 μm ^[40]

基于全固态内腔倍频连续波单频激光器,理论研究了腔内非线性损耗对激光器强度噪声的影响,

发现通过调控腔内非线性损耗,可改变激光器动力学过程,进而抑制激光器的强度噪声。实验中,在 1.064 μm 连续波单频 Nd : YVO₄ 激光器中插入内腔非线性 LBO 晶体,当非线性晶体温度接近最佳相位匹配温度值且非线性损耗增大时,观察到 1.064 μm 激光的 RRO 噪声峰值减小并向低频方向移动,如图 12 所示。同时,倍频 532 nm 激光的 RRO 噪声峰值逐渐增大并向高频移动。通过比较 1.064 μm 和 532 nm 激光的强度噪声谱,发现通过调节内腔非线性损耗,强度噪声可以在 1.064 μm 和 532 nm 激光之间传递,这有利于实现全固态连续波单频激光器的基频和倍频激光的噪声操控^[71]。在高功率全固态连续波单频激光器中,内腔非线性损耗的大小会影响激光器纵模模式的结构,不同纵模之间的竞争会导致激光器输出的激光强度噪声谱发生变化。在实验中,通过控制内腔非线性晶体的温度和量化控制谐振腔内的非线性损耗,可实现激光器不同纵模结构的运转输出。实验研究了激光器纵模结构与强度噪声之间的关系^[63],结果表明,实现低噪声高功率激光器的关键是实现激光器稳定的无跳模单频运转。

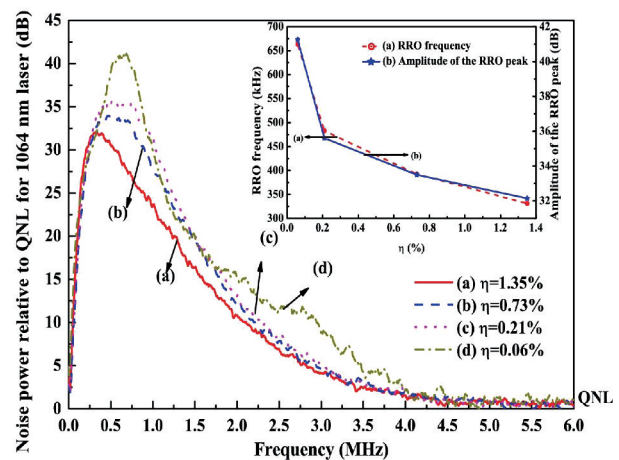


图 12 不同非线性转化系数 η 下 1.064 μm 单频激光器的强度噪声谱^[71]

Fig. 12 Relative intensity noise spectra of single-frequency 1.064 μm laser under different nonlinear conversion coefficients η ^[71]

通过控制谐振腔内的非线性损耗,可改变激光器的动力学过程,进而有效降低弛豫振荡频率处的激光器强度噪声,但该技术对低于和高于弛豫振荡频率的激光器强度噪声的抑制作用并不明显。为了进一步抑制高功率全固态连续波单频激光器的强度噪声,首先理论和实验研究了四能级泵浦方式与准

三能级直接泵浦方式对激光器输出功率和强度噪声的影响,发现准三能级直接泵浦方式可以降低激光器中受激原子与激光谐振腔之间的耦合作用,提高激光器的转换效率,同时降低激光器的强度噪声^[72]。其次,通过调节谐振腔腔长并实现对激光器受激辐射速率的操控,理论模拟了激光器受激辐射速率与激光器强度噪声之间的依赖关系,发现通过减小受激辐射速率可以抑制激光器的强度噪声。在此基础上,实验上通过采用准三能级直接泵浦方式、优化设计谐振腔腔长、在谐振腔中引入成像系统以实现最佳激光输出并控制内腔非线性损耗等措施,高功率全固态连续波单频激光器的强度噪声得到了有效抑制,如图 13 所示^[73]。

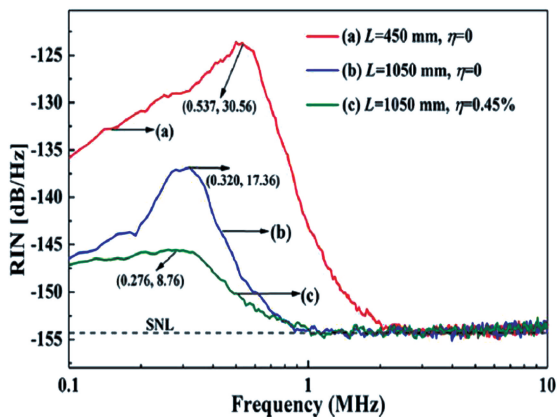


图 13 激光器的强度噪声谱^[73]。(a) $L = 450 \text{ mm}$, $\eta = 0$; (b) $L = 1050 \text{ mm}$, $\eta = 0$; (c) $L = 1050 \text{ mm}$, $\eta = 0.45\%$

Fig. 13 Intensity noise spectra of laser^[73]. (a) $L = 450 \text{ mm}$, $\eta = 0$; (b) $L = 1050 \text{ mm}$, $\eta = 0$; (c) $L = 1050 \text{ mm}$, $\eta = 0.45\%$

虽然采用上述方案可以有效抑制全固态连续波单频激光器在较低分析频率范围内的强度噪声,但其强度噪声仍高于散粒噪声基准。如何使激光器在较低分析频率范围内的强度噪声接近散粒噪声基准是量子光学和高灵敏光学测量研究中备受关注的问题。在研制高功率全固态 532 nm 和 1.064 μm 双波长连续波单频激光器^[57]的基础上,利用基于马赫-增德尔干涉仪(MZI)的稳功率系统降低了激光器输出 532 nm 激光的功率波动,5 h 内功率波动优于 $\pm 0.2\%$ 。通过实验研究,优化了 MZI 的锁定位置,通过选择 MZI 中分束镜的反射率,在 0.4 ~ 3 kHz 的分析频率范围内,MZI 输出的 532 nm 激光的强度噪声得到了很好的抑制,强度噪声接近散粒噪声基准,如图 14 所示^[74]。采用该技术将 0.4 ~

3 kHz 分析频率处的激光强度噪声转移至 50 kHz 附近分析频率处。根据应用需求,采用该技术可有效抑制激光器的强度噪声。该低频段强度噪声接近散粒噪声基准的激光已被用于音频段压缩真空态光场的实验制备^[75]。

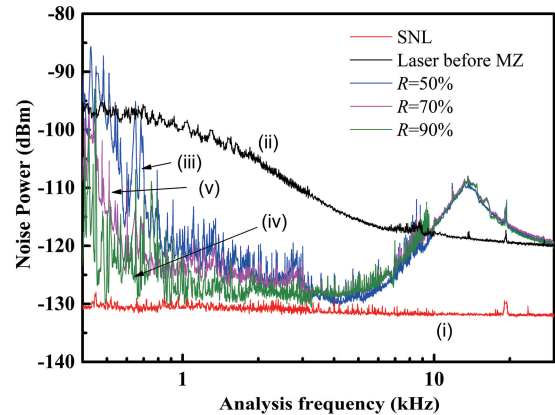


图 14 当 $T_{\text{lock}} = 85\%$ 且 R 不同时, MZI 输出激光的强度噪声与分析频率的关系曲线^[74]

Fig. 14 Intensity noise of output laser from MZI versus analysis frequency under different R and $T_{\text{lock}} = 85\%$ ^[74]

4.3 连续波单频激光器中心波长的拓宽

根据不同的应用需求,进行了不同中心波长高功率低噪声全固态连续波单频激光器的研制。

4.3.1 1.08 μm 和 540 nm 高功率全固态连续波单频 Nd:YAP 激光器的研制

在量子光学研究中,基于优质非线性晶体的非线性频率变换是实验制备压缩态和纠缠态等量子光源的最佳手段。从晶体质量、有效非线性系数和相位匹配温度等方面看,II 类相位匹配的 KTP 晶体是制备量子光源的最佳选择。然而,中心波长为 1.064 μm 的激光不能在常温下满足 KTP 晶体的 II 类非临界相位匹配条件,而中心波长为 1.08 μm 的 Nd:YAP 激光可在 KTP 晶体中实现匹配温度为 63 $^{\circ}\text{C}$ 左右的 II 类非临界相位匹配。因此,1.08 μm 和 540 nm 高功率全固态连续波单频 Nd:YAP 激光器是制备高纠缠度多组份量子纠缠光源并进行量子保密通信和量子计算原理性实验的优质光源。

针对 Nd:YAP 晶体的热导率比较低、热透镜效应严重以及热损伤阈值比较低的特点,为了减小 Nd:YAP 晶体的热效应并提高激光器的转换效率,理论与实验分析了激光谐振腔参数与内腔倍频过程中最佳非线性耦合条件之间的关系。在此基础上,设计出由两个凸面镜和两个凹面镜构成的四镜

环形谐振腔。Nd:YAP 晶体被置于两个凸面镜之间的较大光斑的腰斑处,这样可有效改善 Nd:YAP 晶体的热效应;LBO 内腔倍频晶体被置于两个凹面镜之间的腰斑处以提高倍频转换效率。通过实验优化凸面镜的曲率半径和输出耦合镜对 1.08 μm 激光的透射率,并在腔内插入一块楔形 YVO₄ 晶体作为起偏振器,实验研制出 1.08 μm 和 540 nm 高功率全固态双波长连续波单频 Nd:YAP 激光器^[76]。540 nm 激光的输出功率达 4.5 W,1.08 μm 激光的输出功率达 1.5 W,3 h 内基频光和倍频光的功率稳定性分别优于 $\pm 0.32\%$ 和 $\pm 0.6\%$ 。在研制出小型化全固态连续波单频 Nd:YAP 激光器^[77]的基础上,为了进一步获得长期频率稳定和低强度噪声的单频激光输出,采用具有高精度的超低膨胀法布里-珀罗(F-P)腔作为频率基准,利用改进的级联 PDH 稳频技术将 Nd:YAP 激光器的腔长锁定在频率基准上,研制出超高频率稳定和超低强度噪声 Nd:YAP 激光器^[78]。激光器在 4 h 内的频率漂移小于 7.72 MHz,强度噪声在分析频率大于 300 kHz 的范围内达到散粒噪声基准。该激光器可用于制备稳定的具有高压缩度和高纠缠度的量子光源。

4.3.2 946 nm 和 473 nm 全固态连续波单频 Nd:YAG 激光器的研制

针对单频蓝光激光器在高精度光学测量、生物技术及科学研究等方面的应用需求,进行了 946 nm 和 473 nm 全固态连续波单频 Nd:YAG 激光器的研制。考虑热致退偏损耗和能量传输上转换的影响,建立了准三能级激光系统的理论模型,理论和实验分析了输出耦合镜透射率和泵浦功率等实验参数对激光晶体的热透镜效应、热致衍射损耗效应及热退偏效应等的影响^[79]。在此基础上,设计出 LD 端面泵浦单向行波环形谐振腔 Nd:YAG 激光器。通过降低激光晶体温度并优化激光晶体长度、谐振腔腔长和输出耦合透射率,实验获得了输出功率达 1.5 W 的连续波单频 946 nm 激光输出^[80]。进一步将周期极化磷酸钛氧钾(PPKTP)倍频晶体插入谐振腔中,通过内腔倍频技术进行了 473 nm 连续波单频蓝光激光器的研制。为了提高激光器的转换效率,考虑到能量传输上转换效应导致的热透镜效应与倍频效率的关系,通过优化谐振腔腔长、PPKTP 倍频晶体温度及长度,实验获得了输出功率达 1.01 W 的连续波单频 473 nm 激光输出^[81]。

4.3.3 1.34 μm 和 671 nm 高功率全固态连续波单频 Nd:YVO₄ 激光器的研制

1.34 μm 波段激光在光纤中的传输具有低色散和低损耗的优点,其是光通信领域常用的波段。671 nm 激光与锂原子的跃迁线匹配^[82],可用于高精度激光光谱和锂原子的激光冷却研究。特别是在量子技术研究领域,1.34 μm 和 671 nm 高功率全固态双波长连续波单频激光器可用于制备光纤通信波段量子光源、研究锂原子量子存储器,是实现量子通信网络的优质光源。针对上述应用需求,进行了 1.34 μm 和 671 nm 高功率全固态连续波单频 Nd:YVO₄ 激光器的研制。

建立了一个同时考虑 ETU 和 ESA 效应的四能级全固态 1.34 μm Nd:YVO₄ 激光器理论模型,并利用迭代的方法解决了理论模型中晶体温度场分布、晶体热负载、ETU 和 ESA 效应、输出功率以及依赖于温度的相关参数之间的相互耦合问题。在此基础上,采用 880 nm 的 LD 双端面偏振泵浦复合 Nd:YVO₄ 晶体,通过降低晶体边界温度和优化输出耦合透射率,提高了激光器的输出功率^[38, 83]。进一步理论计算了谐振腔内起振的第 m 个纵模与主振荡模之间的增益差,以及谐振腔内插入 LBO 非线性晶体后与主振荡模相邻的次模与主振荡模之间的非线性损耗差,通过增益差和非线性损耗差的关系给出了抑制激光器多纵模振荡且使激光器无跳模单频运转的充分条件。在实验上,设计出 LD 双端面偏振泵浦的 1.34 μm Nd:YVO₄ 单向环形激光器。通过调节 LBO 温度并控制腔内非线性损耗,研制出 1.34 μm 和 671 nm 高功率全固态连续波单频 Nd:YVO₄ 激光器,激光器可长期无跳模单频运转^[49]。在 50 W 泵浦功率下,激光器 1.34 μm 激光和 671 nm 激光的输出功率随 LBO 晶体温度的变化曲线如图 15 所示,图 15 同时给出了激光器实现稳定无跳模单纵模(SLM)运转和多纵模(MLM)运转的 LBO 晶体温度范围。实验测得 1.34 μm 激光的输出功率为 11.3 W,光光转换效率达 23.18%,3 h 内激光器的功率和频率稳定性分别优于 $\pm 0.5\%$ 和 ± 88 MHz,激光器可同时输出 0.3 W 连续波单频 671 nm 激光。进一步通过优化输出耦合镜的透射率,研制出 671 nm 激光输出功率达 3.17 W、1.34 μm 激光输出功率达 2.15 W 的高功率全固态连续波单频 Nd:YVO₄ 激光器。该激光器已被用于连续变量 1.34 μm 量子纠缠态光场的实验制备中^[84]。

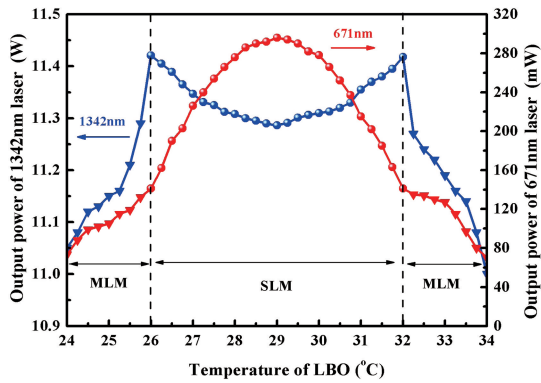


图 15 1.34 μm 和 671 nm 激光输出功率随 LBO 晶体温度的变化^[49]

Fig. 15 Output powers of 1.34 μm and 671 nm lasers versus temperature of LBO crystal^[49]

4.3.4 1.55 μm 全固态连续波单频 Er, Yb : YAB 激光器的研制

1.55 μm 波段激光在光纤中的传输具有损耗低的优点,且处于人眼安全波段,在光纤通信、人眼安全测距、激光雷达、遥感探测和激光医学等领域均有着广泛的应用。同时,1.55 μm 全固态连续波单频激光器可用于制备光纤通信波段量子光源,是进行量子技术研究的优质光源。利用中国科学院福建物质结构研究所黄艺东课题组提供的 Er, Yb : YAB 晶体,进行了 1.55 μm 全固态连续波单频激光器的研制。

考虑了 Er, Yb 双掺系统模型中晶体温度对反转粒子数密度、受激发射截面和自吸收损耗的影响以及晶体热效应对腔模腰斑和热致衍射损耗的影响,提出了 LD 端面泵浦的 Er, Yb : YAB 激光器的理论模型,并分析研究了激光晶体散热装置、泵浦源占空比、泵浦腰斑以及晶体厚度对激光输出的影响。在此基础上,实验测量了在不同晶体冷却措施和不同泵浦方式下 Er, Yb : YAB 晶体的热透镜焦距,设计出图 16 所示的蓝宝石热沉端面制冷 Er, Yb : YAB 激光晶体的晶体散热结构。通过使用该制冷结构,晶体的热效应和晶体温度均大幅减小,在 5 W 泵浦功率条件下,Er, Yb : YAB 晶体中心的最高绝对温度降低了 38%,晶体的热焦距从 10 mm 提高到 35 mm。利用 LD 端面泵浦蓝宝石贴片制冷的 Er, Yb : YAB 微片晶体,采用驻波腔结构,研制出输出功率达 680 mW 的连续单横模 1.55 μm 激光器^[85]。在此基础上,通过在谐振腔中插入标准具,利用内腔标准具选纵模技术,实现了稳定的 1.55 μm 连续波单频激光运转^[40]。在注入泵浦功率为 4.9 W 时,连

续单频 1.55 μm 激光的输出功率达 400 mW,斜效率为 11.8%。1.5 h 内的激光功率稳定性优于 $\pm 1.3\%$ 。激光强度噪声在分析频率大于 4 MHz 的范围内达到散粒噪声基准,相位噪声在分析频率大于 5 MHz 的范围内达到散粒噪声基准。该激光器具有结构紧凑和低噪声等特点,能够满足制备高质量连续变量量子光源的要求。

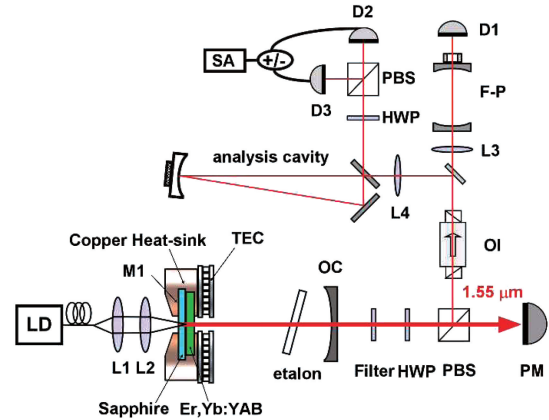


图 16 1.55 μm 全固态连续波单频 Er, Yb : YAB 激光器实验装置^[40]

Fig. 16 Experimental setup of all-solid-state continuous wave single-frequency 1.55 μm Er, Yb : YAB laser^[40]

4.3.5 不同中心波长的全固态可调谐连续波单频钛宝石激光器的研制

掺钛蓝宝石晶体的激光发射光谱范围覆盖了 700~1000 nm 的红光和近红外波段,是目前调谐范围最宽、质量优良的固体激光增益介质。利用全固态连续波单频 532 nm 绿光泵浦的连续波单频钛宝石激光器,不仅能实现宽光谱范围的激光输出,而且在特定波长处可以实现频率的连续调谐。因此,全固态可调谐连续波单频钛宝石激光器作为一种优质光源,在量子光学、冷原子物理、高精度激光光谱及高精度光学测量等领域有着非常广泛的应用。例如,中心波长为 795 nm 的连续波单频激光与铷原子的 D1 跃迁线匹配,可用于冷却俘获铷原子,也可以用于产生 795 nm 波段量子光源,进行量子存储和原子钟等方面的研究。针对量子信息和冷原子物理研究的应用需求,进行了不同中心波长的全固态可调谐连续波单频钛宝石激光器的研制。

首先,采用自制的高功率全固态连续波单频 532 nm 绿光激光器端面泵浦掺钛蓝宝石激光晶体,优化设计出图 17 所示的环形谐振腔^[86]。将自然旋光补偿片和外加磁场的 TGG 晶体构成的宽带光学

单向器插入腔中,使激光器单向行波运转;将由三片厚度比例为 1 : 4 : 16 的石英晶片组成的双折射滤波片(BRF)以布儒斯特角插入,实现激光器输出波长的粗调谐;插入由厚度为 1 mm 的铌酸锂晶体制成的电光标准具,实现激光器输出波长的精细调谐。通过上述措施,研制出全固态可调谐连续波单频钛宝石激光器,通过调节 BRF,激光器可实现从 760~825 nm 的宽范围调谐^[87]。基于波长计测量的系列波长值,构建了 BRF 角度与激光器输出波长值的一一对应关系,设计研制出基于 Labview 控制的自动宽调谐的连续波单频钛宝石激光器^[88],调谐范围达 110 nm。

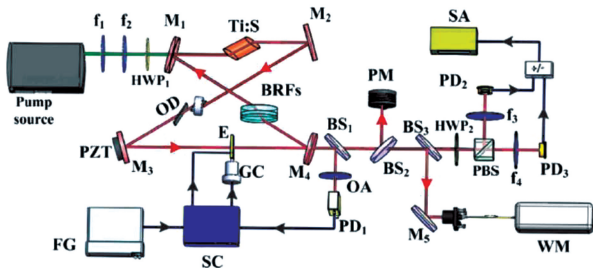


图 17 全固态连续波单频可调谐钛宝石激光器的实验装置^[86]

Fig. 17 Experimental setup of all-solid-state continuous wave single-frequency tunable Ti: sapphire laser^[86]

其次,实验研究了泵浦源纵模结构对钛宝石激光器输出特性的影响^[89]。在此基础上,通过在谐振腔内引入非线性损耗,获得了低噪声且频率连续调谐的钛宝石激光输出。在 11.27 W 泵浦条件下,中心波长为 795 nm 的连续波单频激光的输出功率为 1.27 W;激光器可实现频率连续调谐,调谐范围达 48 GHz;激光器的低频段强度噪声得到有效抑制^[90]。为了实现激光器频率的精细调谐,在腔内插入由铌酸锂晶体制成的电光标准具,利用其电光效应调制腔内激光强度,使其锁定在激光器的振荡波长上,进而实现连续频率调谐。激光器的中心波长可从 760 nm 调谐至 870 nm,在 16.53 W 泵浦条件下,中心波长为 795 nm 的连续波单频激光的输出功率为 2.88 W。以任意调制频率将内腔电光标准具锁定在激光器振荡纵模上,795 nm 单频激光的最大连续频率调谐范围达 20 GHz。同时通过改变加载在内腔电光标准具电极上的调制信号的频率,实现对激光强度噪声的操控^[86]。为了进一步提高激光器输出功率并扩大连续频率的调谐范围,采用图 18 所示的自注入锁定方式,研制出了可调谐连续波

单频钛宝石激光器^[91]。利用可从一个方向将种子激光反射回反向传播场的反射装置,通过优化输出耦合镜的透射率,使激光器实现稳定的单向行波运转,进而获得连续波单频输出,激光器的中心波长可从 748 nm 调谐至 868 nm。在 18 W 泵浦条件下,中心波长为 795 nm 的连续波单频激光的输出功率达 5 W,最大连续频率调谐范围达 40.75 GHz。利用此 795 nm 连续波单频激光,通过内腔倍频和外腔增强谐振倍频,产生了 397.5 nm 连续波单频激光^[92-93]。该激光已被用于制备连续变量三组份偏振纠缠态光场^[94],该非经典光场是实现量子信息网络的必备光源。

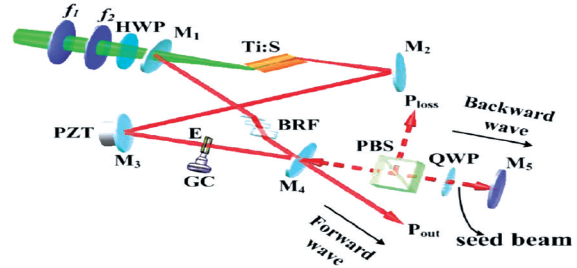


图 18 自注入锁定钛宝石激光器的实验装置^[91]

Fig. 18 Experimental setup of self-injection locked Ti: sapphire laser^[91]

第三,针对铯光钟的应用需求,进行了与铯原子跃迁线相匹配的 461 nm 可调谐连续波单频激光器的研制。由于掺钛蓝宝石晶体在 900 nm 波段的增益较低,通过设计谐振腔镜的镀膜参数来抑制激光器在高增益谱范围内的激光起振,并通过优化谐振腔的设计、晶体参数以及输出耦合镜的透射率,研制出波长调谐范围为 852~934 nm 的宽带可调谐连续波单频红外激光^[95]。当抽运功率为 15 W 时,中心波长为 922 nm 的连续波单频红外激光的输出功率达 2 W,3 h 内的功率稳定性优于 $\pm 0.7\%$ 。在此基础上优化激光谐振腔并利用 PPKTP 晶体作为倍频晶体,通过内腔倍频,实验获得了可调谐连续波单频 461 nm 激光输出^[96]。中心波长为 460.86 nm 的单频蓝光激光的输出功率达 1.05 W。通过调节控制谐振腔腔长,最大连续频率调谐范围为 15.756 GHz。

第四,中心波长为 455.5 nm 的连续波单频激光与铯原子的高激发态跃迁线、钡离子的跃迁线相匹配,可用于研制超窄带宽的铯原子共振滤波器并实现远距离海底通信,也可用于钡离子的冷却和俘获,进行高分辨率光谱学和光学频率标准等方面的研究。在研制出中心波长为 911 nm 的宽带可调谐连续波单频红外激光器的基础上,通过优化谐振镜

的曲率半径并降低激光器的阈值泵浦功率,利用硼酸铋(BIBO)晶体作为倍频晶体,基于内腔倍频,实验获得了可调谐连续波单频 455.5 nm 激光输出^[97]。中心波长为 455.5 nm 的单频蓝光激光的输出功率达 421 mW。通过调节控制谐振腔腔长,最大连续频率调谐范围达 3.4 GHz。为了进一步提高 455.5 nm 连续波单频蓝光激光器的输出功率和调谐范围,采用优化谐振腔结构和锁定内腔标准具等措施,通过 LBO 晶体内腔倍频,实验上将可调谐连续波单频 455.5 nm 激光的输出功率提高到 1 W,1.5 h 内的激光功率稳定性优于 $\pm 0.27\%$ 。将内腔标准具锁定在激光器振荡频率上,通过连续调节谐振腔的长度,455.5 nm 单频激光的最大连续频率调谐范围达 32 GHz^[98]。

5 结束语

为了满足全固态激光器在量子科学与技术、冷原子物理以及高精度精密测量等领域中的应用需求,本课题组开展了高功率低噪声全固态连续波单频激光器的研究,研制出一系列具有不同输出波长的低功率低噪声全固态连续波无跳模单频激光器。介绍了 LD 端面泵浦的高功率固体激光器中激光晶体的热效应及其改善措施与基于高功率全固态连续波激光器实现无跳模单频运转的原理及其实验设计。从单频激光器输出功率的提高、单频激光器噪声特性的抑制以及单频激光器中心波长的拓宽等方面,对高功率低噪声全固态连续波无跳模单频激光器的研究进展进行了总结,并展望了全固态连续波单频激光器的发展。

激光器输出功率和输出能量的提高是一个永恒的话题。为了实现激光器输出功率和输出能量的提高,还需要在原理上进行研究并在技术上进行创新,进一步拓展激光的中心波长并压窄激光器的线宽。为了在任意波长上都能实现高效率的激光输出并提高激光器在自由运转时的频率稳定性,需进一步提高激光的光束质量和光束指向性稳定性以满足应用需求:通过设计新型晶体结构,克服各种光学畸变的影响,在高功率输出的情况下,获得光束质量因子接近于 1 的激光,同时使激光系统结构简单稳定并具备小型化和集成化的特点。在分析频率小于几兆赫兹的低频范围内,现有的全固态激光中存在着远高于散粒噪声基准的额外噪声,特别是在几百 kHz 处有非常大的弛豫振荡噪声。这个额外噪声会影响高精光学测量的灵敏度。随着引力波信号被探测

到,高精度和高灵敏度的光学测量越来越引人关注。为了进一步提高光学测量的精度和灵敏度,需进一步抑制激光器的额外噪声,使激光器的噪声在整个分析频率范围内都达到散粒噪声基准。

参 考 文 献

- [1] Braunstein S L, van Loock P. Quantum information with continuous variables [J]. *Reviews of Modern Physics*, 2005, 77(2): 513-577.
- [2] Wehner S, Elkouss D, Hanson R. Quantum internet: a vision for the road ahead [J]. *Science*, 2018, 362(6412): eaam9288.
- [3] Flowers J. The route to atomic and quantum standards [J]. *Science*, 2004, 306(5700): 1324-1330.
- [4] Endres M, Bernien H, Keesling A, et al. Atom-by-atom assembly of defect-free one-dimensional cold atom arrays [J]. *Science*, 2016, 354(6315): 1024-1027.
- [5] Aasil J, Abbott1 B P, Abbott1 R, et al. Advanced LIGO [J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2015, 32(7): 074001.
- [6] Mauranyapin N P, Madsen L S, Taylor M A, et al. Evanescent single-molecule biosensing with quantum-limited precision [J]. *Nature Photonics*, 2017, 11(8): 477-481.
- [7] Li H, Feng J X, Wan Z J, et al. Low noise continuous-wave single frequency 780 nm laser high efficiently generated by extra-cavity-enhanced frequency doubling [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(5): 0502003.
李宏, 冯晋霞, 万振菊, 等. 高效率外腔倍频产生低噪声连续单频 780 nm 激光 [J]. *中国激光*, 2014, 41(5): 0502003.
- [8] Vainio M, Halonen L. Mid-infrared optical parametric oscillators and frequency combs for molecular spectroscopy [J]. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2016, 18(6): 4266-4294.
- [9] Zhang Q, Guo Y B, Chen J K, et al. A communication experiment using mode division multiplexing with phase modulation-coherent detection [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(3): 0306001.
张强, 郭玉彬, 陈嘉轲, 等. 基于相位调制-相干检测的模式复用通信实验 [J]. *中国激光*, 2020, 47(3): 0306001.
- [10] 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.
- [11] Zhang Z L, Gao L, Sun Y Y, et al. Strain transfer law of distributed optical fiber sensor [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(4): 0410001.
章征林, 高磊, 孙阳阳, 等. 分布式光纤传感器应变传递规律研究 [J]. 中国激光, 2019, 46(4): 0410001.
- [12] Su X, Zhao Y, Hao S, et al. Experimental preparation of eight-partite cluster state for photonic qumodes[J]. Optics Letters, 2012, 37(24): 5178-5180.
- [13] Su X L, Tian C X, Deng X W, et al. Quantum entanglement swapping between two multipartite entangled states[J]. Physical Review Letters, 2016, 117(24): 240503.
- [14] Su X L, Hao S H, Deng X W, et al. Gate sequence for continuous variable one-way quantum computation [J]. Nature Communications, 2013, 4: 2828.
- [15] Barredo D, de Léséleuc S, Lienhard V, et al. An atom-by-atom assembler of defect-free arbitrary two-dimensional atomic arrays [J]. Science, 2016, 354(6315): 1021-1023.
- [16] Abbott B P, Abbott R, Abbott T D, et al. Observation of gravitational waves from a binary black hole merger [J]. Physical Review Letters, 2016, 116(6): 061102.
- [17] Spero R E, Whitcomb S E. The laser interferometer gravitational-wave observatory (LIGO) [J]. Optics and Photonics News, 1995, 6(7): 35-39.
- [18] Winkelmann L. Injection-locked high power oscillator for advanced gravitational wave observatories [M]. Göttingen: Cuvillier Verlag, 2012: 22-23.
- [19] Zayhowski J J, Mooradian A. Single-frequency microchip Nd lasers [J]. Optics Letters, 1989, 14(1): 24-26.
- [20] Lang R J, Yariv A. An exact formulation of coupled-mode theory for coupled-cavity lasers [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1988, 24(1): 66-72.
- [21] Nagai H, Kume M, Ohta I, et al. Low-noise operation of a diode-pumped intracavity-doubled Nd : YAG laser using a Brewster plate [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1992, 28(4): 1164-1168.
- [22] Kemp A J, Friel G J, Lake T K, et al. Polarization effects, birefringent filtering, and single-frequency operation in lasers containing a birefringent gain crystal[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2000, 36(2): 228-235.
- [23] Zhang K S, Li R N, Xie C D, et al. All-solid-state intracavity frequency doubled Nd : YVO₄ laser of single-frequency operation [J]. Chinese Journal of Lasers, 1994, 21(8): 617-620.
张宽收, 李瑞宁, 谢常德, 等. 全固体化 Nd:YVO₄ 单频绿光激光器 [J]. 中国激光, 1994, 21(8): 617-620.
- [24] Hao E J, Tan H M, Li T, et al. Single-frequency laser at 473 nm by use of twisted-mode technique[J]. Optics Communications, 2007, 270(2): 327-331.
- [25] Martin K I, Clarkson W A, Hanna D C. 3 W of single-frequency output at 532 nm by intracavity frequency doubling of a diode-bar-pumped Nd: YAG ring laser [J]. Optics Letters, 1996, 21(12): 875-877.
- [26] 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.
- [27] Drever R W P, Hall J L, Kowalski F V, et al. Laser phase and frequency stabilization using an optical resonator [J]. Applied Physics B, 1983, 31(2): 97-105.
- [28] 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.
- [29] Thies F, Bode N N, Oppermann P, et al. Nd : YVO₄ high-power master oscillator power amplifier laser system for second-generation gravitational wave detectors [J]. Optics Letters, 2019, 44(3): 719-722.
- [30] Bode N N, Meylahn F, Willke B. Sequential high power laser amplifiers for gravitational wave detection [J]. Optics Express, 2020, 28(20): 29469-29478.
- [31] Nunez P M, Wetter N U, Zondy J J, et al. A single-frequency, diode-pumped Nd: YLF laser at 657 nm: a frequency and intensity noise comparison with an extended cavity diode laser [J]. Laser Physics, 2013, 23(2): 025801.
- [32] Koch P, Ruebel F, Bartschke J, et al. 5.7 W cw single-frequency laser at 671 nm by single-pass second harmonic generation of a 17.2 W injection-locked 1342 nm Nd : YVO₄ ring laser using periodically poled MgO : LiNbO₃ [J]. Applied Optics, 2015, 54(33): 9954-9959.
- [33] 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): 14967-14973.
- [34] 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.
- [35] Dai T Y, Guo S X, Duan X M, et al. High efficiency single - longitudinal - mode resonantly - pumped Ho : GdTaO₄ laser at 2068 nm [J]. *Optics Express*, 2019, 27(23): 34204-34210.
- [36] Li M M, Yang F, Zhao S L, et al. All solid-state intracavity sum-frequency single-longitudinal-mode 593. 5 nm yellow lasers [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(3): 0301003.
李萌萌, 杨飞, 赵上龙, 等. 全固态腔内和频单纵模 593. 5 nm 黄光激光器[J]. *中国激光*, 2020, 47(3): 0301003.
- [37] Ian M. Study of the physics of the power-scaling of end-pumped solid-state laser sources based on Nd : YVO₄ [D]. Southampton: University of Southampton, 2003, 50.
- [38] Ma Y Y, Li Y J, Feng J X, et al. Influence of energy-transfer upconversion and excited-state absorption on a high power Nd : YVO₄ laser at 1. 34 μm [J]. *Optics Express*, 2018, 26(9): 12106-12120.
- [39] Zhuo Z, Li T, Li X M, et al. Investigation of Nd : YVO₄/YVO₄ composite crystal and its laser performance pumped by a fiber coupled diode laser [J]. *Optics Communications*, 2007, 274(1): 176-181.
- [40] 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.
- [41] Liu J, Wang Z, 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.
- [42] McDonagh L, Wallenstein R. Low-noise 62 W CW intracavity-doubled TEM₀₀ Nd : YVO₄ green laser pumped at 888 nm [J]. *Optics Letters*, 2007, 32(7): 802-804.
- [43] Yao A Y, Hou W, Kong Y P, et al. Double-end-pumped 11-W Nd: YVO₄ cw laser at 1342 nm [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2005, 22(10): 2129.
- [44] Zheng Y H, Wang Y J, Xie C D, et al. Single-frequency Nd: YVO₄ laser at 671 nm with high-output power of 2. 8 W [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2012, 48(1): 67-72.
- [45] Wang W Z, Lu H D, Su J, et al. Broadband tunable single-frequency Nd: YVO₄/LBO green laser with high output power [J]. *Applied Optics*, 2013, 52(11): 2279-2285.
- [46] Martin K I, Clarkson W A, Hanna D C. Self-suppression of axial mode hopping by intracavity second-harmonic generation [J]. *Optics Letters*, 1997, 22(6): 375-377.
- [47] Lu H D, Su J, Zheng Y H, et al. Physical conditions of single-longitudinal-mode operation for high-power all-solid-state lasers [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(5): 1117-1120.
- [48] Zheng Y H, Li F Q, Wang Y J, et al. High-stability single-frequency green laser with a wedge Nd : YVO₄ as a polarizing beam splitter [J]. *Optics Communications*, 2010, 283(2): 309-312.
- [49] Ma Y Y, Li Y J, Feng J X, et al. High-power stable continuous-wave single longitudinal-mode Nd : YVO₄ laser at 1342 nm [J]. *Optics Express*, 2018, 26(2): 1538-1546.
- [50] Jin P X, Lu H D, Yin Q W, et al. Expanding continuous tuning range of a CW single-frequency laser by combining an intracavity etalon with a nonlinear loss [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2018, 24(5): 1600505.
- [51] Liu Q, Liu J L, Jiao Y C, et al. A stable 22-W low-noise continuous-wave single-frequency Nd : YVO₄ laser at 1. 06 μm directly pumped by a laser diode [J]. *Chinese Physics Letters*, 2012, 29(5): 054205.
- [52] Wang Y J, Zheng Y H, Shi Z, et al. High-power single-frequency Nd : YVO₄ green laser by self-compensation of astigmatism [J]. *Laser Physics Letters*, 2012, 9(7): 506-510.
- [53] Lü B D. Laser optics: beam characterization, propagation and transformation, resonator technology and physics [M]. Beijing: Higher Education Press, 2003: 392-393.
吕百达. 激光光学: 光束描述、传输变换与光腔技术物理 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2003: 392-393.
- [54] Wang Y J, Yang W H, Zheng Y H, et al. Influence of pump wavelength and Nd³⁺ doped concentration on the performance of intracavity doubling single-frequency lasers [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(6): 0602005.
王雅君, 杨文海, 郑耀辉, 等. 抽运波长及 Nd³⁺ 掺杂浓度对内腔倍频单频激光器性能的影响 [J]. *中国激光*, 2013, 40(6): 0602005.
- [55] Wang Y, Yang W, Zhou H, 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.
- [56] Zheng Y H, Zhou H J, Wang Y J, et al. Suppressing the preferential σ-polarization oscillation

- in a high power Nd: YVO₄ laser with wedge laser crystal[J]. Chinese Physics B, 2013, 22(8): 084207.
- [57] Gao Y H, Li Y J, Feng J X, et al. Low noise continuous-wave single-frequency dual-wavelength laser operating at 532 nm and 1.06 μm[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(4): 0401005.
高英豪, 李渊骥, 冯晋霞, 等. 低噪声连续单频 532 nm/1.06 μm 双波长激光器[J]. 中国激光, 2019, 46(4): 0401005.
- [58] Zhang C, Lu H, Yin Q, et al. Continuous-wave single-frequency laser with dual wavelength at 1064 and 532 nm[J]. Applied Optics, 2014, 53(28): 6371-6374.
- [59] Yin Q, Lu H, Peng K. Investigation of the thermal lens effect of the TGG crystal in high-power frequency-doubled laser with single frequency operation[J]. Optics Express, 2015, 23(4): 4981-4990.
- [60] Yin Q, Lu H, Su J, et al. High power single-frequency and frequency-doubled laser with active compensation for the thermal lens effect of terbium gallium garnet crystal[J]. Optics Letters, 2016, 41(9): 2033-2036.
- [61] Guo Y R, Lu H D, Yin Q W, et al. Intra-cavity round-trip loss measurement of all-solid-state single-frequency laser by introducing extra nonlinear loss[J]. Chinese Optics Letters, 2017, 15(2): 021402.
- [62] Jin P, Lu H, Su J, et al. Scheme for improving laser stability via feedback control of intracavity nonlinear loss[J]. Applied Optics, 2016, 55(13): 3478-3482.
- [63] Guo Y R, Lu H D, Xu M Z, et al. Investigation about the influence of longitudinal-mode structure of the laser on the relative intensity noise properties[J]. Optics Express, 2018, 26(16): 21108-21118.
- [64] Guo Y R, Lu H D, Su J, et al. Investigation of hundred-watt all-solid-state continuous-wave single-frequency 1064 nm laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(6): 0601007.
郭永瑞, 卢华东, 苏静, 等. 百瓦级全固态连续单频 1064 nm 激光器的研究[J]. 中国激光, 2017, 44(6): 0601007.
- [65] Xu M Z, Guo Y R, Su J, et al. 125 W single-frequency CW Nd: YVO₄ laser based on two-stage dual-end-pumped master-oscillator power amplifiers[J]. Laser Physics Letters, 2019, 16(3): 036201.
- [66] Guo Y R, Xu M Z, Peng W N, et al. Realization of a 101 W single-frequency continuous wave all-solid-state 1064 nm laser by means of mode self-reproduction[J]. Optics Letters, 2018, 43(24): 6017-6020.
- [67] Feng J X, Wan Z J, Li Y J, et al. Generation of 8.3 dB continuous variable quantum entanglement at a telecommunication wavelength of 1550 nm[J]. Laser Physics Letters, 2018, 15(1): 015209.
- [68] Buchler B C, Huntington E H, Harb C C, et al. Feedback control of laser intensity noise[J]. Physical Review A, 1998, 57(2): 1286-1294.
- [69] Bachor H A, Ralph T C. A guide to experiments in quantum optics[M]. Weinheim: Wiley, 2004: 204-205.
- [70] Zhang T C, Poizat J P, Grelu P, et al. Quantum noise of free-running and externally-stabilized laser diodes[J]. Quantum and Semiclassical Optics: Journal of the European Optical Society Part B, 1995, 7(4): 601-613.
- [71] Lu H, Guo Y, Peng K. Intensity noise manipulation of a single-frequency laser with high output power by intracavity nonlinear loss[J]. Optics Letters, 2015, 40(22): 5196-5199.
- [72] Guo Y R, Peng W N, Su J, et al. Influence of the pump scheme on the output power and the intensity noise of a single-frequency continuous-wave laser[J]. Optics Express, 2020, 28(4): 5866-5874.
- [73] Guo Y, Lu H, Peng W, et al. Intensity noise suppression of a high-power single-frequency CW laser by controlling the stimulated emission rate[J]. Optics Letters, 2019, 44(24): 6033-6036.
- [74] Gao Y H, Li Y J, Feng J X, et al. Stable continuous-wave single-frequency intracavity frequency-doubled laser with intensity noise suppressed in audio frequency region[J]. Chinese Physics B, 2019, 28(9): 094204.
- [75] Gao Y H, Feng J X, Li Y J, et al. Generation and measurement of squeezed vacuum states at audio-band frequencies[J]. Applied Sciences, 2019, 9(7): 1272.
- [76] Wang Y J, Zheng Y H, Xie C D, et al. High-power low-noise Nd: YAP/LBO laser with dual wavelength outputs[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2011, 47(7): 1006-1013.
- [77] Yang W H, Wang Y J, Li Z X, et al. Compact and low-noise intracavity frequency-doubled single-frequency Nd: YAP/KTP laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(5): 0502002.
杨文海, 王雅君, 李志秀, 等. 小型化、低噪声内腔倍频 Nd: YAP/KTP 单频激光器[J]. 中国激光, 2014, 41(5): 0502002.
- [78] Yu J, Qin Y, Yan Z H, et al. Improvement of the intensity noise and frequency stabilization of Nd YAP laser with an ultra-low expansion Fabry-Perot cavity[J]. Optics Express, 2019, 27(3): 3247-3254.
- [79] Feng J X, Li Y J, Zhang K S, et al. Linear polarization output performance of Nd: YAG laser at

- 946 nm considering the energy-transfer upconversion [J]. Chinese Physics B, 27(7): 074211.
- [80] Wang Y T, Liu J L, Liu Q, et al. Diode-end-pumped continuous-wave Nd: YAG laser at 946 nm of single-frequency operation[J]. Laser Physics, 2010, 20(4): 802-805.
- [81] Wang Y T, Liu J L, Liu Q, et al. Stable continuous-wave single-frequency Nd: YAG blue laser at 473 nm considering the influence of the energy-transfer upconversion[J]. Optics Express, 2010, 18(12): 12044-12051.
- [82] Radziemski L J, Engleman R, Brault J W. Fourier-transform-spectroscopy measurements in the spectra of neutral lithium, ^6Li and ^7Li (Li I) [J]. Physics Review A, 1995, 52(6): 4462-4470.
- [83] Yang X P, Wang C X, Feng J X, et al. 9 W all-solid-state continuous-wave single-frequency 1.34 μm Nd: YVO₄ laser [J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(6): 0602019.
杨小平, 王春香, 冯晋霞, 等. 9 W 全固态连续单频 1.34 μm Nd: YVO₄ 激光器[J]. 中国激光, 2013, 40(6): 0602019.
- [84] Ma Y Y, Feng J X, Wan Z J, et al. Continuous variable quantum entanglement at 1.34 μm [J]. Acta Physica Sinica, 2017, 66(24): 244205.
马亚云, 冯晋霞, 万振菊, 等. 连续变量 1.34 μm 量子纠缠态光场的实验制备[J]. 物理学报, 2017, 66(24): 244205.
- [85] Li Y J, Jiao Y C, Feng J X, et al. A diode-end-pumped Er³⁺, Yb³⁺: YAl₃(BO₃)₄ laser at 1.5 μm [J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(1): 0102007.
李渊骥, 焦月春, 冯晋霞, 等. LD 端面抽运 1.5 μm Er³⁺, Yb³⁺: YAl₃(BO₃)₄ 激光器[J]. 中国激光, 2013, 40(1): 0102007.
- [86] Jin P, Lu H, Wei Y, et al. Single-frequency CW Ti: sapphire laser with intensity noise manipulation and continuous frequency-tuning[J]. Optics Letters, 2017, 42(1): 143-146.
- [87] Sun X J, Wei J, Wang W Z, et al. Realization of a continuous frequency-tuning Ti: sapphire laser with an intracavity locked etalon [J]. Chinese Optics Letters, 2015, 13(7): 071401.
- [88] Su J, Jin P X, Wei Y X, et al. Automatically and broadly tunable all-solid-state continuous single-frequency Ti: sapphire laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(7): 0701006.
苏静, 靳丕钰, 卫毅笑, 等. 自动宽调谐的全固态连续单频钛宝石激光器[J]. 中国激光, 2017, 44(7): 0701006.
- [89] Lu H. D, Su J, Xie C D, et al. Experimental investigation about influences of longitudinal-mode structure of pumping source on a Ti: sapphire laser [J]. Optics Express, 2011, 19(2): 1344-1353.
- [90] Lu H. D, Su J, Wang M H, et al. Single frequency Ti: sapphire laser with continuous frequency-tuning and low intensity noise by means of the additional intracavity nonlinear loss[J]. Optics Express, 2014, 22(20): 24551-24558.
- [91] Wei Y X, Lu H D, Jin P X, et al. Self-injection locked CW single-frequency tunable Ti: sapphire laser [J]. Optics Express, 2017, 25(18): 21379-21387.
- [92] Lu H D, Sun X J, Wei J, et al. Intracavity frequency-doubled and single-frequency Ti: sapphire laser with optimal length of the gain medium [J]. Applied Optics, 2015, 54(13): 4262-4266.
- [93] Lu H D, Wei J, Wei Y X, et al. Generation of high-power single-frequency 397.5 nm laser with long lifetime and perfect beam quality in an external enhancement-cavity with MgO-doped PPSLT [J]. Optics Express, 2016, 24(21): 23726-23734.
- [94] Wu L, Yan Z H, Liu Y H, et al. Experimental generation of tripartite polarization entangled states of bright optical beams [J]. Applied Physics Letters, 2016, 108(16): 161102.
- [95] Zhang L P, Yin G L, Li F Q, et al. All-solid-state tunable Ti: sapphire laser with high-power and single-frequency at 900 nm [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(12): 1201002.
张连平, 殷国玲, 李凤琴, 等. 900 nm 波段的全固态高功率单频可调谐钛宝石激光器[J]. 中国激光, 2017, 44(12): 1201002.
- [96] Li F Q, Li H J, Lu H D, et al. High-power tunable single-frequency 461 nm generation from an intracavity doubled Ti: sapphire laser with PPKTP [J]. Laser Physics, 2016, 26(2): 025802.
- [97] Li F Q, Li H J, Lu H D, et al. Realization of a tunable 455.5 nm laser with low intensity noise by intracavity frequency-doubled Ti: sapphire laser[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2016, 52(2): 1700106.
- [98] Li F Q, Zhao B, Wei J, et al. Continuously tunable single-frequency 455 nm blue laser for high-state excitation transition of cesium [J]. Optics Letters, 2019, 44(15): 3785-3788.

Progress on High-Power Low-Noise Continuous-Wave Single-Frequency All-Solid-State Lasers

Zhang Kuanshou^{1,2*}, Lu Huadong^{1,2}, Li Yuanji^{1,2}, Feng Jinxia^{1,2}

¹ State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices, Institute of Opto-Electronics, Shanxi University, Taiyuan, Shanxi 030006, China;

² Collaborative Innovation Center of Extreme Optics, Shanxi University, Taiyuan, Shanxi 030006, China

Abstract

Significance High-power low-noise continuous-wave (cw) single-frequency all-solid-state lasers (ASSL) have various advantages, including high conversion efficiency, high beam quality, low noise, and long coherence length, and have been widely used in many application fields, e. g. quantum science and technology, cold atom physics, high-precision measurement, high-efficiency frequency conversion, coherent communication, lidar, and optical sensing. This type of laser promotes the development of essential quantum physics research and the practicality of quantum technology. For example, such lasers can be used to prepare a high entanglement, multi-component quantum entanglement source, which is an important technical element in quantum secure communications and quantum computing. In addition, such lasers are basic light sources for high-precision measurement based on laser interferometers. With the observation that gravitational waves from a binary black hole merge, high-precision measurement has attracted significant attention recently. The sensitivity of the gravitational wave device is inversely proportional to the root mean square of the injected laser power, and thus if the injection laser power of the advanced LIGO device is expected to reach 125 W, its detection sensitivity will be 10 times higher than that of the LIGO device.

Progress To satisfy the application requirements of ASSLs in quantum science and technology, cold atom physics, and high-precision measurement, high-power low-noise cw single-frequency mode-hop-free ASSLs with different central wavelengths were investigated and fabricated. First, based on the analysis of the thermal effect of laser crystal in laser-diode end-pumped high-power ASSLs and the improvement measures for the thermal effect of laser crystals, a universal model of sufficient conditions for a stable single-longitudinal-mode operation for high-power cw ASSLs was established by introducing the nonlinear losses of the fundamental wave when a nonlinear crystal was inserted into the cavity, and a high-power cw single-frequency mode-hop-free ASSL was fabricated. Second, the output power of the cw single-frequency ASSL was scaled up under intense pump. A 125 W cw single-frequency 1.064 μm laser was achieved by a homemade 50.3 W cw single-frequency laser, and a two-stage dual end-pumped master-oscillator power amplifier acted as the seed source and amplifier. The measured power stability of the 1.064 μm laser over 8 h was better than $\pm 0.73\%$. In addition, a 25.3 W cw single-frequency 532 nm laser was obtained with an optical-optical conversion efficiency of 32.2%, and the power stability was greater than 0.4% over 8 h. Third, the noise characteristics of the cw single-frequency ASSLs were studied and suppressed. The intensity and phase noise of the cw single-frequency ASSLs reached the shot noise level (SNL) for analysis frequencies greater than 5 MHz. The intensity noises of the ASSLs were much greater than the SNL in the low analysis frequency range and less than several megahertz. The intensity noises could be manipulated by intra-cavity nonlinear loss, and the resonant relaxation oscillation noise peak of a 1.064 μm laser was reduced and shifted toward low frequencies when the nonlinear loss was increased. The intensity noises of the ASSLs were suppressed by controlling the stimulated emission rate in the laser cavity and by a control system based on a Mach-Zehnder interferometer outside the laser cavity. Fourth, the central wavelengths of cw single-frequency ASSLs were extended. 1) A high-power stable low-noise cw single-frequency 540 nm and 1.08 μm dual-wavelength Nd : YAP/LBO laser was fabricated. Maximum output powers of 4.5 W at 540 nm and 1.5 W at 1.08 μm were achieved simultaneously. 2) Stable low-noise cw single-frequency 473 nm and 946 nm Nd : YAG/PPKTP lasers were fabricated. Maximum output powers of 1.01 W at 473 nm and 1.5 W at 946 nm were achieved, respectively. 3) A high-power stable low-noise cw single-frequency 671 nm and 1.34 μm dual-wavelength Nd : YVO₄/LBO laser was fabricated. Maximum output powers of 3.17 W at 671 nm and 2.15 W at 1.34 μm were achieved simultaneously. 4) A stable low-noise cw single-frequency 1.55 μm Er, Yb : YAB laser was fabricated. Maximum output power of 400 mW at 1.55 μm was achieved. 5) An all-solid-state

cw single-frequency Ti:sapphire laser with continuous frequency-tuning was achieved via an intra-cavity locked LiNbO₃ electro-optic etalon. A maximal tuning range of 110 nm (760–870 nm) was obtained by rotating the BRFs, and a continuous frequency-tuning range of 20 GHz was realized after the electro-optic etalon was locked to the oscillating mode of the Ti:sapphire laser. Maximal output power of 2.88 W at 795 nm was obtained under a pump power of 16.53 W. 6) A continuously tunable single-frequency 461 nm Ti:sapphire laser was obtained by PPKTP intra-cavity doubling. Output power at 460.86 nm was 1.05 W under a pump power of 12 W, and the continuous frequency-tuning range of the 461 nm blue laser was 15.756 GHz. 7) A continuously tunable single-frequency 455 nm blue laser was implemented by an intra-cavity frequency doubled Ti:sapphire laser with an LBO crystal. The output power at 455 nm was 1.0 W under a pump power of 13.5 W, and the continuous frequency-tuning range of the 455 nm blue laser was up to 32 GHz.

Conclusion and Prospect Based on the theoretical study and experimental design of lasers, a series of high-power, low-noise cw single-frequency mode-hop-free ASSLs with different central wavelengths were fabricated. Relative to the future development of high-power, low-noise cw single-frequency ASSLs, scaling up the output power and output energy of the ASSLs remains an important topic. In addition, the central wavelengths and linewidths of these lasers should be extended and narrowed, respectively, and the beam quality and directional stability of the laser beams should be improved further. Finally, to improve the sensitivity of high-precision optical measurements, the extra intensity noise of cw single-frequency ASSLs should be suppressed further, and it is the best that intensity noise can reach the SNL in the whole analysis frequency range.

Key words lasers; continuous wave; single frequency; high power; low noise

OCIS codes 140.3460; 140.3480; 140.3570