

可见光波段激光器线宽压缩技术研究进展

孟诗涵¹, 付鑫鹏¹, 俞航航¹, 阮迪^{1,2}, 潘禹轩^{1,2}, 胡千廷^{1,2}, 付喜宏^{1*}

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 特种发光科学与技术全国重点实验室, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 可见光波段窄线宽激光器具有超高的光谱纯度、优异的相干性及良好的输出功率稳定性, 凭借这些核心优势, 其作为关键光源在海洋探测、生物医学、激光光谱学、航天卫星及微波场强测量等多个前沿领域发挥着不可替代的作用。随着相关应用研究的持续深入, 对激光器的综合性能参数提出了更高要求, 可见光激光器正朝着线宽压缩、功率稳定性、波长调谐等方向稳步发展。基于激光自发辐射与受激辐射的相互作用原理, 优化激光谐振腔构型是实现线宽精准调控的关键思路, 目前已逐步发展出短腔、环形腔、复合腔及外腔反馈等多种构型的激光器。本文系统综述了可见光波段激光器线宽压缩技术的研究进展, 涵盖线宽压缩机制、谐振腔结构及非线性频率变换技术, 系统总结了固态、光纤与半导体三类激光器的性能提升与技术特征, 探讨了该领域的潜在研究方向, 为高性能可见光波段窄线宽激光源的进一步发展提供参考。

关键词: 线宽压缩; 可见光波段; 非线性频率变换; 相干性

中图分类号: O482.31

文献标识码: A

DOI: 10.37188/CJL.20260104

CSTR: 32170.14.CJL.20260104

Research Progress on Linewidth Compression Technology of Visible Light Band Lasers

Meng Shihan¹, Fu Xinpeng¹, Yu Hanghang¹, Ruan Di^{1,2}, Pan Yuxuan^{1,2},

Hu Qianting^{1,2}, Fu Xihong^{1*}

(1. State Key Laboratory of Luminescence Science and Technology, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences 130033, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

* Corresponding Author, E-mail: fuxh@ciomp.ac.cn

Abstract: Visible narrow-linewidth lasers feature extremely high spectral purity, excellent coherence, and good output power stability. With these core advantages, they serve as key light sources in multiple cutting-edge fields such as marine exploration, biomedicine, laser spectroscopy, aerospace satellites, and microwave field strength measurement. As related application research continues to deepen, higher requirements have been placed on the comprehensive performance parameters of lasers. Visible narrow-linewidth lasers are steadily advancing in directions such as linewidth compression, power stability, and wavelength tuning. Based on the principle of the interaction between spontaneous and stimulated emission of lasers, optimizing the laser resonator configuration is a key approach to achieving precise linewidth control. Currently, various resonator configurations such as short cavity, ring cavity, composite cavity, and external cavity feedback have been gradually developed. This article systematically reviews the research progress of visible narrow-linewidth lasers, covering linewidth compression mechanisms, resonator structures, and nonlinear frequency conversion techniques. It systematically summarizes the performance improvements and technical characteristics of solid-state, fiber, and semiconductor lasers, and explores potential research

收稿日期: XXXX-XX-XX; 修订日期: XXXX-XX-XX

基金项目: 国家重点研发计划(2024YFB3614000); 吉林省科技发展规划项目(SKL202502018JC)

Supported by National Key R & D Program of China (2024YFB3614000); Science and Technology Development Program of Jilin Province (SKL202502018JC)

directions in this field, providing a reference for the further development of high-performance visible narrow-line-width laser sources.

Keywords: narrow linewidth; visible laser band; nonlinear frequency conversion; coherence

1 引 言

1960年,泰德·梅曼^[1](Theodore Maiman)发明了世界上第一台激光器,使用红宝石晶体产生了波长为694.3 nm的激光。一年后, Franken^[2]等人便在该激光束与石英晶体的相互作用中,首次观测到二次谐波的产生。经过几十年的不断发展,在非线性光学理论的不断完善,并结合非线性晶体制备工艺的进步与性能优化,激光技术在其核心参数光谱范围、输出功率、光束质量及激光线宽等方面,均取得了显著的提升。推动了可见光光源在海洋探测^[3-4]、生物医学^[5-6]、激光光谱学^[7]、航天卫星^[8-9]、微波场强测量^[10]、等领域的不断发展,同时为了实现探测技术的不断突破,研究人员对光源的相干性、功率稳定性、相位噪声等要求进一步提升。因此,可见光波段激光器线宽压缩技术具有较高的研究价值。

随着应用场景对探测精度、传输容量及抗干扰能力的要求持续升级,传统可见光激光器逐渐难以满足高性能需求,对光源的相干性、功率稳定性及相位噪声抑制提出了更为严苛的标准。激光线宽作为衡量相干性的核心指标,其压缩程度直接决定了激光器在高精度场景的应用范围。本文系统综述可见光激光器线宽压缩技术的最新研究进展,重点阐述线宽压缩的核心物理机制、典型谐振腔结构设计及非线性频率变换关键技术,全面总结固态、光纤与半导体三类激光器在可见光波段的性能突破和技术特征,并展望其未来发展前景与趋势,为相关领域的研究与应用提供参考。

2 线宽压缩原理与方法

线宽作为衡量激光相干性的核心指标,其压缩程度直接决定激光器在高精度探测、高保真通信等场景的应用上限。激光线宽的形成与调控遵循明确的物理机制,而线宽压缩技术的本质的是通过优化激光谐振腔构型、抑制内外噪声扰动,实现激光频谱的窄化与提纯。

2.1 线宽压缩机制

激光本征线宽源于无源谐振腔的模式特性,

其数值由腔体损耗与腔长等结构参数唯一确定,表征了谐振腔自身的滤波特性。然而,在激光振荡过程中,增益介质中的自发辐射会引入相位与幅度的随机起伏,导致激光输出信号的频率分布呈现出高斯白噪声的特性。这一物理机制致使激光输出频谱呈现固有的洛伦兹型包络,即激光的本征展宽。Schawlow和Townes^[11]基于自发辐射产生的相位噪声,从理论上推导出了量子噪声极限下单频激光器的线宽公式为:

$$\Delta\nu = -\frac{Rh\nu_0\nu_g \ln(r_f)}{8\pi P_{out}L} (1 + \alpha^2) \quad (1)$$

式中: ν_g 为光传输的群速度; r_f 为激光输出端的反射率; h 为普朗克常数; ν_0 为载波频率; P_{out} 为激光输出功率; R 为自发辐射速率; L 为谐振腔的长度; α 为线宽增强因子。根据Schawlow-Townes理论,激光本征线宽主要依赖于自发辐射速率与谐振腔长度,二者分别对应增益介质的辐射特性及谐振腔的结构参数,虽然粒子自发辐射过程本质上不可消除,但是研究员通过优化谐振腔构型以抑制自发辐射对激光相位噪声的影响,可以获得接近量子噪声极限的线宽。此外,外部环境的经典噪声会进一步拓宽激光线宽,破坏相干性能。主要包括温度波动与机械振动两类:温度变化会导致增益介质折射率、谐振腔长度发生热漂移,引发激光频率的随机偏移;机械振动则直接扰动谐振腔的稳定性,破坏光子传播路径的一致性,加剧相位噪声。

2.2 基于谐振腔结构优化的线宽压缩方法

谐振腔作为激光振荡的核心载体,其结构设计直接影响光子与增益介质的相互作用效率、噪声抑制能力。通过优化谐振腔构型,可实现纵模筛选、噪声隔离等功能,从而达到线宽压缩目的,主要有线型腔、环形腔、非平面环形腔及复合腔等。

2.2.1 线型腔

线型腔主要分为短腔结构和长腔结构,被广泛应用于固体激光器与光纤激光器。其中短腔结构主要是通过缩短腔长增大纵模间隔,或引入选模元件抑制多纵模振荡,主要包括以下典型形式:

短腔结构中以法布里—珀罗(F-P)腔为主,其原理如图1所示,通过缩短谐振腔长度,使相邻纵模间隔大于增益介质的增益带宽,仅允许单一纵模振荡,实现线宽压缩^[12]。该方法结构简单,但其稳定性受腔长调谐精度影响。长腔结构虽有利于实现单纵模运转,但易受空间烧孔效应影响,导致增益介质内的增益分布不均匀,进而降低模式稳定性并引起线宽展宽。为解决这一问题,研究员采用扭摆腔结构,其原理是在谐振腔内插入偏振片,并在增益介质两端分别放置四分之一波片。该结构使得增益介质中的光场由驻波形式转变为传播方向相反、旋向不同的圆偏振光,从而实现光强的均匀分布,有效抑制空间烧孔效应^[13]。

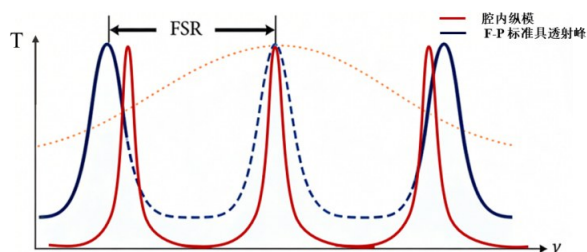


Fig. 1 Schematic diagram of the F-P cavity linewidth compression principle

2.2.2 环型腔

环形腔通过构建闭合光路使光子单向传播,有效消除空间烧孔效应,同时延长光子在腔内的作用时间,增强模式竞争,提升激光相干性与单色性^[14]。其核心优势在于避免了驻波腔中光强分布不均导致的多纵模振荡问题,常见应用形式包括:光纤环形腔,通常以稀土掺杂光纤为增益介质,搭配偏振控制器、光隔离器等元件构建环形光路,通过调节腔内损耗实现单纵模选择。该结构热管理性能优异,线宽可压窄至 kHz 以下,适用于高功率、高稳定性场景。另一种典型结构为固体蝶形腔,这是一种针对固体激光器设计的多镜环形结构,通过优化反射镜布局控制光子传播路径,结合腔内标准具进一步强化选模效果^[22],可实现瓦级输出功率与 MHz 量级线宽的良好平衡,在可见光波段具有广泛应用。

2.2.3 非平面环形腔

非平面环形腔(NPRO)是实现单频激光输出的一种,其原理如图2所示,是在单块晶体中构建非共面的环形光路,A点既是泵浦光的入射点,又是振荡激光的输出点,光在B、C、D三点全反射形成闭合振荡^[15]。关键技术特征包括:A点的介质

膜对泵浦光高透,同时对振荡光的s偏振光和p偏振光呈现不同透射率,起到检偏与选频作用;外加磁场引入的法拉第旋光效应,确保腔内仅沿单一方向的一个偏振态光起振,抑制多纵模振荡。该结构具有腔内损耗低、强度噪声小、输出稳定等优势,线宽可压缩至 Hz 量级,是高精度测量领域的理想光源。

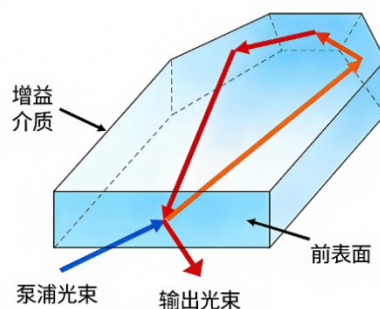


图2 NPRO工作原理示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the working principle of NPRO

2.2.4 复合腔

复合腔由多个子腔耦合构成,通常结合线型腔与环形腔的结构优势,通过多级选模实现深度线宽压缩。例如,将短腔与长腔耦合,利用短腔的大纵模间隔特性进行粗选模,长腔的高Q值特性进行细选模,兼顾线宽压缩效果与功率输出能力^[16]。这类结构在调谐灵活性上具有优势,但结构相对复杂,对各子腔的匹配精度要求较高。

2.3 基于光反馈机制的线宽压缩方法

光反馈技术通过引入外部反馈信号,调控激光振荡的相位与频率稳定性,进一步压缩线宽,主要应用于半导体激光器,分为内腔光反馈与外腔光反馈两类。

2.3.1 内腔光反馈

该方法在激光器谐振腔中内置布拉格光栅,通过光栅的波长选择性实现反馈与选模,根据光栅分布位置可分为两种类型:如图3所示,分布式布拉格反射(DBR)结构,在谐振腔两端或一端设置窄带布拉格光栅,利用光栅的波长选择性实现纵模筛选,通过模式竞争抑制噪声。其线宽可压缩至 kHz 量级,具有结构紧凑、波长稳定性好的优势,但调谐范围较窄。分布式反馈(DFB)结构,将布拉格光栅与增益介质进行直接耦合,形成分布式反馈机制,通过相位匹配条件实现单纵模振荡^[17]。该结构无需额外选模元件,集成度高,线宽压缩效果优异,是窄线宽光纤和半导体激光器的

主流构型之一。体布拉格光栅(VBG)外腔结构是另一类构型,利用VBG的窄带滤波特性实现外腔锁频,通过空间光束合束技术可同时实现多芯片功率合成与线宽压缩,适配高功率输出需求^[18,46]。该结构无需复杂的光栅角度调节,波长稳定性优异,受温度波动影响小,能有效抑制多纵模振荡,在高功率可见光半导体激光器中应用广泛,但存在工作光谱范围受限、调谐灵活性不足的特点。

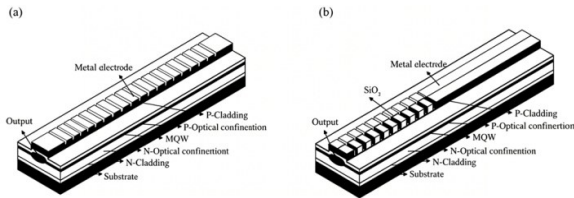


图3 DFB激光器(a)和DBR激光器(b)

Fig. 3 DFB laser (a) and DBR laser (b)

2.3.2 外腔光反馈法

外腔反馈法通常采用外腔中的光功率回馈注入激光主腔,从而对激光的输出频率进行锁定。该方法的核心优势是通过无源光学元件实现频率选择与光反馈,易获得低相位噪声与优异的热稳定性,主流典型结构主要以下两种。Littrow型外腔结构,采用“激光芯片-面光栅”的直接反馈构型,激光从芯片出射后经准直透镜入射至面光栅,特定波长的一阶衍射光沿原光路返回谐振腔形成反馈,未满足衍射条件的其他波长光则被滤除^[19,47]。其具有光路简洁、调谐范围宽,通过旋转光栅角度可实现大跨度波长调节的优点,但波长调谐精度与偏振稳定性相对有限。Littman型外腔结构采用“激光芯片-面光栅-反射镜”的折叠反馈构型,激光经光栅衍射后并非直接返回,而是先入射至固定角度的反射镜,经反射镜反射后再次入射光栅并发生二次衍射,最终仅满足相位匹配条件的特定波长光束沿原光路返回谐振腔^[20]。与Littrow型相比,其具有光栅角度调节范围更小、波长调谐精度更高、稳定性更优、反馈光的模式纯度更高的优点,可有效实现线宽压缩。

2.4 辅助线宽压缩技术

除上述核心方法外,种子注入技术、非线性频率变换技术等可作为辅助手段,进一步优化线宽特性或拓展可见光波段应用:种子注入技术,将稳定的单纵模种子激光注入从属激光器,通过相位锁定实现选模与放大。利用种子光的频率优势,使腔内与种子光频率最接近的模式优先起振,

抑制其他纵模振荡,同时通过压电陶瓷换能器(PZT)控制谐振腔长度,提升频率稳定性,可实现线宽从MHz量级到kHz量级的压缩^[21]。非线性频率变换技术,通过BBO、LBO、CLBO等非线性晶体,利用二阶非线性效应将红外窄线宽激光转换为可见光波段输出,同时进行光谱提纯。还可以通过金刚石晶体的拉曼、布里渊等三阶非线性效应对可见光波段激光直接进行光谱提纯,进一步压缩线宽、提升单色性。

3 可见光波激光器线宽压缩技术研究进展

可见光波段窄线宽激光器的性能突破与技术路径选择,紧密依托于固体、光纤、半导体三类核心激光体系的结构特性与应用场景需求。不同体系在增益介质、热管理能力、集成化潜力等方面的固有差异,决定了其线宽压缩方法的选择逻辑,即需在线宽压缩极限、功率输出能力、结构紧凑性、环境适应性等核心指标间实现最优平衡。本节将按体系分类,系统阐述各类激光器的技术特征、线宽压缩方案适配性及性能突破。

3.1 可见光波段固体激光器线宽压缩技术

窄线宽固体激光器凭借高增益系数、宽波长覆盖范围及优异的光束质量,成为可见光波段中高功率、高精度应用的核心选择。其核心优势在于可通过谐振腔设计与模式选择技术,实现多波段窄线宽输出,且抗干扰能力强,适用于激光钠导星、高分辨率光谱分析等严苛场景。固体激光器的线宽压缩方法选择,主要基于其增益介质体积大、热效应显著、易产生空间烧孔效应的特性,核心思路是通过谐振腔结构优化抑制多纵模振荡,利用辅助线宽压缩技术选择起振模式并进行光谱提纯,具有代表性的技术方案包括以下几类:

3.1.1 基于F-P腔的固体激光器线宽压缩技术

对于线性腔激光器而言,在腔内插入法布里-珀罗(F-P)标准具可以通过多光束干涉原理引入波长选择性损耗,容易实现激光单纵模振荡。Quan等^[22]报道了一种腔内插入标准具的拉曼激光器,研究了其在波长调谐、线宽压缩与功率提升方面的性能。如图4所示通过插入不同厚度(50 μm 、100 μm 、300 μm)的F-P标准具,有效压缩了基频激光线宽。实验结果表明,基频激光线宽由自由运转时的超过0.7 nm压缩至约0.05 nm,斯

托克斯与倍频黄光输出线宽亦同步压窄至仪器极限(<2 GHz)。进一步通过调节标准具倾角, 实现了基频波长在 1061 nm 至 1065.20 nm 范围内的连续调谐, 对应斯托克斯波长调谐范围为 1176.46 nm 至 1181.63 nm。经 LBO 晶体倍频后, 获得 588.23 nm 至 590.81 nm 的可调谐窄线宽黄光输出, 覆盖 589.16 nm 的激光导星波长。同时, 通过 F-P 标准具实现大范围波长调谐时, 将大范围粗

调与稳频分配至不同元件或机制——例如采用恒温角度调谐标准具实现粗调, 同时利用压电陶瓷驱动谐振腔镜或附加的超稳参考腔进行主动反馈锁定, 补偿残余漂移; 或者采用双标准具游标结构, 使承担单纵模选模的厚标准具始终工作于恒温环境, 而薄标准具仅负责大范围粗调。通过上述方法可有效调和标准具温控精度与单纵模长期稳定性之间的固有矛盾。

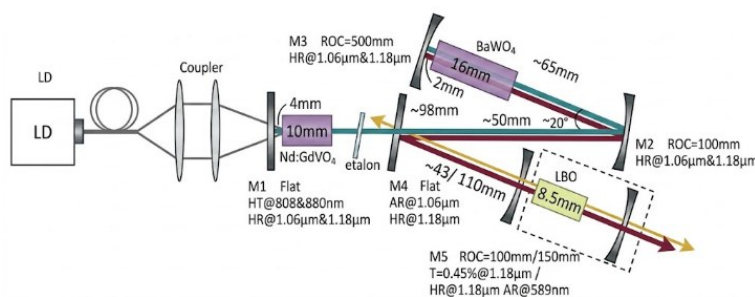


图4 腔内拉曼激光器的实验装置示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the experimental setup for intracavity Raman laser

Fang^[23]设计基于 F-P 标准具波长调谐和线宽压缩的窄线宽基频光方案, 实现高功率窄线宽 1.94 μm 基频光输出, 利用外腔谐振四倍频系统构成, 实现高效率窄线宽的 486 nm 蓝光输出, 获得了最大平均功率为 376 mW, 线宽为 0.11 nm 的 486.1 nm 蓝光输出, 972 nm-486 nm 的转换效率约为 23%。

3.1.2 基于扭摆腔的固体激光器线宽压缩方案

长腔结构的线型腔容易获得单纵模激光输出, 但是光在腔内传播的过程中会发生驻波干涉, 引发空间烧孔效应。为了解决这一问题, 研究员一般采用扭摆腔结构来改变腔内激光偏振态抑制空间烧孔效应。Bian 等人^[24]本文报道了一种用于自适应光学系统的高功率、重复频率与脉冲宽度可调的 589 nm 钠导星激光器。该激光系统基于 1064 nm 与 1319 nm 准连续波 Nd:YAG 放大器的和频产生技术, 采用扭模腔结构替代传统环形腔以提升稳定性和输出功率, 并结合主振荡功率放大器与双端泵浦方式, 有效抑制热致双折射与弛豫振荡。在 400 Hz 重复频率、100 μs 脉冲宽度下实现最高 86.1 W 的 589 nm 激光输出, 和频转换效率达 30.1%, 光束质量因子 M^2 为 1.37。通过标准具温控与角度调节, 输出波长可精确调谐并锁定于钠吸收线(589.159 nm), 频率偏差在 ± 200 MHz 以内, 线宽约为 440 MHz。该激光器重复频率可在 400-1000 Hz 范围内调节, 脉冲宽度随频率增加

相应扩展至 100-180 μs 。

3.1.3 基于环形腔的固体激光器线宽压缩方案

环形腔结构是在原有线型腔激光器基础上, 构建闭合光路使光子单向传播, 消除空间烧孔效应, 同时延长光子在腔内的作用时间, 增强模式竞争。Liu 等^[25]展示了一种具有六镜环形谐振腔和腔内倍频的连续单频 532 nm 激光器。如图 5 所示, 在腔中插入标准具来缩小增益谱和抑制跳模。在 52 W 入射泵浦功率下获得最大 12 W 的 532 nm 单频绿光输出, 光-光转换效率达 23.1%。输出功率在 5 小时内稳定性优于 $\pm 0.5\%$, 无跳模现象; 光束质量接近衍射极限, $M_x^2=1.03$, $M_y^2=1.02$ 。经扫描 F-P 干涉仪验证为单纵模运转, 瞬时线宽小于 150 kHz, 1 分钟内频率漂移优于 15 MHz。噪声性能方面, 强度噪声在分析频率高于 3.5 MHz 时达到散粒噪声极限。

Xue^[26]等设计了一种基于环形腔结构的高功率单纵模可见光 Pr:YLF 激光器, 实现了红、橙、绿多个波段的瓦级单频激光输出。采用 a 切向、低掺杂浓度为 0.2 at. % 的 Pr:YLF 晶体作为增益介质, 结合 GaN 泵浦源, 构建四镜环形谐振腔, 以抑制空间烧孔效应; 并引入 F-P 标准具, 实现单向运转及单纵模选择。实验结果表明, 在 639 nm 处获得最大 1.4 W 的单频输出, 线宽为 7.8 MHz, 斜率效率达 13.7%; 在橙光区域分别于 604 nm 和 607 nm 实现 435 mW 与 1.03 W 的输出, 线宽分别为

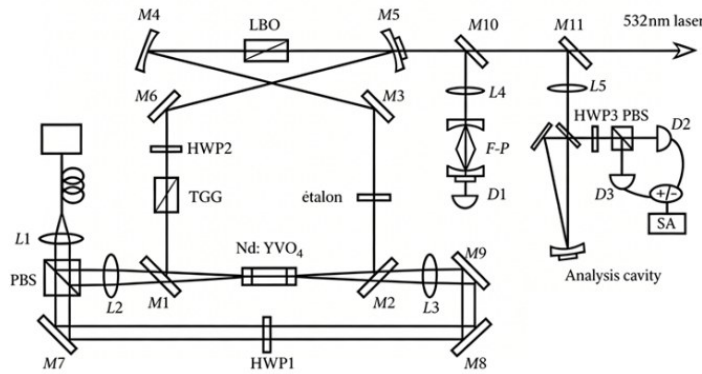


图5 六镜环形腔单频绿光激光器结构示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the structure of a six-mirror ring cavity single-frequency green light laser

9.4 MHz 与 7.6 MHz; 在 522 nm 处输出功率为 313 mW, 线宽为 9.7 MHz。所有激光光束质量 M^2 因子均小于 1.25, 并在 60 分钟内功率稳定性优于 1.3%。

3.1.4 基于非平面环形腔的固体激光器线宽压缩方案

非平面环形腔也是一种典型的行波腔结构, 谐振腔通常由一整块增益介质构成, 激光在腔内采用行波振荡的方式抑制空间烧孔效应。Song 等人^[27]设计一种由 355 nm 紫外激光泵浦的可调谐窄线宽 BBO 光学参量振荡器, 该系统以 Nd:YAG 非平面环形振荡器作为种子源, 经多级放大与 LBO 晶体三倍频获得高稳定性泵浦光, 并采用单共振环形腔结构与 I 类相位匹配 BBO 晶体, 通过角度旋转实现了 470-517 nm 的连续波长调谐, 在自由运转状态下输出能量超过 19 mJ, 线宽低于 0.065 nm。在 486.134 nm 实现 23.8 mJ 脉冲能量与 40.7% 转换效率, 光束质量与稳定性满足星载海洋探测激光雷达等严苛场景需求, 但存在晶体加工精度要求高、调谐范围有限、成本较高等问题, 适用于对相干性与稳定性要求极致的高精度测量领域。

3.1.5 基于种子注入的固体激光器线宽压缩方案

种子注入技术是将稳定的单纵模种子激光注入到从属激光器中进行选模和放大的技术^[28-29], 是获得单纵模激光最重要的技术之一。其基本原理为: 将单纵模种子激光注入谐振腔中, 并通过压电陶瓷换能器 (piezoelectricity transducer, PZT) 等器件控制谐振腔长度变化。由于注入的种子光比腔内自由振荡光更具优势, 因此从腔中与种子光频率最接近的模式会优先起振。Zhang 等人^[30]报道了一种基于光参量振荡器 (OPO) 种子注入的高功率、窄线宽可调谐钛宝石激光器。如图 6 所示该系统采用单频光纤主振荡功率放大系统泵浦的 OPO 结合内腔倍频装置作为种子源, 通过外腔注入锁定技术实现钛宝石激光的线宽压窄与波长调谐。泵浦源为重复频率 10 kHz、最大功率 42.4 W 的 532 nm 倍频 Nd:YAG 激光器, 在 750 - 780 nm 范围内实现了连续可调谐的窄线宽激光输出。当泵浦功率为 42.4 W 时, 在 765.05 nm 处获得最高输出功率 9.17 W, 光-光转换效率为 21.6%, 脉冲宽度约 13 ns, 线宽为 410 MHz。光束质量因子分别为 $M_x^2=2.24$ 与 $M_y^2=2.15$, 30 分钟内输出功率的均方根稳定性为 0.52%。

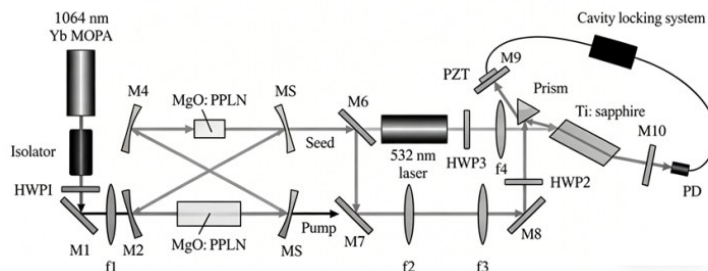


图6 种子光注入高重复、窄线宽钛宝石激光器

Fig. 6 Seed Light Injection High repetition frequency, narrow linewidth titanium Sapphire laser

3.2 可见光波段光纤激光器线宽压缩技术

窄线宽光纤激光器以稀土掺杂光纤为增益介质,具备热管理性能优异、结构紧凑、可全光纤集成等突出优势。其核心特点是光子与增益介质相互作用充分,且光纤的柔性结构便于构建复杂谐振腔,同时抗振动、抗环境干扰能力强,通过非线性频率变换方式,成为高功率可见光窄线宽激光输出的主流选择。

3.2.1 基于线性腔结构的光纤激光器线宽压缩方案

线性腔结构的核心优势的是通过在光纤中集成布拉格光栅实现窄带选模,兼具结构简洁、集成度高、损耗低的特点。Yang 等人^[31]提出全光纤分布式布拉格反射结构短腔线宽压缩方案,成功实现 978 nm 窄线宽基频光的高效产生与 489 nm 蓝光输出。其基频光系统以 3.5 mm 长的掺镱磷酸

盐光纤(YPF)为增益介质,两端搭配石英光纤布拉格光栅构建布拉格反射结构短腔,输出约 10 mW 线偏振激光;随后通过半导体光放大器(SOA)将功率放大至 230 mW,并经保偏带通滤波器滤除放大自发辐射(ASE)噪声,最终获得洛伦兹线宽<10 kHz、偏振消光比>23 dB 的单纵模基频光。该基频光经周期极化铌酸锂(PPLN)波导单通倍频后,生成 68 mW 的 489 nm 蓝光,线宽<15 kHz,120 分钟内功率稳定性达 $\pm 1.5\%$ 。

Su^[32]等报道了一种基于窄线宽全保偏光纤激光器单通倍频的高功率连续波绿光激光系统,如图 7 所示,该系统采用 1064.79 nm 线宽 20 GHz 的保偏光纤激光作为基频光源,通过相位调制抑制受激布里渊散射,并利用 I 类非临界相位匹配 LBO 晶体进行单通倍频,其绿光输出功率达 321 W,转换效率为 40.9%,光束质量 M^2 因子为 1.07。

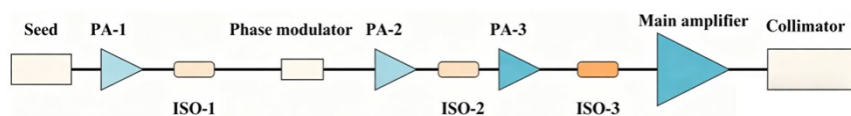


图 7 基于相位调制技术抑制 SBS 效应的窄线宽绿光光纤激光器

Fig. 7 A narrow-linewidth green optical fiber laser based on phase modulation technology to suppress the SBS effect

3.2.2 基于环形腔结构的光纤激光器线宽压缩方案

环形腔结构通过构建闭合光纤光路,使光子单向传播,消除空间烧孔效应,同时延长光子腔内寿命,增强模式竞争,有效解决了光纤激光器长腔易产生多纵模的问题,且便于集成偏振控制器、光隔离器等选模元件,进一步提升线宽压缩效果。

Sultana^[48]等设计了一种基于非线性偏振旋转(NPR)技术的 635 nm 被动锁模光纤激光器。该激光器采用环形腔结构,以单包层 $\text{Pr}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺 ZBLAN 光纤为增益介质,通过双波长 852 nm 激光二极管泵浦,在耗散孤子共振(DSR)机制下实现稳定锁模。实验测得输出激光中心波长为 634.9 nm,线宽约 0.05 nm,基频重复频率 34.5 MHz,信噪比达 60 dB,最大平均输出功率 5.5 mW,对应单脉冲能量 0.16 nJ。该系统结构紧凑、成本较低,为实现可见光波段超快光子光源提供了可行方案,在超快光子学领域具有应用前景。

Han^[33]等报道了一种基于环形谐振腔与周期性极化铌酸锂(PPLN)晶体的高效频率倍频系统,

将 1552 nm 激光倍频至 776 nm。该系统采用两种不同透射率($T=4.5\%$ 与 $T=9.1\%$)的输入耦合镜。实验测得两个耦合器的最大外转换效率分别为 65.8% 与 65.9%,考虑模匹配效率与滤波透射率后,对应的内转换效率分别为 85.0% 与 88.2%。在 535 mW 与 999 mW 泵浦功率下,最大输出功率分别为 333 mW 与 602 mW。该研究充分验证了环形腔在基频光窄线宽调控与倍频效率提升中的协同作用,为中低功率窄线宽可见光光纤激光器提供了高效技术路径。

3.2.3 基于复合腔结构的可见光窄线宽光纤激光器

复合腔结构由多个子腔耦合构成,通过多级选模实现线宽压缩,同时可以优化子腔参数抑制受激布里渊散射效应(SBS),适配光纤激光器高功率输出需求,尤其适用于激光导星等对功率与线宽均有严苛要求的场景。Zhang 等^[34]人报道了 589 nm 激光系统的功率定标研究,如图 8 所示种子激光为 10 mW 的 1178 nm DFB 激光器,并在第一级放大器中预放大至 1 W。第二级放大器的拉曼增益光纤为 35 m 长的保偏光纤,采用纵向变化

的应变来抑制 SBS 效应。在拉曼光纤放大器 (RFA) 中, 当最大泵浦功率为 300 W 时, 实现了 86 W 的单频 1178 nm 激光输出, 且未达到 SBS 阈

值。在外腔倍频效率为 80 % 的情况下, 获得了功率 52.7 W、线宽 1.71 GHz 的 589 nm 激光输出, 为激光导星提供了合适的激光光源。

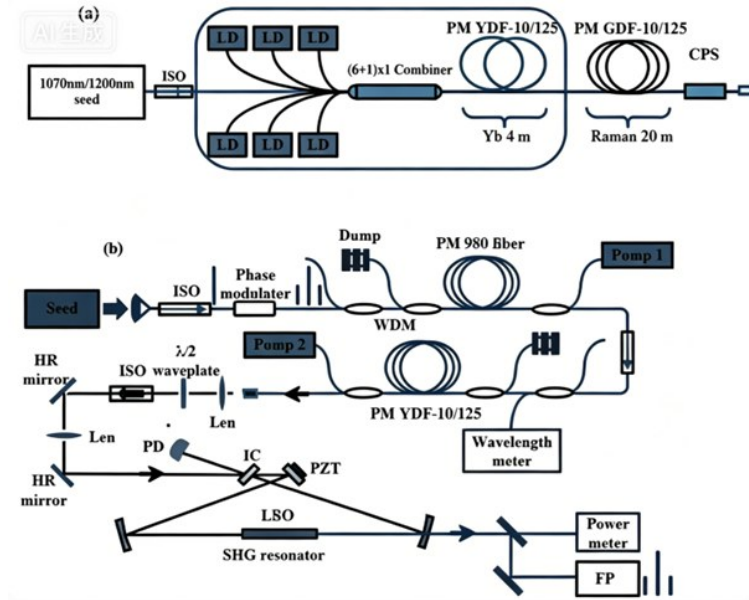


图 8 基于复合腔结构的 589 nm 窄线宽激光器。(a) 掺 Yb 混合拉曼光纤放大器; (b) 589 nm 激光系统

Fig. 8 A 589 nm narrow linewidth laser based on a composite cavity structure. (a) Yb-doped hybrid Raman fiber amplifier; (b) 589 nm laser system

光纤激光器因其散热好、体积小等优势, 利用倍频技术、合束技术, 在绿光波段实现了数百瓦、千瓦级高功率、窄线宽激光输出, 线宽可压缩至 GHz 量级, 如表 1 所示。高功率窄线宽光纤激光器的线宽压缩受限于功率提升时引发的非线性效应: 随着激光功率密度显著提升, SBS 率先达到阈值, 为降低 SBS 带来的相位噪声干扰, 通常需引入相位调制主动展宽种子光谱; 同时, 功率提升过程中横模不稳定性 (TMI)、自相位调制等非线性效

应及自发辐射噪声会进一步使光谱展。在此类展宽后的复杂光谱条件下进行非线性频率变换时, 各光谱分量与非线性晶体的相位匹配条件存在差异, 导致仅中心波长附近的分量能够高效参与倍频, 而边带分量因相位失配贡献极低, 从而严重降低整体倍频转换效率。而全光纤化结构也提升了系统的稳定性与集成性, 成为高功率绿光窄线宽激光应用的主流方案, 同时仍需进一步突破非线性效应带来的性能限制。

表 1 绿光窄线宽高功率激光器

Tab. 1 Green light narrow linewidth high power laser

年分	研究机构	激光功率 (W)	激光线宽 (GHz)	转换效率	参考文献
2014	IPG	356	20	35%	[36]
2014	IPG	356	20	52%	[36]
2015	IPG	550	20	70%	[37]
2017	Osaka University	600	—	67%	[38]
2020	Coherent Shanghai	1000	45	54%	[39]
2021	Institute of Optics Fine Mechanics	321	20	40.9%	[35]
2021	Shanghai Institute of Optics Fine Mechanics	610	20	56.27%	[40]
2026	China Academy of Engineering Physics	1600	137.8	60%	[53]
2026	Shanghai Institute of Optics Fine Mechanics	1823	—	65.1%	[54]

3.3 可见光波段半导体激光器线宽压缩技术

窄线宽半导体激光器以半导体芯片为增益介质, 具有体积小、重量轻、效率高、等优势, 核心特

点是集成化潜力大、响应速度快, 适用于激光雷达、便携光谱仪、集成光学系统等场景。目前 Top-tica 公司^[41]已经研制出了 DL-Pro 外腔型半导体激

光器,中心波长为 698 nm,输出功率约为 31 mW,自由运转线宽约为 1 MHz。

3.3.1 基于内腔光反馈线宽压缩技术

内腔光反馈通过在半导体谐振腔内集成布拉格光栅,利用光栅的波长选择性实现反馈与选模,无需外部光学元件,保持了半导体激光器紧凑集成的核心优势。DBR结构在谐振腔一端或两端集成窄带布拉格光栅,借助光栅的波长选择性实现精准纵模筛选,通过强化模式竞争抑制噪声扰动,线宽可压缩至窄光谱范围,兼具结构紧凑、波长稳定性优异的特点,适用于对光谱纯度与稳定性要求严苛的高功率固定波长场景。Reinhold 等人^[42]报道的渐逝耦合 DBR 激光阵列,采用 AlGaAs 材料体系与 InGaAsP 量子阱结构,在 760 - 770 nm 波段实现高性能输出。如图 9 所示,该器件通过 17 个脊形波导组成阵列结构,搭配 500 μm 长的 DBR 光栅段,实现线宽仅 0.2 nm 的窄光谱发射,边模抑制比最高达 48 dB;在 20 $^{\circ}\text{C}$ 时输出功率达 600 mW,5 $^{\circ}\text{C}$ 时提升至 700 mW,表明了 DBR 结构在高功率、窄线宽场景的显著优势。

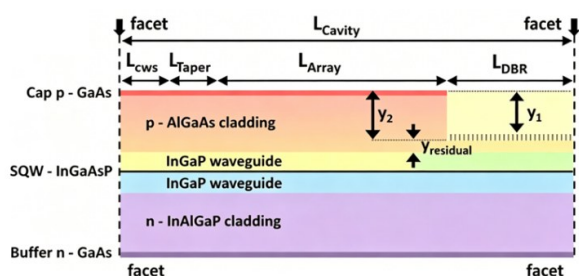


图 9 760 - 770 nm 波段的 DBR 半导体激光器

Fig. 9 DBR semiconductor laser in the 760 - 770 nm wavelength band

DFB 结构将布拉格光栅与增益介质直接耦合,形成分布式反馈机制,通过相位匹配条件实现单纵模振荡,无需额外选模元件,集成度更高,线宽压缩效果更优。Heikki^[43]等人报道了一种基于紫外纳米压印光刻技术制备的 780 nm 窄线宽分布 4 反馈半导体激光器,如图 10 所示其采用无再生长工艺的侧向耦合脊形波导表面光栅结构,实现了高光谱纯度与低线宽的单模输出。在 300 mA 驱动电流下输出功率达 28.9 mW,边模抑制比高达 40-55 dB 线宽约为 10 kHz,低于同类 DFB 激光器。

3.3.2 基于外腔光反馈线宽压缩技术

基于外腔光反馈技术(ECL)的窄线宽半导体

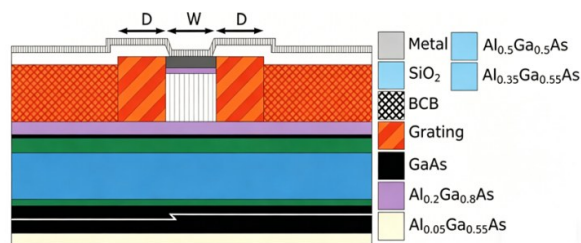


图 10 LC-RWG DFB 激光器结构横向截面示意图

Fig. 10 Schematic diagram of the transverse cross-section of the LC-RWG DFB laser structure

激光器,通过引入外部光学元件对激光芯片输出光束进行反馈与频率选择,有效延长谐振腔的光学长度,提升谐振腔品质因子,从而显著压缩激光线宽。

Littrow/Littman 构型通过面光栅或“光栅-反射镜”折叠结构实现频率选择与反馈,Littrow 型光路简单、调谐范围宽,而 Littman 型调谐精度高、偏振稳定性优。Chen 等^[44]成功研制了一种基于 445 nm InGaN 激光二极管的 Littrow 构型外腔二极管激光器(ECDL),该激光器在整个工作范围内实现了单纵模输出。研究表明,该 ECDL 的最大输出功率为 20 mW,斜率效率约为 0.36 W/A,其线宽在 20 mA 注入电流下被压缩至 4.7 MHz,并随电流增大展宽至 8.1 MHz。

VBG 外腔结构利用 VBG 的窄带滤波特性实现外腔锁频,可同时实现多芯片合束与线宽压缩,适配高功率输出需求。Han 等^[45]设计一种基于体布拉格光栅外腔反馈结构的高功率、窄线宽蓝光二极管激光器。该系统采用九个单发射器蓝光二极管激光芯片,通过空间光束合束技术与单一 VBG 进行外腔锁频,实现了中心波长 444.36 nm、光谱线宽 0.18 nm 的稳定输出。在 3 A 工作电流下,经 105 μm 芯径、数值孔径 0.22 的光纤输出功率达 40.3 W,外腔反馈效率超过 101.8%,光纤耦合效率为 88%,系统总电光转换效率为 35.22%。

3.4 讨论与展望

本文主要对激光器中使用的线宽压缩方法进行了概述,表 2 梳理了可见光光源线宽压缩方案的代表性成果,并对不同方法的优缺点进行了比较。在激光器技术路径发展方面,固体、光纤、半导体三类激光器呈现鲜明的差异化发展格局:固体激光器通过 F-P 标准具、环形腔、扭摆腔及种子注入等结构设计,在红、绿、蓝多波段实现瓦级至数十瓦级单频输出,线宽可达 MHz 至 kHz 量级,光

表 2 三种固体激光器线宽压缩方案优缺点对比

Tab. 2 Comparison of the advantages and disadvantages of three solid-state laser linewidth compression schemes

激光器分类	研究机构	压缩方式	激光波长	激光功率(能量)	激光线宽	非线性频率变换转换效率	优点	缺点
固体激光器	天津大学 ^[22]	F-P腔	590nm	1.14W	4 GHz	6.1%	结构简单	引入插入损耗
	中国科学院物理研究所 ^[24]	扭摆腔	589nm	86.1W	440 MHz	30.1%	结构紧凑、有效消除空间烧孔效应	系统复杂、对激光偏振态及热效应敏感
	山西大学 ^[25]	环形腔	532nm	12 W	<150 kHz	23.1%	应、腔内可以插入多种光学元件	系统复杂
	中国科学院上海光学精密机械研究所 ^[27]	非平面环形腔	486nm	23.8 mJ	<600MHz	40.7%	结构紧凑、稳定性较强	激光晶体设计复杂、调节范围有限
光纤激光器	天津大学 ^[30]	种子注入技术	765nm	9.17 W	410MHz	21.6%	获得高功率激光输出	系统复杂、受外界环境影响较大
	华南理工大学 ^[31]	短腔法	489nm	68 mW	<15 kHz	30.3%	结构紧凑	调节范围有限,不适用于较高功率
	埼玉大学 ^[48]	环形腔	635nm	5.5 mW	37.2GHz	—	消除空间烧孔效应	线宽压缩能力有限
	中国科学院上海固体激光与应用重点实验室 ^[34]	复合腔	589nm	52.7 W	1.71GHz	80%	有效抑制模式不稳定效应	系统复杂
半导体激光器	坦佩雷大学 ^[43]	分布式反馈	780nm	28.9mW	10kHz	—	体积小成本低	工艺复杂
	德国维尔茨堡大学 ^[42]	分布式布拉格反馈	756nm	700mW	105GHz	—	抗干扰	稳定性差
	台湾国立成功大学 ^[44]	Littrow 结构	445nm	20mW	4.7MHz	—	结构紧凑、波长可调谐	光路简单、调谐范围宽
	中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 ^[45]	体布拉格光栅结构	444nm	40.3W	274GHz	—	便于集成、体积小	对温度和机械干扰很敏感

束质量优异,但系统结构相对复杂,受热效应影响显著。光纤激光器依托优良热管理能力与全光纤结构优势,通过倍频技术将红外窄线宽激光高效转换为可见光,实现数百瓦级高功率输出,线宽可达 kHz 量级,成为中高功率应用的主流方案。半导体激光器聚焦小型化与集成化,通过内腔 DFB、DBR 反馈直接产生窄线宽可见光,外腔 VBG 反馈技术进一步压缩线宽并稳定波长,展现出巨大的集成应用潜力。

优化谐振腔构型是实现线宽压缩的主要方法之一,可以实现 kHz 量级的线宽输出。若要将窄线宽激光器的应用领域进一步扩展至原子光钟、相干光通信等领域,需要进一步压缩线宽。近年来,研究人员利用单模光纤的受激布里渊散射的超窄增益带宽及其噪声抑制能力,可以实现亚 kHz 至 Hz 量级的超窄线宽激光输出。除此之外,还可以通过受激拉曼散射(SRS)过程中的增益谱滤波效应与拉曼放大的光谱整形作用,在光纤系统中对泵浦光的线宽进行窄化。Luo 等^[52]报告了

一种直径为 117 μm 的薄膜铌酸锂碟片式芯片级可见光布里渊微腔激光器。通过色散工程与光-声子相互作用,实现了近红外(1559.718 nm)斯托克斯布里渊激光及其倍频光(779.859 nm)的同时输出。该布里渊激光阈值仅 1.81 mW,本征线宽约 254 Hz,倍频光线宽 864 Hz。该工作首次在单片集成平台上实现了可见光与近红外双波段、超窄线宽的布里渊激光,为片上量子光学与精密测量提供了紧凑高效的光源。

随着谐振腔构型的不断优化以及自发辐射噪声的抑制,可见光光源的相干性将大幅提升。未来,窄线宽可见光光源将在以下几个方面有重要应用价值:一、用于高效精密铜材料加工的高功率绿光窄线宽激光器,由于铜对 1 μm 近红外激光吸收率低于 5%,而绿光吸收率为其 8 倍以上,更适用于对铜材料焊接。采用掺镱窄线宽线偏振光纤激光器倍频产生绿光,可兼顾光纤激光器光束质量好、结构紧凑及热管理便捷等优势。二、基于氮化硅波导的可见光光子集成技术,利用其低损耗、

宽透明窗口及高损伤阈值,在片上实现高品质因子谐振腔与窄带滤波,推动激光器的小型化与稳定集成;三是单晶光纤的应用,凭借其高热导率与低非线性系数,有效抑制高功率下的热透镜与光谱展宽,突破功率与线宽相互制约的瓶颈;四是引入人工智能算法(如强化学习、深度神经网络)实现激光器自动锁频与线宽优化,通过实时感知环境扰动并自适应调整反馈参数,超越传统伺服控制的性能极限,在复杂工况下维持超窄线宽与长期稳定性。

4 结 论

可见光波段激光器经线宽压缩技术处理后,展现出超高光谱纯度、优异相干特性及稳定功率输出等核心优势,已成为海洋探测、生物医学、激光光谱学、航天卫星及微波场强测量等前沿领域不可或缺的关键光源。其发展始终围绕线宽压缩这一核心课题展开,激光线宽的本质源于增益介质中自发辐射引发的相位与强度随机扰动,叠加温度波动、机械振动等外部经典噪声的耦合作用,共同制约着激光相干性能的提升。

文中分别梳理了固体、光纤及半导体三类激光器的技术特征:固体激光器依托 F-P 标准具、环形腔、非平面环形腔及种子注入等结构,可实现多

波段单频窄线宽输出,线宽可达 kHz 至 MHz 量级,但系统复杂度与热效应较为显著;光纤激光器凭借优良热管理与全光纤集成优势,结合相位调制、复合腔及倍频技术,可实现高功率窄线宽可见光输出,同时通过受激拉曼与受激布里渊散射实现深度线宽压窄,但高功率下 SBS、TMI 等非线性效应仍构成主要限制;半导体激光器通过内腔光反馈及外腔光反馈调制,实现小型化线宽输出,在集成光子系统中具备突出潜力。此外,非线性频率变换作为拓展可见光光源的关键手段,可将红外窄线宽激光高效转换至可见光,并进一步拓宽光源应用范围。

综合来看,可见光窄线宽激光技术正朝着超窄线宽、高功率、高稳定性与片上集成方向发展,基于薄膜铌酸锂等高 Q 值微腔的布里渊等新架构,已实现 Hz 量级超窄线宽输出,为精密计量、量子传感、原子物理与空间探测等领域提供了核心光源支撑,未来将在材料体系、腔型设计、非线性调控与智能稳频等方向持续突破。

本文(补充文件及)专家审稿意见和作者回复内容下载地址: [http://cjl.lightpublishing.cn/thesisDetails#10.37188/CJL.2024*****\(2024****为文章稿号\)](http://cjl.lightpublishing.cn/thesisDetails#10.37188/CJL.2024*****(2024****为文章稿号))。

参 考 文 献:

- [1] MAIMAN T. Stimulated Optical Radiation in Ruby [J]. *Nature*, 1960, 187: 493 - 494.
- [2] FRANKEN P A, WARD J F. Optical harmonics and nonlinear phenomena [J]. *Reviews of Modern Physics*, 1963, 35 (1): 23-39.
- [3] 马剑, 朱小磊, 陆婷婷, 等. 海洋应用高峰值功率蓝光脉冲激光器技术研究 [J]. *光学学报*, 2022, 42(17): 10. MA J, ZHU X L, LU T T, et al. Research on High-Peak-Power Blue Pulse Laser Technology for Marine Applications [J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(17): 10. (in Chinese).
- [4] SOLONENKO M G, MOBLEY C. D. Inherent optical properties of jerlov water types [J]. *Applied Optics*, 2015, 54 (17): 5392-5401.
- [5] OLIVEIRA J P, SHEN J, ESCOBAR J D, et al. Laser welding of H-phase strengthened Ni-rich NiTi-20Zr high-temperature shape memory alloy [J]. *Materials & Design*, 2021, 202: 109533.
- [6] ZHANG M, JIANG L, HUANG Z. Adaptive optics technology and urban horizontal link laser communication system [J]. *Optical Engineering*, 2021, 60(11): 116107.
- [7] 伍亚东, 朱仁江, 晏日, 等. 高转换效率腔内倍频外腔面发射蓝光激光器 [J]. *物理学报*, 2024, 73(1): 174-180. WU Y D, ZHU R J, YAN R, et al. High conversion efficiency intracavity frequency-doubled external cavity surface-emitting blue laser [J]. *Acta Physica Sinica*, 2024, 73(1): 174-180. (in Chinese).
- [8] ORGEVILLE CD, BENNET F, BLUNDELL M, et al. A Sodium Laser Guide Star Facility for the ANU/EOS Space Debris Tracking Adaptive Optics Demonstrator [C]. *Conference on adaptive optics systems*, San Diego, California.
- [9] WIZINOWICH P. Progress in laser guide star adaptive optics and lessons learned [C]. *Adaptive optics systems III, part*

- I: 3rd Conference on adaptive optics systems. , 1-6 July 2012, Amsterdam, Netherlands.*
- [10] JIA P Q, ZHANG L, JIANG H W, *et al.* 2 W single-frequency, low-noise 509 nm laser via single-pass frequency doubling of an ECDL-seeded Yb fiber amplifier [J]. *Applied Optics.* , 2018, 57(29): 8733-8737.
- [11] SCHAWLOW A L, TOWNES C H. Infrared and optical masers [J]. *Physical Review.* , 1958, 112(6): 1940.
- [12] JEONG Y D, WON Y H, CHOI S C, *et al.* Tunable single mode Fabry-Perot laser diode using a built-in external cavity and its modulation characteristics [J]. *Optics Letters.* , 2006, 31(17): 2586-2588.
- [13] V, Evtuhov, Siegman A. E. . A "Twisted-Mode" Technique for Obtaining Axially Uniform Energy Density in a Laser Cavity [J]. *Applied Optics.* , 1965, 4(1): 142-143.
- [14] HUANG J Q, WEN J X, WAN Y, *et al.* Sub-kHz-linewidth continuous-wave single-frequency ring-cavity fiber laser based on high-gain Er: YAG crystal-derived silica fiber [J]. *Optics Express.* , 2023, 31(4): 5951-5962.
- [15] Numata K. Laser system development for gravitational-wave interferometry in space [J]. *Proceedings of SPIE.* , 2018, 10511(000): 8.
- [16] 高娇, 延凤平, 冯亭, 等. 基于复合双环腔及饱和吸收体的单纵模窄线宽掺铽光纤激光器 [J]. *中国激光*, 2023, 50(23): 38-46.
- GAO J, YAN F P, FENG T, *et al.* Single-mode Narrow-Linewidth Thulium-Doped Fiber Laser Based on Composite Double-Cavity and Saturated Absorber [J]. *Chinese Journal of Lasers.* , 2023, 50(23): 38-46 (in Chinese).
- [17] LANG X, JIA P, CHEN Y, *et al.* Advances in narrow linewidth diode lasers [J]. *Scientia Sinica Informationis.* , 2019, 49(6): 649-662.
- [18] DUAN C C, WANG H P, HU X, *et al.* High-power narrow-linewidth tunable blue laser diode array utilizing a blazed grating external cavity [J]. *Optics Express.* , 2024, 32: 44346-44357.
- [19] DING D, LV X, CHEN X, *et al.* Tunable high-power blue external cavity semiconductor laser [J]. *Optics & Laser Technology.* , 2017, 94: 1-5.
- [20] CHEN D, FANG Z, CAI H, *et al.* Polarization Characteristics of an External Cavity Diode Laser With Littman-Metcalf Configuration [J]. *IEEE Photonics Technology Letters.* , 2009, 14: 21.
- [21] WANG F, ZHAO G, MENG J, *et al.* Widely tunable narrow-linewidth ZGP optical parametric oscillator with injection of single frequency seed [J]. *Optics & Laser Technology.* , 2025, 181(PartB).
- [22] QUAN S, ANDREW LEE, DAVID SPENCE, *et al.* Wavelength tuning and power enhancement of an intracavity Nd: GdVO₄-BaWO₄ Raman laser using an etalon [J]. *Optics Express.* , 2018, 26(24): 32145-32155.
- [23] 方燕. 高效率窄线宽 486 nm 蓝光激光器研究 [D]. 长春: 长春理工大学, 2024.
- Fang Yan. *Research on High-Efficiency Narrow-Waveband 486 nm Blue Light Laser* [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2024. (in Chinese).
- [24] BIAN Q, BO Y, ZUO J W, *et al.* High-power repetition rate- and pulse width-tunable 589nm versatile laser for adaptive optical systems [J]. *Optics express.* , 2020, 28(9): 13895-13906.
- [25] LIU J, WANG Z, LI H, alet, 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.
- [26] XUE Y, DAI R, XU H, *et al.* High-power single-longitudinal-mode visible Pr: YLF ring lasers [J]. *Optics & Laser Technology.* , 2025, 180: 111495.
- [27] SONG Y, YU Z, LI S, *et al.* Tunable and injection-seeded operation of a narrow-linewidth BBO optical parametric oscillator pumped by 355 nm laser [J]. *Optics & Laser Technology.* , 2025, 192(PartC).
- [28] DAI T Y, WU J, JU L, *et al.* A tunable and single-longitudinal-mode Ho: YLF laser [J]. *Infrared Physics & Technology.* , 2016, 77: 149-152.
- [29] GIBERT F, FLAMANT P H, BRUNEAU D, *et al.* Two-micrometer heterodyne differential absorption lidar measurements of the atmospheric CO₂ mixing ratio in the boundary layer [J]. *Applied Optics.* , 2006, 45(18): 4448-4458.
- [30] 张若凡, 白云涛, 蒋国鑫, 等. 基于 OPO 的种子注入窄线宽可调谐钛宝石激光器 [J]. *红外与激光工程*, 2025, 54(10): 123-131.
- ZHANG R F, BAI Y T, JIANG G X, *et al.* Seed Injection Narrow-Waveband Tunable Titanium Sapphire Laser Based on OPO [J]. *Infrared and Laser Engineering.* , 2025, 54(10): 123-131. (in Chinese).
- [31] YANG C S, HUANG, Z P, DENG, H Q, *et al.* Ultra-compact all-fiber narrow-linewidth single-frequency blue laser at 489

- nm [J]. *Journal of optics.*, 2018, 20(2).
- [32] SU M Q, YANG Y, ZHAO Q, SHEN H, alet, 321 W high-efficiency continuous-wave green laser produced by single-pass frequency doubling of narrow-linewidth fiber laser [J]. *Applied. Optics.*, 2021, 60:3836-3841.
- [33] HAN Z H, LIU S L, LIU S K, *et al.* Efficient frequency doubling at 776 nm in a ring cavity [J]. *Optics Communications.*, 2017, 396:146-149.
- [34] ZHANG L, JIANG H W, CUI S Z, *et al.* Over 50 W 589 nm single frequency laser by frequency doubling of single Raman fiber amplifier [C]. *2014 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO) – Laser Science to Photonic Applications, America.*
- [35] SU M Q, YANG Y, ZHAO Q, SHEN H, alet, 321 W high-efficiency continuous-wave green laser produced by single-pass frequency doubling of narrow-linewidth fiber laser [J]. *Applied. Optics.*, 2021, 60:3836-3841.
- [36] GAPONTSEV V, AVDOKHIN A, KADWANI P, *et al.* SM green fiber laser operating in CW and QCW regimes and producing over 550 W of average output power [J]. *Proceedings of SPIE.*, 2014, 8964: 896407.
- [37] AVDOKHIN A, GAPONTSEV V, KADWANI P, *et al.* High average power quasi-CW single-mode green and UV fiber lasers[J]. *Proceedings of SPIE.*, 2015, 9347: 934704.
- [38] TSUBAKIMOTO K, YOSHIDA H, MIYANAGA N. 600 W green and 300 W UV light generated from an eight-beam, subnanosecond fiber laser system [J]. *Optics Letters.*, 2017, 42(17): 3255-3258.
- [39] AHMADI P, CREEDEN D, ASCHAFFENBURG D, *et al.* Generating kW laser light at 532 nm via second harmonic generation of a high power Yb-doped fiber amplifier [J]. *Proceedings of SPIE.*, 2020, 11264: 1126414.
- [40] 苏梦琪, 尤阳, 全昭, 等. 高效率单通倍频实现 610 W 连续波单模绿光输出[J]. *中国激光*, 2021, 48(13): 1315002.
SU M Q, YOU, QUAN Z, *et al.* High-efficiency single-pass frequency doubling for 610 W continuous-wave single-mode green light output [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(13): 1315002 (in Chinese).
- [41] 张林波, 许冠军, 刘杰, 等. 用于锶光钟的 698nm 窄线宽激光研究进展 [C]. 第四届中国卫星导航学术年会论文集 -S4 原子钟技术与时频系统, 中国, 武汉.
ZHANG L B, XU G Z, LIU J, *et al.* Research Progress on 698nm Narrow-Wave Laser for Strontium Optical Clock [C]. *Proceedings of the 4th China Satellite Navigation Academic Annual Conference – S4 Atomic Clock Technology and Time-Frequency System, Wuhan, China*(in Chinese).
- [42] ALEXANDER R, MARC F, WOLFGANG Z, *et al.* Evanescently coupled DBR laser arrays in the 760 – 770 nm wavelength range[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 31, 1319-1322.
- [43] VIRTANEN, HEIKKI, UUSITALO, *et al.* Narrow-Linewidth 780-nm DFB Lasers Fabricated Using Nanoimprint Lithography [J]. *IEEE Photonics Technology Letters.*, 2018, 30(1):51-54.
- [44] CHEN M H, HSIAO S C, SHEN K T, *et al.* Single longitudinal mode external cavity blue InGaN diode laser [J]. *Optics & Laser Technology.*, 2019, 116:68-71.
- [45] HAN J, ZHANG J, SHAN X, *et al.* High-power narrow-linewidth blue external cavity diode laser [J]. *Optics & Laser Technology.*, 2023:108974.
- [46] SAITO S, NILSSON O, YAMAMOTO Y. Oscillation center frequency tuning, quantum FM noise, and direct frequency characteristics in external grating loaded semiconductor lasers [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics.*, 1982, 18(6): 961-970.
- [47] PODOSKIN A, GOLOVIN V, GAVRINA P, *et al.* Ultrabroad tuning range (100 nm) of external-cavitycontinuous-wave high-power semiconductor lasers based on a single InGaAs quantum well [J]. *Applied Optics.*, 2019, 58(33): 9089-9093.
- [48] SULTANA N, NISHIURA M, SHIODA T. Nonlinear polarization rotation based 635-nm praseodymium doped mode-locked fiber laser [J]. *Applied Physics Express.*, 2024, 17(11):112002.
- [49] SHI H S, LU B K, ZHANG H Q, *et al.* Reducing statistical noise in frequency ratio measurement between Ca^+ and Sr optical clocks with a frequency-synthesized local oscillator from a Sroptical clock [J]. *Photonics Research.*, 2024, 12(11): 2741.
- [50] 彭柏语, 袁晨智, 张瑞明, 等. 用于量子通信的增益开关半导体激光器研究进展[J]. *光学学报*, 2022, 42(3): 0327007.

- PENG B Y, YUAN C Z, ZHANG R M, *et al.* Progress in gain-switched semiconductor lasers for quantum communication [J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(3):0327007. (in Chinese).
- [51] 魏荣,李耀,汪凌珂,等. 冷原子微波频标的原理与发展[J]. 中国激光,2024,51(11):333-349.
- WEI R, LI Y, WANG L K, *et al.* Principles and Development of Cold Atom Microwave Frequency Standards [J]. *Chinese Journal of Lasers.*, 2024, 51(11): 333-349. (in Chinese).
- [52] LUO X, LI C, HUANG X, *et al.* Visible Brillouin-quadratic microlaser in a high-Q thin-film lithium niobate microdisk [J]. *Nature Communications.*, 2025, 11533.
- [53] 王思懿,王尧,王佳伟,等. 基于高功率窄线宽光纤激光倍频的 1.6 kW 绿光光源(简讯)[J]. 中国激光,2026,53(03):184-185.
- WANG S Y, WANG Y, WANG J W, *et al.* 1.6 kW Green Light Source Based on High-Power Narrow-Linewidth Fiber Laser Frequency Doubling (Brief News) [J]. *Chinese Journal of Lasers.*, 2026, 53(03): 184-185. (in Chinese).
- [54] 李秋瑞,全昭,沈辉,等. 高功率连续波绿光激光器实现 1.8 kW 单模输出[J]. 光学学报,2026,3(01):100-101.
- LI Q R, QUAN Z, SHEN H, *et al.* Realization of 1.8 kW single-mode output from a high-power continuous-wave green laser [J]. *Acta Optica Sinica.*, 2026, 3(01): 100-101. (in Chinese).



孟诗涵(1998-),女,吉林延边人,硕士研究生,研究实习员,2024年于北京理工大学获得硕士学位,主要从事固体激光技术的研究。
E-mail: mengshihan@ciomp. ac. cn



付喜宏(1980-),男,内蒙古巴彦淖尔人,博士,研究员,2008年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事脉冲激光技术及应用方面的研究。
E-mail: fuxh@ciomp. ac. cn