

文章编号:1001-5078(2026)02-0164-09

· 综述与评论 ·

## 激光外腔谐振倍频技术研究进展

刘润攀<sup>1,2</sup>, 颜博霞<sup>1</sup>, 李岩<sup>2</sup>, 周密<sup>1</sup>, 亓岩<sup>1</sup>, 余洋<sup>1</sup>, 王延伟<sup>1</sup>, 范元媛<sup>1</sup>, 王倩<sup>1</sup>

(1. 中国科学院微电子研究所 光电技术研发中心, 北京 100094;

2. 长春理工大学 高功率半导体激光国家重点实验室, 吉林 长春 130013)

**摘要:** 外腔谐振倍频技术因能实现高转换效率、窄线宽的单频连续短波段激光, 在精密测量、量子光学、先进制造等领域展现出巨大潜力, 获得科研人员的青睐。本文简要介绍了外腔谐振倍频技术原理, 以及光学谐振腔的锁定方法, 并全面梳理了该技术在半导体激光器、光纤激光器和固体激光器作为基频光源倍频的研究进展, 重点介绍了波长、输出功率、转换效率以及激光线宽等技术指标, 并介绍本课题组的研究成果, 采用窄线宽单频光纤激光器作为基频光源, 实现倍频 532 nm, 功率 10.6 W 的单频连续绿光输出。

**关键词:** 外腔谐振; 单频; 稳频技术; 倍频转换效率

中图分类号: O437; TH248 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1001-5078.2026.02.002

## Research progress on resonant frequency doubling of external cavities

LIU Run-pan<sup>1,2</sup>, YAN Bo-xia<sup>1</sup>, LI Yan<sup>2</sup>, ZHOU Mi<sup>1</sup>, QI Yan<sup>1</sup>,  
YU Yang<sup>1</sup>, WANG Yan-wei<sup>1</sup>, FAN Yuan-yuan<sup>1</sup>, WANG Qian<sup>1</sup>

(1. R&D Center of Optoelectronic Technology, Institute of Microelectronics of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China; 2. National Key Laboratory of High Power Semiconductor Laser, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130013, China)

**Abstract:** External cavity resonant frequency doubling technology has significant potential in precision measurement, quantum optics, and advanced manufacturing, and receives the favor of researchers for its ability to produce single frequency continuous short band lasers with high conversion efficiency and narrow linewidth. In this paper, the principle of external cavity harmonic generation technology and the locking methods of optical resonators are briefly introduced. A comprehensive review is conducted on the research progress of this technology in frequency doubling using semiconductor lasers, fiber lasers and solid-state lasers as fundamental light sources. Technical indicators such as wavelength, output power, conversion efficiency, and laser linewidth are highlighted. Additionally, the research achievements are introduced, where a narrow-linewidth single-frequency fiber laser is utilized as the fundamental light source to achieve single-frequency continuous green light output at 532 nm with a power of 10.6 W through frequency doubling.

**Keywords:** external cavity resonant frequency doubling; single frequency; frequency stabilization technology; frequency doubling conversion efficiency

**基金项目:** 国家重点研发计划项目 (No. 2023YFF0718702) 资助。

**作者简介:** 刘润攀 (1999 -), 男, 硕士研究生, 主要从事固体激光工程方面研究。E-mail: 718540671@qq.com

**通讯作者:** 颜博霞 (1980 -), 女, 硕士, 高级工程师, 主要从事集成光子学, 非线性光学频率变换晶体材料, 激光显示固体激光器等方面研究。E-mail: yanboxia@ime.ac.cn

**收稿日期:** 2025-04-10

## 1 引言

当前,高质量单频连续窄线宽激光光源在精密光谱学、量子信息处理、光学频率标准和晶圆检测等领域的应用需求持续增长,其性能要求呈现显著差异化特征<sup>[1-2]</sup>。例如在晶圆检测中,由于晶圆表面缺陷尺寸小、缺陷物质种类复杂,实现高检出率就需要检测光源具有波长短、功率稳定和高光束质量等特点。在冷原子领域相关实验中,需要激光和原子的精细或超精细能级产生相互作用,要求激光线宽窄、频率稳定精度高,因此高功率、窄线宽、高稳频的连续激光光源是开展冷原子实验研究的工作基础。

激光倍频可以得到可见、紫外等更多种类的波长,成为获得短波长激光光源的主要方式。在倍频实验中,常见的是内腔倍频和外腔单通倍频<sup>[3]</sup>,内腔倍频多适用于需要高效率、高功率以及高稳定性激光输出的场景,但激光线宽一般较宽,激光频率稳定性较差。外腔单通倍频配置简单,但光束只与非线性材料发生一次有效作用,转换效率相对较低,常用于高功率的脉冲激光倍频。

相较于内腔倍频和外腔单通倍频,外腔谐振倍频基频光利用率高,可实现高光束质量、高效率的倍频转换,且倍频腔分立于激光谐振腔,稳频精度高,响应速度快,具有高稳定性、单频和窄线宽等特点。因此外腔谐振倍频技术成为单频连续窄线宽激光器的研究热点。

本文对外腔谐振倍频技术的发展进行了详细调研,按照基频光源的不同,分为半导体激光器倍频、光纤激光器倍频和固体激光器倍频三大类,对采用的基频光源、倍频方案及倍频性能进行分析总结,并介绍本课题组光纤激光器外腔谐振倍频的实验结果。

## 2 外腔谐振倍频技术原理

外腔谐振倍频的理论结合了非线性光学与光学谐振腔技术,通过将倍频晶体放于谐振腔内,利用腔的共振效应显著增强基频光功率密度,从而提升倍频效率。

腔型的设计对于实现高效倍频效率是至关重要的。常用的腔型有两镜直腔、V型腔、四镜环型腔等。两镜直腔<sup>[4]</sup>由两面镜子组成一个开放的光学谐振腔,其中一个镜子通常是高反射镜,而另一个则是部分透射镜,允许激光输出。非线性晶体放置在这个直腔内,基频激光在腔内被增强并发生谐振,实现倍频,如图1所示。V型腔<sup>[5]</sup>采用两个相对放置

的镜子形成一个开放的V字形腔体。在这种腔体中,非线性晶体被精准放置,在基频光通过晶体并经由两个镜子之间的多次反射,实现光束强化,并优化相位匹配条件,高效地将基频激光转换为倍频光,如图2所示。四镜环形腔<sup>[6]</sup>则是利用四个镜子构成一个闭合的环路,形成稳定的单向运转行波腔。在这种腔体中,非线性晶体嵌入环路之内,使得激光在环形路径上多次通过晶体,每次通过都参与倍频过程,如图3所示。

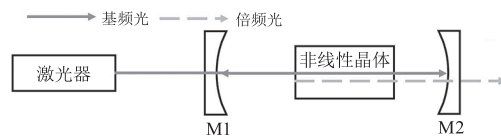


图1 两镜直腔结构示意图

Fig. 1 Schematic representation of two mirror straight cavity construction

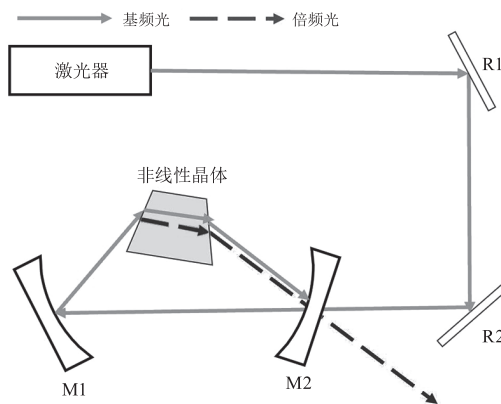


图2 V型腔结构示意图

Fig. 2 Schematic representation of V-shaped cavity configuration

在外腔谐振倍频技术中,三种典型腔体各有特色:两镜直腔结构简单,易于搭建和调试,但在模式控制和光束质量上有所局限,热效应问题非常显著,适用于低功率下的应用场景;V型腔通过其独特的几何排列提高了模式选择性和转换效率,适合追求紧凑型设计的应用,但其腔体设计对某些复杂调控需求可能不够灵活;四镜环形腔则在光束质量和转换效率方面表现出色,其多自由度设计有利于精细调控与热效应补偿,适用于高功率光学倍频。

如图3所示,当入射的基频光在腔内循环一周产生的相移 $\varphi$ 满足 $\varphi = 2k\pi$ 时,通过干涉增强效应,腔内基频光功率极大提高,光的功率密度达到最大,形成谐振<sup>[7]</sup>。腔镜的反射率越高,意味着腔镜能够将更多的光能反射回腔内,从而使得光在腔内来回反射的次数增加,光的能量在腔内累积,导致腔内循

环功率升高。在腔内放入 LBO、PPLN、PPKTP 等非线性晶体,获得倍频激光从输出腔镜(M<sub>4</sub>)输出。谐振倍频效率主要取决于模式匹配和阻抗匹配情况。

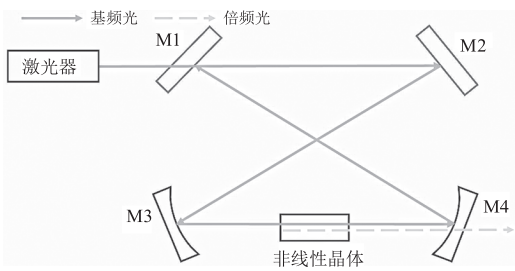


图 3 四镜环形腔结构示意图

Fig. 3 Schematic representation of a four-mirror annular cavity configuration

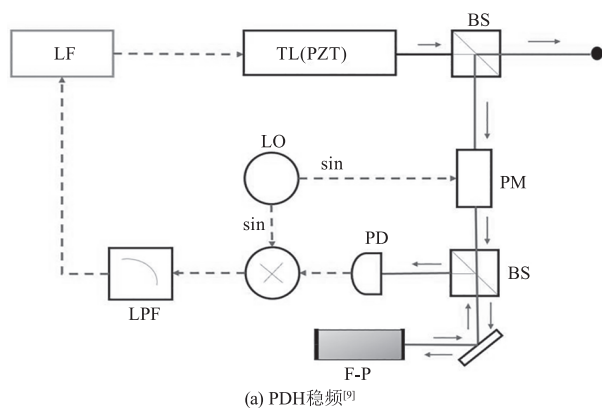
### 3 光学谐振腔锁定方法

为了确保外腔谐振倍频腔能够在一个稳定<sup>[8]</sup>的共振状态下运行,通常需要一个动态的负反馈控制机制来调节腔体的长度,实时地将谐振腔的共振频率与基频光的中心频率进行精确匹配,确保两者同步,此过程称为稳频或者“锁腔”。实验中通过光电探测器获取一个与激光在腔内共振状态相关的误差信号,误差信号的特点是在腔长正好满足共振条件时(即零点位置),信号处于最小或特定基准值。一旦腔长发生变化,导致偏离共振条件,误差信号的值就会偏离,误差信号经过适当的比例积分微分(PID)处理后将反馈电压传递给位于谐振腔上的腔长控制元件(一般为压电驱动器 PZT),形成一个闭环回路,腔长控制元件基于该信号进行调整,直到误差趋零以维持谐振腔的共振。锁频方法主要有两种,一种是 Pound-Drever-Hall(PDH)稳频,另一种是 Hänsch-Couillaud(H-C)稳频。

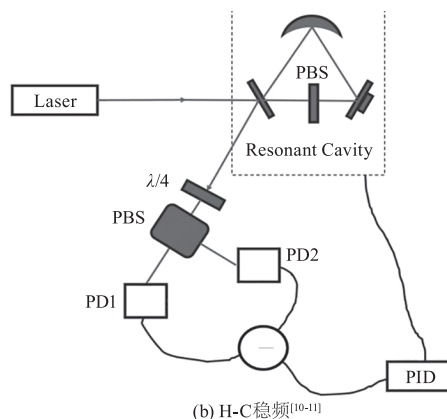
PDH 稳频是一种广泛应用的激光频率稳定技术<sup>[12-14]</sup>,系统组成如图 4(a)所示,激光器(TL)输出的激光经相位调制(PM)后,入射到 F-P 腔上,反射光入射到探测器(PD)上,经适当放大后和调制信号一起输入混频器进行混频解调得到误差信号,再通过 PZT 将激光频率锁定在 F-P 腔峰值频率上实现稳频。

H-C 稳频是由 T. W. Hansch 和 B. Couillaud 提出的一种技术<sup>[10]</sup>。如图 4(b)所示,与 PDH 技术不同的是,该方法不需要对激光器本身直接进行调制操作,而是利用在谐振腔内放置的一个偏振元件来实现。该偏振元件可以使腔内光线的偏振态变为与共振频率相关的椭圆偏振态,再通过一个四分之一波片与偏振分束器(PBS)的组合分出两个正交偏振

态,并用两个探测器(PD<sub>1</sub>、PD<sub>2</sub>)接收后,二者做差后可获得误差信号,并反馈到激光腔镜的 PZT 元件上,对腔长进行精确控制实现稳频。



(a) PDH 稳频<sup>[9]</sup>



(b) H-C 稳频<sup>[10-11]</sup>

图 4 稳频系统组成示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the composition of the PDH frequency stabilization system and H-C lock cavity

PDH 稳频技术优点在于能够极大提升激光频率的稳定性,使激光光束的频率几乎不受光源强度波动的影响,从而显著提高实验精度和稳定性。缺点是需要锁相环,闭环伺服控制较复杂。而 H-C 稳频的优点在于其光路简单无额外的调制,但抗干扰能力较差。

### 4 外腔谐振倍频研究进展

本部分详细介绍外腔谐振倍频技术在激光领域的最新研究进展,特别聚焦于其在半导体激光器、光纤激光器以及固体激光器倍频中的应用。

#### 4.1 半导体激光器外腔谐振倍频

半导体激光器凭借其体积小、电光效率高、寿命长等独特优势,成为了众多领域中不可或缺的光源。然而,受限于其固有的光谱宽度宽的特性,半导体激光器的单色性和波段成为制约其性能提升和应用的关键因素。因此,通过引入外腔谐振技术如倍频、和频等改变输出波长极大地拓宽了半导体激光器的应

用,目前采用该技术已经实现高功率 382 nm、397 nm 以及 426 nm 等紫外光波段输出,在半导体制造、微加工、精密测量等领域有广阔的应用前景。

早期通常采用分布式布拉格反射式 (DBR) 激光器、分布式反馈 (DFB) 激光器等窄线宽半导体激光器进行外腔单通倍频<sup>[15]</sup>。但单通倍频的效率<sup>[16-17]</sup>很难做到 40% 以上,而且线宽压窄也很难达到 pm 以下,因此科研人员使用窄线宽半导体激光器结合外腔谐振倍频获得更高的转换效率和更窄的线宽。

2013 年,丹麦技术大学 Jensen, O. B. 等人<sup>[18]</sup>使用锥形半导体激光器发出基频光,经过光栅压窄线宽,采用外腔谐振倍频获得超过 500 mW 的单横模输出,通过对非线性晶体 PPLN 温度的调整以及利用光学反馈被动锁定到共振频率,实现 530 nm 到 533 nm 可调谐倍频输出,转换效率超过 30% (图 5 所示)。

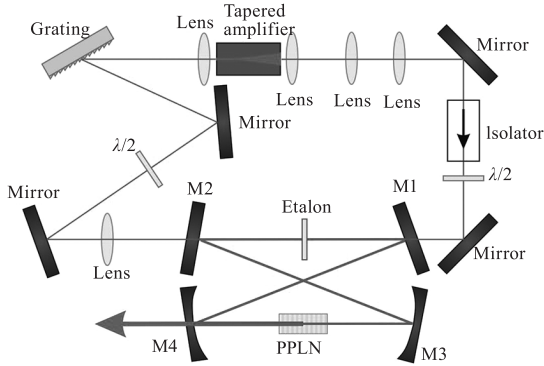


图 5 基于锥形半导体激光器获得 530 ~ 533 nm 激光

Fig. 5 A 530 ~ 533 nm laser based on a conical semiconductor laser

2014 年,山西大学韩亚帅等人<sup>[19]</sup>将一个基频光经过锥形放大器增强,得到线宽为 1 MHz 的 795 nm 的 DBR 激光器,随后与 PPKTP 晶体和 PDH 技术结合,在基频光 416 mW 时成功产生 130 mW 的 397.5 nm 倍频光,倍频转换效率 31%。

2016 年,山西大学温馨等人<sup>[20]</sup>使用波长 795 nm 的 DBR 半导体激光器发出基频光,为了提高光束的质量和稳定性,采用单模保偏光纤对光斑的空间模式进行精细的筛选,免去锁腔的步骤。实验采用具有更低的线性损耗,且结构紧凑,机械稳定性更好的 PPKTP 半整体谐振倍频腔,在基频光功率为 87.5 mW 的条件下,得到 30.3 mW 的 397.5 nm 倍频光,倍频转换效率达到 34.6% (图 6 所示)。

2020 年,山西大学田龙等人<sup>[21]</sup>利用 852 nm 的半导体激光器作为种子源通过半导体锥形放大器后发出的基频光,通过环形腔经过 PPKTP 晶体,外腔

谐振倍频产生 426 nm 激光,对热透镜效应进行深入分析与优化,通过精确调整腔长,使得等效热透镜与谐振腔的腰斑位置的中心基本一致,显著降低由晶体热透镜效应引起的模式不匹配对倍频效率的不利影响。倍频腔锁定采用 PDH 技术,在基频光功率为 515 mW 时产生 428 mW 的 426 nm 倍频光,倍频转换效率高达 83.1% (图 7 所示)。

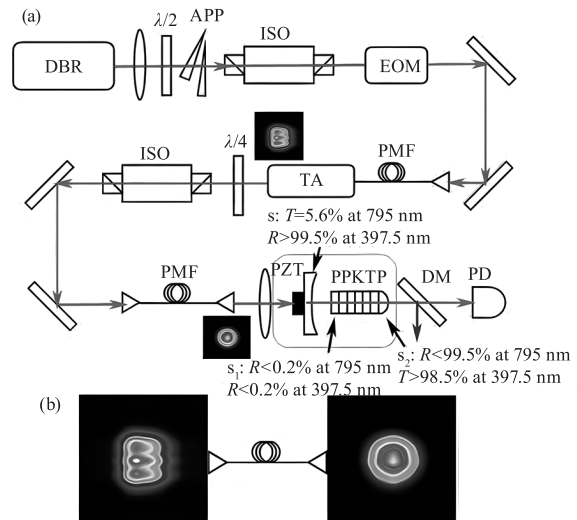


图 6 基于 DBR 二倍频产生 397.5 nm 的激光器

Fig. 6 397.5 nm laser based on DBR frequency doubling

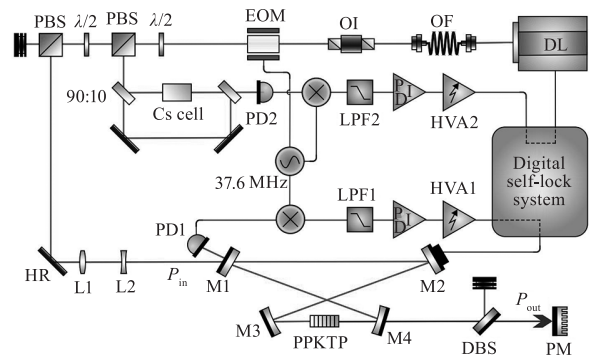


图 7 利用半导体激光器二倍频获得 426 nm 激光

Fig. 7 426 nm laser by frequency doubling of semiconductor laser

2022 年,美国佛罗伦萨大学 SHAMAILA MANZOOR 等人<sup>[22]</sup>使用线宽小于 1 kHz 的 1304 nm 的外腔半导体激光器作为基频光,谐振腔采用非线性弓型腔的设计(图 8),得到更高的基频功率密度,经过两次倍频以及 PDH 和 H-C 锁频技术成功产生了 1 W 的 326 nm 四倍频光,转换效率达 40%。

2023 年,中科院时间频率基准重点实验室陈颖欣等人<sup>[23]</sup>使用 922 nm 的外腔二极管激光器,通过准确地计算晶体内的温度分布,确定热透镜的焦距并调整晶体的位置,实现 94% 的模式匹配效率和 89.2% 的耦合效率,结合 PDH 技术,利用误差信号

调整基频波长,成功获得 382 mW 的 461 nm 倍频光,倍频转换效率为 66.2%。

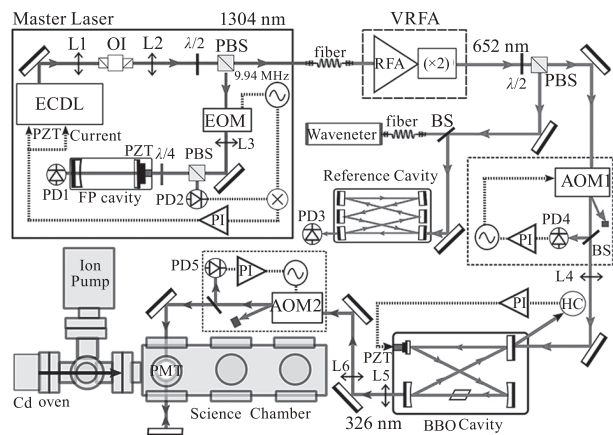


图 8 基于外腔半导体激光器四倍频产生 326.2 nm 的系统光路图

Fig. 8 326.2 nm system optical path diagram based on quadruple frequency of external cavity semiconductor laser

#### 4.2 光纤激光器外腔谐振倍频

光纤激光器以其高功率输出、优秀光束质量和热管理能力在材料加工、传感检测等领域展现出显著优势。外腔谐振技术与光纤激光器结合,通过倍频、和频、四倍频等进一步拓展了光纤激光器的波长范围,为实现高功率 509 nm、422 nm、266 nm 以及 193 nm 等蓝紫光波段单频连续激光提供了更好的技术解决方案,在光子计算、原子钟、晶圆检测等领域有广阔的应用前景。

光纤激光器的外腔单通倍频方案结构简单,在高频脉冲光纤激光器倍频中应用广泛,但在连续光纤激光器中,单通倍频的效率一般在 20% 左右。比如 2021 年,中国科学院上海光学精密机械研究所崔淑珍等人<sup>[24]</sup>使用高功率窄线宽线偏振 1178 nm 激光作为基频光,进行非线性晶体 PPLN 的单通倍频实验,得到 10.19 W 的 589 nm 倍频光,倍频转换效率达到 18.12%。

为得到更高的转换效率以及提高其光束质量,光纤激光器结合外腔谐振倍频技术逐渐成为科研人员的研究热点。2015 年,山西大学冯晋霞等人<sup>[25]</sup>使用 1560 nm 连续单频光纤激光器作为基频光源,利用 PPLN 晶体结合两镜外腔谐振腔获得波长 780 nm 倍频光。实验采用 PDH 技术成功在连续非常低功率下获得了 10 mW 的 780 nm 倍频光,倍频转换效率高达 45%。

2016 年,中国工程物理研究所许夏飞等人<sup>[26]</sup>使用波长 1064 nm、线宽小于 5 kHz 且光束质量接近衍射极限的单频连续光纤激光器作为基频光源,通

过 PDH 技术精确锁定环形倍频腔腔长结合 I 类非临界相位匹配的 LBO 晶体,获得线宽 18.7 kHz,光束质量  $M^2$  为 1.25 的 8.73 W 的 532 nm 倍频光,倍频转换效率达到 68.9%。

2017 年,山西大学李刚等人<sup>[27]</sup>使用自制的 ECDC 通过光纤放大器发出 1018 nm 基频光,为了降低由绿光诱导红外吸收引起的热透镜效应,提高模式匹配,采用了比较松散的聚焦条件,并采用 H-C 稳频技术,在基频光功率 1.58 W 的情况下,使用外腔谐振倍频技术输出 1.13 W 的 509 nm 倍频光,倍频转换效率达 71.5%,1 h 内功率波动小于 0.5%。

同年,中国科学院上海光学精密机械研究所徐震等人<sup>[28]</sup>使用一个线宽为 23 kHz、自制的 1014.8 nm 的 ECDC 通过光纤放大器作为基频光,通过两个级联倍频腔实现了外腔谐振倍频和四倍频,两次倍频均用 H-C 技术锁频,获得 760 mW 的稳定 253.7 nm 紫外光,倍频和四倍频转换效率分别是 62.5% 和 24.8% (图 9 所示)。

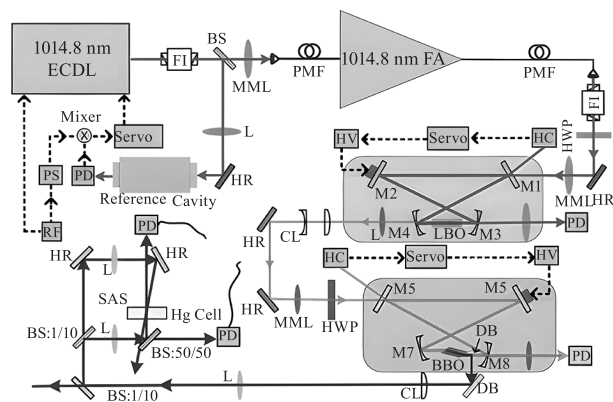


图 9 基于 ECDC 四倍频产生 253.7 nm 的系统光路图

Fig. 9 System optical path diagram of 253.7 nm based on ECDC quadruple frequency generation

2018 年,法国诺曼底大学 BAPTISTE LECONTE 等人<sup>[29]</sup>使用波长 904 nm 的掺钕光纤激光器,通过外腔谐振倍频,首次将内部谐振腔结构引入掺钕光纤激光系统,无需主动腔长控制即可实现高效倍频,得到了 7.5 W 的 452 nm 蓝光,倍频转换效率为 55%,光束质量因子  $M^2$  为 1.0。

2019 年,日本 OXIDE 公司 Yushi Kaneda 等人<sup>[30]</sup>使用两个分别为 4.6 W 的 1907 nm 和 7.7 W 的 1540 nm 的高功率连续波单频光纤激光器源,通过双重共振和频混合 (DRSFM) 技术,生成 5.2 W 的 852 nm 的激光,和频转换效率达到了 40%。随后 852 nm 激光通过两次外腔谐振倍频获得 0.456 W

连续的 213 nm 激光输出,四倍频转换效率为 11.3 % (图 10 所示)。

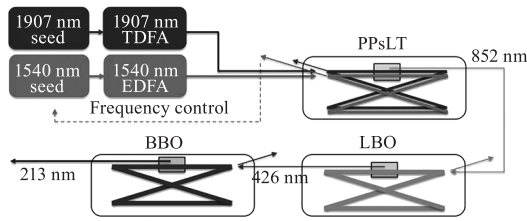


图 10 人通过和频和倍频产生 213 nm 紫外光的系统光路图

Fig. 10 213 nm ultraviolet light by sum frequency and frequency doubling

同年,美国科罗拉多州立大学 Burkley, Z. 等人<sup>[31]</sup>使用一个频率稳定的可调谐 ECDL 产生 972.5 nm 激光,然后通过锥形放大器和双包层掺杂光纤放大器的两级放大,该实验使用一个预稳定参考腔来对激光器进行初步锁定。随后,为实现更高精度的频率控制,他们将参考腔的长度调整,使得振荡器锁定到一个与全球定位系统参考的光学频率梳上,利用四倍频获得 1.4 W 连续的 243.1 nm 的深紫外光,线宽小于 10 kHz,四倍频的转换效率达到了 33.3 %。

2021 年,美国康涅狄格大学 Shaw, J. C. 等人<sup>[32]</sup>搭建了高功率可调谐深紫外(DUV)激光系统,该系统采用自制的外腔二极管激光器放大后的光作为基频光,使用两个外腔谐振倍频腔进行四倍频。为减轻热效应的影响,选择适当的聚焦参数,并使用温度控制的金属外壳隔热为实现激光频率的稳定,结合 H-C 技术,二倍频输出 6.5 W 的 532 nm 光,二倍频转换效率为 72 %,四倍频产生高达 2.75 W 的 261.5 nm 激光,四倍频的转换效率约为 30 %。

2022 年,山西大学姜振宇等人<sup>[33]</sup>使用波长为 1560 nm,线宽 1 kHz 的连续单频光纤激光器发出基频光通过 MgO:PPLN 晶体实现外腔谐振倍频红光。倍频晶体的长度为 10 mm,而倍频腔采用两镜腔,腔长仅为 59 mm。结合 PDH 技术锁频,获得 1.4 W 的 780 nm 倍频光,倍频效率高达 84.1 %,倍频激光的线宽为 270 kHz(图 11 所示)。

本课题组使用波长 1064 nm,线宽 10 kHz 的单频窄线宽光纤激光器作为基频光源,采用尺寸为 5 mm(宽)×5 mm(高)×15 mm(长),切割角度  $\theta = 90^\circ$  和  $\phi = 10.5^\circ$  的 LBO 晶体作为倍频晶体,结合 PDH 稳频技术实现了单频连续波 532 nm 绿光稳定输出,激光器结构如图 12 所示。当输入基频光功率为 20 W 时,最高可以获得 10.6 W 的倍频光输出,倍

频转换效率为 53 %,如图 13 所示。倍频光输出功率为 5 W 时的稳定性 RMS = 1.01 %,如图 14 所示。光束质量因子  $M_x^2$  和  $M_y^2$  分别为 1.618 和 1.169。

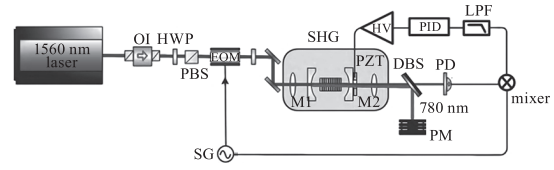


图 11 基于光纤激光器二倍频产生 780 nm 的系统光路图  
Fig. 11 780 nm system optical path diagram based on frequency doubling of fiber laser

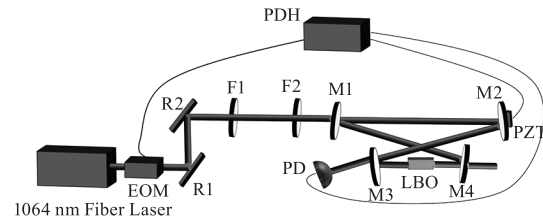


图 12 基于单频窄线宽光纤激光器倍频产生 532 nm 绿光的系统光路图

Fig. 12 System optical path diagram of 532 nm green light generated by frequency doubling of single frequency narrow linewidth fiber laser

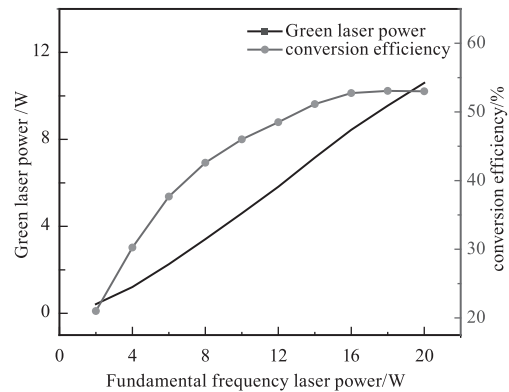


图 13 532 nm 激光输出功率及倍频转换效率  
Fig. 13 532 nm laser output power and frequency doubling conversion efficiency

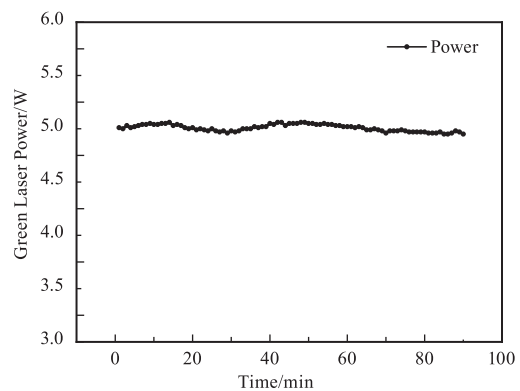


图 14 532 nm 激光在 90 min 内的功率稳定性  
Fig. 14 Power stability of 532 nm laser in 90 min

### 4.3 固体激光器的外腔谐振倍频

固体激光器相较于光纤和半导体激光器有独特的结构优势,特别是在腔内倍频实验中,非线性晶体和激光晶体处于同一谐振腔内,基频功率非常高可以获得高倍频效率<sup>[34-36]</sup>,但由于这种方法获得的激光线宽不够窄,光束质量差,所以实现单频窄线宽激光器仍需采用外腔谐振倍频技术。

2014年,中国科学技术大学李岩等人<sup>[37]</sup>使用钛蓝宝石激光器,采用 PPKTP 晶体作为非线性晶体,在外腔环形谐振腔中实现 795 nm 基频光束到 397.5 nm 紫外光的高效倍频转换。结合 PDH 技术,在低泵浦功率下实现高达 56% 的转换效率。为精密光谱学、量子信息处理以及非线性光学等领域提供了强有力的工具。

2018年,中国科学技术大学崔荣阳等人<sup>[38]</sup>使用自制的全固态 Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器发出 1342 nm 基频光,实验采用长度为 10 mm 的 PPKTP,半径为 65 μm 的束腰半径,较低的聚焦参数降低热效应的影响,使用 H-C 技术将倍频腔锁定在激光基频上,产生 5.2 W,波长 671 nm 的激光,倍频转换效率为 93.8%,此实验结果为原子实验等应用领域提供了强有力的激光光源。

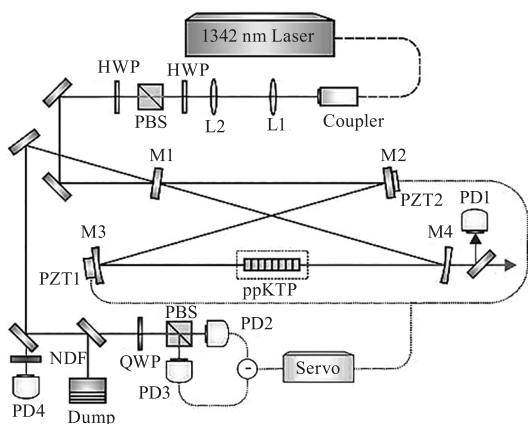


图 15 基于全固态 Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器获得红外光的系统光路图

Fig. 15 System optical path diagram of infrared light based on all solid state Nd:YVO<sub>4</sub> laser

2020年,中国科学院物理化学研究所张逸轩等人<sup>[39]</sup>利用单频外腔半导体激光器作为种子激光器通过三级 Nd:YVO<sub>4</sub> 功率放大器得到 32.1 W 波长 1342 nm 基频光,结合 PDH 技术得到 22.9 W 的 671 nm 红光,转换效率 71.3%, $M^2$  因子为 1.1,输出功率在 2 h 内的稳定性达 1.53%。

### 5 结论

总之,各种类型激光器通过使用外腔谐振倍频技术可以得到非常高的倍频转换效率以及极窄线宽。目前,在半导体激光器倍频中,研究者通过结合窄线宽光源与 PDH/H-C 锁频技术,实现了紫外波段(382~426 nm)的高效倍频输出,转换效率最高达 83.1%;在光纤激光器倍频中,采用环形腔的设计和热效应的有效抑制,使 532 nm 绿光倍频效率提升 84.1%,同时兼具优异的光束质量( $M^2 \leq 1.25$ );固体激光器方面,通过外腔谐振腔与非线性晶体的协同优化,最高实现了 671 nm 红光 93.8% 的转换效率。

这些性能的提升比如倍频转换效率从 30% 提高到了 80% 以上、功率稳定性和频率稳定性的显著进步,主要得益于基频激光的功率和质量、谐振腔设计和非线性晶体聚焦参数的优化,以及使用 PDH、H-C 稳频技术。

综上所述,外腔谐振倍频技术已经得到了较大的发展,随着长期寿命、可靠性等问题的解决,该技术在精密光谱学、量子信息处理、光学频率标准、激光雷达和晶圆检测等多个领域的应用会更加广阔。

### 参考文献:

- [1] Shao X D. Transfer of laser frequency stability based on optical frequency comb [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, 2019. (in Chinese)  
邵晓东. 基于光学频率梳的激光频率稳定性传递研究 [D]. 北京: 中国科学院大学, 中国科学院物理研究所, 2019.
- [2] Jiao D D. Research on key technologies of engineering ultrastable laser in communication band and its application [D]. Xi'an: University of Chinese Academy of Sciences; National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, 2020. (in Chinese)  
焦东东. 通信波段超稳激光器工程化关键技术研究及应用 [D]. 西安: 中国科学院大学, 中国科学院国家授时中心, 2020.
- [3] Ge Q, Yu L, Jia X J, et al. Extracavity frequency doubled red laser with single frequency [J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36(7): 1744-1748. (in Chinese)  
葛青, 于琳, 贾晓军, 等. 外腔谐振倍频单频红光激光器 [J]. 中国激光, 2009, 36(7): 1744-1748.
- [4] Zhu S Q, Chen Z J, Chen Z Q, et al. A LD side-pumped deep ultraviolet laser at 266 nm by using a Nd:YAG/Cr<sup>4+</sup>:YAG/YAG composite crystal [J]. Optics & Laser Technology,

- 2014,63:24-28.
- [5] Shi M J, Chen Q L, Guo S Z, et al. Investigation on thermal stabilization of V-shaped cavity all-solid-state green laser [J]. *Equipment Manufacturing Technology*, 2010(11):12-13. (in Chinese)  
石梦静, 陈巧玲, 郭绍忠, 等. V型腔激光器倍频晶体长度分析和实验研究[J]. *装备制造技术*, 2010(11):12-13.
- [6] Xie S Y, Lu Y F, Zhang X F, et al. High-power ring cavity laser with tunable narrow linewidth of 1064 nm [J]. *Journal of Integration Technology*, 2016, 5(5):67-73. (in Chinese)  
谢仕永, 鲁远甫, 张小富, 等. 高功率窄线宽可调谐1064 nm 环形腔激光[J]. *集成技术*, 2016, 5(5):67-73.
- [7] Xu X F. Theoretical and experimental research on resonant frequency doubling of external cavity based on PDH (Pound-Drever-Hall) technology [D]. Mianyang: China Academy of Engineering Physics, 2015. (in Chinese)  
许夏飞. 基于PDH(Pound-Drever-Hall)技术外腔谐振倍频理论与实验研究[D]. 绵阳:中国工程物理研究院, 2015.
- [8] Ge Y L. Investigations of external-cavity enhanced frequency doubling of 1560 nm laser [D]. Taiyuan: Shanxi University, 2015. (in Chinese)  
葛玉隆. 1560nm 激光外腔谐振倍频研究[D]. 太原:山西大学, 2015.
- [9] Xin Y, Jiang Y S, Wang L C, et al. Analysis of linear dynamic range and sensitivity of error signal in Pound-Drever-Hall method [J]. *Laser & Infrared*, 2010, 40(5):471-475. (in Chinese)  
辛遥, 江月松, 王林春, 等. Pound-Drever-Hall 稳频误差信号线性动态范围及灵敏度分析[J]. *激光与红外*, 2010, 40(5):471-475.
- [10] Hansch T W, Couillaud B. Laser frequency stabilization by polarization spectroscopy of a reflecting reference cavity [J]. *Optics Communications*, 1980, 35(3):441-444.
- [11] Bateman J E, Murray R L D, Himsforth M, et al. Hänsch-couillaud locking of Mach-Zehnder interferometer for carrier removal from a phase-modulated optical spectrum [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2010, 27(8):1530-1533.
- [12] Hou L, Han H N, Zhang L, et al. A narrow linewidth diode laser at 243 nm [J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, 64(13):134205. (in Chinese)  
侯磊, 韩海年, 张龙, 等. 243 nm 稳频窄线宽半导体激光器[J]. *物理学报*, 2015, 64(13):134205.
- [13] Jiang X, Zhang C, Cai W Q, et al. Frequency stabilization system of diode laser for cold atom experiment [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, 37(1):82-86.
- [14] Ma Y Y. Study on quadrature demodulation Pound-Drever-Hall techniques offrequency stabilization for single-frequency solid-state laser [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2016. (in Chinese)  
马源源. 单频固体激光器正交解调 Pound-Drever-Hall 稳频技术研究[D]. 西安:西安理工大学, 2016.
- [15] Feng C H, Vidal S, Robert P, et al. High power continuous laser at 461 nm based on a compact and high-efficiency frequency-doubling linear cavity [J]. *Optics Express*, 2021, 29(17):27760-27767.
- [16] Chen Y L, Zhang J, Qiu X L, et al. Narrow linewidth 510 nm laser via single-pass frequency-tripling by waveguide PPLNs [J]. *Photonics*, 2024, 11(3):269.
- [17] Liu R Z. Study on volume Bragg grating external cavity second harmonic generation semiconductor laser [J]. *Optical Instruments*, 2024, 46(2):36-45. (in Chinese)  
刘荣战. 体布拉格光栅外腔倍频半导体激光器研究[J]. *光学仪器*, 2024, 46(2):36-45.
- [18] Jensen O B, Petersen P M. Generation of single-frequency tunable green light in a coupled ring tapered diode laser cavity [J]. *Optics Express*, 2013, 21(5):6076-6081.
- [19] Han Y S, Wen X, Bai J D, et al. Generation of 130 mW of 397.5 nm tunable laser via ring-cavity-enhanced frequency doubling [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2014, 31(8):1942-1947.
- [20] Wen X, Han Y S, He J, et al. Generation of 397.5 nm ultra-violet laser by frequency doubling in a PPKTP-Crystal semi-monolithic resonant cavity [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(4):0414001. (in Chinese)  
温馨, 韩亚帅, 何军, 等. PPKTP 晶体半整体谐振腔倍频的 397.5 nm 紫外激光输出 [J]. *光学学报*, 2016, 36(4):0414001.
- [21] Tian L, Wang Q W, Yao W X, et al. Experimental realization of high-efficiency blue light at 426 nm by external frequency doubling resonator [J]. *Acta Physica Sinica*, 2020, 69(4):044201. (in Chinese)  
田龙, 王庆伟, 姚文秀, 等. 高效外腔倍频产生 426 nm 激光的实验研究 [J]. *物理学报*, 2020, 69(4):044201.
- [22] Manzoor S, Tinsley J N, Bandarupally S, et al. High-power, frequency-quadrupled UV laser source resonant with the 1S<sub>0</sub>-3P<sub>1</sub> narrow intercombination transition of cadmium at 326.2 nm [J]. *Optics Letters*, 2022, 47(10):2582-2585.
- [23] Chen Y X, Zhao G D, Tan W, et al. 382 mW external-cavity frequency doubling 461 nm laser based on quasi-phase matching [J]. *Photonics*, 2024, 11(1):40.
- [24] Cui S Z, Zeng X, Cheng X, et al. Generation of 10 W

- yellow fiber laser by frequency doubling of cascaded Raman laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(16): 1601006. (in Chinese)
- 崔淑珍, 曾鑫, 程鑫, 等. 基于级联拉曼激光倍频的10W黄光光纤激光器[J]. 中国激光, 2021, 48(16): 1601006.
- [25] Feng J X, Sun Z N, Zhang K S. Two-color quantum correlation fields generated by extra-cavity-enhanced frequency doubling[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(8): 0818001. (in Chinese)
- 冯晋霞, 孙志妮, 张宽收. 利用外腔谐振倍频获得双色量子关联光场[J]. 中国激光, 2015, 42(8): 0818001.
- [26] Xu X F, Lu Y H, Zhang L, et al. Technical study of 8.7 W continuous wave single frequency green laser based on extra-cavity frequency doubling[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(11): 1101010. (in Chinese)
- 许夏飞, 鲁燕华, 张雷, 等. 外腔谐振倍频8.7 W连续单频绿光技术研究[J]. 中国激光, 2016, 43(11): 1101010.
- [27] Li G, Li S K, Wang X C, et al. High efficient generation of over 1 Watt 509 nm laser beam by a ring cavity frequency doubler with periodically poled KTiOPO<sub>4</sub>[J]. Applied Optics, 2017, 56(1): 55 – 60.
- [28] Zhao R C, Fu X H, Zhang L, et al. High-power continuous-wave narrow-linewidth 253.7 nm deep-ultraviolet laser[J]. Applied Optics, 2017, 56(32): 8973 – 8977.
- [29] Leconte B, Gilles H, Robin T, et al. 7.5 W blue light generation at 452 nm by internal frequency doubling of a continuous-wave Nd-doped fiber laser[J]. Optics Express, 2018, 26(8): 10000 – 10006.
- [30] Kaneda Y, Tago T, Sasa T, et al. High-power, continuous-wave, scalable, single-frequency 852 nm laser source for 213 nm generation[C]//Nonlinear Frequency Generation and Conversion: Materials and Devices XVIII. Bellingham, WA: SPIE, 2019: 1090203.
- [31] Burkley Z, Brandt A D, Rasor C, et al. Highly coherent, watt-level deep-UV radiation via a frequency-quadrupled Yb-fiber laser system[J]. Applied Optics, 2019, 58(7): 1657 – 1661.
- [32] Shaw J C, Hannig S, McCarron D J. Stable 2 W continuous-wave 261.5 nm laser for cooling and trapping aluminum monochloride[J]. Optics Express, 2021, 29(23): 37140 – 37149.
- [33] Jiang Z Y, Feng J X, Sun J K, et al. 1560 nm laser external cavity resonant frequency doubler based on MgO:PPLN crystal[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(17): 1701001. (in Chinese)
- 姜振宇, 冯晋霞, 孙婧可, 等. 基于 MgO:PPLN 晶体的1560 nm 激光外腔谐振倍频器[J]. 中国激光, 2022, 49(17): 1701001.
- [34] Fei Q, Zou X L, Zhou H, et al. Compact and high-efficient intracavity frequency doubling solid-state TEM<sub>00</sub> green lasers by PPMgOLN crystal[J]. Applied Laser, 2014, 34(6): 598 – 601. (in Chinese)
- 费穷, 邹小林, 周煌, 等. 基于 PPMgOLN 晶体的高效紧凑型的腔内倍频固体 TEM<sub>00</sub> 绿光激光器[J]. 应用激光, 2014, 34(6): 598 – 601.
- [35] Ruan R Q, Li Y L, Ni T Y, et al. 888 nm LD pumped Nd:LuVO<sub>4</sub> doubling frequency green laser[J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2012, 10(5): 18 – 20. (in Chinese)
- 阮仁秋, 李永亮, 倪天怡, 等. 888 nm LD 泵浦 Nd:LuVO<sub>4</sub> 倍频绿光激光器[J]. 光学与光电技术, 2012, 10(5): 18 – 20.
- [36] Chen Y L, Liu J Q, Wang M J, et al. 310 nm ultraviolet solid-state Raman laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2023, 50(22): 2201005. (in Chinese)
- 陈忆兰, 刘继桥, 王明建, 等. 310 nm 紫外固体拉曼激光器[J]. 中国激光, 2023, 50(22): 2201005.
- [37] Li Y, Zhou Z Y, Ding D S, et al. Low-power-pumped high-efficiency frequency doubling at 397.5 nm in a ring cavity[J]. Chinese Optics Letters, 2014, 12(11): 111901.
- [38] Cui X Y, Shen Q, Yan M C, et al. High-power 671 nm laser by second-harmonic generation with 93% efficiency in an external ring cavity[J]. Optics Letters, 2018, 43(8): 1666 – 1669.
- [39] Zhang Y X, Wang Z M, Zhou Z H, et al. 22.9 W CW single-frequency laser at 671 nm by frequency doubling of Nd:YVO<sub>4</sub> laser[J]. Optics Letters, 2020, 45(16): 4389 – 4392.