

窄线宽光纤激光腔外倍频532 nm研究进展

吴泽坤, 郭丽君*

长春理工大学物理学院, 吉林 长春

收稿日期: 2024年1月22日; 录用日期: 2024年3月8日; 发布日期: 2024年3月19日

摘要

窄线宽532 nm在高反金属材料加工、荧光检测、紫外波段和中红外波段激光的产生等领域均有广泛的应用。近红外波段1064 nm光纤激光腔外倍频产生的532 nm具有噪声低、效率高, 光束质量好和功率稳定性好等优点。本文从常见的腔外倍频结构和晶体出发, 对四种常见倍频晶体的有效非线性系数、激光损伤阈值进行分析对比; 重点总结了窄线宽光纤激光单通双折射晶体、周期性极化晶体产生绿光; 角度匹配、温度匹配下外腔谐振倍频产生532 nm激光的研究进展。讨论了腔外倍频中两种结构的特性和应用场景。

关键词

窄线宽光纤激光, 532 nm, 腔外倍频, 相位匹配

Advancements in Research on Extracavity Frequency Doubling of Narrow-Linewidth Fiber Lasers at 532 nm

Zekun Wu, Lijun Guo*

School of Physics, Changchun University of Science and Technology, Changchun Jilin

Received: Jan. 22nd, 2024; accepted: Mar. 8th, 2024; published: Mar. 19th, 2024

Abstract

The narrow-linewidth of 532 nm is widely utilized in various domains, including high-reflectance metal material processing, fluorescence detection, and the generation of laser in the ultraviolet and mid-infrared spectral ranges. The 532 nm generated through extracavity frequency doubling

*通讯作者。

of a 1064 nm near-infrared fiber laser boasts advantages such as low noise, high efficiency, good beam quality, and stable power. This paper initiates its exploration from common extracavity frequency-doubling structures and crystals, conducting a comparative analysis of the effective nonlinear coefficients and laser damage thresholds of four commonly used frequency-doubling crystals. It places particular emphasis on summarizing the production of green light using narrow-linewidth fiber lasers through single-pass birefringent crystals and periodically poled crystals. The research progress in external cavity resonant frequency doubling for 532 nm laser generation under angle matching and temperature matching is elucidated. The characteristics and application scenarios of the two extracavity frequency-doubling structures are discussed.

Keywords

Narrow-Linewidth Fiber Laser, 532 nm, Extracavity Frequency Double, Phase Match

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在工业生产和科学研究中高功率窄线宽 532 nm 激光有着重要的应用价值, 一直以来都是倍频领域研究的热点之一。半导体检测中常用的 266 nm、355 nm, 可使用 532 nm 激光倍频、和频获得[1] [2]。对于铯原子光钟中原子冷却和捕获, 可通过单频 532 nm 激光泵浦钛宝石产生 922 nm 激光, 进一步倍频获取所需的 461 nm 单频激光[3]。常用的中红外波段激光, 单频 532 nm 结合光参量振荡技术, 可以产生宽带可调谐的中外红激光[4]。绿光波段, 铜的吸收高达 40%, 532 nm 十分有利于焊接铜等高反材料[5]。超精密加工中, 532 nm 可作为跨尺度(几十至几百毫米量程)和高分辨(纳米至皮米量级)的激光外差干涉仪的光源[6]。随着应用领域拓展, 对窄线宽光纤激光器的功率需求也逐年提升。2020 年通快公司在 Spie 会议上报道了输出功率高达 2 kW 连续绿光碟片激光器, 但其光束参量积 BPP 为 6 mm·mrad (M^2 为 36.6) [7]。光纤激光器有着泵浦吸收效率高、发射谱线范围广、散热能力强和输出近衍射极限的光束质量等诸多优点。在腔外倍频中, 由光纤产生的基频光源与倍频装置分离, 可有效避免基频激光晶体容易受热透镜和热致双折射影响, 使倍频光输出功率不稳定, 光束质量变差[8]。

本文对基于窄线宽光纤激光倍频产生 532 nm 激光的研究方案进行了综述, 比较了不同倍频晶体和倍频方式的技术特点。详细介绍了单通双折射晶体、单通周期性极化晶体、温度匹配下的外腔谐振倍频和角度匹配下的外腔谐振倍频等几种倍频方式, 分析了单通双折射晶体、周期性极化晶体的倍频特性; 对比了外腔谐振倍频下的角度匹配、温度匹配两种相位匹配方式的适用场景。

2. 倍频晶体特性

根据二次谐波产生的基本原理, 在倍频过程中不同的晶体对应不同的相位匹配方式。对于 β 相偏硼酸钡(β -BaB₂O₄, BBO)和三硼酸锂(LiB₃O₅, LBO)晶体, 常使用双折射相位匹配使基频光和倍频光同时满足 $n_{\omega} = n_{2\omega}$ 和 $\Delta k = \vec{k}_1 - \vec{k}_2 - \vec{k}_3$ 为零。LBO 属于斜方晶系, 点群 mm2 的负双轴晶体, 锂离子填充在网状硼氧阴离子基团间隙中[9], 其具有损伤阈值高、接收角大、走离角小和透射光谱宽等优点, 已成功用于 Nd:YAG 激光的二倍频、三倍频过程[10] [11]。BBO 是 3 m 点群中的单轴晶体, 拥有较高的损伤阈值和较宽的相位匹配波段范围、允许温度, 尤其适用于紫外波段激光的产生[12]。利用 BBO 晶体结合倍频、和频技术

可产生线宽为 0.84 pm 的深紫外 195 nm 激光[13]。相对于 BBO 晶体, LBO 具有较宽的允许角和小的走离角,更为重要的是其可通过非临界相位匹配(NCPM)进行倍频。NCPM 避免临界相位匹配中的走离效应,很大程度上的提升倍频效率,具有无走离、接收角度宽、有效系数大等特点。

此外,周期性极化铌酸锂晶体(Periodically Poled LiNbO₃, PPLN)和周期极化钽酸锂(Periodically Poled LiTaO₃, PPLT)还可用准相位匹配的方式进行倍频。其利用铁电体内的极化方向可由外电场决定的特性,可对其非线性极化率、极化周期进行调控,用来补偿三波之间由折射率色散导致的波矢失配。PPLN 属于三方晶系中的负单轴晶体,在室温下具有良好的铁电性,周期性极化铌酸锂晶体在准相位匹配中有着广泛的应用[14]。PPLT 单晶属于六方晶系,结构归属类钙钛铁矿型。其居里温度点很高,可在高温状态下工作[15]。虽然 PPLN 晶体具有很高的非线性系数(见表 1),但倍频过程中由于光折变效应,使其在高功率运转下严重受限。对 PPLN 掺杂 MgO 后,可以提升激光损伤阈值,也降低了光折变效应的影响,但是倍频过程中仍然无法避免绿光诱导红外吸收(GRIIRA)。掺杂 MgO 后的 PPLT 晶体很好弥补了 MgO:PPLN 的缺点,其光折变损伤阈值显著提升,晶体内的 GRIIRA 现象几乎不发生。同时,其还具有很高的热导率。这都有利于 MgO:PPLT 在高功率下进行倍频转换。表 1 给出了四种倍频晶体的相关参数。

Table 1. Comparisons between four nonlinear crystals

表 1. 四种非线性晶体的对比

Nonlinear crystal	Effective nonlinear coefficient/(pm·v ⁻¹)	Walk-off angle/°	Surface damage threshold for 10 ns/(GW/cm ⁻²)	Transparency range/nm	Reference
LBO	0.98	0.6	>10	160~2600	[9]
BBO	2.4	2.7	>1.5	190~3500	[12]
PPLN	16	0	0.3	350~5000	[16]
PPLT	12	0	>PPLN	280~5000	[16]

3. 光纤激光单通倍频

由光纤输出的激光作为基频光,单次通过倍频晶体的过程称为光纤激光单通倍频。根据倍频晶体划分可分为两类:一类是单通双折射晶体倍频,另一类是单通周期性极化晶体倍频。

3.1. 单通双折射晶体倍频

相位调制技术、光谱和相干合成技术的发展,促使光纤激光的输出功率不断提升,这使光纤激光单通非线性晶体产生倍频光这一途径变得可行。高功率的窄线宽光纤激光单通倍频晶体,可获得几百瓦至千瓦量级的窄线宽绿光。

2014 年,IPG 的 Gapontsev 采用 I 类非临界相位匹配, LBO 晶体温度维持在 150℃。在基频光功率输出功率为 1035 W 时,获得了 356 W 的线偏振 532 nm 倍频光,光光转换效率、电光效率分别为 35% 和 11% [17]。使用线偏振单频 1064 nm 的 LD 种子源,相位调制后线宽展宽至 20 GHz,经过多级保偏放大后,输出功率高达 1060 W (如图 1 所示)。在基频光最大输出功率时,功率不稳定性约在 1%,偏振消光比大于 20 dB。整个装置封装在一个重量仅有 12 kg,体积只有 532 × 3352 mm 的集成模块。全功率倍频过程中,基频光和倍频光未发生明显的光束畸变,并且在基频光最大输出功率时,倍频效率没有任何减缓的迹象,继续增加基频光,倍频光功率和效率仍可进一步提升。从实验上验证了窄线宽高功率光纤激

光单通倍频方案的可行性, 为其他波长的单通倍频提供了参考。同时整个装置高度集成化、小型化, 可广泛应用于科研、工业领域。

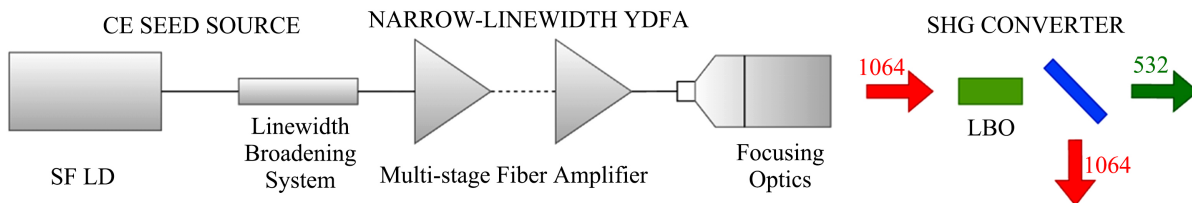


Figure 1. Narrow-linewidth fiber laser single-pass LBO crystal frequency doubling device diagram [17]

图 1. 窄线宽光纤激光单通 LBO 晶体倍频装置图 [17]

2020 年, Nufern 公司的 Ahmadi 采用自研的超低损耗的 55 mm LBO 晶体, 温度匹配下倍频光输出功率超 kW, 倍频效率高达 54%。得益于高光束质量的单模基频光, 倍频光 $M^2 = 1.01$ [18]。对倍频光使用透镜组进行聚焦准直, 耦合进入高氢氧基、纤芯直径为 100 μm 的光纤中。高氢氧基的光纤可有效避免光纤中的光子暗化现象, 100 μm 的纤芯可获得 93% 的耦合效率。从而可实现倍频光的高效光纤耦合、传输, 十分适合于工业加工。对线宽约几十 KHz 的种子光, 使用加载了白噪声信号的高速电光调制器将其相位展宽至 45 GHz, 展宽后的种子光经过主动控制偏振态的多级光纤放大, 功率为 5 mW 放大至 2 kW。他们对通过 40 mm 和 55 mm LBO 晶体的基频光线宽进行了分析, 对于 40 mm 晶体, 基频光线宽在 45~81 GHz 范围对倍频效率影响很小。但晶体长度为 55 mm 时, 存在一个最佳的基频光线宽 65 GHz 使得倍频光效率达到最大, 说明对于不同长度的倍频晶体可能存在一个最佳的基频光线宽。此外, 对光纤激光器偏振态的主动控制相较于全保偏放大具有输出功率高、高模态不稳定阈值等优点。对于单通倍频, 一般情况下基频光功率越高, 倍频效率也越高。

2021 年上海光机所的苏梦琪在基频光 784 W 时, 获得 321 W 的 532 nm 倍频光, 倍频转换效率为 40.9%。倍频光近衍射极限输出, $M^2 = 1.07$ [19]。其使用中心波长为 1064.79 nm、功率为 12 mW 的单频种子源。如图 2 对种子源经相位调制后采用保偏全光纤 MOPA 结构使其功率放大。基频光最大输出功率 784 W、线宽约为 20 GHz (0.079 nm)、 $M^2 = 1.15$, 偏振消光比大于 15 dB。对 LBO 晶体采用 I 类非临界相位匹配, 理论相位匹配温度为 148.3 $^{\circ}\text{C}$ 。高功率倍频时, 晶体对基频光和倍频光存在吸收发热现象。所以他们对倍频实验中不同基频光功率下的 LBO 相位匹配温度进行调谐, 得到高功率倍频时的最佳相位匹配温度。

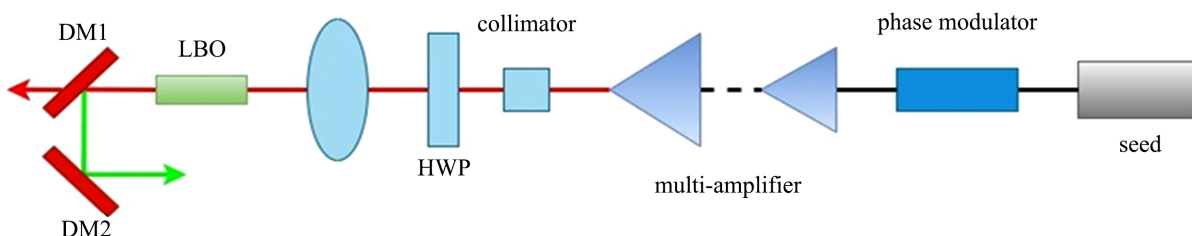


Figure 2. Schematic diagram of experimental setup

图 2. 实验装置示意图

同年, 苏梦琪对基频光种子源的主放过程进行优化, 进一步的提升其功率。基频光最大输出功率可达到 1100 W。在基频光功率为 1084 W 时, 实现了 610 W 连续波绿光激光输出, 倍频转换效率高达 56.27%, 光束质量 $M^2 = 1.05$ [20]。该指标为目前基于光纤激光单通 LBO 晶体获取 532 nm 激光的最高倍频效率。

3.2. 单通周期性极化晶体倍频

窄线宽光纤激光的输出功率不断提高、晶体制作工艺的提升,能够制作更大尺寸的周期性极化晶体,这都有利于倍频光的产生,单通周期性极化晶体获得单频 532 nm 的倍频效率、功率正逐年攀升,如表 2 所示。由于 PPLT 在倍频过程表现出良好的稳定性,逐渐成为单通周期性极化晶体主流。

Table 2. Frequency-doubling output parameters of a single-pass periodically polarised crystal for narrow-linewidth fiber lasers

表 2. 窄线宽光纤激光单通周期性极化晶体的倍频研究进展

Year	Research institute	Crystal	Out power/W	Optical-optical conversion efficiency	Reference
2001	Johns Hopkins University	10 mm, 6.5 μm , PPLN	0.1	5%	[21]
2005	University of Electro-Communications, Japan	10 mm, 6.97 μm , MgO:PPLN	2.2	18%	[22]
2008	ICFO, Spain	17 mm, 9.01 μm , PPKTP	6.2	20.8%	[23]
2008	Raydiance Inc	40 mm, 8 μm , MgO:sPPLT	18.8	25.1%	[24]
2009	ICFO, Spain	30 mm, 7.97 μm , MgO:sPPLT	9.64	32.7%	[25]
2012	BIT, China	10 mm, 6.96 μm , MgO:PPLN	0.122	1.2%	[26]
2012	SIOM, China	20 mm, 7.77 μm , PPSLT	2.1	9.6%	[27]
2012	ICFO, Spain	30 mm, 7.97 μm , MgO:sPPLT	11	33.3%	[28]
2013	SIOM, China	10 mm, 6.96 μm , MgO:sPPLN	1.437	17.84%	[29]
2015	Niser, India	30 mm, 7.97 μm , MgO:sPPLT	14.5	36%	[16]
2019	HC Photonics Corp	25 mm, 6.97 μm , MgO:PPLN	7.5	30%	[30]
2020	SIOM, China	30 mm, 7.98 μm , MgO:sPPLT	10.8	38.3%	[31]
2021	CNRS, France	30 mm, 8 μm , MgO:sPPLT	17	37%	[32]

2020 年上海光机所搭建了高效率、低噪声的单通 MgO:PPLT 的实验装置,在基频光 28.2 W、晶体中心光斑半径 33.8 μm 时,倍频光功率为 10.8 W,倍频转换效率高达 38.3% [31]。实验中倍频晶体的长度为 30 mm,极化周期 7.98 μm 。在基频光最大输出功率时,对瞬时频率的功率谱密度进行测量,计算出基频光线宽约为 1.7 kHz,从而推理出倍频光线宽约为 3.4 kHz。同时他们对种子源、基频光和倍频光的相对强度噪声进行了分析。在 1 kHz~1 MHz 范围内,三者的相对强度噪声均呈现下降趋势,约为-140 dBc/Hz。

在 5 kHz 在下, 两者的相对强度噪声差(约 6 dB)与理论符合的很好。但在 100 kHz 附近相对强度噪声差变大至 16 dB, 相对强度噪声差变化的原因还有待进一步分析。

4. 光纤激光外腔谐振倍频

与全固态腔内倍频不同的是, 外腔谐振倍频中腔内只放置倍频晶体。光纤输出的基频光通过耦合系统进入到谐振腔, 基频光在腔内传输过程中, 多次通过倍频晶体, 同时利用 PDH、HC 稳频装置对腔长进行精确控制, 优化输入耦合镜的反射率, 使得基频光功率密度得到极大增强, 从而有效提升倍频效率。外腔谐振倍频根据晶体的相位匹配方式可分为: 温度匹配和角度匹配。

4.1. 温度匹配下的外腔谐振倍频

2012 年, Avdokhin 等报道了 170 W、倍频效率 76% 的 532 nm 倍频光, 此时电光效率为 25% [33]。线宽 140 kHz 的线偏振 1064 nm 种子光经过全保偏 MOPA 放大后, 输出功率高达 230 W, 1064 nm 的电光效率约为 33%。采用自研的 LBO 晶体, 进行倍频实验, 倍频腔一面腔镜安装压电陶瓷, 结合 PDH 稳频技术, 使得腔内激光频率与种子光频率一致。倍频光 75 W 时, 倍频效率为 88%。然而继续增加基频光功率时, 倍频效率开始逐步下降。实验获得的 170 W 绿光在 100s 内表现出很低的功率噪声, 100s 内绿光的输出功率波动小于 1%。通过对腔内各组件的后续优化, 有望将倍频效率提升至 90%, 电光效率提升至 30%。得益于 IPG 公司成熟的全保偏窄线宽、高功率和低噪声的光纤激光器, 他们在 130 W 的基础上进一步提升了倍频光功率[34]。

2016 年, 中国工程物理研究院的许夏飞在基频光功率 12.67 W 时, 获得 8.37 W 的 532 nm 激光, 倍频转换效率为 68.9%。同时, 测量了倍频光的光束质量 $M^2 = 1.25$ 、线宽 18.7 kHz [35]。线宽小于 5 kHz, 10 mW 的连续 1064 nm 种子光, 注入光纤放大器中, 获得超 12 W 的线偏、单频 1064 nm 激光。为实现非临界相位匹配, 30 mm 的 LBO 晶体处于 150°C 的铜制热沉中, 实验装置如图 3 所示。对于模式匹配, 采用两块焦距均为 240 mm 的透镜对光斑半径进行放缩, 获得 272.6 μm 的束腰半径。对于阻抗匹配, 测量出环形腔对 1064 nm 的静态损耗约 5.3%, 选择反射率为 90% 的输入耦合镜用于倍频。在实验中对环形腔静态损耗的测量和采用不同反射率的输入耦合镜进行实验, 可提升蝶形腔的阻抗匹配, 有效的提高了系统倍频效率。

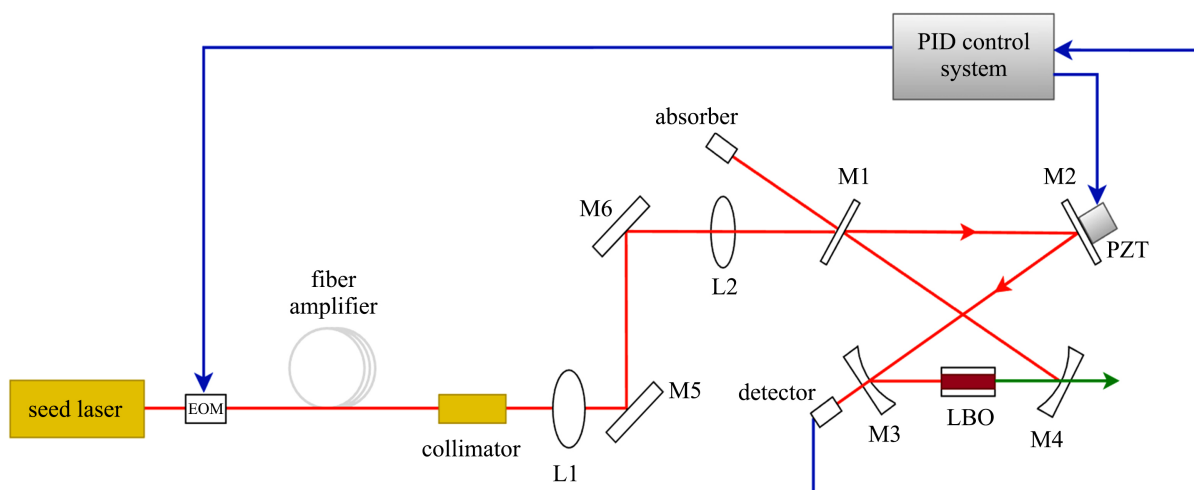


Figure 3. Schematic diagram of external cavity second harmonic generation experiment under non-critical phase matching [35]
图 3. NCPM 时外腔谐振倍频实验装置示意图[35]

2017年上海光机所的崔淑珍使用线宽为17.6 MHz, 50 mW的DFB种子源。使用两级放大对种子光功率进行提升, 经预放大后1064 nm功率达到360 mW。主放大过程采用1.5 m保偏YDF增益光纤, 双60 W的976 nm LD同向泵浦信号光。泵浦光在103 W时, 获得60 W、PER > 23 dB的单频1064 nm基频光。30 mm的LBO放置在154.6℃的铜质热沉中, 较临界相位匹配温度149℃略高一些。通过优化模式匹配, 使得LBO晶体中心的光斑半径约54 μm。采用透射率12%的输入耦合镜, 以满足最优的阻抗匹配。当45 W的基频光输入时, 获得33.2 W的532 nm倍频光, 倍频转换效率为74%。倍频光线宽约为39 MHz, 光束质量呈现为完美的高斯分布[36]。环形腔总腔长小于160 mm, 有利于系统的小型化。在低功率时, 尽管晶体存在对基/倍频光的吸收发热。但是端面暴露在空气中, 晶体存在与空气的对流换热, 使得晶体不处于最佳的相位匹配温度。

2020年上海光机所的曾鑫采用在基频光最大输出功率40 W时, 获得29.72 W的倍频光, 倍频转换效率为75.8% [37]。30 mW、线宽小于100 kHz的1064 nm单频种子光。经过正弦调制、保偏放大后输出功率约40 W。实验装置如图4所示, 蝶形腔由两平面、两曲率半径为50 mm的腔镜组成, 平面输入耦合镜的反射率85%, 腔镜的折叠角为24℃。整个腔长为164 mm, 对应1.646 GHz的自由光谱区。温度匹配下, 30 mm LBO晶体中心子午面光斑半径54 μm。倍频过程中, 对EOM施加25 MHz的射频信号, 在调制深度 $\gamma = 1.4348$ 时, 获得频率间隔为1.646 GHz的三单频基频光。基频光20 W时, 倍频效率超过80%。输出的少频基频光的倍频远场光斑呈完美的高斯分布。由于光隔离器的热透镜效应, 导致倍频转换效率下降。与单一频率的基频光相比, 经调制后的三单频基频光的总功率是单一频率的基频光的三倍。三单频基频光与腔耦合状态良好且与腔共振时, 能有效提升倍频功率和效率。

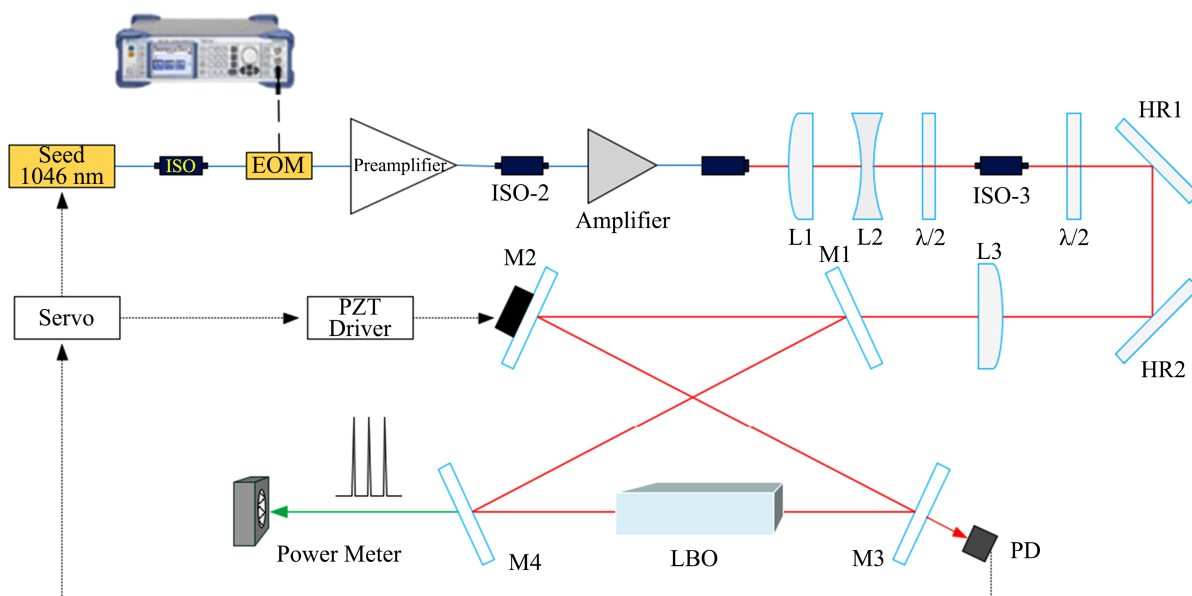


Figure 4. Schematic diagram of the experimental setup for resonant cavity SHG of a phase-modulated few-frequency fiber laser [37]

图4. 相位调制的少频光纤激光器谐振腔 SHG 实验装置示意图[37]

4.2. 角度相位匹配下的外腔谐振倍频

2008年 Sony 公司获得大于20 W的532 nm激光输出, 此 $M_x^2 = 1.00$, $M_y^2 = 1.03$ 。根据模式匹配进入到腔内的基频光计算, 倍频效率大于94%, 外腔谐振总倍频效率大于88% [38]。采用NPRO作为种子源, 注入到MOPA结构中的掺Yb保偏光纤中, 得到单频线偏振25 W, $M^2 < 1.1$ 的1064 nm基频光为了

提高倍频转换效率, 对二次谐波发生器的各组成部分进行了优化。预估腔内总损耗小于 0.25%、晶体对基频光的吸收率小于 0.05%, 单次转换效率为 4.4%。基频光光斑经过透镜组缩束后, 在 20 mm 的晶体中心处半径约 50 μm , 晶体端面镀反射率小于 0.05% 的 1064 nm 减反膜。此时处于临界相位匹配的晶体温度约 25 $^{\circ}\text{C}$ 。针对输入耦合镜进行优化, 反射率约 95.5%, 接近最优的阻抗匹配值。利用 PDH 的稳频技术, 将腔内激光频率锁定在种子光频率上。由于使用音圈电机驱动 PDH, 获得了极佳的锁频稳定性。倍频光从透射率约 99.7% 二相色镜输出。

2020 年中国科技大学的陈昊泽使用 Hänsch-Couillaud 技术, 在两平面镜后分别安装快、慢速的 Piezo 用于锁定腔长。基频光最高输入功率 47 W 时, 获得 30 W、 $M_x^2 = 1.12$ 和 $M_y^2 = 1.04$ 的 532 nm 激光, 倍频转换效率为 63.8% [39]。采用 8 mW 的 DFB 种子光被注入到光纤放大器中, 获得最高约 50 W 的 1064 nm 激光输出。蝶形腔由两平凹透镜和两平面透镜组成, 平凹透镜的曲率半径分别为 132 mm, 100 mm。两平凹透镜间距离为 166 mm, 平面透镜间距离为 144 mm, 折叠角为 10 度。整个腔长约 626 mm, 自由光谱区 FSR 约为 480 MHz。20 mm 的 LBO 晶体放置于精度为 0.01 $^{\circ}\text{C}$ 的自制铜热沉中, 热沉处于室温 25 $^{\circ}\text{C}$ 。I 类角度相位匹配的晶体中心光斑为 27.5 μm , 此时聚焦参量 $\zeta = 2.84$ 。经过模拟和多次尝试, 阻抗匹配时输入耦合镜的反射率为 94%。1 h 内倍频光功率不稳定性为 2.6%。在 1000s 内, 532 nm 的倍频光线宽约为 kHz, 频率不稳定约 30 kHz。常见的高功率 532 nm 线宽大多在 MHz 量级, 无法满足量子光学中的要求。使用光纤激光结合外腔谐振倍频可以获得高功率的倍频光。同时利用碘分子的 R69 (36-1) 超精细吸收谱线, 结合调制转移光谱技术(MTS), 对高功率 532 nm 激光的线宽进行超窄压缩, 获得稳定的绝对频率。

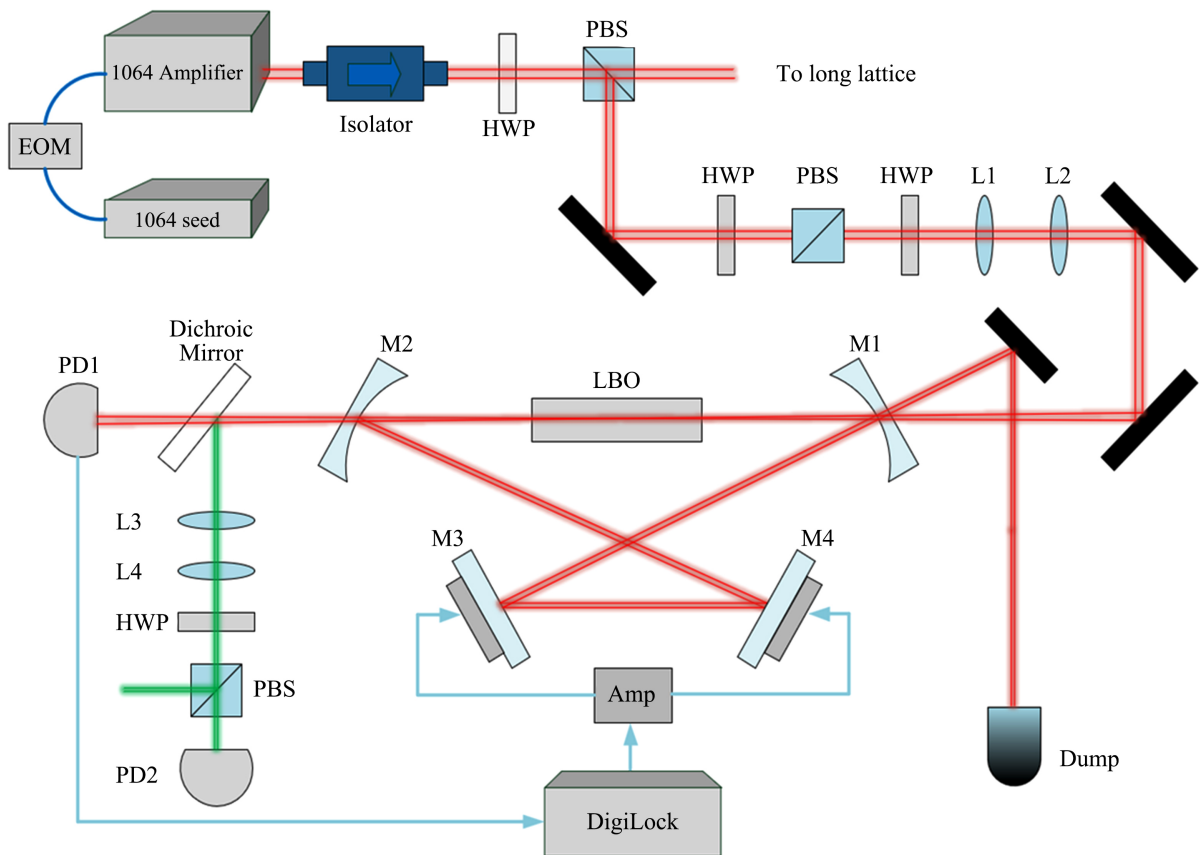


Figure 5. Schematic diagram of external cavity second harmonic generation experiment under critical phase matching [40]

图 5. 临界相位匹配时外腔谐振倍频实验装置示意图[40]

2022年中国科技大学的王宣恺使用国产的80 W单频线偏振1064 nm光纤激光,当51 W基频光在晶体中心光斑半径为46.5 μm 时,获得30 W的532 nm倍频光,倍频转换效率为59% [40]。图5是其倍频装置图,由两平面镜和平凹镜组成,凹面曲率半径为100 mm。折叠角为7.2°,整个腔长为474.1 mm。针对1064 nm基频光,输入耦合镜其反射率为92%,其余三镜反射率均为99.95%。为满足I类临界相位匹配,20 mm的LBO被放置在精度为0.01°C的TEC温控装置中。他们对激光器的相对强度噪声进行了分析,倍频光的相对强度噪声包含:基频光、锁定系统、放大器、压电陶瓷和PD探测器的相对强度噪声。其中放大器带来的噪声是系统噪声的主要来源。通过采用快、慢pzt来减少低频噪声。优化倍频晶体的温度、采用两级反馈环路实现功率稳定从而减低系统的相对强度噪声。实现了在10 Hz~100 kHz范围内,输出激光器的相对强度噪声被抑制至-120 dbc/hz。十分适用于量子气体的长期囚禁和相干操控。

5. 分析和讨论

对于单通倍频,该方案结构简单、鲁棒性好,所需器件少。并且易调节,几乎不需要后期维护。在单通双折射晶体倍频中,尽管高功率窄线宽的基频光获取较为困难、倍频过程中存在很高的能量损耗,仍可作为产生高功率绿光的一个有效途径。相较而言,周期性极化晶体激光损伤阈值较低、且易解相,难以用于高功率倍频。但在低功率下,单通周期性极化晶体的倍频效率远远高于单通双折射晶体,可有效利用基频光能量。同时周期性极化晶体其周期可调控,十分有利于产生某些特定波长的倍频光。因此,在产生数十瓦量级的倍频光领域,单通周期性极化晶体倍频被广泛应用。

相对于单通倍频,外腔谐振倍频的结构复杂,系统稳定性差。一般需要伺服系统对腔长进行主动控制,以保持激光的稳定。并且链路中的反馈控制模块需要精细设计和优化,使得整个系统比较复杂。因此外腔谐振倍频所需的成本高。但其在几瓦至几百瓦量级均表现出很高的倍频效率,最高倍频效率达90%,倍频功率超百瓦,而且倍频功率还有进一步提升的空间。角度匹配下的外腔谐振倍频中倍频晶体易受走离效应影响,使得基频光和倍频光分离,从而导致倍频效率急剧下降。而温度匹配中,倍频晶体不存在走离效应。同时,温度匹配下倍频晶体的有效非线性系数一般都大于角度匹配。这些因素使得角度匹配下得外腔谐振倍频的倍频效率常常低于温度匹配。但是,温度匹配下的外腔谐振倍频需要对倍频晶体进行主动温控,这无疑会增加系统不稳定性和成本。此外,在高功率倍频下,将加剧倍频晶体的热透镜效应。这都会影响温度匹配下外腔谐振倍频的应用场景。

窄线宽、高功率的绿光在诸多领域有着巨大的发展潜力。利用光束质量好、输出功率高和可柔性化的光纤激光器,结合倍频技术产生绿光的优势十分明显。在倍频获得绿光技术中,倍频效率、倍频光功率严重受限于基频光的性能。因此在倍频过程中提升基频光的输出功率和进一步压缩基频光的线宽显得很有必要。此外,随着目标倍频光功率的不断提高,倍频晶体热效应所带来的问题也日益凸显。

参考文献

- [1] Sakuma, J., Asakawa, Y. and Obara, M. (2004) Generation of 5-W Deep-UV Continuous-Wave Radiation at 266 nm by an External Cavity with a CsLiB₆O₁₀ Crystal. *Optics Letters*, **29**, 92-94. <https://doi.org/10.1364/OL.29.000092>
- [2] Mizell, G.J. (1999) 355-nm CW Laser Emission Using a Contact-Bonded Crystal Assembly Pumped with a 1-W 808-nm Diode. *Laser Material Crystal Growth and Nonlinear Materials and Devices*, **3610**, 54-56. <https://doi.org/10.1117/12.349219>
- [3] Li, F.Q., Shi, Z., Li, Y.M., et al. (2011) Tunable Single-Frequency Intracavity Frequency-Doubled Ti:Sapphire Laser around 461 nm. *Chinese Physics Letters*, **28**, Article ID: 124205. <https://doi.org/10.1088/0256-307X/28/12/124205>
- [4] Strössner, U., Peters, A., Mlynek, J., et al. (1999) Single-Frequency Continuous-Wave Radiation from 0.77 to 1.73 μm Generated by a Green-Pumped Optical Parametric Oscillator with Periodically Poled LiTaO₃. *Optics Letters*, **24**, 1602-1604. <https://doi.org/10.1364/OL.24.001602>
- [5] Engler, S., Ramsayer, R. and Poprawe, R. (2011) Process Studies on Laser Welding of Copper with Brilliant Green and

- Infrared Lasers. *Physics Procedia*, **12**, 339-346. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2011.03.142>
- [6] Zhao, S., Wei, H., Zhu, M., *et al.* (2016) Green Laser Interferometric Metrology System with Sub-Nanometer Periodic Nonlinearity. *Applied Optics*, **55**, 3006-3011. <https://doi.org/10.1364/AO.55.003006>
- [7] Pricking, S., Dold, E.M., Kaiser, E., *et al.* (2020) 2 KW CW Laser in the Green Wavelength Regime for Copper Welding. In: Clarkson, W.A. and Shori, R.K., Eds., *Solid State Lasers XXIX: Technology and Devices*, SPIE, San Francisco, 56. <https://doi.org/10.1117/12.2546224>
- [8] Yin, Q., Lu, H., Su, J., *et al.* (2016) High Power Single-Frequency and Frequency-Doubled Laser with Active Compensation for the Thermal Lens Effect of Terbium Gallium Garnet Crystal. *Optics Letters*, **41**, 2033-2036. <https://doi.org/10.1364/OL.41.002033>
- [9] Chen, C., Wu, Y., Jiang, A., *et al.* (1989) New Nonlinear-Optical Crystal: LiB_3O_5 . *Journal of the Optical Society of America B*, **6**, 616-621. <https://doi.org/10.1364/JOSAB.6.000616>
- [10] Ukachi, T., Lane, R.J., Bosenberg, W.R., *et al.* (1990) Measurements of Noncritically Phase-Matched Second-Harmonic Generation in a LiB_3O_5 Crystal. *Applied Physics Letters*, **57**, 980-982. <https://doi.org/10.1063/1.104275>
- [11] Jarrett, S.M., Shellikeri, G.P. and Varela, O. (2010) A 200 MW, CW, 355 nm Laser Based on DPSS Side Pumped, Internally Frequency Tripled Technology. *Solid State Lasers XIX: Technology and Devices*, **7578**, 193-200. <https://doi.org/10.1117/12.854939>
- [12] Chuangtian, C., Bochang, W., Aidong, J., *et al.* (1985) A New-Type Ultraviolet SHG Crystal— $\beta\text{-BaB}_2\text{O}_4$. *Science in China Series B-Chemistry, Biological, Agricultural, Medical & Earth Sciences*, **28**, 235-243.
- [13] Masuda, H., Kimura, K., Eguchi, N., *et al.* (2001) All-Solid-State, Continuous-Wave, 195 nm Light Generation in $\beta\text{-BaB}_2\text{O}_4$. *Advanced Solid-State Lasers (2001)*, Paper WA6. Optica Publishing Group, Washington DC, WA6. <https://doi.org/10.1364/ASSL.2001.WA6>
- [14] Boyd, G.D., Miller, R.C., Nassau, K., *et al.* (1964) LiNbO_3 : An Efficient Phase Matchable Nonlinear Optical Material. *Applied Physics Letters*, **5**, 234-236. <https://doi.org/10.1063/1.1723604>
- [15] Kim, Y.S. and Smith, R.T. (1969) Thermal Expansion of Lithium Tantalate and Lithium Niobate Single Crystals. *Journal of Applied Physics*, **40**, 4637-4641. <https://doi.org/10.1063/1.1657244>
- [16] Shukla, M.K., Kumar, S. and Das, R. (2015) Single-Pass Multi-Watt Second-Harmonic-Generation in Congruent and Stoichiometric LiTaO_3 . *IEEE Photonics Technology Letters*, **27**, 1379-1382. <https://doi.org/10.1109/LPT.2015.2421643>
- [17] Gapontsev, V., Avdokhin, A., Kadwani, P., *et al.* (2014) SM Green Fiber Laser Operating in CW and QCW Regimes and Producing over 550W of Average Output Power. *SPIE LASE*, San Francisco, **8964**, Article ID: 896407. <https://doi.org/10.1117/12.2058733>
- [18] Ahmadi, P., Creedon, D., Aschaffenburg, D., *et al.* (2020) Generating KW Laser Light at 532 nm via Second Harmonic Generation of a High Power Yb-Doped Fiber Amplifier. In: Schunemann, P.G. and Schepler, K.L., Eds., *Nonlinear Frequency Generation and Conversion: Materials and Devices XIX*, SPIE, San Francisco, 40. <https://doi.org/10.1117/12.2546377>
- [19] Su, M., You, Y., Quan, Z., *et al.* (2021) 321 W High-Efficiency Continuous-Wave Green Laser Produced by Single-Pass Frequency Doubling of Narrow-Linewidth Fiber Laser. *Applied Optics*, **60**, Article No. 3836. <https://doi.org/10.1364/AO.422514>
- [20] 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): 213-216.
- [21] Chang-Seok, K. and Kang, J.U. (2001) Second Harmonic Generation of Polarization Maintaining Yb-Doped Fiber Laser Using Periodically-Poled Lithium Niobate. *LEOS 2001. 14th Annual Meeting of the IEEE Lasers and Electro-Optics Society*, San Diego, 12-13 November 2001, 58-59.
- [22] Shirakawa, A., Hiwada, K., Hasegawa, S., *et al.* (2005) All-Fiber Linearly-Polarized Yb-Doped Fiber Laser Yielding 2.2-W Green Second Harmonics. *2005 Pacific Rim Conference on Lasers & Electro-Optics*, Tokyo, 11-14 July 2005, 410-411.
- [23] Samanta, G.K., Kumar, S.C., Mathew, M., *et al.* (2008) High-Power, Continuous-Wave, Second-Harmonic Generation at 532 nm in Periodically Poled KTiOPO_4 . *Optics Letters*, **33**, 2955-2957. <https://doi.org/10.1364/OL.33.002955>
- [24] Sinha, S., Hum, D.S., Urbaneck, K.E., *et al.* (2008) Room-Temperature Stable Generation of 19 Watts of Single-Frequency 532-nm Radiation in a Periodically Poled Lithium Tantalate Crystal. *Journal of Lightwave Technology*, **26**, 3866-3871. <https://doi.org/10.1109/JLT.2008.928396>
- [25] Samanta, G.K., Kumar, S.C. and Ebrahim-Zadeh, M. (2009) Stable, 9.6 W, Continuous-Wave, Single-Frequency, Fiber-Based Green Source at 532 nm. *Optics Letters*, **34**, 1561-1563. <https://doi.org/10.1364/OL.34.001561>
- [26] An, H.B., Su, B.H., Niu, L.H., *et al.* (2012) Green Generation by Single-Pass Frequency-Doubling in a Periodically

- Poled MgO:LiNbO₃ at Room Temperature. *Advanced Materials Research*, **622-623**, 1258-1261.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.622-623.1258>
- [27] 焦梦丽, 吕新杰, 刘驰, 等. 周期极化钽酸锂倍频窄谱线全光纤连续激光放大器特性[J]. 中国激光, 2012, 39(3): 30-34.
- [28] Samanta, G.K., Chaitanya, K.S., Devi, K., *et al.* (2012) High-Power, Continuous-Wave Ti:Sapphire Laser Pumped by Fiber-Laser Green Source at 532 nm. *Optics and Lasers in Engineering*, **50**, 215-219.
<https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2011.09.001>
- [29] 郝丽云, 苏岑, 漆云凤, 等. 基于 PPMgO:LN 晶体的连续波全光纤激光器倍频特性[J]. 中国激光, 2013, 40(6): 76-81.
- [30] Lai, R., Hsu, C.S., Hsu, C.W., *et al.* (2019) Single Pass 7 Watts Continuous Wave 532 nm Generation by Focusing Optimized Second Harmonic Generation in MgO:PPLN. In: Schunemann, P.G. and Schepler, K.L., Eds., *Nonlinear Frequency Generation and Conversion: Materials and Devices XVIII*, SPIE, San Francisco, 4.
<https://doi.org/10.1117/12.2510795>
- [31] Zeng, X., Cui, S., Qian, J., *et al.* (2020) 10 W Low-Noise Green Laser Generation by the Single-Pass Frequency Doubling of a Single-Frequency Fiber Amplifier. *Laser Physics*, **30**, Article ID: 075001.
<https://doi.org/10.1088/1555-6611/ab908a>
- [32] Dixneuf, C., Guiraud, G., Ye, H., *et al.* (2021) Robust 17 W Single-Pass Second-Harmonic-Generation at 532 nm and Relative-Intensity-Noise Investigation. *Optics Letters*, **46**, 408-411. <https://doi.org/10.1364/OL.415532>
- [33] Avdokhin, A.V., Gapontsev, V.P. and Grapov, Y.S. (2012) 170W Continuous-Wave Single-Frequency Single-Mode Green Fiber Laser. *Fiber Lasers IX: Technology, Systems, and Applications*, **8237**, 19-20.
- [34] Meier, T., Willke, B. and Danzmann, K. (2010) Continuous-Wave Single-Frequency 532 nm Laser Source Emitting 130 W into the Fundamental Transversal Mode. *Optics Letters*, **35**, 3742-3744. <https://doi.org/10.1364/OL.35.003742>
- [35] 许夏飞, 鲁燕华, 张雷, 等. 外腔谐振倍频 8.7W 连续单频绿光技术研究[J]. 中国激光, 2016, 43(11): 64-68.
- [36] Cui, S., Zhang, L., Jiang, H., *et al.* (2017) 33 W Continuous-Wave Single-Frequency Green Laser by Frequency Doubling of a Single-Mode YDFA. *Chinese Optics Letters*, **15**, Article ID: 041402.
<https://doi.org/10.3788/COL201715.041402>
- [37] Zeng, X., Cui, S., Cheng, X., *et al.* (2020) Resonant Frequency Doubling of Phase-Modulation-Generated Few-Frequency Fiber Laser. *Optics Letters*, **45**, 4944-4947. <https://doi.org/10.1364/OL.401348>
- [38] Sudmeyer, T., Imai, Y., Masuda, H., *et al.* (2008) Efficient 2nd and 4th Harmonic Generation of a Single-Frequency, Continuous-Wave Fiber Amplifier. *Optics Express*, **16**, 1546-1551. <https://doi.org/10.1364/OE.16.001546>
- [39] Chen, H.Z., Liu, X.P., Wang, X.Q., *et al.* (2018) 30 W, Sub-KHz Frequency-Locked Laser at 532 nm. *Optics Express*, **26**, 33756-33763. <https://doi.org/10.1364/OE.26.033756>
- [40] Wang, X.K., Zhou, Z.Y., Li, M.D., *et al.* (2022) Low-Noise and High-Power Second Harmonic Generation of 532 nm Laser for Trapping Ultracold Atoms. *Review of Scientific Instruments*, **93**, Article ID: 123002.
<https://doi.org/10.1063/5.0117561>