



·强激光物理与技术·综述·

基于光纤激光倍频的高功率绿光光源研究进展*

马 天, 李富全, 林宏奂

(中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

摘 要: 详细调研了近年来基于光纤激光倍频的高功率绿光光源的研究进展, 绿光激光功率从百瓦到千瓦, 光束质量近衍射极限, 而且输出功率有望进一步提升。采用光纤激光倍频技术得到高功率绿光光源的技术路线大致分为两条: 一条是用高功率单光束光纤激光器作为基频光源, 然后级联单程非临界相位匹配 LBO 晶体作为倍频; 另一条是用多光束光纤激光器作为基频光源, 然后合成与倍频分别实现, 或者合成与倍频一体实现。对比两条技术路线, 前者相对后者简单, 后者具有更高输出功率的潜力, 但是倍频晶体的弱吸收是两条技术路线共同面临的问题。

关键词: 激光光学; 高功率光纤激光; 倍频技术; 绿光激光; 相位匹配

中图分类号: O439

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202335.220367

Recent progress of high power green laser based on frequency doubling technology for fiber laser

Ma Tian, Li Fuquan, Lin Honghuan

(Laser Fusion Research Center, CAEP, P. O. Box 919-988, Mianyang 621900, China)

Abstract: The green laser can be used for the processing of highly reflective metals such as copper. Compared with the 1 μm laser which is broadly used now, green laser has the absorption efficiency nearly an order of magnitude higher, which can better meet the needs of various fields for the precision processing of highly reflective metals. Thus, the application prospect of high power green laser is very broad. In this paper, recent progress of high power green laser based on frequency doubling technology for fiber laser is investigated in detail. The power of green laser has increased from 100 W to 1 kW, the beam quality is close to the diffraction limit, and the output power is expected to be further improved. There are two technical routes to obtain high power green laser by using fiber laser frequency doubling technology. One is to use high power single beam fiber laser as the fundamental frequency light source and cascade single-pass frequency doubling technology. The other is to use multiple-beam fiber lasers as the fundamental frequency light source, realize beam combining and frequency doubling respectively, or beam combining and frequency doubling at the same time. The former route is simpler than the latter, but the latter has the potential of higher output power. The weak absorption of frequency doubling crystal is the common problem faced by the two technical routes.

Key words: laser optics, high power fiber laser, frequency doubling technology, green laser, phase matching

铜是世界上应用量仅次于铁、铝的第三大金属, 广泛应用于航空航天、高速列车、智能终端产片、电子通讯、电动汽车等多个高端工业领域。目前大规模使用的 1 μm 波段红外光纤激光器, 因对铜的吸收较弱, 在铜材料的加工上, 存在飞溅大、熔深不可控等缺点。飞溅对于铜材料的各个应用领域都有很大负面影响, 例如, 在新能源汽车动力电池的加工中, 飞溅物不仅会影响铜材料的焊接效率, 还会影响电池的生产安全、性能和寿命。

在室温下, 铜对近红外波长(约 1 μm)的吸收率不到 5%, 相当于有 95% 的激光被反射。而铜对绿光波长(532 nm)的吸收率超过 40%, 比近红外波段高了接近一个量级。因此, 为了更好地满足各领域对铜等高反材料精密加工的需求, 高功率绿光激光器的研究是极为重要的课题。此外, 高功率绿光激光在半导体领域可以用于半导体圆片退

* 收稿日期: 2022-12-01; 修订日期: 2023-02-27
联系方式: 马 天, 18383810670@139.com。

火、低温多晶硅(LTPS)显示器退火和太阳能电池制造^[1-2];还可以应用于娱乐行业,用于激光表演和激光投影仪^[3]。

近年来,商用的绿光激光器已经取得了较大的进展,德国通快公司和美国 IPG 公司分别通过碟片激光技术和光纤激光技术,获得超过 3 kW 和 1 kW 的超高功率绿光输出。碟片绿光激光器的输出功率更高,光纤绿光激光器的光束质量更好。

光纤激光器具有结构紧凑、高效率、易散热、可柔性操作等特点,能够输出光束质量好、亮度极高、能量密度极高的激光^[4]。随着双包层大模场光纤的产生、半导体泵浦性能的提升和光纤集成技术的快速发展,光纤激光器的输出功率得到了迅速提升^[5]。国内有数十家从事光纤激光器研发的单位,年产值数十亿元。目前,单束窄线宽输出已达到数千瓦,通过光束合成的方案还有望进一步实现光纤激光器功率的提升^[6-7]。光纤激光发展与绿光光源需求结合是顺理成章的事,随着高功率光纤激光器的飞速发展,基于光纤激光倍频技术的高功率绿光光源研究也取得了一定的进展和突破。

本文对基于光纤激光倍频技术的高功率绿光光源的发展进行了详细的调研,按照使用基频光源的不同,分为基于单束窄线宽光纤激光器倍频绿光光源和基于多束窄线宽光纤激光器倍频绿光光源两大类,分别对采用的基频光源、倍频方案、性能特点等进行了调研。在此基础上,总结出基于高功率光纤激光器倍频绿光光源发展的两条技术路线,最后对倍频晶体的弱吸收如何限制绿光光源效率和功率提升问题开展了分析。

1 基于单束窄线宽光纤激光器倍频绿光光源

近年来,随着高功率窄线宽光纤激光器的快速发展,基于单束窄线宽光纤激光器倍频绿光光源的研究也取得了许多进展,输出绿光功率得到了迅速提升。

2014年,美国 IPG 公司的 Gapontsev 等在 SPIE 会议上报道了一种基于线偏振窄线宽掺镱光纤激光器在 LBO 晶体中单通倍频方案的单模绿光激光器,可以在连续(CW)和准连续(QCW)两种模式下运行^[8]。图 1 的(a)和(b)分别为 CW 和 QCW 方案的装置图,将窄线宽单模光纤激光器输出的 1064 nm 基频光聚焦到非临界相位匹配晶体 LBO 上,经过单通倍频得到 532 nm 的绿光,再通过色分离镜过滤掉基频光。在 CW 模式下,窄线宽光纤激光器最大能够输出 1035 W 的基频光,此时输出功率为 356 W 的连续绿光,倍频效率接近 35%,窄线宽激光器的壁插效率约为 32%,整个绿光激光器的壁插效率约为 11%,且在各个功率下都能保持单模光束质量。在 QCW 模式下,因为峰值功率更高,倍频效率也更高,窄线宽光纤激光器输出平均功率最大达 1067 W,峰值功率达 2 kW,此时输出绿光功率超过 550 W,倍频效率约为 52%,整个绿光激光器的壁插效率约为 16%,且光束质量良好。

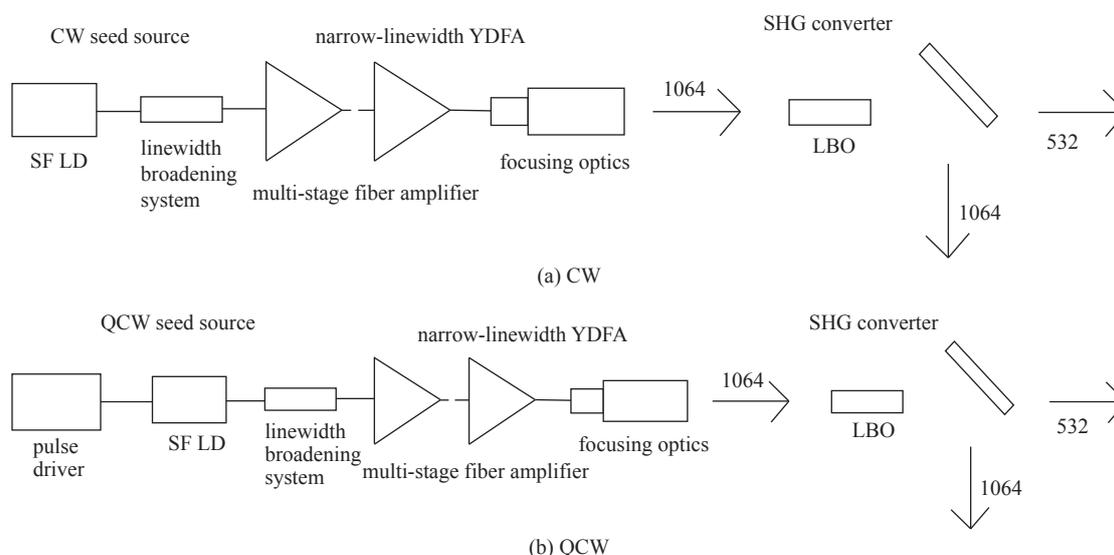


Fig. 1 The schematic of experimental green laser based on narrow linewidth fiber laser of IPG photonics

图 1 美国 IPG 公司基于线偏振窄线宽光纤激光器的绿光光源光路图

2015年,美国 IPG 公司在 SPIE 会议上进一步报道了基于 kW 级窄线宽线偏振单模掺镱光纤激光器准连续模式的单模绿光激光器^[9]。QCW 光纤激光器在 2%~100% 的占空比范围内运行,在几十到几百 MHz 的重复频率下工作。因为 QCW 光纤激光器的 SBS 阈值较 CW 光纤激光器更高,所以峰值功率更高,倍频转换效率有显著提高。在 QCW 模式下,基频光源获得的最大平均功率为 993 W,峰值功率可达 4.73 kW,此时输出绿光功率达 700 W,

倍频效率超过 70%，整个绿光激光器系统的壁插效率约为 23%，重复频率为 150 MHz，且在各个功率水平下都能保持单模光束质量。

2020 年，美国 IPG 公司推出了全新的 VLM-532 和 VLR-532 高功率绿光光纤激光器，该激光器工作模式为脉冲/准连续，重复频率最高可达 250 MHz，脉宽约为 1.2 ns，光束质量 $M^2 < 1.2$ ，电光效率可达 25%，输出功率最高可达 1000 W。这是世界上第一款商用的千瓦绿光单模光纤激光器产品，具有优异的性能和卓越的电光转换效率。

2020 年，美国相干公司的 Ahmadi 等在 SPIE 会议上报道了基于非保偏光纤激光器结合主动偏振控制技术，该激光器采用单通倍频方案的绿光激光器^[10]，装置如图 2 所示。研制了 2 kW 非保偏窄线宽光纤激光器作为基频光源，光纤放大器具有多个增益级，种子源的线宽被展宽到 45 GHz 或更高以提升 SBS 阈值。展宽后，种子激光通过偏振控制器，偏振控制器可以改变输入端的激光偏振态，以补偿光纤放大器中的偏振变化，从而使光纤放大器输出的激光偏振态固定，实现偏振消光比大于 15 dB。基频光源的输出被准直，光束采样器采样一小部分光束用于偏振状态分析，采样光束的一半功率通过半波片和偏振分束器聚焦到光电探测器上，用于向偏振控制器提供反馈信号；另一半功率通过另一个半波片和偏振分束器来测量激光器的偏振消光比。在光束采样器之后，高功率光束通过四分之一波片和半波片，对光纤放大器的输出偏振进行精细校正以提高 SHG 效率。然后用聚焦透镜将光束聚焦到他们自行研发的超低损耗的厚度为 55 mm 的 LBO 晶体上，晶体温度控制在 150 °C 以保证非临界相位匹配，从而最大限度地提高 SHG 效率。色分离镜过滤后的绿光输出准直后耦合到纤芯直径为 50 或 100 μm 的高羟基传输光纤中，抑制高功率绿光传输时的光子暗化效应。光子暗化效应诱导传输损耗增加，会导致光纤激光器的斜率效率和输出功率逐渐降低，并伴随热耗散的增长，抑制光子暗化效应能够改善激光器的功率稳定性。他们设计的激光器最终实现 1 kW 绿光输出，倍频效率为 54%，光束质量 M^2 为 1.01。

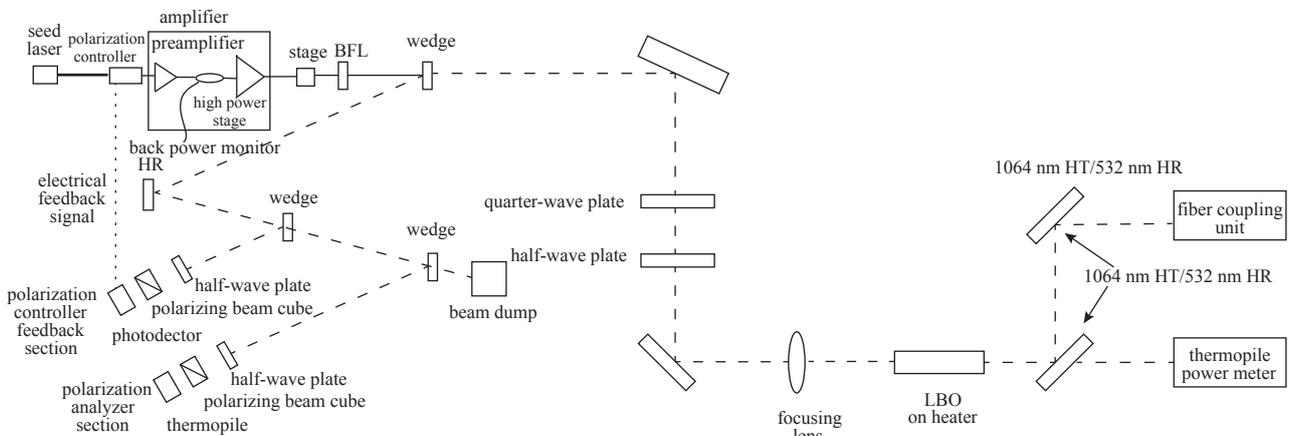


Fig. 2 The schematic of green laser based on non-polarization-maintaining narrow linewidth fiber laser with polarization controller of Coherent

图 2 美国相干公司基于非保偏光纤激光器结合主动偏振控制技术的绿光光源光路图

国内，中国科学院上海光学精密机械研究所在高功率光纤绿光激光器领域开展了系列研究。2021 年 4 月，中国科学院上海光学精密机械研究所的苏梦琪等报道了一种基于窄线宽保偏光纤激光器单通倍频方案的高功率连续波绿光激光器^[11]，其装置图如图 3 所示。基频光源是课题组自主研发的 kW 级窄线宽保偏全光纤激光器，线宽约为 20 GHz，偏振消光比 (PER) 高于 15 dB、光束质量 M^2 优于 1.1。采用 I 类非临界相位匹配 LBO 晶体作为倍频晶体，并且基于塞米尔方程，从理论上分析了影响 LBO 晶体非临界相位匹配的因素，计算 LBO 晶体对基频光的接受线宽和匹配温度，并根据结果优化倍频结构，设计聚焦透镜焦距和晶体控制温度。该激光器最高可在基频光 784 W 时获得 321 W 的连续绿光输出，倍频效率为 40.9%，光束质量 M^2 为 1.07。

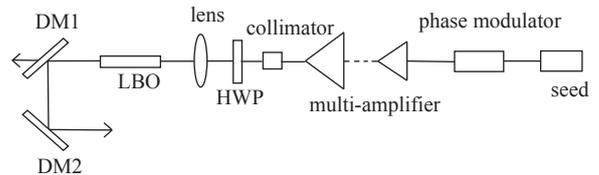


Fig. 3 Schematic of green laser based on narrow linewidth fiber laser of Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics

图 3 上海光机所基于窄线宽保偏激光器的绿光光源光路图

同年 7 月，该课题组又报道了基于该方案获得的 610 W 单模连续绿光输出，此时基频光功率为 1084 W，倍频效率达到 56.27%，光束质量 M^2 为 1.05，输出远场光斑具有基横模形态^[12]。他们采用的装置示意图如图 4 所示，基频光源输出的光束通过准直器准直后，依次通过半波片 (HWP) 和透镜聚焦到 LBO 晶体内，通过调节半波片改变进入

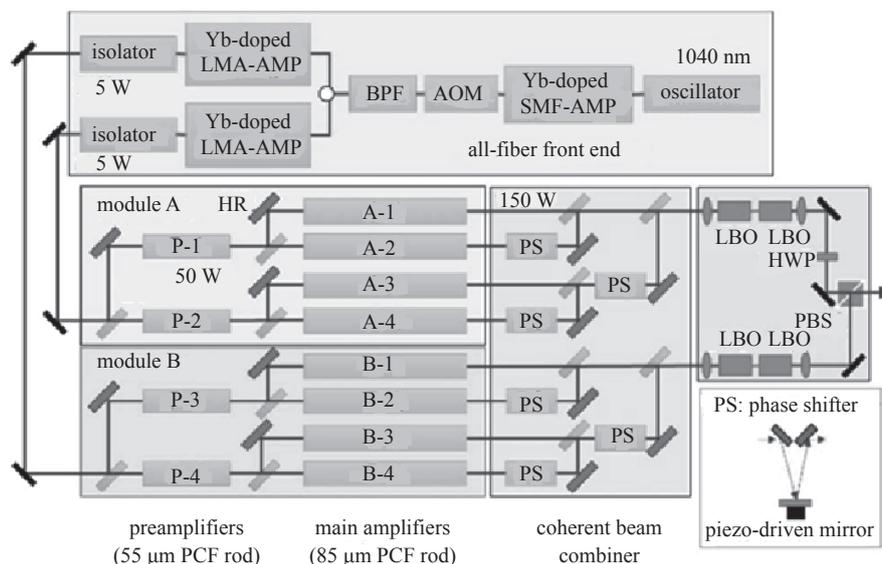


Fig. 4 Schematic for obtaining green laser and ultraviolet laser based on high power nanosecond pulsed fiber laser of Osaka University

图4 大阪大学基于高功率纳秒级脉冲光纤激光器获得绿光和紫外光的系统光路图

LBO晶体的基频光偏振方向,并优化聚焦透镜焦距以获得最高的倍频效率,采用双色镜滤除基频光后,获得绿光输出。

在国内商用绿光光纤激光器产品方面,2021年10月,锐科激光推出了两款ns绿光激光器,这两款激光器均采用光纤倍频方案,最大平均功率分别为50W和200W,重复频率分别可达2MHz和25MHz,窄脉宽设计为1.5~10ns,脉冲波形可调制,脉冲稳定性(峰-峰值)<2%,光束质量 $M^2 < 1.2$ 。2022年6月,深圳公大激光推出了可用于高反金属3D打印以及精密焊接的单模绿光激光器GCL-500,该激光器采用全光纤基频加单通倍频的方案,能够达到最高超过500W的单模连续绿光输出。

2 基于多子束光纤激光器倍频绿光光源

基于多子束光纤激光器倍频获得高功率光纤绿光光源主要有两类方案:一是倍频过程与合束过程独立实现,通过合束获得高功率的基频光,再倍频得到绿光输出,也可以通过偏振合束得到高功率绿光输出;二是采用非线性晶体的类非共线临界相位匹配,合束过程与倍频过程通过一块晶体同时实现。

2017年,大阪大学激光工程研究所的Koji Tsubakimoto等报道了基于高功率ns级脉冲光纤激光器获得绿光和紫外光的系统^[3]。图4是他们采用的装置示意图,种子源输出的光束经过掺镱单模光纤放大器放大后经由光纤分束器分成两束,再通过掺镱大模场面积光纤放大器和PCF放大器放大,模块A和模块B各有四束激光,每个模块的4个光束再次合并成单光束输出,这个过程相当于采用合束的方法获得了两束高功率的基频光源。倍频模块由I型LBO晶体(用于倍频)和II型LBO晶体(用于三倍频)组成,进行倍频实验时,移除II型LBO晶体,模块A与模块B输出的两束基频光通过I型LBO晶体倍频后由PBS进行偏振合束;进行三倍频实验时,基频光聚焦在I型LBO晶体和II型LBO晶体的正中间,两束紫外光再通过PBS进行偏振合束。

实验中,两个模块的四光束合成效率分别为83%和90%,PBS对绿光和紫外光的偏振合束效率均 $\geq 98\%$ 。基频光的最大平均功率为955W,脉宽为285ps,峰值功率强度约 2 GW/cm^2 ,重复频率为10MHz,输出绿光的最大平均功率为600W,倍频效率约67%,输出紫外光的最大功率为300W,转换效率约为40%,高功率下光束质量 M^2 能够保持1.3。

实现多子束光纤激光器倍频的第二种方案是立陶宛EKSPLA公司的Michailovas等2010年在欧洲专利中提出的^[4]。当光束合成和频率变换作为两个独立的过程时,如果想产生高能量高频率的脉冲,需要两个装置,一个装置用于光束合成,另一个用于非线性光学频率变换,但这样系统效率较低,实用性不够高,而且使用两个独立的装置,在对激光束的相位控制上也存在一定难度。而该专利提出的光束合成方法,能够将多束激光组合成能量更高的单束激光,同时实现倍频和合束两个过程。专利的具体装置如图5,光纤激光器($1_1, 1_2, \dots, 1_n$)输出的初始光束通过准直器($2_1, 2_2, \dots, 2_n$)聚焦到II类非线性晶体3(如KTP, LBO, DKDP等)上,这些输出激光束4均相互不共线,

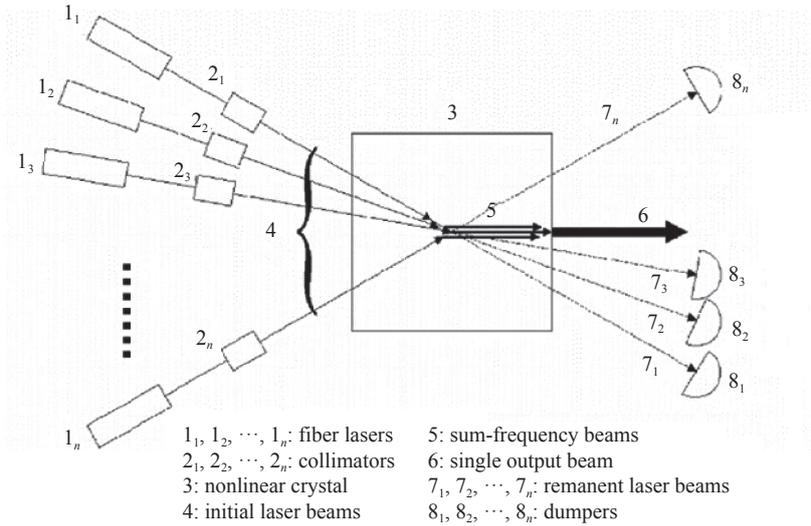


Fig. 5 Frequency doubling beam combining scheme proposed by EKSPALA of Lithuania in European Patent

图 5 立陶宛 EKSPALA 公司在欧洲专利中提出的倍频合束方案

它们的和频光束 5 合成输出为一光束 6; 初始光束的剩余部分(7₁, 7₂, ..., 7_n)采用吸收模块(8₁, 8₂, ..., 8_n)进行吸收。

2017 年, 立陶宛物理科学与技术中心的 JULIJANAS 等报道了基于 Michailovas 等在欧洲专利中提出的光束合成方法的多子束光纤激光倍频实验, 进行了四路合束的概念验证实验^[15]。实验装置如图 6 所示, 他们选取了 4 束(2 对)基频光束, 基频激光全部为脉冲激光, 脉宽 200 ps, 脉冲能量 31 μJ, 最大平均输出功率 16 W, 束腰直径 200 μm, 不同基频光束对产生的和频光束在空间重叠, 获得单个光束。实验采用非相干方案, 为了避免逆转换过程影响倍频效率, 需要控制激光的初始时刻使组内同步、组间异步。实验在基频光功率 4×10 W 时得到了最高 51% 的转换效率, 在 4×16 W 时得到了最大平均功率 29 W 的绿光输出, 此时转换效率约 49%。最高转换效率时, 输出绿光的光束质量 *M*² 在水平和竖直方向上分别为 1.32 和 1.16。通过这个实验, 他们证明了采用倍频合束的方案获得绿光的可行性, 基于光束可能达到的最小角间距, 他们预估光束总数可以达到 14 束, 增加非共线角也可能组合更多数量的光束。这种方案平均功率的提升主要受到基频光纤激光器的峰值功率和非线性晶体中的热效应问题限制。

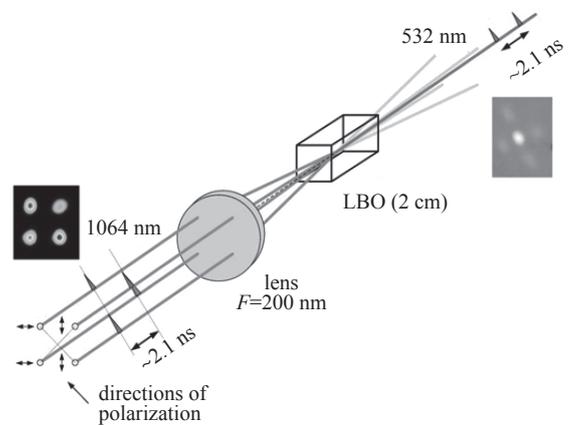


Fig. 6 Schematic of four fiber lasers beam combining based on incoherent scheme by Center for Physical Sciences and Technology of Lithuania

图 6 立陶宛物理科学与技术中心基于倍频合束非相干方案的四路合束实验光路图

2019 年, Julijanas 等进一步报道了基于四路子束倍频合束方案的 97 W 绿光输出, 证明了倍频合束相干方案的可行性^[16]。实验装置如图 7 所示, 基频光脉宽 240 ps, 脉冲能量 66.7 μJ, 最大平均输出功率 60 W, 束腰直径 230 μm。采用两对子束进行合成, 控制四束激光中一束激光的相位来实现倍频激光相位的控制, 当不同组倍频激光相位相同时, 实现相干增强。在基频光功率为 4×26 W 时实现了 49% 的最大转换效率, 输出功率的进一步增加会导致转换效率的降低, 这可能是基频光束的光束质量不好和逆转换效应导致的。在基频光功率 4×60 W 时, 转换效率下降到 40%, 和频光束达到 97 W 的平均功率。在低转换效率下, *M*² < 1.1, 然而光束质量随着效率的提高有所恶化, 他们将其原因归于基频光的光束质量问题。

3 讨论和分析

目前基于高功率光纤激光倍频的绿光光源研究有单子束和多子束两条技术路线, 不管是哪条路线, 对基频光源的研究都是极为重要的。为了使基频光更易转换为二次谐波从而获得更高的转换效率, 基频光源需要满足高峰值功率、窄线宽、线偏振的性能要求。带宽越窄转换效率越高, 对于 LBO 晶体, 带宽一般不要超过 30 GHz。基频

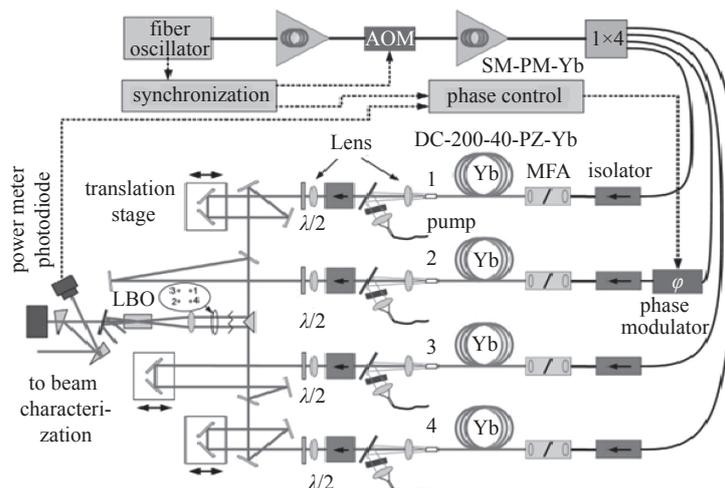


Fig. 7 Schematic of four fiber lasers beam combining based on coherent scheme by Center for Physical Sciences and Technology of Lithuania

图 7 立陶宛物理科学与技术中心基于倍频合束相干方案的四路合束实验装置图

光源的偏振纯度越高越好,一般要求偏振消光比 PER 高于 15 dB,可以采用保偏光纤激光器或者采用偏振控制方案。此外,倍频转换效率与峰值功率密度成正比,因此使用准连续光纤激光器和聚焦后在焦点位置倍频可以提升峰值功率密度。

倍频方案是高功率绿光光纤光源的另一设计重点,根据调研结果,国内外在各个方案的研究中都选择了 LBO 用作倍频晶体。LBO 晶体是一种优秀的非线性晶体,属于正交晶系,具有双折射特性,抗潮解性强。它具有较宽的光谱透过范围(透光范围 210~2300 nm)、较高的非线性系数、较高的激光损伤阈值和理想的化学和力学特性。LBO 晶体常用于倍频、三倍频等一系列非线性激光转换,其非线性系数约为 KDP 的 3 倍^[17]。LBO 晶体既可以用来实现临界相位匹配,也可以用来实现非临界相位匹配(可以实现 1000~1300 nm 波段的 I 类倍频非临界相位匹配,也可以实现 800~1100 nm 的 II 类倍频非临界相位匹配),因此在多种技术路线中都有应用。

使用 LBO 晶体,高功率绿光光纤光源的倍频方案目前常用的有两种设计: I 类非临界相位匹配和 II 类非共线临界相位匹配。I 类相位匹配中,两个相对非线性晶体具有寻常光偏振(o 光)的光子结合,产生一个非寻常光偏振(e 光)的倍频光子。在 II 类相位匹配中,一个寻常光偏振(o 光)的光子和一个非寻常光偏振(e 光)的光子结合,产生一个寻常光偏振的倍频光子。非临界相位匹配主要是利用各向异性双折射晶体的 n_e 随温度变化而变化的特性,调节晶体温度来实现晶体中基频光与倍频光折射率的匹配;而临界相位匹配是通过调节入射光的角度来实现相位匹配,又称角度相位匹配。两个基频光子相互作用、湮灭,产生一个倍频光子,如果三者传播方向相同,光线重叠,称作共线相位匹配;如果参与和频的两束基频光不共线,倍频光与两束基频光也不共线,称作非共线相位匹配。非共线相位匹配的优势是基频光、倍频光的传播方向不同,容易将从晶体出射后的倍频光、剩余基频光分开,但非共线角度差异过大会导致走离增加,倍频效率降低。

I 类非临界相位匹配的优点是高非线性系数带来的高转换效率,并且该过程对角度不敏感,可以通过聚焦倍频提高晶体内部的功率密度;此外,该过程不存在空间走离,光束质量好。这种方案的缺点是晶体需要 150 °C 的高温环境,温度控制和元件高阈值困难。单子束光纤激光倍频大多采用 I 类非临界相位匹配,其中获得高功率绿光的方案通常是单通倍频,即基频光入射至倍频晶体后直接产生倍频光,基频光只通过倍频晶体一次。相比谐振增强方案^[18],单通倍频结构简单,不需要复杂的稳频系统,激光单次通过,鲁棒性好。以束腰半径为 0.1 mm 的 1064 nm 连续激光为例,图 8 是理论计算晶体厚度为 40 mm 和 60 mm 时的基频光功率与输出绿光的功率关系曲线,基频光功率为 2000 W 时,60 mm 晶体输出绿光功率 1170 W,效率约为 58.5%;40 mm 晶体输出绿光功率 1020 W,效率约为 51%。

基于 II 类非共线临界相位匹配的倍频方案可以同时实现合束和倍频过程。对于 LBO 晶体,采用菲涅耳波法线方程计算相位匹配角,基频光束的匹配方向对应于和频光束的

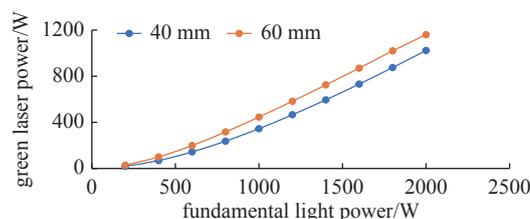


Fig. 8 Relation curves of output green light power and fundamental light power when the thickness of crystal is 40 mm and 60 mm

图 8 晶体厚度 40 mm/60 mm 时输出绿光功率与基频光功率关系曲线

方向,得到两个相位匹配圆,图9(a)是II型LBO晶体(横、纵向切割角分别为 $\theta=21^\circ$, $\varphi=90^\circ$,厚度20 mm)的相位匹配圆。相位匹配圆上任意一对关于中心对称的基频光都能在匹配圆中心产生和频光。这种方案的优点是常温工作,温度控制和元件高阈值简单,并且可以排布多对子束,子束对非共线注入有相干和非相干可选,有利于更高功率或者超窄线宽高功率输出,同时还可以自动实现剩余未转换激光的色分离。以II型LBO晶体(切割角 $\theta=21^\circ$, $\varphi=90^\circ$,厚度20 mm)为例,激光发散半角3.25 mrad,可在相位匹配圆上排布5行共18束子束,如图9(b)所示。可以通过改变晶体切割角增加两个匹配圆的半径,或者增加聚焦透镜焦距减小发散角来增加可排布子束数量。在基频光源能量足够高时,这种方案有望获得超高功率的绿光输出。

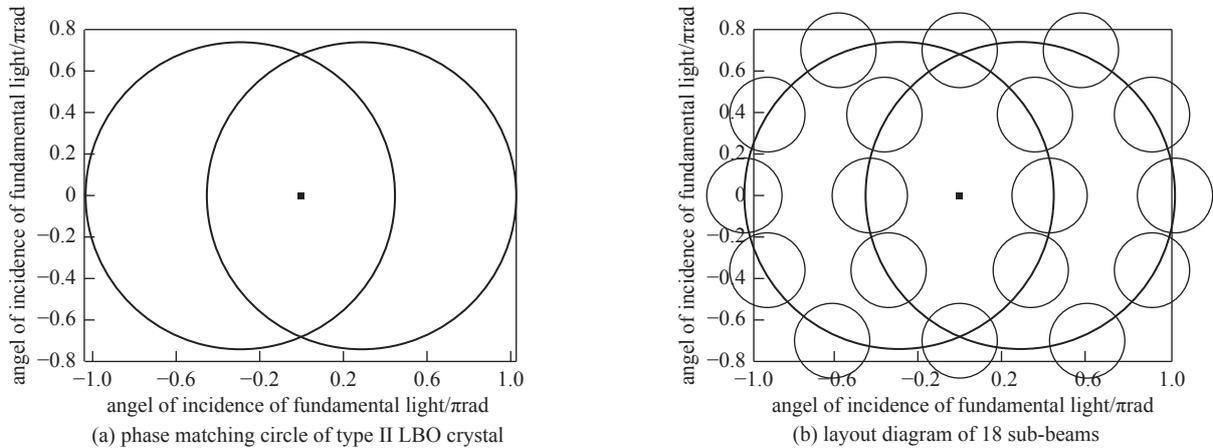


Fig. 9 Phase matching circle of type II LBO crystal and layout diagram of 18 sub-beams

图9 II型LBO晶体的相位匹配圆和18束子束在匹配圆上的排布示意图

不管选择哪种倍频方案,LBO晶体的弱吸收是限制倍频效率和输出功率提升的共同因素。在高平均功率的激光辐照下,由于晶体自身的光热特性,例如热扩散率、热导率以及光热系数等,在激光辐照位置会引起晶体局部的光热效应(热透镜效应)^[19],导致晶体对光能量的弱吸收。研究表明,弱吸收值通常能够直接反映出晶体材料对某一波长光束的吸收能力,这种特性将直接影响到晶体在倍频中的应用,弱吸收值越高,晶体吸收的热量越多,晶体温度升高,这一方面影响相位匹配导致转换效率降低,另一方面可能导致晶体损伤。

用于倍频的晶体必须具有高转换效率和长预期寿命,应用于高功率激光时这尤其具有挑战性,最大限度地减小晶体的表面吸收和体吸收是满足这些需求的关键。

晶体的表面吸收与晶体表面的粗糙度直接相关,表面的任何不光滑都会导致晶体的表面吸收增加,应用于高功率激光时,一般要求晶体表面粗糙度达到 10^{-10} m量级。此外,晶体表面光学薄膜的吸收过大会导致薄膜的损伤,因此需要对薄膜的吸收进行测量并根据测量结果对薄膜进行优化:选择合适的镀膜材料;改进镀膜工艺参数(比如温度、离子源强度等);改进抛光基片质量(膜层吸收偏大,也有可能是基片的抛光参数不合适或者擦拭溶液不合适)。通常使用共路径干涉仪(PCI)测量晶体的表面吸收^[20],PCI能够对晶体表面和薄膜中的吸收损失进行高度灵敏和精确的测量。

晶体的体吸收一般由杂质、色心、导带电子或者是受激光辐照容易受热、融化开裂的区域所引起,由于电子和分子吸收影响,这些在紫外和红外光谱区域表现得尤为明显^[21]。如果晶体纯度不够高或者结构不规则,体吸收会增加。为了使体吸收最小化,晶体本身必须具有非常高的质量。应用于高功率激光时,一般要求晶体具有ppm量级的低体吸收。低体吸收的测量难度较高,可以使用激光诱导偏转(LID)技术来实现精准测量^[22]。

4 结 论

铜材料在航空航天、高速列车、智能终端产品、电子通讯、电动汽车等行业都有重要应用,绿光相比现在市场上普遍使用的 $1\ \mu\text{m}$ 激光吸收效率高近一个量级,能够更好地满足各领域对铜等高反材料精密加工的需求,因此高功率绿光激光器具有非常广阔的应用前景。

近年来基于光纤激光倍频技术的高功率绿光光源发展迅速,根据基频光源的类型,技术路线大致分为两条:一条是用高功率单束光纤激光器作为基频光源,然后级联单程非临界相位匹配LBO晶体作为倍频;另一条是用多子束光纤激光器作为基频光源,然后合成与倍频分别实现,或者合成与倍频一体实现。目前,基于单束光纤激光

器得到的倍频绿光光源已达千瓦输出,国内国外都有持续研究报道和产品推出。基于多子束光纤激光器的倍频可以将倍频过程和合束过程分别独立实现,也可以通过非线性晶体的类非共线临界相位匹配让合束过程与倍频过程同时实现,后者目前仅有低功率下的概念验证性实验。

对比两条技术路线,单子束倍频相对简单,而多子束倍频具有更高输出功率的潜力,但是倍频晶体的弱吸收是两条技术路线共同面临的问题。弱吸收会直接影响到晶体在倍频中的应用,最大限度地减小晶体的表面吸收和体吸收是制造具有高转换效率和长预期寿命晶体的关键。表面吸收与晶体表面的粗糙度直接相关,通常采用CPI进行测量;体吸收受晶体的纯度和结构影响,可以采用LID技术进行测量。应用于高功率激光倍频时,一般要求晶体表面粗糙度达到亚 nm 水平并具有 ppm 量级的低体吸收。

参考文献:

- [1] Uraoka Y, Kawamura Y, Yamasaki K, et al. Crystallization by green-laser annealing for three-dimensional device application[J]. *Journal of the Korean Physical Society*, 2010, 56(5): 1456-1460.
- [2] Hay N, Baker I, Guo Yili, et al. Stability-enhanced, high-average power green lasers for precision semiconductor processing[C]//Proceedings of SPIE 8235, Solid State Lasers XXI: Technology and Devices. 2012: 82351E.
- [3] Chellappan K V, Erden E, Urey H. Laser-based displays: a review[J]. *Applied Optics*, 2010, 49(25): F79-F98.
- [4] 周朴, 冷进勇, 肖虎, 等. 高平均功率光纤激光的研究进展与发展趋势[J]. *中国激光*, 2021, 48: 2000001. (Zhou Pu, Leng Jinyong, Xiao Hu, et al. High average power fiber lasers: research progress and future prospect[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48: 2000001)
- [5] Zervas M N, Codemard C A. High power fiber lasers: a review[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2014, 20(5): 219-241.
- [6] Shiner B. The impact of fiber laser technology on the world wide material processing market[C]//CLEO: Science and Innovations 2013. 2013: AF2J. 1.
- [7] Lin Honghuan, Xu Lixin, Li Chengyu, et al. 10.6 kW high-brightness cascade-end-pumped monolithic fiber lasers directly pumped by laser diodes in step-index large mode area double cladding fiber[J]. *Results in Physics*, 2019, 14: 102479.
- [8] Gapontsev V, Avdokhin A, Kadwani P, et al. SM green fiber laser operating in CW and QCW regimes and producing over 550W of average output power[C]//Proceedings of SPIE 8964, Nonlinear Frequency Generation and Conversion: Materials, Devices, and Applications XIII. 2014: 896407.
- [9] Avdokhin A, Gapontsev V, Kadwani P, et al. High average power quasi-CW single-mode green and UV fiber lasers[C]//Proceedings of SPIE 9347, Nonlinear Frequency Generation and Conversion: Materials, Devices, and Applications XIV. 2015: 934704.
- [10] Ahmadi P, Creedon D, Aschaffenburg D, et al. Generating kW laser light at 532 nm via second harmonic generation of a high power Yb-doped fiber amplifier[C]//Proceedings of SPIE 11264, Nonlinear Frequency Generation and Conversion: Materials and Devices XIX. 2020: 1126414.
- [11] Su Mengqi, You Yang, Quan Zhao, et al. 321 W high-efficiency continuous-wave green laser produced by single-pass frequency doubling of a narrow-linewidth fiber laser[J]. *Applied Optics*, 2021, 60(13): 3836-3841.
- [12] 苏梦琪, 尤阳, 全昭, 等. 高效率单通倍频实现610W连续波单模绿光输出[J]. *中国激光*, 2021, 48: 1315002. (Su Mengqi, You Yang, Quan Zhao, et al. 610-W continuous-wave single-mode green laser output based on highly efficient single-pass frequency doubling[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48: 1315002)
- [13] Tsubakimoto K, Yoshida H, Miyana N. 600 W green and 300 W UV light generated from an eight-beam, sub-nanosecond fiber laser system[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(17): 3255-3258.
- [14] Michailovas A, Mikalauskas S, Regelskis K, et al. Method and device for combining laser beams: 2194426[P]. 2016-03-23.
- [15] Želudevičius J, Regelskis K, Račiukaitis G. Experimental demonstration of pulse multiplexing and beam combining of four fiber lasers by noncollinear frequency conversion in an LBO crystal[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(2): 175-178.
- [16] Želudevičius J, Rutkauskas R, Regelskis K. Coherent beam combining of pulsed fiber amplifiers by noncollinear sum-frequency generation[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(7): 1813-1816.
- [17] Dmitriev V G, Gurzadyan G G, Nikogosyan D N. Handbook of nonlinear optical crystals[M]. Berlin, Heidelberg: Springer, 1991.
- [18] Avdokhin A V, Gapontsev V P, Grapov Y S. 170W continuous-wave single-frequency single-mode green fiber laser[C]//Proceedings of SPIE 8237, Fiber Lasers IX: Technology, Systems, and Applications. 2012.
- [19] Carrion L, Girardeau-Montaut J P. Gray-track damage in potassium titanyl phosphate under a picosecond regime at 532 nm[J]. *Applied Physics Letters*, 2000, 77(8): 1074-1076.
- [20] Alexandrovski A L, Foulon G, Myers L E, et al. UV and visible absorption in LiTaO₃[C]//Proceedings of SPIE 3610, Laser Material Crystal Growth and Nonlinear Materials and Devices. 1999: 44-51.
- [21] 李小矛. 非线性光学晶体弱吸收及激光损伤研究[D]. 北京: 中国科学院理化技术研究所, 2013. (Li Xiaomao. Research on the weak absorption and laser-induced damage of nonlinear optical crystals[D]. Beijing: Technical Institute of Physics and Chemistry, CAS, 2013)
- [22] Mühlig C. Direct and absolute absorption measurements in optical materials and coatings by laser induced deflection (LID) technique[C]//Proceedings of SPIE 8206, Pacific Rim Laser Damage 2011: Optical Materials for High Power Lasers. 2012: 82061I.