



高功率连续绿光激光器的研究进展

邱樟鹏^{1,2}, 王楠^{1*}, 陈子昊¹, 李小婷², 李泽标², 刘建强², 罗又辉², 吕启涛², 闫培光¹

1. 深圳大学物理与光电工程学院, 深圳市激光工程重点实验室, 深圳 518060;

2. 大族激光科技产业集团股份有限公司, 深圳 518057

* 联系人, E-mail: nwang@szu.edu.cn

2023-03-10 收稿, 2023-05-29 修回, 2023-06-05 接受, 2023-06-07 网络版发表

国家自然科学基金(61935014)和深圳市科技计划(JSGG20220831104600001, JCYJ20190808160205460, 20200810161702001)资助

摘要 近年来, 高功率绿光激光器的快速发展引起了国内外学者的广泛关注, 已经逐步应用于工业加工、3C 电子行业、医疗、军事国防等领域. 本文首先对高功率绿光激光相比于近红外激光的优势和主要的应用场景进行介绍, 然后对二极管泵浦全固态、半导体、碟片和窄线宽光纤倍频四种类型的高功率连续绿光激光器的国内外发展现状进行总结. 其中, 光纤激光器具有电光效率高、体积小、光束质量好、成本较低和散热好等特点, 并且单通倍频的方案具有结构简单、易于调节安装等优势. 将高功率窄线宽光纤激光器和单通倍频方案结合, 是实现高功率高亮度小型化绿光激光输出的理想技术方案. 然后, 主要分析了当前高功率窄线宽绿光光纤激光器的关键技术、发展趋势和面临的主要挑战. 最后, 介绍了该类型激光器在焊接工艺中的应用, 并对未来的发展进行了展望.

关键词 高功率, 绿光激光器, 倍频, 窄线宽

高功率绿光激光的发展备受关注, 与更普遍的近红外(near infrared, NIR)光源相比, 绿光光源在激光制造方面具有两个明显的优势: 首先, 在短波长上, 金属(尤其是铜、金和银等高反射金属)通常具有更高的吸收率. 例如, 常温工作下, 铜对532 nm波段附近的绿光吸收率接近40%, 而对1000 nm波段附近的近红外光源吸收率不到5%^[1], 如图1所示, 因此绿光的加工效率约为近红外激光的8倍. 但目前主流还是采用近红外光纤激光器来做铜材料焊接, 铜对红外激光的吸收率较低, 会导致一些熔化的材料飞溅, 影响加工效率. 绿光焊接时回光反射小, 能有效保护激光器的寿命, 同时吸收率大在焊接时能有效降低加工的阈值强度, 抑制熔体喷射和飞溅, 使得焊接深度与宽度比更大^[2]. 其次, 与蓝光半导体激光器相比, 绿光激光能在千瓦级高功率输出时仍保持单模光束质量, 因而在加工时可提供更低的发散度和更小的焦点, 有效提升了加工的精度; 与近

红外激光相比, 绿光激光可作为铜及其合金的切割与焊接的理想工具^[3,4].

高功率绿光激光光源在新能源电动汽车的三电系统^[5]、高反射材料(铜及其合金)的精密焊接^[2,6]、深紫外激光产生^[7,8]、泵浦钛宝石激光器^[9,10]、半导体加工^[11]以及水下光通信和探测^[12]等领域有着广泛应用. 目前, 实现高功率和高亮度绿光激光器的主要技术路线包括使用碟片激光器倍频^[13]和光纤激光器倍频^[14]. 德国通快集团(TRUMPF)于2021年推出高功率连续绿光碟片激光器TruDisk 3022, 能够提供3 kW的最高输出功率, 是目前绿激光系列中的最强功率, 展示了其在铜材焊接方面的应用优势, 但其价格非常昂贵. 美国IPG公司于2022年推出了世界上第一台千瓦级单模绿光激光器GLPN-1000, 可提供高达1 kW的平均功率, 整机体积小, 电光转换效率高达25%, 引起了产业界的广泛关注. 本文概述了领域内不同类别连续绿光激光器的

引用格式: 邱樟鹏, 王楠, 陈子昊, 等. 高功率连续绿光激光器的研究进展. 科学通报, 2023, 68: 4618–4629

Qiu Z P, Wang N, Chen Z H, et al. Research progress in high-power continuous green lasers (in Chinese). Chin Sci Bull, 2023, 68: 4618–4629, doi: [10.1360/TB-2023-0219](https://doi.org/10.1360/TB-2023-0219)

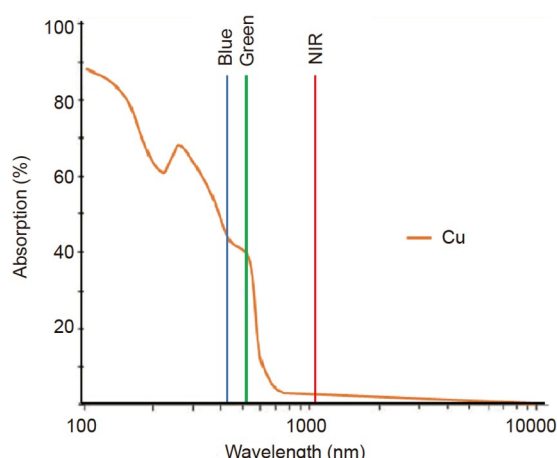


图1 铜的吸收率取决于波长

Figure 1 Absorption of copper depending on the wavelength

研究进展,包括二极管泵浦全固态连续绿光激光器、半导体连续绿光激光器、碟片连续绿光激光器和窄线宽保偏掺镱光纤激光器倍频绿光激光器。光纤倍频绿光激光器由于具有转化效率高、接近单模输出的优点,且从大模场保偏增益光纤到光纤无源器件的国产化趋于成熟,已展现出良好的市场化前景。本文概括了这类激光的技术方案,包含不同类型窄线宽种子源、光纤激光功率放大过程中非线性效应的抑制、高效倍频的原理与关键技术,最后介绍了高功率绿光激光在焊接中的应用研究。

1 高功率连续绿光激光器的研究现状

1.1 二极管泵浦全固态连续绿光激光器

历史上,第一批高功率绿光激光器是氩离子激光器。然而,这些都是大型、笨重且效率极低的系统,需要大量冷却,并产生较高的拥有成本。它们的输出功率通常限制在10 W以内。进入20世纪90年代,随着二极管泵浦固体激光器和倍频技术的发展,全固态绿光激光器得到了空前发展^[15],氩离子激光器被更强大、高效和紧凑的固体倍频激光器所取代。二极管泵浦固体激光器(diode pumped solid state lasers, DPSS)绿光光源使用常用的Nd:YAG和Nd:YVO₄激光系统,泵浦方式分为侧面泵浦和端面泵浦,结合腔内或腔内倍频装置。三硼酸锂(LBO)、磷酸钛氧钾(KTP)和周期极化钽酸锂(PPLT)等非线性晶体已广泛用于倍频。

早在2004年,美国Coherent公司报道了一台商业化

的高功率单模连续固体绿光激光器。该产品采用Nd:YVO₄/LBO组合、环形腔内倍频的方式,实现18 W绿光输出。其由于单模输出的特性,具备了低噪声的特点。同年,Bai等人^[16]报道了二极管端面泵浦Nd:YVO₄中引入LBO晶体,通过V型腔内倍频的方式最高输出9.9 W的532 nm单模连续绿光。这款绿光激光器的倍频转换效率高达34.8%。2006年,Mukhopadhyay等人^[17]报道了二极管侧面泵浦Nd:YAG/KTP连续绿光激光器,采用V型腔内倍频的方式输出30.5 W绿光,倍频转换效率为11.7%。2008年,姚建铨院士课题组^[18]报道了高功率侧面抽运Nd:YAG/KTP连续绿光激光器,采用优化的三镜折叠腔结构,腔内倍频得到最高18.7 W的连续绿光激光输出,倍频转换效率为10.4%。该激光器功率稳定性良好且成本低,可应用于彩色显示等领域。2009年,李凤琴等人^[19]选用低掺杂浓度的Nd:YVO₄/YVO₄复合晶体,采用V型腔内LBO晶体倍频获得单模连续绿光最高输出功率为12.9 W,倍频转换效率高达43%。同年,姚建铨院士课题组^[20]将三镜折叠腔结构进一步优化,将连续侧泵固体绿光激光器的输出功率提升至36.6 W。同年,许祖彦院士课题组^[20]报道了一台输出功率高达40 W的连续侧泵固体绿光激光器。2010年,Meier等人^[21]报道了一台134 W的全固态连续绿光激光器,其倍频效率高达90%,是目前报道过的功率高达150 W的激光器中倍频效率最高的绿光激光器。2020年,卢华东团队报道了一台全固态单频连续激光器,通过有效补偿热效应,单个谐振腔单频1064 nm激光的输出功率从33.7 W提高至101 W,将倍频后的单频连续绿光激光功率从18 W提高至30 W。2023年,卢华东团队^[22]将全固态单频连续激光器进一步优化:谐振腔采用对称的环形结构,腔内插入5块激光晶体(Nd1-Nd4, LBO)。谐振腔单频1064 nm激光的输出功率从33.7 W提高到140 W,经腔内倍频输出的单频连续绿光激光功率为30.2 W,倍频转换效率为21.4%。该激光器是目前国际上采用单个谐振腔所能实现的最高指标。

尽管DPSS技术带来了广泛的好处,但由于激光晶体中的热束畸变,将腔内倍频DPSS激光器的绿光输出功率扩展到约100 W功率水平是一个挑战^[23]。DPSS激光器也已与包含非线性晶体的外部谐振腔结合使用。从上述方案及研究成果可以看出:腔内倍频会有所限制,要做到100 W以上的绿光都很困难,所以现在用到更多的是腔外倍频的方案。但目前二极管泵浦固体激光器要倍频输出千瓦级绿光还存在很大困难。

1.2 半导体连续绿光激光器

直接泵浦的半导体绿光激光器目前仅限于非常低的功率,通常在百毫瓦量级^[24]。相比之下,使用间接泵浦形式的光学泵浦半导体激光器(optically pumped semiconductor laser, OPSL)可以获得更高的输出功率。OPSL使用薄半导体多层膜作为增益介质,其下面通常还包含高反射层。这种结构通常具有较大的表面积,并安装在散热器上。OPSL增益介质封装在谐振腔中,通常用二极管激光器泵浦。由于OPSL通常在近红外范围内发射,为了产生绿光, Berger等人^[25]于2012年结合腔内倍频晶体,在保持基模光束质量的同时,通过在单个腔中添加多个OPS芯片,实现了20 W连续绿光激光的输出。他们可以进一步改进这种配置,但要以光束质量为代价。因此,该技术仅限于在单模模式下工作的小于50 W的激光系统^[26],采用半导体绿光激光器方案实现千瓦级绿光输出还存在很大困难。

1.3 碟片连续绿光激光器

实现高功率绿光输出的一项关键技术是碟片激光器系统的倍频。碟片激光器系统包括数百微米厚的掺镱增益介质,注入安装在散热器上的镜子上。低热透镜和大模场面积是实现近红外激光输出功率达到数千瓦水平的关键因素。该系统的主要难点在于整体尺寸大和谐振腔的设计非常复杂^[14],在功率缩放的过程中保持良好的光束质量仍然具有挑战性。通过使用谐振腔中的孔径可以获得基横模式光束质量,从而对系统的效率产生影响。2012年, Weiler等人^[27]报道了一种腔内倍频Yb:YAG碟片激光器,可提供255 W连续绿光,具有单模光束质量。通快集团^[28]基于自身独有的碟片激光技术,在2015年首次发布了1 kW高亮度连续绿光激光器TruDisk 1020;与红外激光相比,使用绿光激光焊接的优点是对铜材料的吸收系数显著提高。2020年,通快集团^[13]推出高功率绿光连续光激光器TruDisk 2021,能够以6 mm·mrad的光束参数提供2 kW的最高输出功率。在2021年第十四届中国国际电池技术展览会上,德国通快首发旗下3 kW高功率连续绿光碟片激光器。该产品能够以6 mm·mrad的光束参数提供3 kW的最高输出功率,光束质量好,可进行高质量深熔焊,也可进行热传导焊来实现均匀连续的焊缝表面,非常适合铜、铝等高反材料的焊接工作。特别是在以新能源汽车动力电池为代表的锂电行业,通快碟片绿光激光器系列(1000/2000/3000 W)可实现多达120层的铜箔焊接,几

乎无飞溅,熔深精确可控。此外,高功率绿光在纯铜材料3D打印应用上也有着突出优势。

国内如中国科学院大连化学物理研究所^[29]在高功率碟片激光器上经过多年的技术攻关,于2022年实现输出波段为1031 nm激光的平均功率超过210 W,近衍射极限的光束质量($M^2 < 1.2$),经过倍频最高能输出功率为百瓦级的绿光。因此,目前国内千瓦级高功率碟片绿光激光器领域尚属空白,这主要是由于碟片绿光激光器系统的增益介质和谐振腔设计过于复杂,该方案实现千瓦级绿光输出还存在巨大困难。

1.4 窄线宽掺镱光纤激光器倍频绿光激光器

光纤激光技术在产生高功率高亮度绿光激光方面具有技术潜力,如高效的热管理、良好的光束质量、较高的光电转化效率和较低的成本。使用高功率光纤激光进行倍频有两种典型方案,即谐振腔内倍频和腔外单通倍频。谐振腔倍频方法需要单频光纤激光器来获得有效的功率耦合。但是,单频光纤激光器的功率水平受到光纤中受激布里渊散射(stimulated Brillouin scattering, SBS)效应和模式不稳定(model instability, MI)效应的限制,这将限制通过这种方法实现绿光激光器的功率缩放。此外,与单通倍频相比,谐振腔内倍频是一个更复杂的方案。单通倍频的优势在于结构设计更为简单紧凑、鲁棒性强和节约成本等。LBO晶体是一种用于高功率倍频的优秀非线性光学晶体,具有超高的损伤阈值(超过10 GW/cm²)、超高的倍频效率、可透光波段范围宽、较小的走离角和非临界相位匹配(noncritical phase-matching, NCPM)等优点。

2014年, Gapontsev等人^[14]报道了采用1 kW窄线宽全保偏掺镱光纤激光器和LBO晶体单通倍频的方法输出356 W绿光,倍频效率达到35%。2020年, Ahmadi等人^[30]报道了采用功率超过2 kW且线宽窄至45 GHz的非保偏窄线宽掺镱光纤激光器和LBO晶体单通倍频的方法输出1 kW绿光。该放大器的设计经过优化,可以明显减少非线性效应的影响,倍频转换效率高达54%。这是目前非保偏结合单通倍频方案报道的最高倍频效率。2021年, Su等人^[5]报道了采用功率为784 W、线宽窄至20 GHz的全保偏窄线宽掺镱光纤激光器和LBO晶体单通倍频的方法输出321 W绿光,倍频效率为40.9%。同年,他们^[31]将全保偏窄线宽光纤激光器的功率提升至1.1 kW,单通倍频输出的绿光功率提升至610 W,倍频效率高达56.27%,这也是目前基于全保偏结合单通倍

频方案所报道的最高倍频效率,为工业应用的理想光源。IPG公司基于已有的高功率窄线宽保偏/非保偏光纤激光器研究,推出了GLPN系列绿光光纤激光器,平均输出功率覆盖50、100、200、500 W,更是于2022年推出世界上第一台千瓦绿光单模激光器GLPN-1000,能够以单模输出高达1000 W的平均功率,电光转换效率超过25%。

2022年,罗正钱教授课题组^[32]开发出一种工作在绿光波段的瓦级全光纤掺Pr³⁺激光器,可直接稳定输出中心波长521 nm、平均功率3.62 W的连续波绿光激光。2023年,该团队^[33]首次利用声光腔倒空技术在稀土掺杂氟化物光纤中直接产生了重频频率在100 Hz且脉冲能量为3.17 mJ的绿光(543 nm)脉冲,为稀土掺杂氟化物光纤中直接产生的最大能量的绿光脉冲。这两项工作作为可见光波段高性能全光纤激光的产生提供了一种有效的新方案,这一突破将为小型化可见光光纤激光器在生物医学、激光显示、水下光通信、水下探测和光谱学等领域的应用奠定良好基础。

2 高功率窄线宽线偏振绿光激光器的关键技术

高功率窄线宽线偏振绿光激光器由基频光源(窄线宽种子源和放大器组合,种子源输出低功率激光经过放大器进行功率放大)和倍频装置组成。基频光源即高功率窄线宽全保偏光纤激光器是一种基于紧密型主振荡功率放大(master oscillator power amplifier, MOPA)结构的高功率、窄线宽、线偏振激光器。全光纤结构的光纤激光器具有集成度高、稳定性好、工程化应用难度低等优点,使得基于全光纤结构的窄线宽光纤激光器得到迅速发展。

2.1 高功率窄线宽全保偏连续光纤激光器的研究现状

2018年,IPG公司^[34]实现了基于相位调制技术的2 kW窄线宽(30 GHz)激光输出。2019年,王岩山等人^[35]进一步开展相位调制和保偏光纤激光器研究,采用白噪声信号相位调制的种子源并经过多级放大,实现了

表1 四种类型的高功率连续绿光激光器的国内外研究现状总结表

Table 1 Research status of four types of high power continuous green fiber lasers at China and abroad

年份	研究机构	类型	绿光功率(W)	倍频效率(%) ^{a)}
2004	Coherent	全固态	18	—
2004	西北大学 ^[16]	全固态	9.9	34.8
2006	Indore ^[17]	全固态	30.5	11.7
2008	天津大学 ^[18]	全固态	18.7	10.4
2009	山西大学 ^[19]	全固态	12.9	43
2009	天津大学 ^[20]	全固态	36.6	—
2009	中国科学院理化技术研究所 ^[20]	全固态	40	—
2010	马克思-普朗克研究所 ^[21]	全固态	134	90
2020	山西大学	全固态	30	29.7
2023	山西大学 ^[22]	全固态	30.2	21.5
2012	Coherent	半导体	20	27
2012	通快 ^[27]	碟片	255	30
2015	通快 ^[28]	碟片	1000	—
2020	通快 ^[13]	碟片	2000	55
2021	通快	碟片	3000	50
2014	IPG ^[14]	窄线宽光纤	356	35
2020	Coherent ^[30]	窄线宽光纤	1000	54
2021	中国科学院上海光学精密机械研究所 ^[5]	窄线宽光纤	321	40.7
2021	中国科学院上海光学精密机械研究所 ^[31]	窄线宽光纤	610	56.27
2022	IPG	窄线宽光纤	1000	—

a) “—”表示无相关数据

2.62 kW(线宽为32 GHz)的线偏振激光输出. 2020年, Wang等人^[36]又报道了一种基于全光纤保偏主振荡功率放大器的3.08 kW窄线宽(线宽为0.2 nm)线偏振激光输出, 为高功率窄线宽保偏基频光源方案提供了一种崭新思路(该方案的优势: 将10 W的光纤振荡种子源直接放大至3 kW, 整体方案较为简单, 无须经过多级放大), 有望通过腔外倍频输出1 kW以上的绿光激光. 2022年, 任帅等人^[37]报道了基于白噪声相位调制种子源, 经保偏预放大器和主放大器, 实现了近单模保偏光纤激光器的输出功率突破4.5 kW, 3 dB线宽为0.33 nm. 同年, 王岩山等人^[38]进一步优化单频种子源消除随机相位调制、偏振度管理、弱模耦合及高效热管理技术, 有效抑制了窄线宽光纤激光放大过程中存在的受激布里渊散射(stimulated Brillouin scattering, SBS)及横模不稳定(transverse mode instability, TMI)效应, 实现了5.043 kW的窄线宽线偏振近单模光纤激光输出, 最大功率下二阶矩线宽(20 dB)为0.2 nm. 以上研究的高功率窄线宽保偏光纤激光器均可作为倍频产生绿光激光的理想光源. 2023年, 大族激光与深圳大学的研究人员共同搭建了高功率窄线宽全保偏连续光纤激光器, 将20 W的光纤振荡种子源通过双向泵浦的方式直接放大至1.05 kW(8 h工作功率稳定性为 $\pm 1\%$), 3 dB线宽为0.26 nm, 未来有望将功率提升至3 kW, 并作为基频装置倍频出千瓦级高功率绿光激光. 整体实验装置如图2所示.

2.2 窄线宽种子源

2.2.1 光纤振荡种子源

基频光装置用到的高稳定性窄线宽种子源, 是由于光谱展宽而形成少纵模的光纤振荡激光器(fiber oscillator laser, FOL)种子源. 含有光纤振荡激光器种子源的MOPA方案具有只需经过单级放大、结构简单、成本低等优势. FOL种子源的放大器不需要考虑受激布里渊效应. 但由于自相位调制和四波混频, 在放大过程中会发生光谱展宽效应, 可采用短腔长的形式来抑制该效应. 光纤振荡种子源如图2所示, 由激光二极管、一对保偏光纤布拉格光栅、腔内为保偏掺镱光纤、一个保偏包层功率剥离器、一个保偏光纤隔离器和一个保偏模式场适配器组成. 高反光纤光栅的快轴波长与输出光纤光栅的慢轴波长相匹配, 以实现偏振选择.

虽然目前高功率窄线宽光纤激光器采用相位调制种子源并进行放大的研究颇多, 该方案有诸多优点, 如种子源激光在放大过程中线宽可以保持不变、受激拉曼散射(stimulated Raman scattering, SRS)阈值高等, 但是要经过多级放大(一般至少需要三级)以及一整套复杂的电控系统, 导致这种方案非常复杂.

以一种少纵模数的FOL种子源和一种高功率的保偏全光纤放大器为基础, 对不同泵浦方案下的种子源和保偏放大器的光谱展宽特性进行研究和优化, 基于双端泵浦方案和更高的反向抽运功率, 可以实现最大

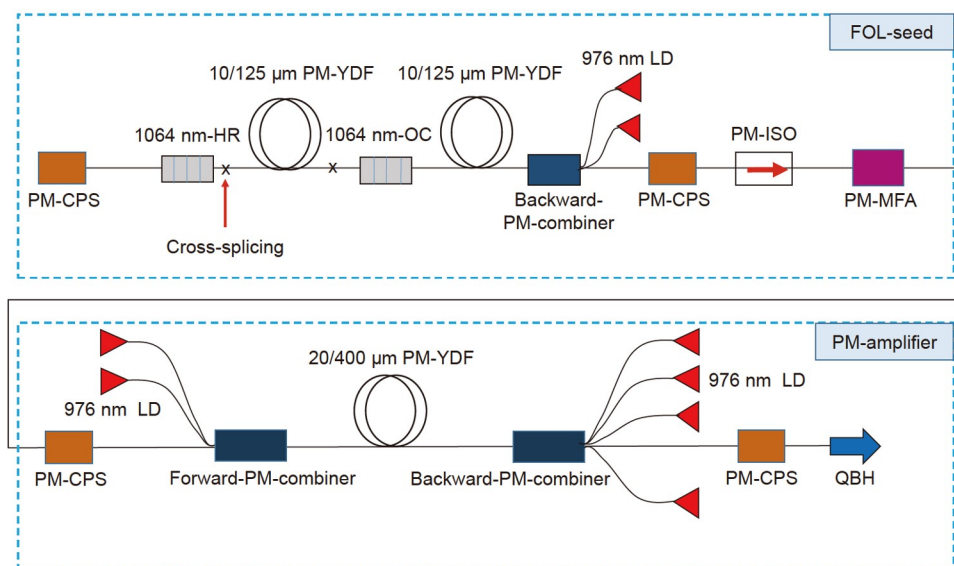


图2 高功率窄线宽保偏连续光纤激光器实验装置图

Figure 2 Experimental setup of the high-power narrow-linewidth polarization-maintained continuous fiber laser

输出功率超过3 kW的窄线宽全光纤激光器^[36]。但该种子源仍然存在缺点:目前的研究结果显示,在主放大级输出千瓦级功率的同时,无法将激光线宽压窄至0.1 nm以内。可以得出结论:利用FOL种子源在抑制SBS效应及支持与主放大级相连(无需经过多级预放大),获得更简单、更紧凑的高功率窄线宽MOPA结构上具有更实际的应用价值,在如何压窄放大后的激光线宽上还需进一步研究。

2.2.2 单频相位调制种子源

单频激光相位调制种子源是一种时域稳定的窄线宽光源,被认为是MOPA型高功率窄线宽光纤激光器的最佳种子源方案。目前,大多数报道的千瓦级窄线宽光纤放大器都使用单频激光相位调制种子源方案。随着光纤激光器向高功率方向发展,采用相位调制法抑制大功率光纤激光器中SBS效应的研究越来越受到重视。此外,应用于相位调制器的信号不再局限于正弦信号。已经有广泛的研究利用射频高斯白噪声和伪随机序列码对单频激光进行相位调制^[39]。

正弦相位调制是最基本的相位调制方法之一,因为理论上任何负载电信号的调制都可以等效于无穷多个正弦信号通过傅里叶变换进行叠加。通过信号发生器对单频激光器进行正弦相位调制,单频激光经过正弦相位调制后变为多波长激光,以展宽激光的光谱宽度,从而提高了光纤激光功率放大过程中SBS的阈值^[40]。

单频输入光和正弦调制信号的表达式分别是

$$\begin{aligned} E &= E_0 \cos(\omega_0 t + \varphi_0), \\ E_M &= E_{M0} \cos(\omega_1 t + \varphi_1), \end{aligned} \quad (1)$$

式中, E_0 、 ω_0 、 φ_0 、 E_{M0} 、 ω_1 、 φ_1 分别是输入激光和调制信号的振幅、角频率、初相位。

相位调制是通过对单频光施加单级正弦调制信号来实现的,可以得到调制光的表达式为

$$E_1 = E_{10} \cos[\delta_1(\omega_1 t + \varphi_1) + \omega_0 t + \varphi_0], \quad (2)$$

式中, $\delta_1 = \pi E_{M0} / V_\pi$ 是调制幅度, V_π 是相位调制器的半波电压。

输出光场按照第一类贝塞尔函数展开:

$$E_1(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} j^n J_n(\phi_0) \exp(-jn\varphi_0) \exp[-j(\omega_0 + n\omega_m)t], \quad (3)$$

对单频光施加正弦相位调制信号后,输出多波长激光;波长相邻的激光之间角频率间隔为 ω_1 ,各波长分量的

振幅由第一类贝塞尔函数决定,与调制信号的幅度 δ_1 相关;调制形成的多波长光谱特性由调制频率和调制幅度所决定^[39]。

WNS是一种非周期性质的电信号,使用带通滤波器来控制带宽,使用射频放大器来提供合适的电压,利用放大后的射频信号驱动电光相位调制器(electro-optic modulation, EOM),对单频激光进行相位调制,从而拓宽了种子激光的光谱宽度。白噪声相位调制的频谱是连续的,线型依赖于滤波情况,可以实现较强的SBS阈值提高^[41,42]。

PRBS和WNS的调制方式有很大不同。在实际应用中,电光相位调制器存在电压上限,这影响了正弦相位调制的深度,从而限制了SBS的抑制效果。与正弦相位调制相比,WNS和PRBS是抑制SBS效应更优化的相位调制方式。在选定的最优模式条件下,在给定的光纤长度和信号波束宽度下,PRBS调制对SBS的抑制效果优于WNS调制^[43]。此外,当信号波束宽度接近布里渊频移(16 GHz)时,信号激光线宽与布里渊频移的光谱重叠为布里渊过程的放大提供了机会,从而降低了SBS阈值。对于WNS调制,这种放大是无法控制的;而对于PRBS调制,可以通过微时钟频率来控制这种放大,使PRBS调制具有更广阔的前景,进一步展宽线宽,提高SBS的阈值^[44]。

2.3 抑制光纤激光功率放大过程中的非线性效应

功率的进一步提高仍然是光纤激光器的研究热点。激光功率放大技术是实现功率提升的重要手段,该技术的研究对于功率提升具有重要意义。如前所述,高功率窄线宽光纤激光器的功率提升过程就是不断突破SBS、MI和SRS阈值的过程,而关键技术是相应的抑制SBS和MI的方法。SBS抑制技术主要包括增大光纤模场面积、减小光纤长度、优化主放大器泵浦结构、引入增益竞争,以及应用温度或应力梯度来拓宽布里渊增益谱。此外,对于单频种子相位调制的窄线宽激光器,优化相位调制信号也是提高SBS阈值的关键^[45]。

抑制MI的关键技术可以从三个方面进行总结:优化种子源、优化泵浦激光器和优化主放大器光纤参数。对种子源的优化包括增加种子激光的功率、增加种子激光的线宽和选择发射截面较大的种子激光波长。泵浦激光的优化包括后向或双向泵浦结构、915 nm激光泵浦、同步泵浦等技术;对主放大器光纤参数的优化

包括减小纤芯包层比、减小数值孔径、减小光子暗化和增大高阶模式损失。此外,长锥形光纤的锥形结构可使光束在传输过程中保持较好的光束质量,而且锥形结构可引起SBS频移以拓宽SBS增益谱,以具有较高的SBS阈值,近年来也引起了广泛关注^[46]。

抑制SRS的技术主要分为特种光纤设计和系统整体结构优化两大类^[47]。特种光纤设计中大模场光纤如部分掺杂光纤、锥形光纤、纺锤形光纤等展现了出色的抑制能力和高功率应用前景。系统结构优化除了采用长周期光栅或啁啾倾斜布拉格光栅作为拉曼滤波元件外,主要基于系统的各项参数及其他非线性效应(如自发辐射放大、自脉冲、四波混频等)对拉曼光的影响,通过优化相关参数实现拉曼抑制。为进一步抑制SBS、TMI和SRS效应,可开展非线性效应组合抑制策略的研究,以提升现有高功率高光束质量光纤激光系统功率水平。

2.4 高效倍频的技术研究

2.4.1 倍频的基本原理

倍频技术是一种频率转换技术,它是由较低频率的激光转换成频率较高的激光,是现如今最成熟和最常用的一种倍率转换技术。激光器的倍频方式可分为腔内倍频和腔外倍频两种,根据激光器的不同特性选择合适的倍频方式可以实现最佳倍频效果。本文介绍的方案是采用1064 nm基频激光通过腔外LBO晶体倍频产生532 nm激光。采用腔外倍频的方式,由于没有在谐振腔内引入倍频晶体,不会增加腔内损耗,因此不会增大激光产生阈值。而对于高功率窄线宽连续光纤激光器,采用腔内倍频需要更高的成本且较难获得高功率的输出,因此采用腔外倍频是实现此次方案的最好方法。

倍频过程是一个相位敏感的过程,通常需要相位匹配才可以达到较高的效率。这意味着在非线性晶体不同位置产生的谐波场在晶体的出射面相干叠加。如果相位匹配合适,且入射激光具有高强度、高的光束质量以及合适的线宽,倍频转换效率有望超过50%。随着基频光在LBO晶体中传播,当满足相位匹配条件时,倍频得到的绿光功率会增大,不满足相位匹配时,倍频得到的绿光功率会减小。

由二次谐波理论推导得到倍频转换效率公式^[48],设 P_1 为基频光功率, P_2 为倍频光功率,可得

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{8\omega_1^2 d^2 L_c^2}{n_1^2 n_2 c^3 \epsilon_0} \cdot \frac{P_1}{A} \cdot \text{sinc}^2\left(\frac{\Delta k L_c}{2}\right) t, \quad (4)$$

其中, A 为基频光束在非线性光学倍频晶体中的横截面积, ω_1 为基频光频率, L_c 为晶体长度, Δk 为相位失配量, d 为倍频系数。为方便讨论,从式(4)中可得出以下结论:倍频光的强度与基频光强度的平方成正比;倍频转换效率取决于基频光的功率,倍频效率还与晶体中基频光的功率密度 $\frac{P_1}{A}$ 成正比;倍频转换效率与有效非线性系数 d 的平方成正比,能够通过改换晶体类型以及不同的基频光偏振方向来优化倍频转换效率。

2.4.2 高效倍频的关键技术

LBO晶体具有更小的非线性效应系数和更高的损伤阈值。提高倍频效率有两种方法,即增加相互作用长度和增加晶体内部的功率密度。对于单通倍频,相互作用长度由LBO长度决定。功率密度由束腰半径决定,并受晶体表面损伤阈值限制。所以需要增加晶体内部的功率密度,但要在LBO的角度接受范围内保持角度发散。根据Boyd和Kleinman^[48]提出的高斯光束二次谐波理论,设激光波长为1064 nm,选用长度为40或60 mm的LBO晶体为前提条件,由聚焦参数公式可得

$$b = L_c / \xi = 2n_\omega \pi \omega_0^2 / \lambda_\omega, \quad (5)$$

式中, L_c 是晶体长度, b 是高斯光束的聚焦参数, n_ω 、 ω_0 和 λ_ω 分别是晶体内的折射率、基频激光波长和光束束腰半径。结合二次谐波理论,当聚焦参数 $\xi = L_c / b$ 在 $1.52 < \xi < 5.3$ 范围内时,效率不会有所降低。为了提高晶体内部的功率密度,使用聚焦透镜在晶体内部产生束腰的同时,还要确保聚焦参数在 $1.52 < \xi < 5.3$ 范围内。影响相位匹配的因素很多,包括基频光的线宽和发散角以及晶体温度。所有这些因素都会导致相位不匹配:

$$\Delta k = 2k_\omega - k_{2\omega} = \frac{4\pi}{\lambda_\omega} (n_\omega - n_{2\omega}). \quad (6)$$

通过实现相位匹配即基频光折射率与倍频后的绿光折射率相等,设基频光折射率为 n_ω ,出射的绿光折射率为 $n_{2\omega}$,最佳相位匹配条件为 $\Delta k = 0$,即 $n_\omega = n_{2\omega}$ 时可实现相位匹配。

因此,高效倍频的关键是如何实现基频光的折射率与倍频激光的折射率相等。LBO指数作为 x 、 y 和 z 轴上波长和温度的函数,可以用Sellmeier方程表示^[49]:

$$\begin{aligned}
n_x(t) &= n_x(t_0) + (-3.76\lambda + 2.30) \times 10^{-6} \\
&\quad \times (\Delta t + 29.13 \times 10^{-3} \Delta t^2), \\
n_y(t) &= n_y(t_0) + (6.01\lambda - 19.40) \times 10^{-6} \\
&\quad \times (\Delta t - 32.89 \times 10^{-4} \Delta t^2), \\
n_z(t) &= n_z(t_0) + (1.50\lambda - 9.70) \times 10^{-6} \\
&\quad \times (\Delta t - 74.49 \times 10^{-4} \Delta t^2).
\end{aligned} \quad (7)$$

在式(7)中, λ 的单位是 μm , $\Delta t = t - t_0$, 设常温 $t_0 = 20^\circ\text{C}$,

$$\begin{aligned}
n_x^2(t_0) &= 2.4542 + \frac{0.01125}{\lambda^2 - 0.01135} - 0.01388\lambda^2, \\
n_y^2(t_0) &= 2.5390 + \frac{0.01277}{\lambda^2 - 0.01189} - 0.01849\lambda^2 \\
&\quad + 4.3025 \times 10^{-5}\lambda^4 - 2.9131 \times 10^{-5}\lambda^6, \\
n_z^2(t_0) &= 2.5865 + \frac{0.01310}{\lambda^2 - 0.01223} - 0.01862\lambda^2 \\
&\quad + 4.5778 \times 10^{-5}\lambda^4 - 3.2526 \times 10^{-5}\lambda^6.
\end{aligned} \quad (8)$$

在 I 型相位匹配的条件下, 1064 nm 基频光沿 LBO 晶体的 x 轴传输, 倍频得到 532 nm 绿光, 如图 3 所示, 相应的折射率为 $n_\omega = n_z(\omega, t)$, $n_{2\omega} = n_y(2\omega, t)$. 目前有研究表明^[5,31]: 对于 1064 nm 的基频光波长, 相位匹配的理论温度在 147~150 $^\circ\text{C}$, 基频光和倍频光的折射率是温度的函数, 因此准确控制晶体内部的温度是获得最佳倍频的重要步骤. 根据 Sellmeier 方程, 可以计算不同长度 LBO 的温度调谐曲线, 并得出结论: 在相位匹配温度下, 对应 LBO 可接受的激光半高全宽(full width at half maximum, FWHM)与晶体长度成反比^[50], 并且 LBO 可接受的激光线宽和晶体长度也成反比. 故要用到温度控制精度为 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 的晶体炉、压窄基频光线宽至 LBO 晶体可接受范围、减小束腰发散角可以达到相位匹配的条件^[51], 确保绿光更高效地输出.

3 高功率绿光激光的焊接工艺研究

3.1 绿光激光与红外激光焊接铜及铜合金

高功率绿光激光光源的优点包括对铜材料高吸收率、外观良好、短波长热影响区小、所焊产品焊点成型好, 特别是铜高反材料焊接, 大小一致均匀, 抗拉强度、剪切强度较近红外波长激光等有显著提高. 大族激光已开展 1~3 kW 级高功率绿光的工艺研究, 为未来自主研发的高功率绿光激光器的工艺研究打下基础. 紫铜焊接效果如图 4 所示. 高功率绿光激光可以实现铜

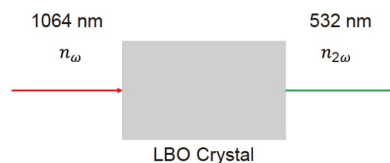


图 3 基频光通过 LBO 晶体产生绿光的示意图

Figure 3 Diagram of the fundamental frequency laser passing through an LBO crystal to produce the green laser

材料可靠、高效和稳定的深熔焊接, 也是电动汽车和电子焊接领域的最佳光源. 利用绿光激光可以实现稳定的热传导焊接和深熔焊, 进而能够高效、优质且高重复性地焊接铜和其他高反光材料, 焊缝表面光滑, 熔深一致性好, 缺陷部件少, 同时不受材料表面性质影响, 将形成的飞溅物减少到几乎没有, 提高加工效率. 对比分析红外激光器和绿光激光器特征可知, 如图 4(a)所示, 红外激光器光斑尺寸较大、焦深短, 紫铜对其吸收率低. 绿光激光器光斑尺寸小、焦深长, 紫铜对其吸收率高. 分别采用红外激光器和绿光激光器对紫铜进行脉冲点焊, 可以发现绿光激光器焊点大小更均匀, 深度一致, 表面光滑, 如图 4(b)所示. 采用绿光激光器焊接工艺更稳定, 能量输入可精确控制, 成形更加可控.

3.2 铜/铝高反材料点焊

采用绿光激光分别对 0.1 mm 厚紫铜与 0.1 mm 厚紫铜搭接焊, 以及 0.1 mm 厚紫铜与 0.2 mm 厚铝合金搭接焊. 从图 5 中可以发现, 成形铜表面无需清理, 无飞溅产生, 焊点大小均匀, 焊接质量非常好, 同时焊接过程稳定, 所需能量也更低. 因此, 高功率绿光激光器在铜、铝等高反材料的焊接上极具优势, 具有广阔的应用前景, 目前已应用于手机连接片的精密焊接, 如图 5 所示.

3.3 铜丝-镍片点焊

镍材料对 1064 nm 波段激光吸收较好, 采用常用波长 1064 nm 激光器时, 由于铜材料的高反特性, 导致镍片熔化甚至烧穿而铜丝几乎未熔, 因此焊接此类工件难度较大. 采用绿光激光对镍片(上)-铜丝(下)进行点焊, 可以看出, 焊点大小均匀, 连接强度较高, 如图 5(d)所示.

4 总结与展望

综上所述, 高功率绿光激光器广泛应用于汽车、电子、能源、航空航天等众多军事和民用领域. 本文

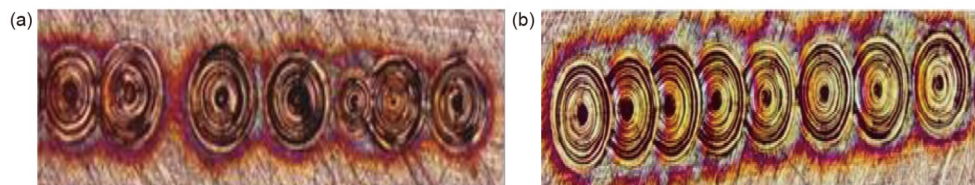


图 4 紫铜焊接效果图. (a) 红外激光器的紫铜焊点表面图. (b) 绿光激光器的紫铜焊点表面图

Figure 4 Copper welding effect pictures. (a) Surface diagram of the copper solder joint of an infrared laser. (b) Surface diagram of the copper solder joint of a green laser

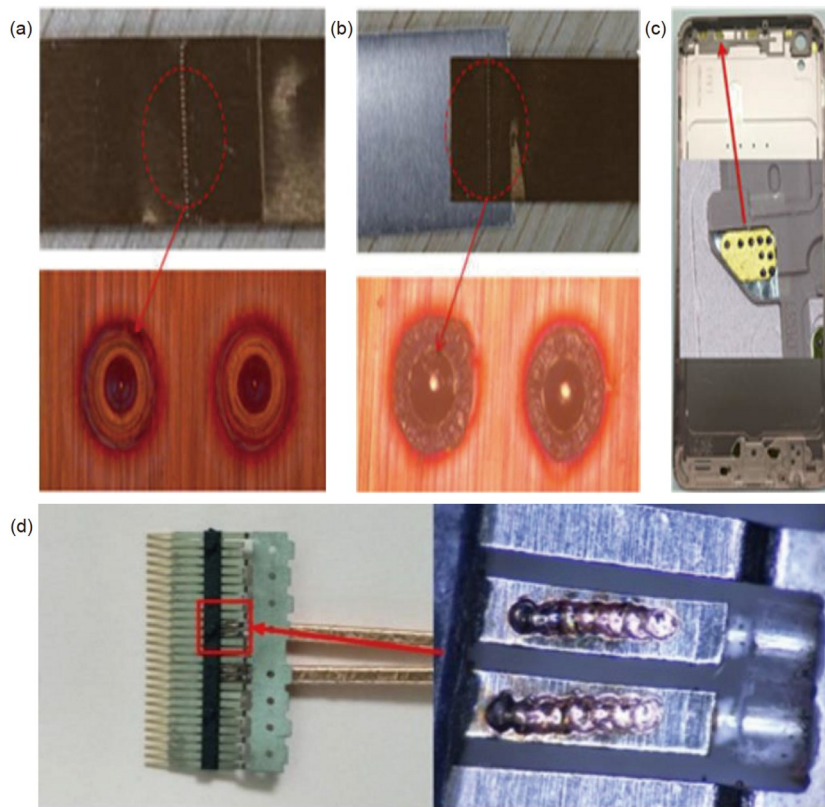


图 5 高功率绿光点焊效果图. (a) 紫铜-紫铜. (b) 紫铜-铝合金. (c) 手机连接片-黄铜. (d) 铜丝-镍片

Figure 5 Spot welding diagram of the high-power green laser. (a) Red copper and red copper. (b) Red copper and aluminum alloy. (c) Mobile phone connection piece and brass. (d) Copper wire and nickel sheet

介绍了国内在千瓦级高功率绿光激光器及其应用领域的发展现状和主要问题，重点分析了窄线宽种子源、光纤激光功率放大、倍频转换效率提升等关键技术研究。基于窄线宽全保偏光纤激光方案输出的610 W绿光，进一步通过两束绿光光束合束可实现千瓦级绿光输出^[31]。我们期望为新能源汽车、动力电池等行业焊

接应用需求的MOPA型高功率绿光光纤激光器探索技术方案；推动高功率绿光光源关键技术和部件以及新型工艺的协同发展，逐步突破由国外技术封锁向掌握关键技术研发能力的转变，从而增强国产绿光激光设备的核心竞争力，弥补国内在千瓦级高功率绿光激光器主要靠进口的现状，对国外设备形成竞争优势。

致谢 感谢四川光延科技有限公司杨江博士和光越科技(深圳)有限公司张峰博士在窄线宽种子源和高功率窄线宽光纤激光技术上的交流讨论。

参考文献

- 1 Dold E, Kaiser E, Klausmann K, et al. High-performance welding of copper with green multi-kW continuous-wave disk lasers. In: High-Power Laser Materials Processing: Applications, Diagnostics, and Systems VIII, 2019, 10911: 179–184
- 2 Engler S, Ramsayer R, Poprawe R. Process studies on laser welding of copper with brilliant green and infrared lasers. *Phys Procedia*, 2011, 12: 339–346
- 3 Hummelt G. TEM00 CW green laser source is a powerful tool. *Laser Focus World*, 2006, 42: 8
- 4 Tunna L, Kearns A, O'Neill W, et al. Micromachining of copper using Nd:YAG laser radiation at 1064, 532, and 355 nm wavelengths. *Optics Laser Technol*, 2001, 33: 135–143
- 5 Su M, You Y, Quan Z, et al. 321 W high-efficiency continuous-wave green laser produced by single-pass frequency doubling of narrow-linewidth fiber laser. *Appl Opt*, 2021, 60: 3836–3841
- 6 Zhu B H, Li X T, Sun Z L. Long pulse green laser welding technology (in Chinese). *Appl Laser*, 2018, 38: 946 [朱宝华, 李小婷, 孙子路. 长脉冲绿光激光焊接技术. *应用激光*, 2018, 38: 946]
- 7 Zhao R, Fu X, Zhang L, et al. High-power continuous-wave narrow-linewidth 2537 nm deep-ultraviolet laser. *Appl Opt*, 2017, 56: 8973–8977
- 8 Wang J Y, Li Q, Chen X, et al. A high-frequency all-solid-state ultraviolet laser at 244 nm (in Chinese). *Chin J Laser*, 2019, 46: 0901010 [王金艳, 李奇, 陈曦, 等. 全固态高重复频率244 nm紫外激光器. *中国激光*, 2019, 46: 0901010]
- 9 Samanta G K, Chaitanya Kumar S, Devi K, et al. High-power, continuous-wave Ti:sapphire laser pumped by fiber-laser green source at 532 nm. *Optics Lasers Eng*, 2012, 50: 215–219
- 10 Li L P, Li Y J, Song Y J, et al. High-power and high-efficiency widely tunable Ti:sapphire nanosecond pulsed laser pumped by Q-switched green laser (in Chinese). *Chin J Laser*, 2019, 46: 0508018 [李隆普, 李玉娇, 宋艳洁, 等. 高功率, 高效率调Q绿光抽运的钛宝石宽调谐纳秒脉冲激光. *中国激光*, 2019, 46: 0508018]
- 11 Hay N, Baker I, Guo Y, et al. Stability-enhanced, high-average power green lasers for precision semiconductor processing. In: Conference on Solid State Lasers XXI: Technology and Devices, 2012, 8235: 292–298
- 12 Xu J, Lin A, Yu X, et al. Underwater laser communication using an OFDM-modulated 520-nm laser diode. *IEEE Photon Technol Lett*, 2016, 28: 2133–2136
- 13 Pricking S, Dold E, Kaiser E, et al. 2 kW cw laser in the green wavelength regime for copper welding. In: Conference on Solid State Lasers: Technology and Devices, 2020, 11259: 321–327
- 14 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. In: Nonlinear Frequency Generation and Conversion: Materials, Devices, and Applications XIII, 2014, 8964: 36–44
- 15 Bai J, Chen G. Continuous-wave diode-laser end-pumped Nd:YVO₄/KTP high-power solid-state green laser. *Optics Laser Technol*, 2002, 34: 333–336
- 16 Yang B, Long L, Hao-Wei C, et al. Continuous-wave green laser of 9.9 W by intracavity frequency doubling in laser-diode single-end-pumped Nd:YVO₄/LBO. *Chin Phys Lett*, 2004, 21: 1532–1534
- 17 Mukhopadhyay P K, Sharma S K, Ranganathan K, et al. Efficient and high-power intracavity frequency doubled diode-side-pumped Nd:YAG/KTP continuous wave (CW) green laser. *Optics Commun*, 2006, 259: 805–811
- 18 Zhang H Y, Zhang Y P, Zhong K, et al. Efficient high power diode-side-pumped intracavity-doubled continuous wave green laser (in Chinese). *Chin J Laser*, 2008, 35: 3–5 [张会云, 张玉萍, 钟凯, 等. 高效高功率侧面抽运腔内倍频连续绿光激光器. *中国激光*, 2008, 35: 3–5]
- 19 Li F Q, Yu L, Shen Y M, et al. All-solid-state CW 12.9 W TEM₀₀ mode green laser (in Chinese). *Chin J Lasers*, 2009, 36: 1332–1336 [李凤琴, 于琳, 申玉梅, 等. 输出功率12.9W的全固态连续TEM₀₀模绿光激光器. *中国激光*, 2009, 36: 1332–1336]
- 20 Geng A C, Yang X D, Yang M J. Progress of research on all-solid-state green laser (in Chinese). *Laser J*, 2011, 32: 57–59 [耿爱丛, 杨晓冬, 杨明江. 全固态绿光激光器研究进展. *激光杂志*, 2011, 32: 57–59]
- 21 Meier T, Willke B, Danzmann K. Continuous-wave single-frequency 532 nm laser source emitting 130 W into the fundamental transversal mode. *Opt Lett*, 2010, 35: 3742–3744
- 22 Wei Y, Peng W, Li J, et al. Self-mode-matching compact low-noise all-solid-state continuous wave single-frequency laser with output power of 140 W. *Opt Lett*, 2023, 48: 676–679
- 23 Singh A, Mukhopadhyay P K, Sharma S K, et al. 82 W continuous-wave green beam generation by intracavity frequency doubling of diode-side-pumped Nd:YAG laser. *IEEE J Quantum Electron*, 2011, 47: 398–405
- 24 Strauß U, Avramescu A, Lermer T, et al. Pros and cons of green InGaN laser on c-plane GaN. *Phys Status Solidi B*, 2011, 248: 652–657
- 25 Berger J, Anthon D, Caprara A, et al. 20 Watt CW TEM00 intracavity doubled optically pumped semiconductor laser at 532 nm. In: Conference on Vertical External Cavity Surface Emitting Lasers (VECSELs) II, 2012, 8242: 36–42

- 26 Berger J, Chilla J L, Govorkov S, et al. Towards a practical sodium guide star laser source: Design for > 50 watt LGS based on OPSL. In: Conference on Adaptive Optics Systems III, 2012, 8447: 129–136
- 27 Weiler S, Hangst A, Stolzenburg C, et al. Frequency doubled high-power disk lasers in pulsed and continuous-wave operation. In: Conference on Vertical External Cavity Surface Emitting Lasers (VECSELs) II, 2012, 8239: 35–42
- 28 Haubold M, Ganser A, Eder T, et al. Laser welding of copper using a high power disc laser at green wavelength. *Procedia CIRP*, 2018, 74: 446–449
- 29 Dai L, Liu R, Gong F, et al. Resonators with a continuously variable output coupling rate to enhance output performance of Yb:YAG thin-disk lasers. *Opt Express*, 2022, 30: 40739–40749
- 30 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. In: Conference on Nonlinear Frequency Generation and Conversion: Materials and Devices XIX, 2020, 11264: 114–119
- 31 Su M Q, You Yang, Quan Z, et al. 610-W Continuous-wave single-mode green laser output based on highly efficient single-pass frequency doubling (in Chinese). *Chin J Laser*, 2021, 48: 1315002 [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. 中国激光, 2021, 48: 1315002]
- 32 Zou J H, Hong J F, Zhao Z, et al. 3.6 W compact all-fiber Pr^{3+} -doped green laser at 521 nm. *Adv Photonics*, 2022, 4: 056001
- 33 Li T, Wang Z, Zou J, et al. Direct generation of 3.17 mJ green pulses in a cavity-dumped Ho^{3+} -doped fiber laser at 543 nm. *Photon Res*, 2023, 11: 413–419
- 34 Platonov N, Yagodkin R, De La Cruz J, et al. Up to 2.5-kW on non-PM fiber and 2.0-kW linear polarized on PM fiber narrow linewidth CW diffraction-limited fiber amplifiers in all-fiber format. In: Conference on Fiber Lasers XV: Technology and Systems, 2018, 10512: 57–64
- 35 Wang Y S, Ma Y, Sun Y H, et al. 2.62-kW, 30-GHz linearly polarized all-fiber laser with narrow linewidth and near-diffraction-limit beam quality (in Chinese). *Chin J Lasers*, 2019, 46: 313–315 [王岩山, 马毅, 孙殷宏, 等. 2.62 kW, 30 GHz窄线宽线偏振近衍射极限全光纤激光器. 中国激光, 2019, 46: 313–315]
- 36 Wang Y, Ke W, Peng W, et al. 3 kW, 0.2 nm narrow linewidth linearly polarized all-fiber laser based on a compact MOPA structure. *Laser Phys Lett*, 2020, 17: 075101
- 37 Ren S, Chen Y S, Ma P F, et al. 4.5 kW, 0.33 nm near-single mode narrow-linewidth polarization-maintained fiber laser (in Chinese). *High Power Laser Part Beams*, 2022, 34: 137 [任帅, 陈益沙, 马鹏飞, 等. 4.5 kW, 0.33 nm近单模窄线宽保偏光纤激光器. 强激光与粒子束, 2022, 34: 137]
- 38 Wang Y S, Feng Y J, Peng W J, et al. The output power of the polarization-maintained fiber laser near the diffraction limit with high extinction ratio and narrow line width breaks through 5 kW (in Chinese). *High Power Laser Part Beams*, 2022, 34: 48 [王岩山, 冯昱骏, 彭万敬, 等. 近衍射极限高消光比窄线宽保偏光纤激光输出功率突破5 kW. 强激光与粒子束, 2022, 34: 48]
- 39 Zheng Y, Li P, Zhu Z D, et al. Progress in high-power narrow-linewidth fiber lasers (in Chinese). *Laser Optoelectron Prog*, 2018, 55: 86–104 [郑也, 李磐, 朱占达, 等. 高功率窄线宽光纤激光器研究进展. 激光与光电子学进展, 2018, 55: 86–104]
- 40 Li Q. Research on stimulated Brillouin scattering suppression based on multi-frequency phase modulation. *Chin Opt Lett*, 2009, 7: 29–31
- 41 Anderson B, Robin C, Flores A, et al. Experimental study of SBS suppression via white noise phase modulation. In: Conference on Fiber Lasers XI-Technology, Systems, and Applications, 2014, 8961: 362–368
- 42 Supradeepa V R. Stimulated Brillouin scattering thresholds in optical fibers for lasers linewidth broadened with noise. *Opt Express*, 2013, 21: 4677–4687
- 43 Anderson B, Flores A, Holten R, et al. Beam combining and SBS suppression in white noise and pseudo-random modulated amplifiers. In: Conference on Fiber Lasers XII-Technology, Systems, and Applications, 2015, 9344: 294–302
- 44 Anderson B, Flores A, Holten R, et al. Comparison of phase modulation schemes for coherently combined fiber amplifiers. *Opt Express*, 2015, 23: 27046–27060
- 45 Chu Q H, Guo C, Yan D L, et al. Recent progress of high power narrow linewidth fiber laser (in Chinese). *High Power Laser Part Beams*, 2020, 32: 61–73 [楚秋慧, 郭超, 颜冬林, 等. 高功率窄线宽光纤激光器的研究进展. 强激光与粒子束, 2020, 32: 61–73]
- 46 Lai W C, Ma P F, Xiao H, et al. High-power narrow-linewidth fiber laser technology (in Chinese). *High Power Laser Part Beams*, 2020, 32: 7–28 [来文昌, 马鹏飞, 肖虎, 等. 高功率窄线宽光纤激光技术. 强激光与粒子束, 2020, 32: 7–28]
- 47 Chu Q, Shu Q, Chen Z, et al. Experimental study of mode distortion induced by stimulated Raman scattering in high-power fiber amplifiers. *Photonics Res*, 2020, 8: 595–600
- 48 Boyd G D, Kleinman D A. Parametric interaction of focused Gaussian light beams. *J Appl Phys*, 1968, 39: 3597–3639
- 49 Kato K. Temperature-tuned 90° phase-matching properties of LiB_3O_5 . *IEEE J Quantum Electron*, 1994, 30: 2950–2952
- 50 Lin J T, Montgomery J L, Kato K. Temperature-tuned noncritically phase-matched frequency conversion in LiB_3O_5 crystal. *Optics Commun*, 1990, 80: 159–165
- 51 Ukachi T, Lane R J, Bosenberg W R, et al. Measurements of noncritically phase-matched second-harmonic generation in a LiB_3O_5 crystal. *Appl Phys Lett*, 1990, 57: 980–982

Summary for “高功率连续绿光激光器的研究进展”

Research progress in high-power continuous green lasers

Zhangpeng Qiu^{1,2}, Nan Wang^{1*}, Zihao Chen¹, Xiaoting Li², Zebiao Li², Jianqiang Liu², Youhui Luo², Qitao Lü² & Peiguang Yan¹

¹ Shenzhen Key Laboratory of Laser Engineering, College of Physics and Optoelectronic Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China;

² Hans's Laser Technology Industry Group Co, Ltd., Shenzhen 518057, China

* Corresponding author, E-mail: nwang@szu.edu.cn

Recently, the rapid development of high-power green lasers has attracted considerable attention from scholars worldwide and has been gradually applied in highly reflective metal processing (such as copper), the 3C electronics industry, medical treatment, underwater laser communications, and military defense. First, this paper introduces the realization of high-power green lasers and reviews research progress achieved globally in high-power continuous green lasers. Compared with solid-state lasers and disk lasers with frequency doubling, fiber lasers have a high electro-optical efficiency, small size, good beam quality, low cost, and good heat dissipation. The single-pass frequency-doubling solution has a simple structure and is easy to adjust and install. The combination of a high-power narrow-linewidth fully polarized fiber laser and a single-pass frequency-doubling scheme is an outstanding ideal solution to achieve high-power and high-brightness miniaturized green laser output. Then, based on the theory of nonlinear effects combined with the second harmonic generation, the formula for efficient frequency doubling is derived. The theoretical and technical study of fiber laser single-pass frequency doubling has been conducted based on the scheme of noncritical phase matching LBO-crystal single-pass frequency doubling with narrow-linewidth linearly polarized fiber laser as the fundamental frequency source, which provides a feasible solution for the localization of high-power green lasers. The main research objectives of this paper are as follows: (1) The research background, application prospects, and development overview of high-power green lasers are introduced. Then, the processing advantages of high-power green lasers are identified and compared with those of near-infrared and blue lasers, and the common technical routes for generating high-power green lasers are compared. (2) Four types of high-power continuous green lasers are introduced: diode-pumped all-solid-state lasers, semiconductor lasers, disk lasers, and narrow-linewidth fiber lasers with frequency doubling. The research progress in narrow-linewidth fully polarized fiber lasers is presented to summarize their current global development status, and the common frequency-doubling crystals and structures and their respective advantageous features are analyzed. The narrow-linewidth linearly polarized fiber laser combined with the LBO-crystal single-pass frequency-doubling solution has the advantages of low cost and simple structures. Thus, this solution is analyzed to provide a feasible solution for generating kilowatt-class high-power green lasers. (3) The key technologies, development trends, and main challenges of the current high-power narrow-linewidth green fiber lasers are presented. The research progress in high-power narrow-linewidth linearly polarized fiber lasers is discussed, and the technologies of narrow-linewidth seed lasers, such as seed source of fiber oscillators and single-frequency phase modulation, laser power amplification, nonlinear effect suppression, high-efficiency frequency doubling, are investigated in depth. The advantages of fiber oscillator lasers and single-frequency phase modulation seed sources in narrow linewidth and the suppression of nonlinear effects are analyzed. The theoretical study of LBO based on phase matching for an efficient frequency multiplication output is presented according to the Sellmeier equation of crystals. (4) The application of high-power green lasers in the welding processes of metals, such as copper and aluminum alloys, is studied. Finally, an outlook on the development of high-power green laser technology is provided. In the future, more research should be devoted to the study of high-power narrow-linewidth linearly polarized green lasers.

high-power, green laser, frequency doubling, narrow-linewidth

doi: [10.1360/TB-2023-0219](https://doi.org/10.1360/TB-2023-0219)