

高功率高光束质量短脉冲/超短脉冲固体绿光激光技术研究进展

周天琛 李科学 陈毅 张新 于晶华 张逸文 孙俊杰 陈飞 王晓华 魏志鹏

Research progress on high-power, high-beam-quality short-pulse/ultrashort-pulse solid-state green laser technology

ZHOU Tian-chen, LI Ke-xue, CHEN Yi, ZHANG Xin, YU Jing-hua, ZHANG Yi-wen, SUN Jun-jie, CHEN Fei, WANG Xiao-hua, WEI Zhi-peng

引用本文:

周天琛, 李科学, 陈毅, 张新, 于晶华, 张逸文, 孙俊杰, 陈飞, 王晓华, 魏志鹏. 高功率高光束质量短脉冲/超短脉冲固体绿光激光技术研究进展[J]. *中国光学*, 优先发表. doi: 10.37188/CO.2025-0050

ZHOU Tian-chen, LI Ke-xue, CHEN Yi, ZHANG Xin, YU Jing-hua, ZHANG Yi-wen, SUN Jun-jie, CHEN Fei, WANG Xiao-hua, WEI Zhi-peng. Research progress on high-power, high-beam-quality short-pulse/ultrashort-pulse solid-state green laser technology[J]. *Chinese Optics*, In press. doi: 10.37188/CO.2025-0050

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2025-0050>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

改进丰富卷积特征算法的液滴边缘检测模型

Improved droplet edge detection model based on RCF algorithm

中国光学 (中英文). 2024, 17(4): 886 <https://doi.org/10.37188/CO.2024-0019>

距离选通成像系统中短脉冲激光驱动技术研究

Short pulse laser drive technology in a distance-selective imaging system

中国光学 (中英文). 2023, 16(3): 567 <https://doi.org/10.37188/CO.2022-0142>

5.2 W高重频257 nm深紫外皮秒激光器

High repetition frequency 257 nm deep ultraviolet picosecond laser with 5.2 W output power

中国光学 (中英文). 2023, 16(6): 1318 <https://doi.org/10.37188/CO.2023-0026>

内腔式非稳腔DF激光光束质量研究

Study on beam quality of DF laser with inner cavity unstable resonator

中国光学 (中英文). 2024, 17(5): 1068 <https://doi.org/10.37188/CO.2023-0210>

重复频率可调窄脉宽228 nm紫外激光器

An ultraviolet laser at 228 nm with adjustable repetition rate and narrow pulse width

中国光学 (中英文). 2024, 17(1): 100 <https://doi.org/10.37188/CO.2023-0058>

同带泵浦的Tm:CYA调Q锁模激光器

Tm:CYA Q-switched mode-locked laser realized by tandem-pumping

中国光学 (中英文). 2024, 17(4): 764 <https://doi.org/10.37188/CO.2023-0162>

文章编号 2097-1842(xxxx)x-0001-12

高功率高光束质量短脉冲/超短脉冲固体 绿光激光技术研究进展

周天琛¹, 李科学¹, 陈毅², 张新², 于晶华², 张逸文², 孙俊杰^{2,3}, 陈飞^{2*}, 王晓华^{1*}, 魏志鹏¹

*

1. 长春理工大学 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 130022;
2. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 吉林省高功率激光技术及应用重点实验室, 吉林 长春 130033;
3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 高功率高光束质量短脉冲/超短脉冲绿光激光器在工业、医疗、科研等领域应用广泛。为了明晰基于二次谐波产生(倍频)的绿光光源的研究进展, 本文系统综述了千赫兹重复频率下二次谐波产生绿光光源的最新进展, 按脉宽和倍频形式分为纳秒腔内倍频、纳秒腔外倍频、皮秒腔外倍频及飞秒腔外倍频四大类别。纳秒腔内倍频 KTP、LBO 等晶体, 功率升至 51.1 W(能量 50 mJ, 重频 1 kHz), 效率 50%。纳秒腔外以 LBO 为主, 采用两倍频晶体串联可将倍频功率提升至 1.04 kW(能量 1.04 J, 效率 89%)。皮秒腔外倍频平均功率最高可达 1460 W(能量 259 mJ, 效率 71%)。飞秒倍频通过采用薄晶体, 功率提升至 29 W(能量 440 μ J, 效率 >52%)。基于二次谐波产生的绿光光源以及相关的应用技术进步, 将不断拓展其在科研、工业、医疗等领域的应用边界。

关键词: 计算机视觉; 边缘检测; 二次谐波生成; 倍频; 激光; 光光效率; 绿光激光器

中图分类号: TP394.1; TH691.9 文献标志码: A doi: 10.37188/CO.2025-0050 CSTR: 32171.14.CO.2025-0050

收稿日期: 2025-03-24; 修订日期: xxxx-xx-xx

基金项目: 中文基金

National Key R&D Program of China (No. 2023YFB4604400), the National Natural Science Foundation of China (No. 62434001, 62027820), the Science and Technology Development Project of Jilin Province (No. SKL202402019), the Natural Science Foundation of Jilin Province (No. 20230101352JC), the "111" Project of China (No. D17017).

Research progress on high-power, high-beam-quality short-pulse/ ultrashort-pulse solid-state green laser technology

ZHOU Tian-chen¹, LI Ke-xue¹, CHEN Yi², ZHANG Xin², YU Jing-hua², ZHANG Yi-wen²,
SUN Jun-jie^{2,3}, CHEN Fei^{2*}, WANG Xiao-hua^{1*}, WEI Zhi-peng^{1*}

(1. *State Key Laboratory of High Power Semiconductor Laser, Changchun University of Science and
Technology, Jilin 130022, China;*

2. *Optoelectronic Countermeasures Department, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Science, Changchun 130033, China;*

3. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)*

* *Corresponding author, E-mail: feichenny@126.com; biewang2001@126.com; weizp@cust.edu.cn*

Abstract: High-power, high-beam-quality short-pulse/ultrashort-pulse green lasers have wide applications in industry, medicine, and scientific research. To clarify the research progress of green light sources based on second-harmonic generation (SHG, frequency doubling), this paper systematically reviews the latest advancements in SHG green light sources at kilohertz repetition rates, categorized by pulse width and doubling scheme into four types: nanosecond intracavity doubling, nanosecond extracavity doubling, picosecond extracavity doubling, and femtosecond extracavity doubling. For nanosecond intracavity doubling, crystals such as KTP and LBO are used, with power increased to 51.1 W (energy 50 mJ, repetition rate 1 kHz) and efficiency of 50%. Nanosecond extracavity doubling primarily employs LBO, where tandem frequency-doubling crystals can elevate the doubling power to 1.04 kW (energy 1.04 J, efficiency 89%). Picosecond extracavity doubling achieves the highest average power of 1460 W (energy 259 mJ, efficiency 71%). Femtosecond doubling, by employing thin crystals, boosts power to 29 W (energy 440 μ J, efficiency >52%). The advancements in SHG-based green light sources and related application technologies will continually expand their boundaries in scientific research, industry, medicine, and other fields.

Key words: computer vision; edge detection; geometric figure; curve fitting; subpixel; optical efficiency; green laser

1 引言

基于二次谐波产生 (SHG) 的绿光光源 (主要 515–532 nm) 在工业、医疗和科研领域应用广泛。在医疗领域, 绿光常用于前列腺增生等疾病治疗^[1]。在科研领域, 绿光作为光学参量振荡器、钛蓝宝石激光器的泵浦源^[2], 也可用于卫星测距^[3]、水下探测关键组件。在工业领域, 绿光用于激光雕刻、退火^[4] 等各类加工环节。

这些应用源于 SHG 技术的直接性和可扩展性: 利用近红外 (~1 μ m) 基频激光通过非线性晶体高效转换为可见绿光, 同时实现高平均功率、高

单脉冲能量和高光束质量, 避免了染料激光器 (系统复杂、维护成本高)、铜蒸汽激光器 (操作难度大) 和半导体绿光激光器 (功率受限) 等替代方案的缺陷。

近年来, 研究重点转向提升输出参数, 主要通过三条路径:

新型非线性晶体: 聚焦高损伤阈值、宽接受带宽晶体优化, 如掺杂 LBO 纳米晶体研究, 以探索掺杂机制对倍频效率的影响^[5]。

新基频光路体系: 典型如谐波光束同轴组合 (HBCC), 实现重频倍增和高功率输出, 例如 2024 年腔内倍频 HBCC 方案, 在重频 100 kHz 下获得平均功率 83 W、 $M^2 \approx 1.8$ 的 532 nm 绿光, 合

成效率 92.2%^[6]。

新倍频光路体系: 强调真空环境压缩与大光斑设计以缓解非线性效应, 例如 2021 年真空脉冲压缩+倍频方案, 在重频 1 kHz 下实现平均能量 121 mJ、脉宽 1.5 ps、 $M^2 \approx 1.8$ 的 515 nm 绿光^[7]。

本文以脉宽为分类标准, 聚焦纳秒、皮秒和飞秒脉宽下重频千赫兹为主的 SHG 绿光光源最新进展, 并展望未来方向。

2 二次谐波技术

二次谐波产生(SHG)是通过非线性晶体在适当相位匹配条件下, 将近红外基频光转换为绿光的最直接方法。转换效率 η 和输出光束质量取决于泵浦强度(通过晶体表面光斑尺寸调节)、晶体长度及相位匹配精度。

理论上, 小信号极限、未显著耗尽基频光、假设完美相位匹配的高斯光束二次谐波功率转换效率表示为:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{8\pi^2 I^2 d_{\text{eff}}^2}{n_1 n_2 \lambda_1 c \epsilon_0 \pi w_{10}^2} \cdot P_1 \cdot \left(\frac{\sin(\Delta k l / 2)}{\Delta k l / 2} \right)^2$$

实际中需综合考虑热效应、走离和群速度失配。

SHG 分为腔内倍频和腔外倍频。腔内倍频(如图 1(a)^[8](b)^[9]所示)可实现高光-光转换效率(最高 82%)^[8], 但高功率下热扰动导致腔不稳定、光束质量下降^[10], 连续波或长脉冲时纵模耦合引起功率波动^[11]。腔外倍频(如图 1(c)^[12]、图 1(d)^[12]、图 1(e)^[12]所示)更灵活, 直接在基频光路后插入倍频晶体, 实现更高单脉冲能量和平均功率^[13]。

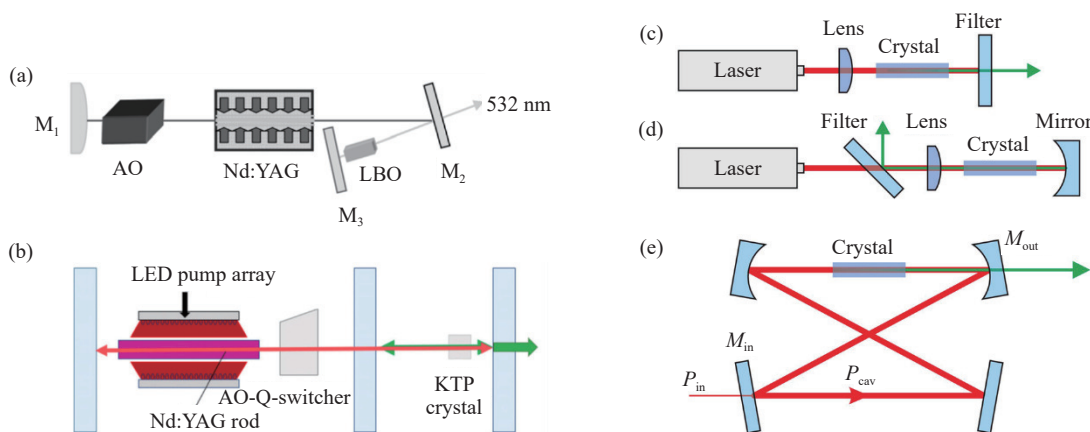


图 1 (a) 折叠(V 型)腔内倍频^[7]; (b) 直线腔内倍频^[9]; (c) 单通腔外倍频^[12]; (d) 双通腔外倍频^[12]; (e) 外谐振腔倍频^[12];

Fig. 1 (a) Folded (V-shaped) intracavity frequency doubling^[7]; (b) Linear intracavity frequency doubling^[9]; (c) Single-pass extracavity frequency doubling^[12]; (d) Double-pass extracavity frequency doubling^[12]; (e) External resonant cavity frequency doubling^[12].

3 纳秒脉宽的腔内倍频研究进展

纳秒腔内倍频纳秒腔内倍频技术近年来取得显著进展, 主要围绕 KTP、LBO、BBO 和 PPLN 等非线性晶体展开, 目标是实现高平均功率、高转换效率和高光束质量的绿光脉冲输出。

2015—2017 年间, 研究重点在于探索不同晶体的适用性。Shengchuang Bai 等采用 GTR-KTP 晶体获得较好的光束质量与较高平均功率^[14]; Qiang Fu 等基于 LBO 晶体实现了较高的光光转换

效率^[15]; Jianhua Chang 等利用 PPLN 晶体获得了窄谱线输出, 但效率相对较低^[16]。

2020 年, 多项工作进一步提升了输出性能。孙瑛璐等^[17]和 Yanmin Duan 等^[18]采用 BBO 晶体实现了较高的平均功率和单脉冲能量; G V Shilova 等基于 LBO 晶体在较低重频下保持了较好稳定性^[19]。

2022—2024 年, 转换效率和功率水平显著提高。Mi Yeon Song 等在低重频条件下采用 LBO 晶体实现了 50% 的突出转换效率^[20]; Jianping Shen 等使用 KTP 晶体获得 45.5% 的高效率^[9];

4 纳秒脉宽的腔外倍频研究进展

纳秒级腔外倍频技术近年来在高平均功率和高单脉冲能量绿光(主要 515–532 nm)生成方面取得显著进展,主要采用 LBO 晶体,辅以 PPKTP、BBO 等,实现从数十瓦到千瓦级的功率跃升。

2015–2019 年间,研究重点在于中等功率(数十瓦)和较高效率(~60%–70%)的实现。代表性工作包括 Zhichao Wu 等采用 LBO 晶体实现平均功率 60.2 W(重频 100 kHz,效率 68.8%)^[22],以及 Jianqiang Zhu 等采用 PPKTP 晶体获得单脉冲能量 450 mJ(重频 1 Hz)^[23]。

2020–2023 年,功率水平实现重大突破。Han Chi 等采用两块串联 LBO 晶体,以 Yb:YAG 激光器泵浦,实现 515 nm 绿光总平均功率 1.04 kW(单脉冲能量 1.04 J,重频 1 kHz,脉宽 2 ns),转换效率最高达 89%——成为迄今报道的纳秒级腔外倍频最高平均功率和单脉冲能量^[24]。同期 Yong-Ho Cha 等采用 LBO 晶体和脉冲整形技术,实现平均功率 70–80 W(重频 400–900 kHz,效率 65%)^[25]^[26]; Hua-Yu Liu 等实现平均功率 67.4 W(效率 75.4%)^[27]。

统计的实验结果中最高平均功率 1.04 kW^[24];最高单脉冲能量 1.04 J^[24];最高转换效率 89%^[24];最佳光束质量 $M^2 < 1.2$ ^[12]。

总体而言,LBO 晶体因高损伤阈值、小走离角、宽温度/角度接受带宽和高热导率,已成为纳秒级高功率腔外倍频的首选晶体,尤其适合 kW 级平均功率和焦耳级单脉冲能量应用;PPKTP 在准相位匹配下效率较高,但功率扩展受限。

未来将通过多晶体串联、大孔径/长晶体优

化、脉冲平顶整形、热管理和相位匹配精细调控,有望进一步提升功率密度和稳定性,实现更高效的纳秒绿光源。

图 4、图 5 分别展示了 2015 年以来纳秒级腔外倍频的平均功率、单脉冲能量、转换效率、重频分布。表 2 总结了千赫兹重频下代表性实验参数。

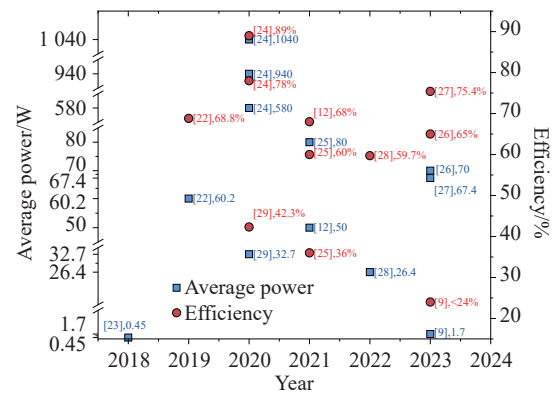


图 4 纳秒级腔外倍频输出平均功率、效率统计

Fig. 4 Statistics on average output power and efficiency of nanosecond-level extracavity frequency doubling

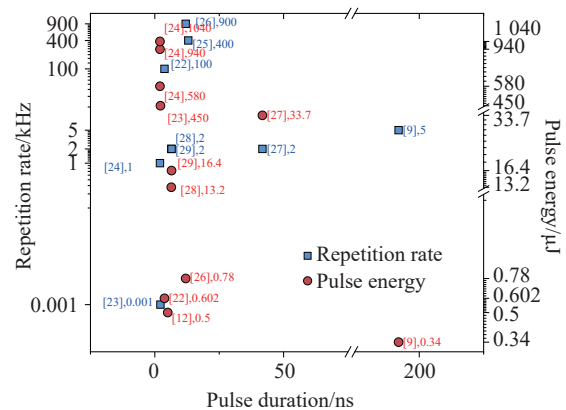


图 5 纳秒级腔外倍频脉宽、重复频率、单脉冲能量统计
Fig. 5 Statistics on pulse width, repetition rate, and single-pulse energy of nanosecond-level extracavity frequency doubling

表 2 纳秒级腔外倍频研究进展 (按倍频输出平均功率升序)

Tab. 2 Advances in Nanosecond Extracavity Frequency Doubling Research (Sorted in Ascending Order of Frequency Doubling Output Average Power)

年份	非线性晶体	晶体尺寸 (mm ²)	晶体工作温度	倍频平均功率(W)	倍频输出波长(nm)	能量	倍频脉宽 (ns)	光光转换效率(%)	斜率效率 (%)	倍频 M ²	重频 (kHz)	基频波长 (nm)	基频光脉宽 (ns)
2018 ^[23]	PPKTP	-	-	0.45	532	450 mJ	2.2 ns	-	-	-	1 Hz	1064	-
2023 ^[9]	KTP	4*4*10	20 °C ¹	1.7	532	0.34 mJ	192 ns ²	<24	-	-	5	1064	-
2022 ^[28]	LBO	6*6*35	33.5 °C	26.4	532	13.2 mJ	6.4 ns	59.7	-	1.7/1.68 ³	2	1064	-
2020 ^[29]	LBO	4*4*20	23 °C	32.7	532	16.4 mJ	6.5 ns	42.3	-	1.52/1.5 ³	2	1064	-

续表 2

年份	非线性晶体	晶体尺寸 (mm ³)	晶体工作温度	倍频平均功率(W)	倍频输出波长(nm)	能量	倍频脉宽 (ns)	光光转换效率(%)	斜率效率 (%)	倍频 M ²	重频 (kHz)	基频波长 (nm)	基频光脉宽 (ns)
2021 ^[12]	LBO	长40	-	50	515	0.5 mJ	5 ns	-	68	<1.2	100-500	1030	-
2019 ^[22]	LBO	5*5*20	-	60.2	532	0.602 mJ	3.77 ns	68.80	-	1.78	100	1064	-
2023 ^[27]	LBO	4*4*40	145.6±0.05 °C	67.4	532	33.7 mJ	41.8 ns	75.40	-	1.31	2	1064	-
2023 ^[26]	LBO	长40	158.85 °C	70	528	0.78 mJ	-	65	-	-	900 ⁴	1056	12 ns
2021 ^[25]	LBO	-	142.85 °C	80 ⁷	535	-	-	36	-	1.2 ⁸	400	1070	13 ns
2021 ^[25]	LBO	-	142.85 °C	80 ⁷	528	-	-	60	-	1.2 ⁸	400	1056	13 ns
2020 ^[24]	LBO	10*10*10	-	580	515	0.58J	2 ns ⁵	89	-	-	1	1030	-
2020 ^[24]	LBO	10*10*13	-	940	515	0.94J ⁶	2 ns	78	-	1.4/1.32 ³	1	1030	-
2020 ^[24]	LBO	10*10*13	-	1040	515	1.04J ⁶	2 ns	-	-	-	1	1030	-

1. 水冷铜炉温度为20 °C; 2. 腔内倍频的脉宽; 3. 为M_x²/M_y²简写; 4. 经由第一块晶体倍频产生; 5. 基频光经时间整形至方形脉冲; 6. 经由两块LBO晶体倍频输出的总能量; 7. 输出的528 nm和535 nm混合光的平均功率; 8. 输出的528 nm和535 nm混合光的光束质量;

5 皮秒脉宽的腔外倍频研究进展

自2015年以来,皮秒脉宽腔外倍频技术在高平均功率、高单脉冲能量和高转换效率方向取得显著进展。LBO晶体因宽接收带宽、高损伤阈值和较小的走离效应,成为最常用的倍频晶体;BBO晶体在超短脉冲(~1 ps)下仍具优势,但热效应和走离限制了其在极高功率下的应用。

早期代表性工作包括:2015年,Negel等采用Yb:YAG碟片放大器泵浦LBO,实现820 W平均功率的515 nm绿光(重频300 kHz,单脉冲2.7 mJ,效率70%),并指出优化晶体内光束直径可缓解热负荷和饱和效应^[30]。2016年,Fattahi等使用BBO晶体实现70 W平均功率(单脉冲20 mJ,效率70%),模拟显示BBO在短晶体长度(1.5 mm)下即可饱和^[31]。

随后功率水平快速提升。2020年,Röcker等采用Yb:YAG碟片系统泵浦LBO(晶体尺寸15×15×5 mm³),在基频脉宽7.7 ps、重频300 kHz下获得平均功率1460 W的515 nm绿光(单脉冲4.87 mJ, M²≈1.4,光光转换效率71%),这是迄今报道的皮秒绿光最高平均功率^[32]。同一时期, Ma等使用burst脉冲和偏振净化技术,实现50 W平均功率(效率68%)^[33]。

近年来,单脉冲能量和转换效率进一步突破。2023年,Produit等采用Yb:YAG碟片激光器泵浦LBO,实现单脉冲能量259 mJ的515 nm绿

光(重频1 kHz,效率59%),创皮秒腔外倍频单脉冲能量纪录^[34]。同年,Fan等使用LBO实现光光转换效率1.5%(平均功率5.3 W,单脉冲0.53 mJ,重频10 kHz,脉宽18.6 ps, M²≈1.1),显示通过精确相位匹配和温度控制可显著提升效率^[3]。

统计的实验结果中最高平均功率:1460 W^[32];单脉冲能量最高:259 mJ^[34];光光转换效率最高:81.5%^[3]。总体趋势显示Yb:YAG碟片激光器已成为高功率/高能量皮秒基频主流泵浦源;LBO晶体在大多数高性能实验中占主导(晶体长度多为2–15 mm,优化光束直径和偏振是常见效率提升手段);平均功率已达kW级,单脉冲能量超百mJ,转换效率最高超过80%^[3]。

图6、图7分别展示了2015年以来皮秒级倍频的平均功率、单脉冲能量、转换效率、重频分布。表3总结了千赫兹重频下代表性实验参数。

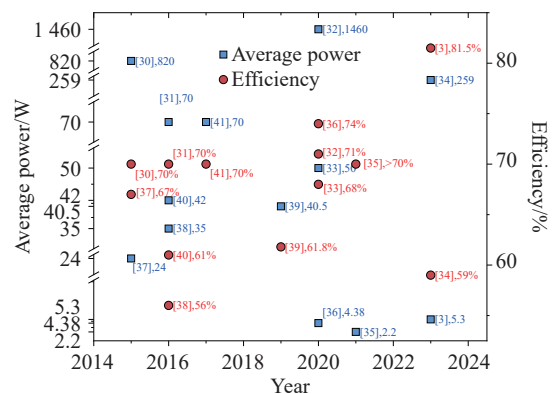


图6 皮秒倍频输出平均功率、效率统计

Fig. 6 Statistics on average output power and efficiency of picosecond frequency doubling

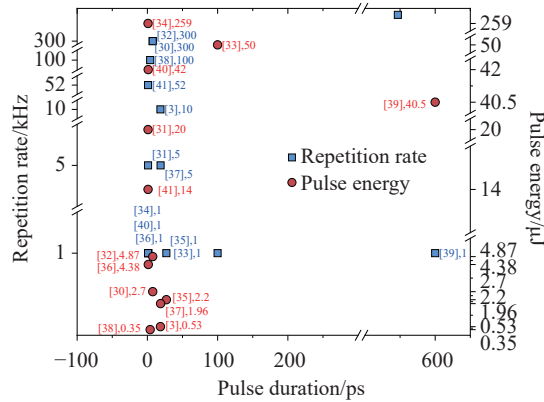


图 7 皮秒倍频脉宽、重复频率、单脉冲能量统计

Fig. 7 Statistics on pulse width, repetition rate, and single-pulse energy of picosecond frequency doubling

表 3 皮秒级脉宽倍频研究进展 (按倍频输出平均功率升序)

Tab. 3 Advances in Picosecond Pulse Width Frequency Doubling Research (Sorted in Ascending Order of Frequency Doubling Output Average Power)

年份	非线性晶体	晶体尺寸 (mm ³)	晶体工作温度	平均功率 (W)	输出波长 (nm)	能量	脉宽 (ps)	光光转换效率(%)	倍频 M ²	重频 (kHz)	基频波长 (nm)	基频光脉宽
2021 ^[35]	LBO	-	40 °C	2.2	532	2.2 mJ	27 ps	>70	1.5	1	1064	
2020 ^[36]	LBO	8*8*2	-	4.38	515	4.38 mJ	1.3 ps	74	<1.6	1	1030	
2023 ^[3]	LBO	4*4*12	50 °C	5.3	532.2	0.53 mJ	18.6 ps	81.50	1.09/1.12 ¹	10	1064	
2015 ^[37]	LBO	4*4*20		24		1.96 mJ	18.9 ps	67	1.75 ³	5	1064	
2016 ^[38]	LBO	8*8*10	47 °C	35	515	0.35 mJ	-	56	1.4/1.6 ¹	100	1030	4 ps
2019 ^[39]	LBO	9*9*20	-	40.5	532	40.5 mJ	-	61.8	1.26/1.25 ¹	1	1064	600 ps
2016 ^[40]	LBO	厚1.47	-	42	515	42 mJ	-	61	-	1	1030	1.2 ps
2020 ^[33]	LBO	6*6*15	149 °C	50	532	50 mJ	-	68	3.358/2.457 ¹	1	1064	100 ps
2016 ^[31]	BBO	厚1.5	室温	70	515	20 mJ	-	70	1.84/1.66 ¹	5	1030	1 ps
2017 ^[41]	β-BBO	厚1.5	-	70	515	14 mJ	-	70		5 ²	1030	1 ps
2023 ^[34]	LBO	-	-	259	515	259 mJ	-	59	-	1	1030	1 ps
2015 ^[30]	LBO	6*6*5	47 °C	820	515	2.7 mJ	-	70	1.53/1.99 ¹	300	1030	7.7 ps
2020 ^[32]	LBO	15*15*5	47 °C	1460	515	4.87 mJ	-	71	1.38/1.43 ¹	300	1030	7.7 ps

1. 为 M_x²/M_y² 简写; 2. 基频光重频; 3. 最大绿光脉冲能量1.96 mJ输出时测得;

6 飞秒脉宽的腔外倍频研究进展

飞秒级腔外倍频技术近年来在超短脉冲绿光 (主要 515–530 nm) 生成领域取得进展, 主要采用 BBO (包括 β-BBO)、LBO、等非线性晶体, 将脉宽 <300 fs 的基频光 (多来自掺 Yb 光纤激光器或 CPA 系统) 转换为高平均功率、高峰值功率的绿光脉冲。该技术面临宽谱脉冲的群速度失配、走

离效应、晶体损伤阈值和热管理等挑战, 研究重点逐步从低功率验证转向高平均功率、高效率与优异光束质量的综合实现。

早期阶段 (2016–2020 年), 输出功率多限于 1–10 W 范围, 转换效率一般 20%–40%。

2021–2023 年, 性能显著提升, 尤其平均功率突破 10 W 以上。代表性进展包括:

2021 年法国波尔多大学 Dominique Descamps 等采用 BBO 晶体, 实现平均功率 11.45 W (单脉

冲能量 69 μJ , 重频 166 kHz, 脉宽 14.8 fs, 效率 40.6%)^[42]。

2022 年华东师范大学 Gehui Xie 等采用 LBO 晶体, 实现平均功率 5.5 W(单脉冲能量 50 μJ , 重频 110 kHz, 脉宽 290 fs, 效率 41%)^[43]。

2023 年德国耶拿大学 Maximilian Karst 等采用 BBO 晶体, 以掺 Yb 光纤激光器泵浦, 实现 515 nm 绿光平均功率 22.4 W、单脉冲能量 0.44 mJ(440 μJ)、

重频 50.8 kHz、脉宽 15.7 fs、光束质量 $M^2 \approx 1.19/1.17$ 、转换效率 >52%——成为报道的飞秒级腔外倍频最高平均功率和单脉冲能量组合, 同时光束质量接近衍射极限^[44]。

统计的实验结果中最高平均功率: 22.4 W^[44]。最高单脉冲能量: 0.44 mJ(440 μJ , 同时对应^[44]。最高转换效率: >52%^[44]。未来通过采用更薄晶体减小走离、多晶体串联、先进光束整形、更高功率泵浦源及后压缩技术, 有望进一步提升功率密度、缩短脉宽并提高效率, 实现更高效的飞秒绿光源。

总体而言, BBO 因高有效非线性系数、宽相位匹配带宽和适合极短脉宽而成为飞秒级高功率腔外倍频的主流晶体, 尤其适用于高重频和高平均功率场景; LBO 在热导率和走离控制上更优, 适合突发模式或中等功率应用; 相比皮秒级, 飞秒级倍频整体转换效率偏低(最高>52%), 受脉冲展宽和相位失配影响较大。

图 8、图 9 分别展示了 2021 年以来飞秒级腔

外倍频的平均功率、单脉冲能量、转换效率、重频分布。表 4 总结了千赫兹重频下代表性实验参数。

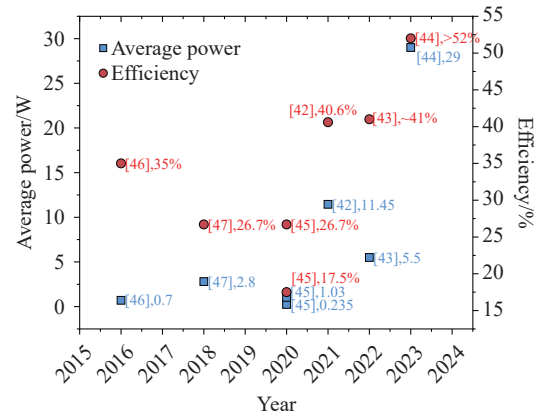


图 8 飞秒倍频输出平均功率、效率统计

Fig. 8 Statistics on average output power and efficiency of femtosecond frequency doubling

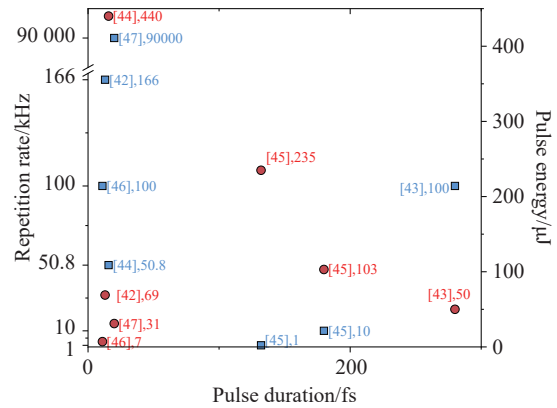


图 9 飞秒倍频脉宽、重复频率、单脉冲能量统计

Fig. 9 Statistics on pulse width, repetition rate, and single-pulse energy of femtosecond frequency doubling

表 4 飞秒级脉宽倍频研究进展 (按倍频输出平均功率降序)

Tab. 4 Advances in Femtosecond Pulse Width Frequency Doubling Research (Sorted in Descending Order of Frequency Doubling Output Average Power)

年份	非线性晶体	晶体尺寸 (mm^3)	倍频平均功率(W)	倍频输出波长(nm)	能量 (μJ)	倍频脉宽 (fs)	光光转换效率(%)	倍频 M^2	重频 (kHz)	基频波长 (nm)	基频光脉宽 (fs)
2020 ^[45]	KBOB	7*7*1	0.235	515	235	132 fs	26.70	-	1 kHz	1030	180 fs
2016 ^[46]	KDP	厚1	0.7	515	7	11 fs	35	-	100 kHz	1030	-
2020 ^[45]	KBOB	7*7*1	1.03	515	103	-	17.50	-	10 kHz	1030	180 fs
2018 ^[47]	-	-	2.8	532	31	<20 fs	26.7	-	90 MHz	1063	-
2022 ^[43]	LBO	3*3*4	5.5	530	50	-	~41	-	100 kHz	1060	280 fs
2021 ^[42]	BBO	厚1	11.45	515	69	13 fs	40.6	-	166 kHz	1030	-
2023 ^[44]	BBO	长1.5	29	515	440	15.7 fs	>52	1.19/1.17 ¹	50.8 kHz	1030	-

1. 为 M_x^2/M_y^2 简写形式

7 讨论与总结

本文系统综述了二次谐波(SHG)绿光光源(主要 515–532 nm)的近年进展,按脉宽与倍频形式分为纳秒腔内/腔外、皮秒腔外及飞秒腔外四类,各具特征与互补性。

单脉冲能量方面,纳秒腔外倍频最高(1.04 J, 重频 1 kHz)^[24],受益于低重频大能量基频积累;皮秒腔外次之(259 mJ, 重频 1 kHz)^[34];飞秒腔外受

走离与损伤阈值限制(最高 0.44 mJ, 重频 50.8 kHz)^[44];纳秒腔内最低(典型<0.4 mJ)^[9]。此规律表明,重频-能量负相关:低重频(≤ 1 kHz)利于高峰值功率应用(如激光加工、等离子体激发),高重频(数十–数百 kHz)则优先平均功率。

平均功率方面,皮秒腔外实现 kW 级突破(最高 1460 W, 重频 300 kHz)^[32],彰显 Yb:YAG 碟片+LBO 组合的扩展潜力;纳秒腔外接近 kW (1.04 kW, 重频 1 kHz)^[24],借助串联 LBO 与脉冲整形获高效率;飞秒级腔外倍频功率受热效应和群速度失配限制,当前最高~22–29 W^[44];纳秒腔内最高 51 W^[21]。总体,重频与平均功率正相关,实验可通过重频调控实现能量与平均功率的权衡。

晶体尺寸分析显示,同脉宽下最高输出多采用较大横截面积晶体(如纳秒腔外 LBO 10×

10 mm²^[24]、皮秒腔外 33×33 mm²^[7]、次高皮秒 LBO 15×15 mm²^[32]),利于热负荷分散、功率密度降低及热透镜效应缓解,支持更高泵浦强度。飞秒级偏好短薄晶体,但截面小限制功率扩展。未来宜优先大孔径晶体(横截面 $\geq 10\times 10$ mm²)并辅以先进热管理(如微通道冷却)。

转换效率优化为共性关键。纳秒腔外最具代表性:精确匹配晶体长度、泵浦强度与相位条件,结合 EOM 方波整形,可达 89%(580 W 时)^[24]。通用策略包括优化泵浦强度^[48]/光束分布^[29]、热梯度控制^[49–50]、模式匹配^[51]、多晶体串联^[24, 52]、外部谐振腔增强^[53]等;光束质量优化依赖提升基频光束质量^[12, 22, 27, 54]、孔径整形^[29]及热效应抑制^[10, 36, 48, 55]。

晶体选择以 LBO 为主导(尤其高功率皮秒/纳秒场景),源于高损伤阈值(~18.9 GW/cm²^[56])、宽接受带宽、低走离、适中热导率(3–4.5 W/m·K^[57])及优异稳定性。相较,KTP 族易灰迹/损伤低^[58];KDP/DKDP 潮解敏感^[59];BBO 热导低/走离大^[60];PPLN/PPMgLN 热导/损伤不足(中低功率适用)。

展望未来,大孔径高损伤晶体、先进热管理、脉冲整形(平顶/burst)与多级倍频的成熟,将推动 kW 级以上稳定绿光源实现;飞秒领域经后压缩+高效 SHG 有望突破>100 W。同时,针对行业需求(如精密加工的高重频高光束质量、粒子加速的高能量低重频)定制参数系统,将加速超快激光在工业、科研等领域的深度应用。

参考文献:

- [1] WU Y, WU H P, WANG Y, *et al.*. 1.21-W 532-nm picosecond green laser generated by second-harmonic generation using K3B6O10Cl as a nonlinear optical crystal[J]. *Optical Engineering*, 2018, 57(6): 066112.
- [2] DING X, WANG R, ZHANG H, *et al.*. Generation of 3.5W high efficiency blue-violet laser by intracavity frequency-doubling of an all-solid-state tunable Ti: sapphire laser[J]. *Optics Express*, 2008, 16(7): 4582-4587.
- [3] FAN ZH W, LIU X P, ZHANG ZH P, *et al.*. 10 kHz repetition rate picosecond green laser for high-accuracy satellite ranging[J]. *Frontiers in Physics*, 2023, 10: 1115330.
- [4] LEONE C, LOPRESTO V, DE IORIO I. Wood engraving by Q-switched diode-pumped frequency-doubled Nd: YAG green laser[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2009, 47(1): 161-168.
- [5] BREDILLET K, RIPORTO F, GUO T, *et al.*. Dual second harmonic generation and up-conversion photoluminescence emission in highly-optimized LiNbO₃ nanocrystals doped and co-doped with Er³⁺ and Yb³⁺[J]. *Nanoscale*, 2024, 16(13): 6739-6747.
- [6] ZHANG A N, WANG Y P, LI ZH L, *et al.*. Concept for power scaling by harmonic beam coaxial combination in an intra-cavity frequency doubling laser[J]. *Optics Letters*, 2024, 49(16): 4669-4672.
- [7] HUBKA Z, ANTIPENKOV R, BOGE R, *et al.*. 120 mJ, 1 kHz, picosecond laser at 515 nm[J]. *Optics Letters*, 2021, 46(22): 5655-5658.
- [8] JI B, ZHENG X S, CAI Z P, *et al.*. Compact high conversion efficiency Nd: YAG/LBO green laser using unstable V

- cavity[J]. *Laser Physics*, 2012, 22(2): 406-410.
- [9] SHEN J P, HUANG X, XU SH C, *et al.*. High average power green laser based on LED-side-pumped Q-switched Nd: YAG laser[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2023, 35(13): 721-724.
- [10] LIU Q, YAN X P, GONG M L, *et al.*. 103W high beam quality green laser with an extra-cavity second harmonic generation[J]. *Optics Express*, 2008, 16(19): 14335-14340.
- [11] BAER T. Large-amplitude fluctuations due to longitudinal mode coupling in diode-pumped intracavity-doubled Nd: YAG lasers[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 1986, 3(9): 1175-1180.
- [12] JIANG SH B, WANG Q, JIANG L J, *et al.*. Frequency-doubled short nanosecond fiber lasers for glass drilling and grinding[J]. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 2022, 19(3): 1208-1213.
- [13] KHRIPUNOV S, KOBTSEV S, RADNATAROV D. Efficiency of different methods of extra-cavity second harmonic generation of continuous wave single-frequency radiation[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(3): 502-506.
- [14] BAI S C, DONG J. GTR-KTP enhanced stable intracavity frequency doubled Cr, Nd: YAG self-Q-switched green laser[J]. *Laser Physics*, 2015, 25(2): 025002.
- [15] FU Q, ZHANG X Y, LIU ZH J, *et al.*. An efficient frequency-doubled Nd: KLu(WO₄)₂ laser at 535 nm[J]. *Optics & Laser Technology*, 2016, 77: 193-197.
- [16] CHANG J H, YANG ZH B, LI H H, *et al.*. Passively Q-switched Nd: YVO₄/PPLN green laser with a few-layered MoS₂ saturable absorber[J]. *Optical Review*, 2017, 24(6): 765-771.
- [17] 孙瑛璐, 段延敏, 程梦瑶, 等. 自拉曼混频黄绿波段三波长可切换激光[J]. *物理学报*, 2020, 69(12): 124201.
- SUN Y L, DUAN Y M, CHENG M Y, *et al.*. Triple wavelength-switchable lasing in yellow-green based on frequency mixing of self-Raman operation[J]. *Acta Physica Sinica*, 2020, 69(12): 124201. (in Chinese).
- [18] DUAN Y M, SUN Y L, ZHU H Y, *et al.*. YVO₄ cascaded Raman laser for five-visible-wavelength switchable emission[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(9): 2564-2567.
- [19] SHILOVA G V, ZVEREV P G, SIROTKIN A A. Diode pumped Nd: YVO₄/LBO/Ba(NO₃)₂ Raman laser at 563 nm[J]. *Laser Physics Letters*, 2020, 17(6): 065801.
- [20] SONG M Y, CHOO H T, CHOI J H. Operational characteristics of the doubly Q-switched Nd: YAG laser and intracavity frequency doubled laser[J]. *New Physics: Sae Mulli*, 2022, 72(3): 245-251.
- [21] PANG Y J, XUE R X, LU W, *et al.*. Intracavity frequency doubling acousto-optic Q-switched high repetition rate high-energy Nd: YLF laser[J]. *Applied Optics*, 2024, 63(6): 1572-1576.
- [22] WU ZH CH, ZHANG X L. High power 100 kHz electro-optic cavity empty green laser[J]. *Optik*, 2019, 178: 25-28.
- [23] ZHU J Q, XIE X L, SUN M ZH, *et al.*. Analysis and construction status of SG-II 5PW laser facility[J]. *High Power Laser Science and Engineering*, 2018, 6: e29.
- [24] CHI H, WANG Y, DAVENPORT A, *et al.*. Demonstration of a kilowatt average power, 1 J, green laser[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(24): 6803-6806.
- [25] CHA Y H, KIM Y, PARK H, *et al.*. 80-W dual-wavelength green pulsed laser based on a Yb-doped rod-type fiber amplifier[J]. *Applied Physics B*, 2021, 127(5): 78.
- [26] CHA Y H, CHUN B, PARK H. 40-W 352-nm single-frequency nanosecond pulsed rod-type fiber laser[J]. *Journal of the Korean Physical Society*, 2023, 82(12): 1157-1162.
- [27] LIU H Y, ZHOU Z H, BIAN Q, *et al.*. High-efficiency nanosecond green laser based on extra-cavity second-harmonic generation of a Nd: YAG MOPA system[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2023, 15(5): 1502005.
- [28] LI X D, ZHOU Y P, XU H B, *et al.*. High-stability, high-pulse-energy MOPA laser system based on composite Nd: YAG crystal with multiple doping concentrations[J]. *Optics & Laser Technology*, 2022, 152: 108080.
- [29] JIANG Y W, YANG J, LI P L, *et al.*. High energy LiDAR source for long distance, high resolution range imaging[J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2020, 62(12): 3655-3661.
- [30] NEGEL J P, LOESCHER A, VOSS A, *et al.*. Ultrafast thin-disk multipass laser amplifier delivering 1.4 kW (4.7 mJ, 1030 nm) average power converted to 820 W at 515 nm and 234 W at 343 nm[J]. *Optics Express*, 2015, 23(16): 21064-21077.
- [31] FATTAHI H, ALISMAIL A, WANG H CH, *et al.*. High-power, 1-ps, all-Yb: YAG thin-disk regenerative amplifier[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(6): 1126-1129.
- [32] RÖCKER C, LOESCHER A, BIENERT F, *et al.*. Ultrafast green thin-disk laser exceeding 1.4 kW of average power[J].

- Optics Letters*, 2020, 45(19): 5522-5525.
- [33] MA N, CHEN M, YANG C, *et al.*. High-efficiency 50 W burst-mode hundred picosecond green laser[J]. *High Power Laser Science and Engineering*, 2020, 8: e1.
- [34] WALCH P, MAHIEU B, MORENO V, *et al.*. Long distance laser filamentation using Yb: YAG kHz laser[J]. *Scientific Reports*, 2023, 13(1): 18542.
- [35] GORBUNOV I A, KULAGIN O V. Picosecond hybrid laser based on semiconductor laser, fibre and Nd: YVO₄ amplifiers. Investigation of effects limiting the peak power[J]. *Quantum Electronics*, 2021, 51(10): 886-893.
- [36] DUDA M, NOVÁK O, CHYLA M, *et al.*. Balancing the conversion efficiency and beam quality of second harmonic generation of a two-picosecond Yb: YAG thin-disk laser[J]. *Laser Physics*, 2020, 30(2): 025405.
- [37] CHEN Y, LI F Q, LIU K, *et al.*. High-efficiency 2-mJ 5-kHz picosecond green laser generation by Nd: YAG innoslab amplifier[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2015, 27(14): 1531-1534.
- [38] NOVÁK O, TURČIČOVÁ H, SMRŽ M, *et al.*. Picosecond green and deep ultraviolet pulses generated by a high-power 100 kHz thin-disk laser[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(22): 5210-5213.
- [39] HUANG Y T, ZHANG H B, YAN X CH, *et al.*. A high peak power and high beam quality sub-nanosecond Nd: YVO₄ laser system at 1 kHz repetition rate without SRS process[J]. *Applied Sciences*, 2019, 9(23): 5247.
- [40] NOVÁK J, GREEN J T, METZGER T, *et al.*. Thin disk amplifier-based 40 mJ, 1 kHz, picosecond laser at 515 nm[J]. *Optics Express*, 2016, 24(6): 5728-5733.
- [41] ALISMAIL A, WANG H CH, BRONS J, *et al.*. 20 mJ, 1 ps Yb: YAG thin-disk regenerative amplifier[J]. *Journal of Visualized Experiments*, 2017(125): 55717.
- [42] DESCAMPS D, GUICHARD F, PETIT S, *et al.*. High-power sub-15 fs nonlinear pulse compression at 515 nm of an ultrafast Yb-doped fiber amplifier[J]. *Optics Letters*, 2021, 46(8): 1804-1807.
- [43] XIE G H, LIU Y, ZHANG C C, *et al.*. Temporal envelope programmable burst-mode Ytterbium all-fiber amplifier based, ultraviolet source at 260 nm[J]. *Optics & Laser Technology*, 2022, 151: 108032.
- [44] KARST M, PFALLER P, KLAS R, *et al.*. 22-W average power high pulse energy multipass-cell-based post-compression in the green spectral range[J]. *Optics Letters*, 2023, 48(5): 1300-1303.
- [45] ZHANG L, LONG Y, ZHANG M, *et al.*. Femtosecond green and ultraviolet lasers generated using second-harmonic generation based on K₃B₆O₁₀Br nonlinear optical crystals[J]. *Optical Engineering*, 2020, 59(5): 056107.
- [46] DIDENKO N V, KONYASHCHENKO A V, KOSTRYUKOV P V, *et al.*. Temporal compression of pulses from a 100-KHz-repetition-rate femtosecond ytterbium laser[J]. *Quantum Electronics*, 2016, 46(8): 675-678.
- [47] TAWFIEQ M, HANSEN A K, JENSEN O B, *et al.*. Intensity noise transfer through a diode-pumped titanium sapphire laser system[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2018, 54(1): 1700209.
- [48] KUMAR S C, BAUTISTA E S, EBRAHIM-ZADEH M. Stable, high-power, Yb-fiber-based, picosecond ultraviolet generation at 355 nm using BiB₃O₆[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(3): 403-406.
- [49] 程梦尧, 王兆华, 何会军, 等. 高效率三倍频产生 355 nm 皮秒激光的实验研究[J]. *物理学报*, 2019, 68(12): 124205. CHENG M Y, WANG ZH H, HE H J, *et al.*. Efficient third harmonic generation of 355 nm picosecond laser pulse[J]. *Acta Physica Sinica*, 2019, 68(12): 124205. (in Chinese).
- [50] 上官爱红, 张昊苏, 曹钰, 等. 空间高功率激光二极管泵浦源阵列的相变热控系统[J]. *光学精密工程*, 2024, 32(19): 2877-2888. SHANGGUAN A H, ZHANG H S, CAO Y, *et al.*. Phase change thermal control system for space high-power laser diode pumping source array[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2024, 32(19): 2877-2888. (in Chinese).
- [51] CHIOU S W, KOVACHY T, HOGAN J M, *et al.*. Generation of 43 W of quasi-continuous 780 nm laser light via high-efficiency, single-pass frequency doubling in periodically poled lithium niobate crystals[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(18): 3861-3863.
- [52] KIRIYAMA H, INOUE N, YAMAKAWA K. High energy second-harmonic generation of Nd: glass laser radiation with large aperture CsLiB₆O₁₀ crystals[J]. *Optics Express*, 2002, 10(19): 1028-1032.
- [53] YANG X Z, ZHANG L, CUI S Z, *et al.*. Sodium guide star laser pulsed at Larmor frequency[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(21): 4351-4354.
- [54] 张益嘉, 付鑫鹏, 阮迪, 等. 固体 MOPA 激光器光束质量优化技术研究进展[J]. *发光学报*, 2025, 46(10): 1916-1929. ZHANG Y J, FU X P, RUAN D, *et al.*. Research progress of beam quality optimization technology for solid-state

- MOPA lasers[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2025, 46(10): 1916-1929. (in Chinese).
- [55] 王英广, 张激扬, 张强, 等. 旋变二次谐波测角误差自校正[J]. *光学精密工程*, 2024, 32(2): 184-192.
WANG Y G, ZHANG J Y, ZHANG Q, *et al.*. Self-correction for resolver second harmonic angle measurement error[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2024, 32(2): 184-192. (in Chinese).
- [56] 宋佳齐. 高平均功率单频 824nm 纳秒光学参量振荡器的研究[D]. 太原: 山西大学, 2024.
SONG J Q. *Investigation of the high-average-power single-frequency 824 nm nanosecond optical parametric oscillator*[D]. Taiyuan: Shanxi University, 2024. (in Chinese).
- [57] RIEDEL R, ROTHHARDT J, BEIL K, *et al.*. Thermal properties of borate crystals for high power optical parametric chirped-pulse amplification[J]. *Optics Express*, 2014, 22(15): 17607-17619.
- [58] ZHANG Y, ZHANG L C, LIU M, *et al.*. Revealing the mechanical properties of potassium dihydrogen phosphate crystals by nanoindentation[J]. *Journal of Materials Research*, 2016, 31(8): 1056-1064.
- [59] ZHANG ZH CH, WANG B, TAO G H, *et al.*. Water dissolution ultra-precision continuous polishing of potassium dideuterium phosphate (DKDP) crystal[J]. *Proceedings of SPIE*, 2023, 12982: 129820G.
- [60] BEASLEY J D. Thermal conductivities of some novel nonlinear optical materials[J]. *Applied Optics*, 1994, 33(6): 1000-1003.

作者简介:



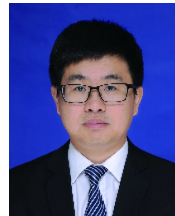
周天琛(1993—), 男, 河北省黄骅人, 长春理工大学博士研究生, 主要从事二次谐波、固体激光器方面的研究。
E-mail: zhoutianchen@yeah.net



陈 飞(1982—), 男, 河南南阳人, 博士, 研究员, 2011年于哈尔滨工业大学获博士学位。主要从事新型激光技术及应用研究。E-mail: feichenny@126.com



王晓华(1967—), 女, 黑龙江绥化人, 博士, 研究员, 博士生导师, 2003年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获博士学位。主要从事半导体激光材料生长、物性研究。E-mail: biewang2001@126.com



魏志鹏(1978—), 男, 吉林长春人, 博士, 教授, 博士生导师, 2008年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获博士学位。主要从事半导体光电子器件方面的研究。E-mail: weizp@cust.edu.cn