

全固态高功率深紫外皮秒激光器*

欧佐元¹⁾²⁾ 徐思志²⁾ 刘星^{2)†} 高瑜博²⁾ 陈俊展¹⁾ 和星宇²⁾ 卢浩天²⁾
吴宠昊²⁾ 郭春雨¹⁾ 郭丽³⁾ 吴旭²⁾ 吕启涛³⁾ 阮双琛²⁾

1) (深圳大学物理与光电工程学院, 应用技术学院, 深圳 518060)

2) (深圳技术大学中德智能制造学院, 先进光学精密制造技术广东普通高校重点实验室, 深圳 518118)

3) (大族激光科技产业集团股份有限公司, 深圳 518103)

(2025 年 2 月 28 日收到; 2025 年 5 月 8 日收到修改稿)

全固态高功率深紫外激光器具有光子能量高、脉冲宽度短和空间分辨率优异等优点, 在科学研究和先进制造等领域展现出重要的应用价值. 本文基于自主研发的全固态 Nd:YVO₄ 皮秒 MOPA 激光放大器 (平均功率 140 W、重复频率 800 kHz、脉冲宽度 8.33 ps), 开展了 LBO 和 β -BBO 晶体 I 类相位匹配的腔外二倍频与四倍频研究. 双光子吸收是限制深紫外光功率进一步提升的关键因素, 通过研究高功率双波长激光在 β -BBO 晶体的透过率和温升, 发现高功率深紫外光在 β -BBO 晶体中存在较强的双光子吸收, 引发的热效应导致相位失配, 严重影响频率转换效率和输出稳定性. 为了进一步提高深紫外功率, 本文采用大尺寸光斑泵浦 (光斑尺寸 1.5 mm×1 mm) β -BBO 晶体方案, 在泵浦峰值功率密度 <1.11 GW/cm² 的条件下, 有效地抑制了双光子吸收效应引起的热梯度, 实现了平均功率 11 W 的四倍频深紫外光输出, 单脉冲能量为 13.75 μ J. 经过 8 h 运行, 功率抖动的均方根小于 0.96% (@ 8 W). 该光源有望在超快精密加工和高次谐波产生等领域发挥重要作用.

关键词: 深紫外, 皮秒激光, β -BBO, 四倍频

PACS: 42.65.-k, 42.65.Ky, 42.55.-f

CSTR: 32037.14.aps.74.20250247

DOI: 10.7498/aps.74.20250247

1 引言

200—280 nm 的深紫外 (deep ultraviolet, DUV) 光源在多个前沿领域中具有重要应用价值, 例如高精度表征、自由电子激光器驱动以及高端材料加工等^[1-3]. 在半导体集成电路制造中, 深紫外光能够实现对晶圆表面微观缺陷的高分辨率检测, 为器件的缺陷分析与修复提供了关键技术支持^[4,5]. 此外, 作为外部种子源, 深紫外光能够有效地驱动波长小于 10 nm 的自由电子激光器, 从而促进超高

分辨率成像和物质微观结构的深度探测^[6,7]. 在材料加工方面, 深紫外光的“冷加工”特性使其能够在几乎无热效应的条件下高效破坏材料内部的化学键, 显著提高加工质量, 尤其适用于宽禁带材料、脆性材料的微米级精密加工^[8,9]. 因此, 深紫外光不仅在基础科学研究中具有重要应用潜力, 也在先进制造技术中发挥着日益重要的作用.

目前, 基于非线性晶体对近红外波段激光进行腔外级联倍频 (second-harmonic generation, SHG) 是产生深紫外光的主要技术手段之一^[10,11]. 该技术通常采用 1 μ m 波段的近红外光作为基频光, 首先

* 国家重点研发计划 (批准号: 2022YFB3605800)、国家自然科学基金 (批准号: 62275174, 62105225)、深圳市新引进高端人才财政补助科研启动项目 (批准号: GDRC202106)、深圳市高等院校稳定支持计划 (批准号: 20220719104008001, 20220718173849001) 和深圳市科技重大专项 (批准号: KJZD20240903100205008) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: liuxingstart123@163.com

通过非线性晶体产生倍频光, 随后再次倍频进一步转化为深紫外光^[12,13]. 在四倍频 (fourth-harmonic generation, FHG) 转换过程中, 常用的非线性晶体主要包括 β -BaB₂O₄ (β -BBO), CsLiB₆O₁₀ (CLBO)^[14,15]. 其中 CLBO 晶体具有较小的空间走离角和较弱的双光子吸收等优点, 因此近年来受到研究人员的广泛关注^[16]. 2022 年, Orii 等^[17] 报道了一种基于 CLBO 晶体的深紫外皮秒激光器, 在平均功率为 20 W 时实现了 10000 h 的稳定运行, 并保持了良好的光束质量因子 $M^2 < 1.5$. 该研究首次展示了深紫外激光器在工业应用中的长期可靠性. 随后, Orii 等^[18] 进一步将深紫外光的平均功率提升至 53 W, 这是迄今为止报道的最高超快深紫外平均功率. 2024 年, Yu 等^[19] 采用国产商用 CLBO 晶体作为四倍频变换晶体, 在基频光功率为 34.2 W 时, 实现了平均功率为 14 W、脉冲宽度为 1.8 ns 的深紫外光输出. 尽管 CLBO 晶体在深紫外光频率转换中表现出色, 但其存在生长困难和价格昂贵的缺点. 此外, CLBO 晶体吸湿性强, 在空气中易发生潮解^[20], 因此必须放置于高温密封干燥的气室中以确保长期稳定性. 与 CLBO 晶体相比, β -BBO 晶体因其非线性系数高、潮解性低和化学性能稳定等优点而广泛应用于深紫外四倍频转换. 2015 年, Kumar 等^[21] 采用双晶体空间补偿方案, 开展了腔外四倍频深紫外研究, 探讨了在不同温度条件下, β -BBO 晶体的双光子吸收系数与色心密度的变化规律, 在绿光泵浦峰值功率密度为 3.5 GW/cm² 和温度为 200 °C 时, 双光子吸收系数较室温降低了 3.5 倍, 实现了平均功率为 2.9 W、脉宽为 20 ps 的深紫外光输出. 2024 年, 王子文等^[12] 通过研究不同匹配温度下 β -BBO 晶体内部的升温情况, 发现提高晶体的匹配温度能够有效地缓解由非线性吸收引起的热效应, 从而改善深紫外光输出性能, 最终, 在晶体匹配温度为 180 °C、绿光输入功率为 16 W 时, 获得平均功率为 2.56 W、重复频率为 20 kHz、单脉冲宽度为 4 ns 的 266 nm 深紫外光, 绿光-深紫外光转换效率为 16%. 然而, β -BBO 晶体在高重复频率、高功率激光泵浦下的双光子吸收及动态色心的形成^[22,23], 是限制深紫外光功率进一步提升的重要原因. 因此, 研究 β -BBO 晶体在深紫外光生成中的转化机理和过程, 特别是在高功率和高重复频率下, 对于推动深紫外激光技

术的发展具有重要意义.

本文基于全固态 Nd:YVO₄ 激光 MOPA (master oscillator power amplifier, MOPA) 放大器开展了深紫外四倍频研究, 通过不同功率条件下对 532 nm 绿光和 266 nm 深紫外光在 β -BBO 晶体中的透过率与温升进行对比实验, 发现双光子吸收引发的热效应导致 β -BBO 晶体相位失配, 限制了深紫外光功率的进一步提升. 为此, 本文采用大尺寸光斑泵浦 (光斑尺寸 1.5 mm×1 mm) 方案, 在泵浦峰值功率密度 < 1.11 GW/cm² 的条件下, 有效地抑制了双光子吸收效应引起的热梯度, 获得了 11 W 的深紫外光输出. 该结果为超快精密加工、半导体制造等前沿应用提供了可靠的高功率光源支撑.

2 全固态皮秒激光放大器

实验设计的全固态深紫外超快激光实验装置如图 1 所示, 由种子源、光纤预放大模块、四级 Nd:YVO₄ 端泵激光放大模块和非线性频率转换模块组成. 其中, 种子源采用发射波长为 1064 nm、输出功率为 50 mW、重复频率为 20 MHz 与脉冲宽度为 7.8 ps 的全光纤 SESAM 锁模激光器. 通过精确控制声光调制器 (acoustic optical modulator, AOM) 可实现种子光的重复频率在 500 kHz—4 MHz 范围内调节. 之后通过光纤预放大模块和四级 Nd:YVO₄ 端泵激光放大模块, 进一步提升激光器的平均功率和单脉冲能量. 随后, 放大输出的近红外光通过半波片 HWP3 和薄膜偏振片 TFP, 直接注入到非线性频率转换模块中. 在二倍频阶段, 为减小走离效应以及提高倍频效率, 选用 6 mm×6 mm×15 mm 的 I 类相位匹配 (“o+o→e”) LBO 晶体 (θ : 90°, φ : 11.4°, S_1, S_2 : AR@1064/532 nm), 并采用控温精度为 0.1 °C 的温控炉对包裹铝箔的 LBO 倍频晶体的温度进行精确调节, 获得了高效的绿光激光输出. 在四倍频阶段, 绿光经双色镜 DM3 (AR@532 nm, HR@1064 nm) 分离后注入到 10 mm×10 mm×6 mm 的 I 类相位匹配 (“o+o→e”) β -BBO 晶体 (θ : 47.7°, φ : 0°, S_1, S_2 : AR@532/266 nm) 中, 通过精确的角度调节, 最终产生的深紫外光经双色镜 DM4 (AR@532 nm, HR@266 nm) 滤除残余的绿光, 从而实现深紫外光输出.

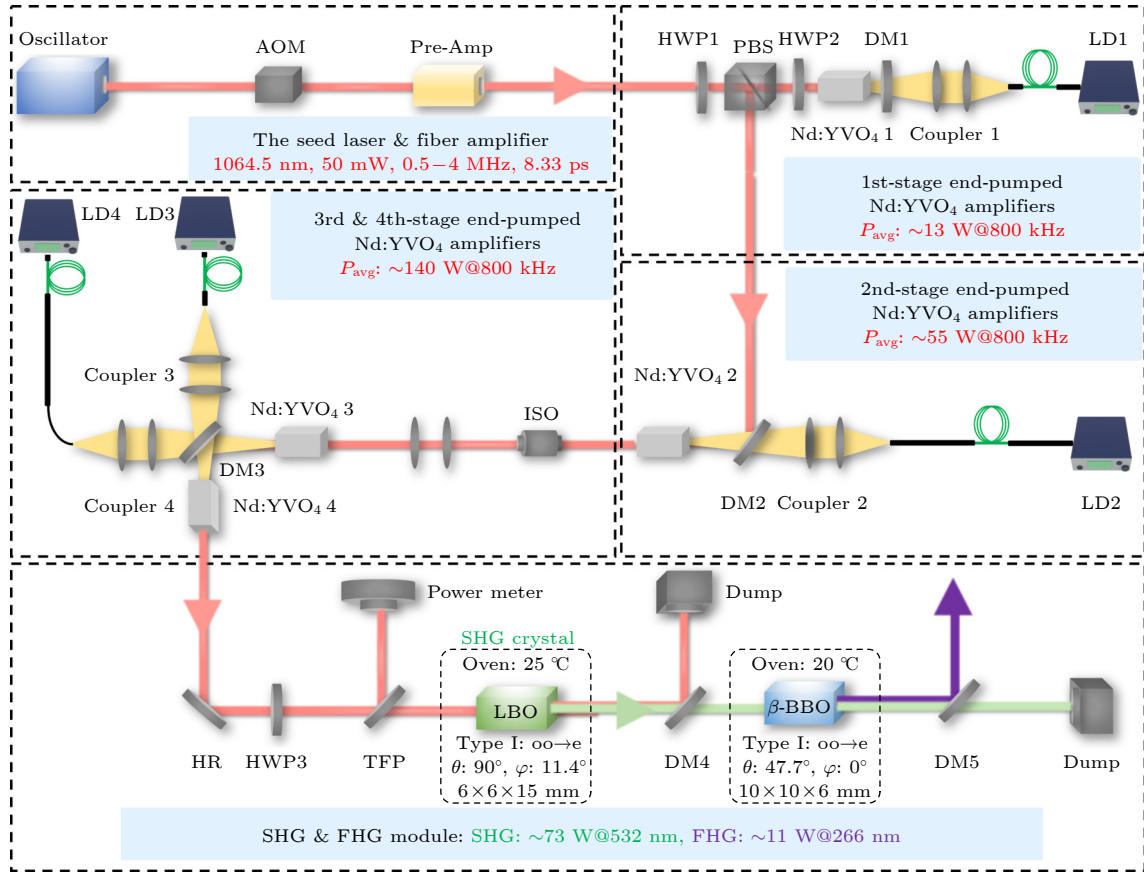


图 1 全固态深紫外皮秒激光器实验装置图. AOM, 声光调制器; Pre-Amp, 光纤预放大模块; HWP, 半波片; PBS, 偏振分光棱镜; TFP, 薄膜偏振片; DM, 双色镜

Fig. 1. All-solid-state DUV picosecond lasers experimental setup. AOM, acoustic optical modulator; Pre-Amp, fiber pre-amplification module; HWP, half-wave plate; PBS, polarizing beam splitter prisms; TFP, thin-film polarizer; DM, dichroic mirror.

3 结果与讨论

实验中使用的全固态 Nd:YVO₄ 皮秒 MOPA 激光放大器采用了光纤耦合的半导体激光器 (laser diode, LD) 作为泵浦源. LD 中心波长为 878.6 nm, 输出光纤的芯径为 400 μm, 数值孔径 (NA) 为 0.22. 其中, 第一级泵浦 LD1 的最大输出功率为 65 W, 而 LD2, LD3 和 LD4 的最大输出功率均为 115 W. 种子源输出功率是 50 mW, 重复频率 20 MHz, AOM 选频后重频为 0.5–4 MHz, 功率约 1 mW, 预放大后功率由 1 mW 增加到 50 mW, 经过第一、二级固体放大模块后, 近红外光的平均输出功率分别达到 13 W 和 54.5 W, 功率提取效率分别为 19.9% 和 36.09%, 光束质量因子为 $M_X^2 = 1.268$, $M_Y^2 = 1.351$. 随后, 基频光经第三、四级端泵放大模块进一步放大, 最终输出功率分别提升至 117 W 和 140 W, 相应的功率提取效率为 54.35% 和 20%. 图 2(a) 展示了在近红外光功率为 140 W、

重复频率为 800 kHz 条件下, 使用光束质量分析仪 (Beamsquare SP90449, Ophir) 测得的光束质量因子分别为 $M_X^2 = 1.60$, $M_Y^2 = 1.99$. 此外, 插图 2(b) 为近红外光最大输出功率时的近场光斑, 径向尺寸为 2.6 mm 以及 2.0 mm. 如图 2(b) 所示, 利用自相关仪 (PulseCheck150, APE GmbH) 测得近红外光的脉冲宽度, 经 sech^2 拟合后为 8.33 ps. 图 2(c) 展示了使用示波器 (MSO44, Tektronix) 测得近红外光的重复频率为 807.8 kHz. 如图 2(d) 所示, 使用光谱仪 (HR4000CG, Ocean Optics) 测得的近红外光谱中心波长为 1064.5 nm.

在二倍频过程中, 采用高精度温控炉对 LBO 晶体的温度进行精确调节, 在设置温度为 25 °C, 近红外光输入功率为 140 W, 泵浦光斑尺寸与泵浦峰值功率密度分别为 2.6 mm×2.0 mm, 0.51 GW/cm² 的条件下, 实现了 73 W 的绿光输出, 近红外光至绿光的转换效率最高可达到 52.64%. 图 3(a) 为绿光的平均功率和转换效率随近红外光功率变

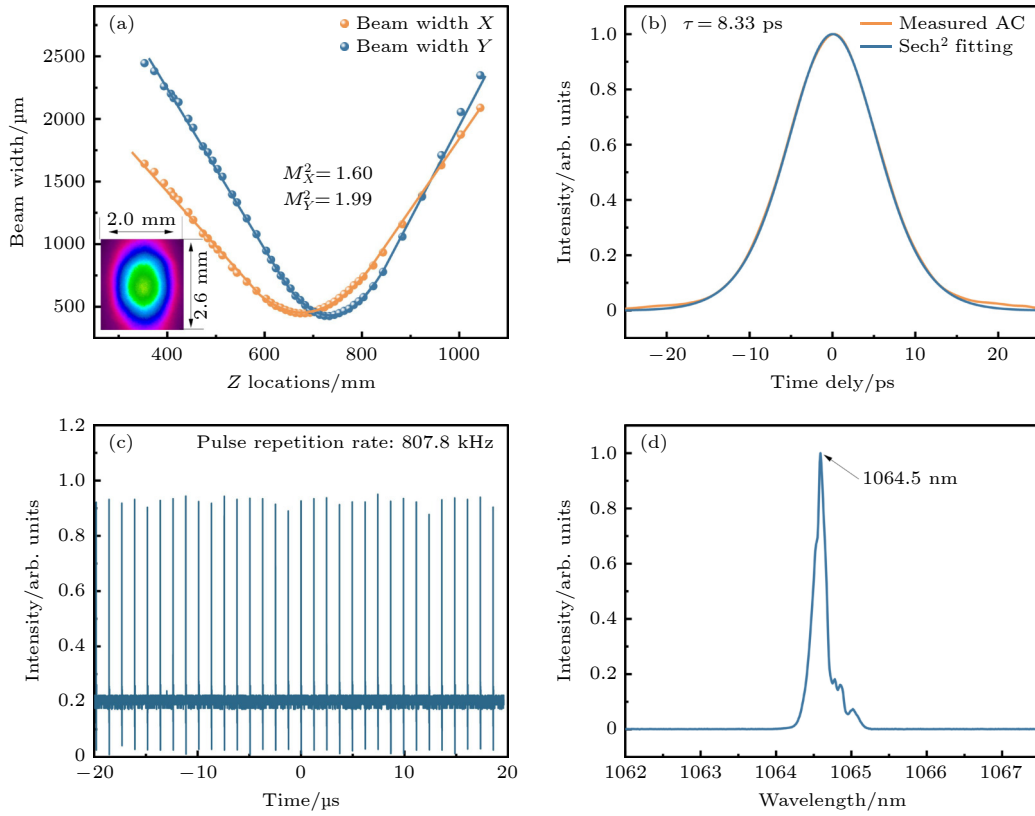


图 2 近红外光光束特性 (a) 近场光斑及 M^2 ; (b) 自相关曲线; (c) 重复频率; (d) 输出光谱

Fig. 2. Beam characteristics of Near-infrared laser: (a) Near-field spot and M^2 ; (b) autocorrelation curve; (c) repetition rate; (d) output spectrum.

化的曲线, 从图中可以观察到, 随着近红外光功率的增加, 倍频产生的绿光输出功率和转换效率总体上呈现出增长的趋势. 然而, 在近红外光功率达到 120 W 时, 倍频转换效率开始趋于饱和. 随着功率增加至 140 W, 绿光输出功率达到峰值, 平均功率为 73 W, 转换效率为 52.14%. 图 3(b) 为 800 kHz 时绿光的自相关曲线, 输出绿光的脉冲宽度经 sech^2 拟合后为 6.93 ps, 与近红外光相比, 绿光脉冲宽度有所压缩, 对应的峰值功率为 13.2 MW. 插图展示了使用示波器 (MSO44, Tektronix) 测得绿光的重复频率为 807.8 kHz. 图 3(c) 展示了在绿光最高功率输出时的光束质量因子, 其中 $M_X^2 = 1.27$, $M_Y^2 = 1.42$, 与近红外光相比有所改善. 此外, 插图显示了最高功率输出时绿光的近场光斑图, 近场光斑的径向尺寸分别为 1.85 mm 和 1.32 mm. 如图 3(d) 所示, 使用光谱仪 (HR4000CG, Ocean Optics) 测得绿光的中心波长为 532.1 nm.

为了深入地研究高功率泵浦下双光子吸收效应对 β -BBO 晶体的影响, 实验采用一块尺寸为 $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$ 的 β -BBO 晶体 (θ : 47.7° ,

φ : 0° , S_1 , S_2 : AR@532/266 nm), 测量了 532 nm 绿光和 266 nm 深紫外光的透过率及晶体表面温度.

实验测量结果如图 4 所示, 图 4(a) 和图 4(b) 的插图分别展示了在 60 W 绿光和 9.5 W 深紫外光注入条件下, 使用红外热像仪 (T1010, FLIR) 测得的 β -BBO 晶体温度分布, 从中可得晶体的最高温度分别为 30.5°C 和 59.4°C , 由于采用了一维加热的温控炉, 该装置仅能从底部加热晶体, 导致晶体两侧温度分布不均. 图 4(a) 和图 4(b) 分别展示了在不同绿光和深紫外光功率注入条件下, β -BBO 晶体透过率与温度的变化趋势. 从图 4(a) 中可以观察到, 随着绿光功率从 0 W 逐步增加至 60 W, 绿光注入下的晶体透过率与温度呈线性变化趋势, 透过率变化较小, 始终维持在 96.02% 以上, 晶体温度从 19.1°C 上升至 30.5°C , 表明 β -BBO 晶体对 532 nm 绿光具有良好的热稳定性与透过率. 相比之下, 不同深紫外光功率注入下的 β -BBO 晶体透过率与温度则呈现出明显的非线性变化趋势. 在图 4(b) 中, 随着深紫外光功率从 0 W 增加至 9.5 W, 透过率随功率增加下降显著, 尤其在功率大于 7 W 时, 最低降为 90.42%, 与此同时, 晶体温度急剧上

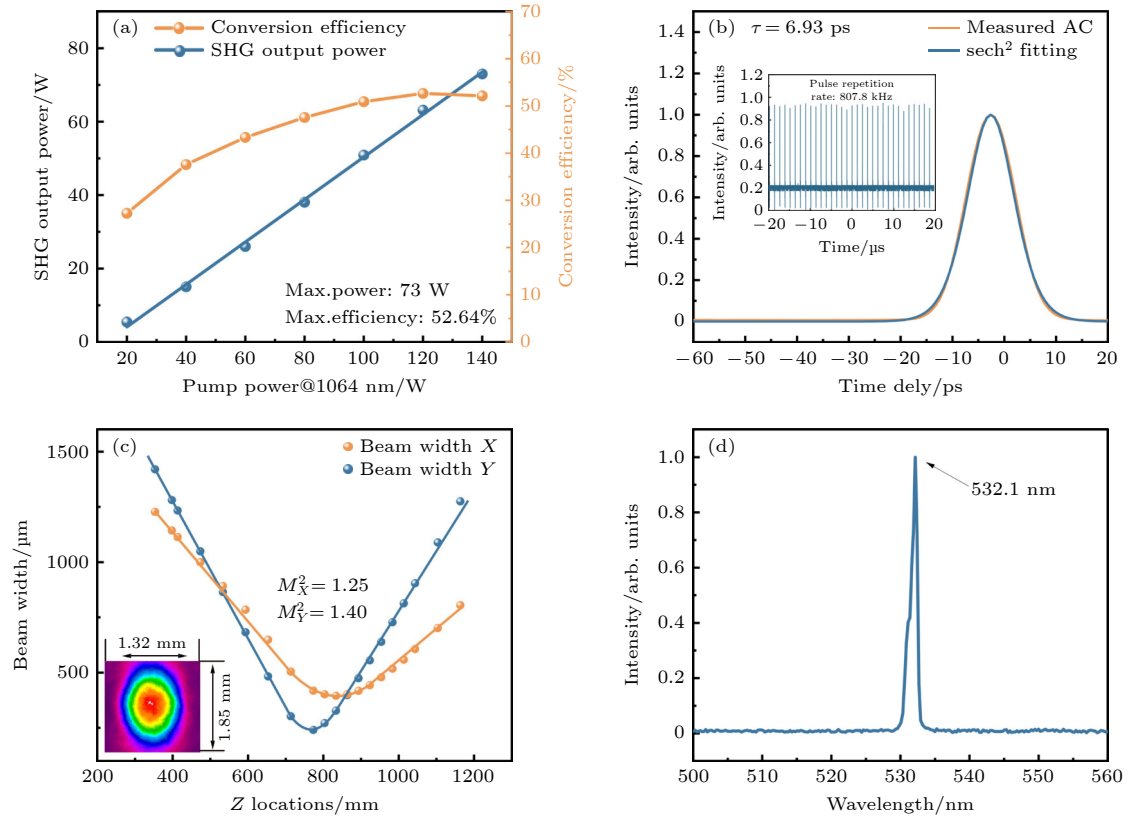


图 3 绿光光束特性 (a) 绿光功率随近红外光功率变化曲线; (b) 自相关曲线及重复频率; (c) 近场光斑及 M^2 ; (d) 输出光谱
Fig. 3. Beam characteristics of green laser: (a) Green laser power changes with near-infrared laser power; (b) autocorrelation curve and repetition rate; (c) near-field spot and M^2 ; (d) output spectrum.

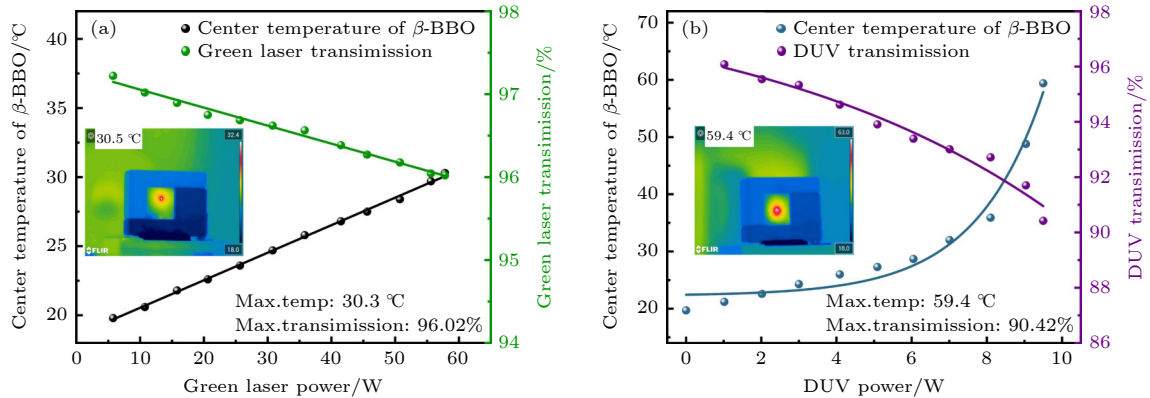


图 4 不同激光功率注入下的透过率与 β -BBO 晶体温度 (a) 绿光; (b) 深紫外光
Fig. 4. Transmission and temperature of β -BBO crystal under different laser power injection: (a) Green laser; (b) DUV.

升, 从 32 °C 升至 59.4 °C, 该结果表明 β -BBO 晶体对 266 nm 深紫外光在高功率下存在较强的吸收效应, 产生明显的热梯度现象, 从而造成晶体相位失配, 限制深紫外光功率进一步提升. 因此, 在四倍频过程中, 为减小高功率泵浦下双光子吸收效应对 β -BBO 晶体的影响, 本文采用了大尺寸光斑 (泵浦光斑尺寸 1.5 mm×1 mm) 泵浦方案产生深紫外光, 有效地抑制因双光子吸收效应产生的热梯

度现象, 从而保持良好的相位匹配, 提高倍频转换效率和输出稳定性, 最终在绿光注入功率为 73 W, 泵浦峰值功率密度为 1.11 GW/cm² 的条件下, 通过优化相位匹配角实现了最高 11 W 的深紫外光输出.

图 5(a) 为深紫外光的平均功率及转换效率随倍频光功率变化的曲线. 结果表明, 随着绿光功率的增加, 四倍频产生的深紫外光输出功率呈现上升

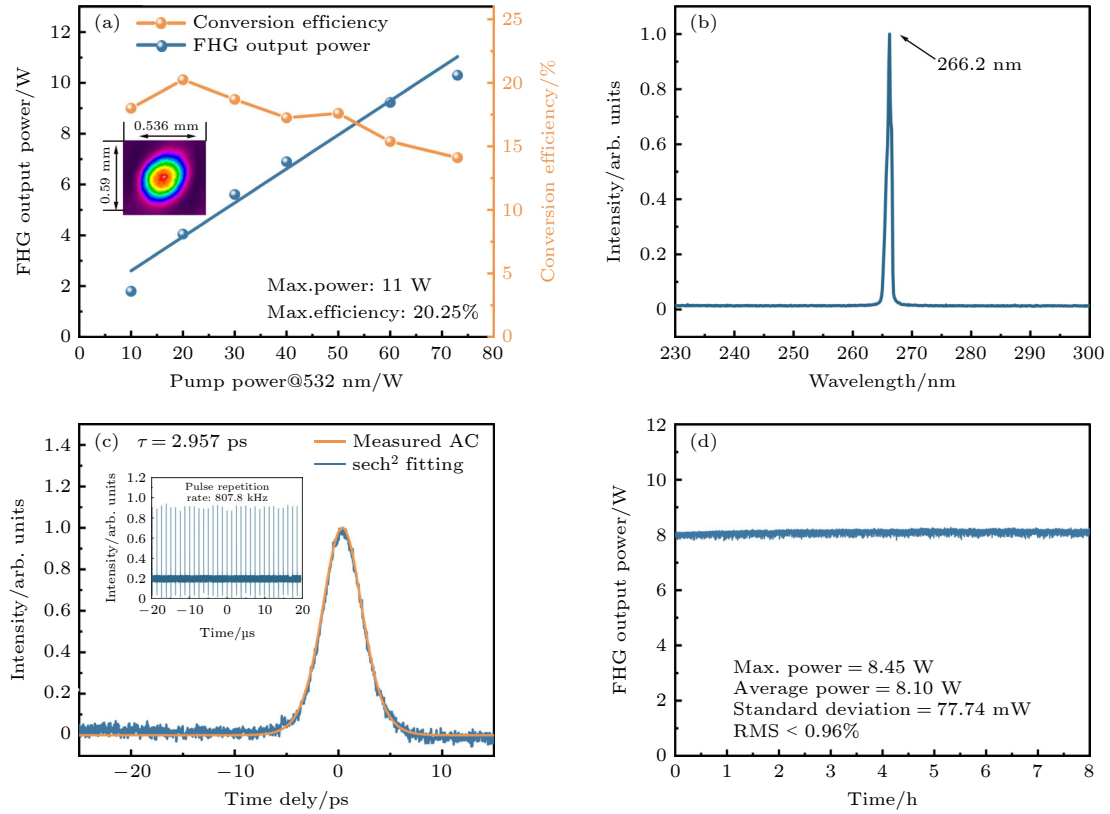


图 5 深紫外光光束特性 (a) 深紫外光功率随绿光功率变化曲线; (b) 输出光谱; (c) 自相关曲线及重复频率; (d) 输出功率稳定性
Fig. 5. Beam characteristics of DUV: (a) DUV power changes with green laser power; (b) output spectrum; (c) autocorrelation curve and repetition rate; (d) stability of output power.

趋势. 当输入绿光功率达到 73 W 时, 深紫外光的输出功率最高可达 11 W. 与此同时, 绿光至深紫外光的转换效率则表现出先上升后下降的趋势, 最大可达到 20.3%. 插图为深紫外光为 5 W 时的近场光斑图, 近场光斑的径向尺寸分别为 0.536 mm 和 0.59 mm. 图 5(b) 显示了使用 Ocean 光谱仪 (USB2000+, Ocean Optics) 测量的深紫外光谱, 其中心波长为 266.2 nm. 如图 5(c) 所示, 利用自相关仪 (PulseCheck150, PD TPA UV, APE GmbH) 测得深紫外光的自相关曲线, 输出脉冲宽度经 sech² 拟合后为 2.95 ps, 对应的峰值功率为 4.6 MW. 插图展示了使用示波器 (MSO44, Tektronix) 测得深紫外光的重复频率为 807.8 kHz. 图 5(d) 为深紫外光在输出 8 W 时连续工作 8 h 的稳定性情况, 功率抖动的均方根小于 0.96%. 在连续工作约 1 h 后, 输出功率出现小幅度下降 (<0.5 W). 这主要是由于初始阶段的光学系统热累积及环境温度变化导致的晶体温度微小波动, 从而影响四倍频转换效率. 随着激光器的持续运转, 光学系统和环境温度趋于热平衡, 激光器输出功率也逐渐稳定.

4 结 论

本文基于自主研发的全固态 Nd:YVO₄ 皮秒 MOPA 激光放大器 (平均功率 140 W、重复频率 800 kHz、脉冲宽度 8.33 ps), 开展了 LBO 和 β -BBO 晶体 I 类相位匹配的腔外二倍频与四倍频研究, 实现了高功率、高稳定性的深紫外皮秒激光输出. 通过对高功率双波长激光在 β -BBO 晶体中的透过率和温升进行实验研究, 发现高功率深紫外光引发的双光子吸收效应导致了晶体内部的温度梯度, 进而产生相位失配, 严重影响了频率转换效率和输出稳定性. 本文采用大尺寸光斑泵浦 (光斑尺寸 1.5 mm $\times$ 1 mm) 方案, 在泵浦峰值功率密度 <1.11 GW/cm² 的条件下, 有效地抑制了双光子吸收效应引起的热梯度, 实现了平均功率为 11 W 的四倍频深紫外光输出, 单脉冲能量为 13.75 μ J. 经过 8 h 稳定运行, 功率抖动的均方根小于 0.96% (@8 W). 该全固态深紫外皮秒激光器具有高平均功率、高稳定性、高分辨率以及高峰值功率等优点, 有望在半导体检测、工业加工等领域提供更加高效、优质的解决方案.

参考文献

- [1] Liu K, Li H, Qu S Z, Liang H K, Wang Q J, Zhang Y 2020 *Opt. Express* **28** 18360
- [2] Wen N, Zhang S J, Zong N, Gao H W, Bo Y, Peng Q J, Cui D F, Xu Zu Y 2022 Optica Advanced Photonics Congress 2022, Maastricht, Limburg Netherlands, July 24–28, 2022 NpTu1G6
- [3] Mutailipu M, Pan S 2020 *Angew. Chem. Int. Ed.* **59** 20302
- [4] Zhu J L, Liu J M, Xu T L, Yuan S, Zhang Z X, Jiang H, Gu H G, Zhou R J, Liu S Y 2022 *Int. J. Extreme Manuf.* **4** 032001
- [5] Meshulach D, Dolev I, Yamazaki Y, Tsuchiya K, Kaneko M, Yoshino K, Fujii T 2010 *Metrology, Inspection, and Process Control for Microlithography XXIV. SPIE* San Jose, California, United States, February 21–25 7638 76380K
- [6] Allaria E, Castronovo D, Cinquegrana P, et al. 2013 *Nat. Photonics* **7** 913
- [7] Cinquegrana P, Demidovich A, Kurdi G, Nikolov I, Sigalotti P, Susnjar P, Danailov M B 2021 *High Power Laser Sci. Eng.* **9** e61
- [8] Tanaka S, Arakawa M, Fuchimuka A, et al. 2016 *Solid State Lasers XXV: Technology and Devices. SPIE* San Francisco, California, United States February 13–18, 9726 424
- [9] Fujimoto J, Kobayashi M, Kakizaki K, Oizumi H, Mimura T, Matsunaga T, Mizoguchi H 2017 *High-Power Laser Materials Processing: Applications, Diagnostics, and Systems VI. SPIE* San Francisco, California, United States January 28–February 2 10097 234
- [10] Cui Z J, Sun M Y, Liu De'an, Zhu, J Q 2022 *Opt. Express* **30** 43354
- [11] Liu Q, Yan X P, Fu X, et al. 2008 *Laser Phys. Lett.* **6** 203
- [12] Wang Z W, Cao X C, Zhang Y L, Cheng D L, Jin P X, Lu H D 2024 *Chin. J. Lasers* **51** 1401003 (in Chinese) [王子文, 曹雪辰, 张艳林, 程东林, 靳丕钰, 卢华东 2024 *中国激光* **51** 1401003]
- [13] He J L, Lu X Q, Jia Y L, Man B Y, Zhu S N, Zhu Y Y 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 2106 (in Chinese) [何京良, 卢兴强, 贾玉磊, 满宝元, 祝世宁, 朱永元 2000 *物理学报* **49** 2106]
- [14] Wang N, Zhang J Y, Yu H J, Lin X C, Yang G W 2022 *Opt. Express* **30** 5700
- [15] Chen G Z, Shen Y, Liu Q, Zou H X 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 054204 (in Chinese) [陈国柱, 沈咏, 刘曲, 邹宏新 2014 *物理学报* **63** 054204]
- [16] Zheng J Q, Cong Z H, Liu Z J, Wang S, Zhao Z G 2021 *Chin. J. Lasers* **48** 1201008 (in Chinese) [郑佳琪, 丛振华, 刘兆军, 王上, 赵智刚 2021 *中国激光* **48** 1201008]
- [17] Orii Y, Kohno K, Tanaka H, Yoshimura M, Mori Y, Nishimae J, Shibuya K 2022 *Opt. Express* **30** 11797
- [18] Orii Y, Yoshii K, Kohno K, et al. 2023 *Opt. Express* **31** 14705
- [19] Yu H H, Zhang Z T, Xuan H W 2024 *Chin. J. Lasers* **51** 0701020 (in Chinese) [俞航航, 张志韬, 玄洪文 2024 *中国激光* **51** 0701020]
- [20] Willenberg B, Brunner F, Phillips C R, Keller U 2020 *Optica* **7** 485
- [21] Kumar S C, Casals J C, Wei J X, Ebrahim-Zadeh M 2015 *Opt. Express* **23** 28091
- [22] Takahashi M, Osada A, Dergachev A, et al. 2011 *J. Cryst. Growth* **318** 606
- [23] R Bhandari, T Taira, A Miyamoto, Y Furukawa, T Tago 2012 *Opt. Mater. Express* **2** 907

All-solid-state high-power deep ultraviolet picosecond laser^{*}

OU Zuoyuan¹⁾²⁾ XU Sizhi²⁾ LIU Xing^{2)†} GAO Yubo²⁾ CHEN Junzhan¹⁾
 HE Xingyu²⁾ LU Haotian²⁾ WU Chonghao²⁾ GUO Chunyu¹⁾ GUO Li³⁾
 WU Xu²⁾ LUE Qitao³⁾ RUAN Shuangchen²⁾

1) (College of Applied Technology, College of Physics and Optoelectronic Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China)

2) (Key Laboratory of Advanced Optical Precision Manufacturing Technology of Guangdong Higher Education Institutes, Sino-German College of Intelligent Manufacturing, Shenzhen Technology University, Shenzhen Technology University, Shenzhen 518118, China)

3) (Han's Laser Technology Industry Group Co. Ltd., Shenzhen 518103, China)

(Received 28 February 2025; revised manuscript received 8 May 2025)

Abstract

Deep ultraviolet (DUV) picosecond lasers, operating in a 200–280 nm wavelength range, possess significant advantages, such as high photon energy and high resolution. These attributes make them highly promising for

^{*} Project supported by the National Key Research and Development Program of China (Grant No. 2022YFB3605800), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 62275174, 62105225), the Natural Science Foundation of Top Talent of Shenzhen Technology University, China (Grant No. GDRC202106), the Shenzhen University Stability Support Project, China (Grant Nos. 20220719104008001, 20220718173849001), and the Shenzhen Science and Technology Major Project, China (Grant No. KJZD20240903100205008).

[†] Corresponding author. E-mail: liuxingstart123@163.com

applications like semiconductor detection, ensuring the production of high-quality, defect-free semiconductor devices, as well as for advanced scientific research and industrial processing. High-power DUV picosecond lasers are typically generated via nonlinear frequency conversion of infrared lasers based on master oscillator power amplifier (MOPA) configurations. Among various DUV laser technologies, systems based on β -BBO crystals are particularly valuable due to their simple design and cost-effectiveness. However, the linear two-photon absorption, as well as the formation of dynamic color centers in BBO, are significant limitations for high-power, high-repetition-rate UV radiation, leading to thermal effects. Hence, it is important to carefully study the performance characteristics of BBO for high-power, high-repetition-rate pulse generation in the UV at 266 nm.

This study presents a high-power, all-solid-state DUV picosecond laser developed using a 1064 nm Nd:YVO₄ MOPA amplification architecture. In this experimental setup, a 50 mW, 7.8 ps, 20 MHz all-fiber SESAM mode-locked laser is used as a seed source, achieving 140 W in amplified output power 8.33 ps in pulse duration at 1064 nm via MOPA. In the nonlinear frequency conversion process, the amplified laser pulses are initially focused onto an LBO crystal for secondary harmonic generation (SHG). Precise temperature control of the LBO crystal can generate a 532 nm output with 73 W in power and 6.93 ps in pulse duration, while achieving 52.64% in conversion efficiency. Two-photon absorption is a key factor limiting the further enhancement of deep ultraviolet (DUV) laser power. By investigating the transmittance and temperature rise of a high-power dual-wavelength laser in a β -BBO crystal, the results indicate that strong two-photon absorption occurs under high-power DUV irradiation. This absorption induces significant thermal effects, resulting in a temperature gradient within the crystal and leading to phase mismatch, which severely affects frequency conversion efficiency and output stability.

To solve this problem and further increase the DUV output power, a large-spot pumping scheme (spot size: 1.5 mm $\times$ 1 mm) is adopted in this work. Under a pump peak power density of less than 1.11 GW/cm², the thermal gradient caused by two-photon absorption is effectively suppressed, achieving maximum fourth-harmonic output power of 11 W. The corresponding single-pulse energy reaches 13.75 μ J. The root mean square (RMS) jitter, measured in an 8-hour period, is less than 0.96%.

This all-solid-state DUV laser demonstrates excellent performance characteristics, including high average power, stability, resolution, and peak power, making it a strong candidate for applications requiring efficient and high-precision processing or detection. By further increasing the pump power and optimizing the temperature control system, the output power of the laser can be significantly enhanced, thereby broadening its applicability and competitiveness in high-end fields such as semiconductor manufacturing, advanced research, and industrial processing.

Keywords: deep ultraviolet, picosecond laser, β -BBO, fourth-harmonic generation

PACS: 42.65.-k, 42.65.Ky, 42.55.-f

DOI: [10.7498/aps.74.20250247](https://doi.org/10.7498/aps.74.20250247)

CSTR: [32037.14.aps.74.20250247](https://cstr.cn/32037.14.aps.74.20250247)

全固态高功率深紫外皮秒激光器

欧佐元 徐思志 刘星 高瑜博 陈俊展 和星宇 卢浩天 吴宠昊 郭春雨 郭丽 吴旭 吕启涛 阮双琛

All-solid-state high-power deep ultraviolet picosecond laser

OU Zuoyuan XU Sizhi LIU Xing GAO Yubo CHEN Junzhan HE Xingyu LU Haotian WU Chonghao GUO Chunyu GUO Li WU Xu LUE Qitao RUAN Shuangchen

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 74, 144204 (2025) DOI: 10.7498/aps.74.20250247

CSTR: 32037.14.aps.74.20250247

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.74.20250247>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

光纤飞秒激光五倍频产生206 nm深紫外激光

206 nm deep ultraviolet laser generated from fifth harmonic of femtosecond fiber laser

物理学报. 2023, 72(22): 224209 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230877>

深紫外双层金属光栅偏振器的设计与分析

Design and analysis of bilayer metallic grating polarizer in deep ultraviolet band

物理学报. 2021, 70(4): 044203 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201403>

皮秒激光驱动下的背向受激布里渊散射的光谱结构

Spectral structures of backward stimulated Brillouin scattering driven by a picosecond laser

物理学报. 2021, 70(19): 195202 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210568>

基于外腔面发射激光器腔内三倍频的可调谐紫外激光器

Tunable ultraviolet laser based on intracavity third harmonic generation of external cavity surface emitting laser

物理学报. 2024, 73(8): 084202 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20231923>

空间引力波探测中电荷管理系统的紫外光源应用

Application of ultraviolet light sources in charge management systems for space gravitational wave detection

物理学报. 2024, 73(22): 220401 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20241115>

具有大光电导增益的氧化镓薄膜基深紫外探测器阵列

Gallium oxide thin film-based deep ultraviolet photodetector array with large photoconductive gain

物理学报. 2022, 71(20): 208501 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220859>