

# 基于国产商用 CLBO 晶体的高转换效率、 高功率深紫外 266 nm 激光

俞航航<sup>1,2</sup>, 张志韬<sup>1,2</sup>, 玄洪文<sup>1,3\*</sup><sup>1</sup>广东大湾区空天信息研究院, 广东 广州 510700;<sup>2</sup>广东省太赫兹量子电磁学重点实验室, 广东 广州 510700;<sup>3</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 深紫外激光具有光子能量高、波长短等特点,在激光加工、半导体光刻等领域中具有重要的应用价值。固体激光非线性频率变换是实现高功率、高相干性深紫外激光输出的主要方式之一。采用全固态 532 nm 激光作为基频光、国产商用 CsLiB<sub>6</sub>O<sub>10</sub>(CLBO)晶体作为频率变换晶体,在基频光功率为 34.2 W 时,实现了平均功率为 14 W、重复频率为 100 kHz、脉冲宽度为 1.8 ns 的 266 nm 深紫外激光输出,光-光转换效率达到 41%。该深紫外光源具有效率高、结构紧凑的优点,验证了国产商用 CLBO 晶体的实用性,可进一步获得更稳定、更高功率的深紫外激光输出。

**关键词** 激光器; 深紫外激光; 全固态激光; CsLiB<sub>6</sub>O<sub>10</sub>晶体; 高功率

**中图分类号** TN23; TN248.1

**文献标志码** A

**DOI:** 10.3788/CJL231234

## 1 引言

深紫外激光(DUV)具有高光子能量、高空间分辨率和优良的聚焦性能等特点,被广泛应用于激光材料加工<sup>[1-2]</sup>、辐射测量<sup>[3]</sup>、半导体检测<sup>[4]</sup>、高能射线产生<sup>[5]</sup>及波导直写<sup>[6]</sup>等领域。相较于准分子激光器,固体深紫外激光器不仅具有体积小、高效能比的优势,而且具有高光束质量、高相干性的特点,可实现无掩模光刻。自 20 世纪 80 年代以来,以全固态激光为基频,通过偏硼酸钡( $\beta$ -BaB<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, BBO)、三硼酸锂(LiB<sub>3</sub>O<sub>5</sub>, LBO)、氟代硼铍酸钾(KBe<sub>2</sub>BO<sub>3</sub>F<sub>2</sub>, KBBF)、六硼酸铯锂(CsLiB<sub>6</sub>O<sub>10</sub>, CLBO)等人工晶体的非线性频率变换(倍频或和频),可实现高功率固态深紫外激光输出。2007 年, Sudmeyer 等<sup>[7]</sup>利用共振增强技术获得了平均功率为 12.2 W 的 266 nm 连续激光输出,1064 nm 基频光至 266 nm 深紫外光的转换效率超过 50%。该单频 266 nm 连续激光功率结果相较文献<sup>[8]</sup>的结果提高了 10 倍以上。2009 年, Liu 等<sup>[9]</sup>通过 BBO 晶体倍频获得了最高输出功率为 14.8 W 的 266 nm 深紫外激光,绿光至深紫外光的转换效率为 18.3%。2016 年, Nikitin 等<sup>[10]</sup>通过 LBO 晶体和频产生了平均功率为 3 W 的连续 266 nm 激光。2022 年, Cha 等<sup>[11]</sup>同样通过 LBO 晶体和频产生了平均功率为 12 W 的 257 nm 深紫外纳秒脉冲激光。

2014 年,陈创天团队使用 KBBF 作为倍频晶体,获得了平均功率为 7.86 W 的 266 nm 激光输出<sup>[12]</sup>。在上述晶体中, BBO 晶体的走离效应较大,影响高功率深紫外激光的光束质量; LBO 晶体存在紫外诱导损伤及温度失调<sup>[10-11]</sup>; KBBF 晶体因其层状习性,很难生长为大体块晶体,还需通过棱镜耦合装置(PCD)实现相位匹配<sup>[13]</sup>,难以支持更高功率的深紫外激光输出。

深紫外激光应用于激光加工时不仅需要高功率,还应具有高光束质量。另外,利用高平均功率、高光束质量的深紫外 266 nm/258 nm 激光,在非线性光学晶体中通过和频的方式,可进一步产生更短波长的深紫外乃至真空紫外波长激光。如 193 nm 激光可通过和频方式产生,可应用于干涉光刻、检测、量测设备,并可作为 ArF 准分子放大器的注入种子等<sup>[14]</sup>。CLBO 晶体<sup>[15]</sup>具有走离效应小、可生长为大体块、深紫外区有效非线性系数高等优势,可用于产生高功率、高光束质量的固态深紫外激光。2003 年和 2006 年, CLBO 晶体输出的平均功率已达到 40 W 及 28.4 W<sup>[16-17]</sup>,但相应的基频光的光束质量因子分别为  $M^2=10$  及  $M^2=6.5$ ,因此深紫外激光的光束质量不会优于基频光。当提高基频光的光束质量时,通过 CLBO 晶体倍频获得的深紫外激光的光束质量也会同步提高。2017 年, Xuan 等<sup>[18]</sup>使用光纤和固体混合放大方式,获得了高功率 1030 nm 基频光,

收稿日期: 2023-09-26; 修回日期: 2023-10-21; 录用日期: 2023-11-08; 网络首发日期: 2023-11-17

基金项目: 中国科学院空天信息创新研究院自主部署项目(E2Z2D101, E1Z1D101)、中科院人才引进计划(E33310030D)、广州市基础与应用基础研究项目(2023A04J0021)

通信作者: \*xuanhw@aircas.ac.cn

经过四倍频后获得了输出功率为 10.5 W 的 266 nm 激光,绿光至深紫外激光的转换效率超过 40%;同时,在 10 W 的高输出功率下,深紫外激光的光束质量因子 $M^2$ 小于 1.5。2020 年,日本 Spectronix 公司使用皮秒基频光源,借助大口径 CLBO 晶体(尺寸为 13 mm×13 mm×15 mm),获得了输出功率为 14 W 的 266 nm 激光,光-光转换效率达到 54%,这也是目前绿光至深紫外的最高转换效率<sup>[19]</sup>。该结果中基频绿光的光束质量因子 $M^2=1.2$ ,深紫外激光的 $M^2=1.5$ 。2023 年,该公司使用更高平均功率的泵浦基频光,将 266 nm 激光的输出功率提高至 53 W,其光束质量因子 $M^2=1.9$ ,光-光转换效率在 32% 左右<sup>[20]</sup>,打破了 2003 年以来大阪大学保持的深紫外激光最高输出平均功率的纪录。

作为高功率深紫外固体激光产生的关键非线性光学材料,CLBO 晶体极易潮解,其质量需通过实际验证,以获得高光束质量、高转换效率、高平均功率的固态深紫外激光输出,满足我国科研与工业应用的需求<sup>[21-22]</sup>。

本文以国产商用 CLBO 晶体作为非线性频率变换晶体,使用重复频率为 100 kHz、平均功率为 35 W 的 532 nm 纳秒激光作为基频光,开展了高功率固态深

紫外光源的研究,实现了最高平均功率为 14 W 的 266 nm 激光输出,光-光转换效率达到 41%。当平均功率为 7 W 时,其横向光束质量因子( $M_x^2$ )和纵向光束质量因子( $M_y^2$ )分别为 1.54 和 1.97。

## 2 实验装置

实验装置如图 1 所示,基频泵浦源为国产全固态 532 nm 激光器,脉冲宽度为 2.7 ns,重复频率为 100 kHz,最大输出功率约为 35 W,光束质量因子 $M^2$ 为~1.5。利用半波片(HWP)和偏振分束器(PBS)组合对泵浦光功率进行调控,利用焦距为 $f=200$  mm 的平凸透镜(L1)和 $f=-100$  mm 的平凹透镜(L2)调节泵浦光斑直径。CLBO 晶体的尺寸为 5 mm×5 mm×20 mm,切角( $\theta$ )为 61.7°,晶体两通光端面均已抛光但均未镀膜。CLBO 晶体极易潮解,因此将其加热至 150 °C 以上,并使其处于惰性气体环境中<sup>[20]</sup>。将 CLBO 晶体放置在旋转位移台上,便于在水平面内调节基频入射角度,以实现相位匹配。为避免分光器件损坏,使用未镀膜的氟化钙( $\text{CaF}_2$ )棱镜,在空间上分离产生的 266 nm 激光与 532 nm 泵浦光。

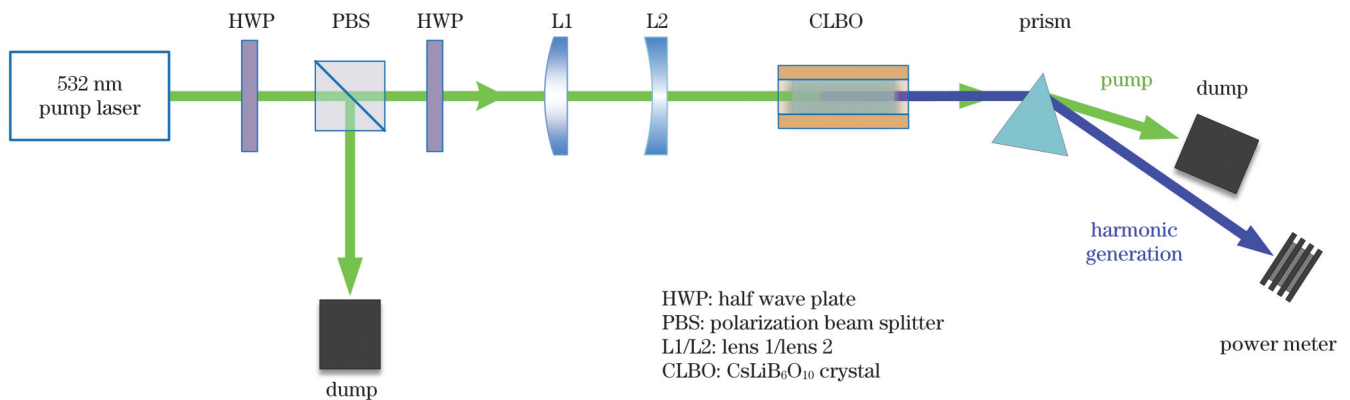


图 1 基于 CLBO 晶体的 266 nm 激光实验装置图

Fig. 1 Experimental setup for 266 nm laser based on CLBO crystal

## 3 实验结果与讨论

在实验中,首先通过白纸板在分光棱镜后观察到 266 nm 光信号(基频光的泵浦功率为 0.7 W),然后继续增大泵浦光功率,通过不断调整泵浦光斑直径,并配合旋转晶体,调节入射光角度,获得最佳相位匹配,实现高功率泵浦下 266 nm 激光的高转换效率输出。为真实反映深紫外激光的输出功率,实验中首先对  $\text{CaF}_2$  棱镜在 266 nm 波段的透过率进行测量标定。使用功率计分别测量插入  $\text{CaF}_2$  棱镜前后 266 nm 激光的功率,当 266 nm 激光功率为 0~7 W 时, $\text{CaF}_2$  棱镜对其的实际透过率如图 2(a) 所示。考虑到测量过程中的误差,以算术平均值 92.2% 作为  $\text{CaF}_2$  棱镜在高功率下对 266 nm 激光的透过率。随后测量了 266 nm 激光的输出功率及转换效率随泵浦功率的变化,如图 2(b) 所

示。从出现 266 nm 信号开始,不断增加泵浦光功率到最大值 34.2 W, $\text{CaF}_2$  棱镜后测得的 266 nm 激光功率为 12.9 W。使用标定后的透过率 92.2% 计算得到对应的 266 nm 激光的功率为 14 W,此时绿光至深紫外光的光-光转换效率达到 41%。从图 2(b) 可见转换效率基本达到饱和状态,继续增大泵浦功率不会带来转换效率的进一步提升。266 nm 激光的转换效率与晶体长度、温度和泵浦光斑大小等因素紧密相关,根据已有的报道,41% 的转换效率接近于纳秒泵浦光源在 20 mm 长的 CLBO 晶体中所获得的最好深紫外转换效率。使用更长的晶体以及提高泵浦功率密度,理论上可以获得更大的转换效率。根据图 2(b) 的结果可以看出,使用更高功率的泵浦光可以获得更高功率的 266 nm 激光,但与此同时晶体内部严重的热效应会影响相位匹配,从而限制深紫外激光功率的继续提高。

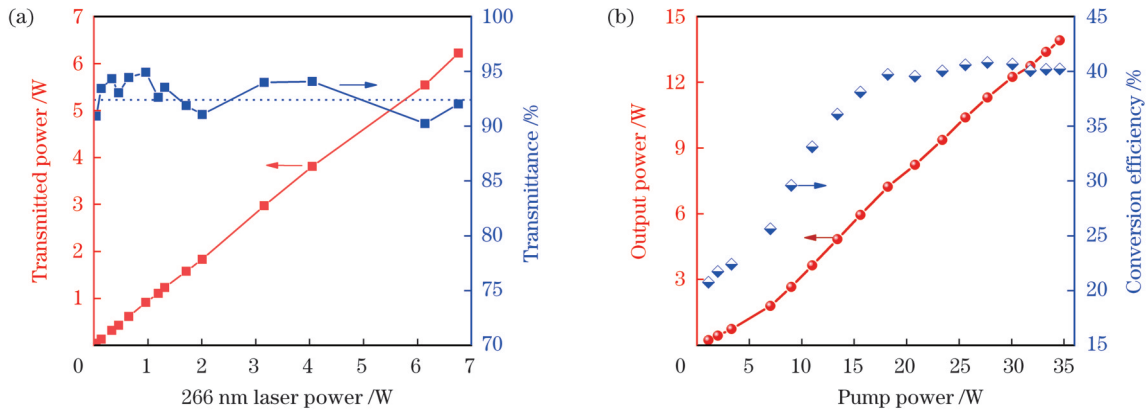


图 2 透过率及 266 nm 激光输出功率实验结果。(a) 266 nm 激光在棱镜处的透过率;(b) 266 nm 激光的输出功率和转换效率随注入泵浦功率的变化

Fig. 2 Experimental results of transmittance and output power of 266 nm laser. (a) Transmittance of 266 nm laser at prism; (b) output power and conversion efficiency of 266 nm laser versus injected pump power

使用另一套光源系统及长度为 10 mm 的国产 CLBO 晶体开展了对比实验。泵浦源为国产 532 nm 激光器,脉宽约为 10 ns,重复频率为 5 kHz,输出功率约为 8 W,光束质量因子  $M^2$  约为 1.3。实验装置与图 1 基本相同,CLBO 晶体尺寸为 5 mm×5 mm×10 mm。在泵浦功率密度接近(约为 150 MW/cm<sup>2</sup>)的情况下,研究不同长度 CLBO 晶体下的转换效率和长时间的功率稳定性,如图 3 所示。当泵浦功率为 8 W 时,获得的 266 nm 激光的最高平均输出功率为 1.7 W,转换效率约为 22%。可见 CLBO 晶体长度是决定深紫外激

光转换效率的重要因素之一,在适当的泵浦参数条件下,晶体长度成倍增大可以实现其光-光转换效率的倍增。但由于 CLBO 晶体对深紫外激光存在吸收、散射等,光-光转换效率会有上限存在。因此,对于 CLBO 晶体的深紫外倍频效率,可采用单位长度的光-光转换效率作为更合理的表征转换效率的参数。由此计算得出,在上述两个实验中,10 mm 和 20 mm 长的 CLBO 晶体对应的单位长度光-光转换效率分别为  $2.20 \times 10^{-2}/\text{mm}$  和  $2.05 \times 10^{-2}/\text{mm}$ ,两者的单位长度光-光转换效率基本一致。

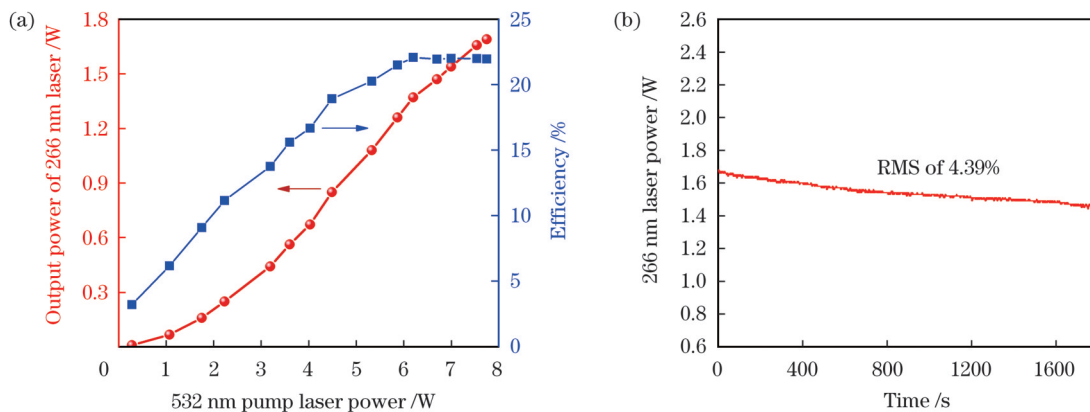


图 3 266 nm 激光输出功率和功率稳定性的测量结果。(a)使用 10 mm 长的 CLBO 晶体时 266 nm 激光的输出功率和转换效率随注入泵浦功率的变化;(b)使用 10 mm 长的 CLBO 晶体时 266 nm 激光的功率稳定性

Fig. 3 Measurement results of output power and power stability of 266 nm laser. (a) Output power and conversion efficiency of 266 nm laser versus injected pump power when 10 mm long CLBO crystal is used ; (b) power stability of 266 nm laser with 10 mm long CLBO crystal

使用 10 mm 长的 CLBO 晶体时 266 nm 激光的功率稳定性如图 3(b)所示,半小时内平均功率的均方根(RMS)约为 4.39%。对于 20 mm 长的 CLBO 晶体,当平均输出功率为 10 W 左右时,测量其自由运转下 10 min 内的功率稳定性,结果如图 4(a)所示,其功率抖动 RMS 为 1.52%,高于泵浦光的 RMS (~0.5%)。更长期的自由运转如 1 h,功率会缓慢下降。实验上,精

细调整放置 CLBO 晶体的旋转位移台,对于同一个晶体出光点,266 nm 激光的输出功率会迅速回到 10 W。如图 3(b)所示,相较于使用 20 mm 长的晶体时的结果,使用 10 mm 长的 CLBO 晶体时 266 nm 激光的功率 RMS 较大。这是因为图 3(b)中初始阶段的深紫外激光的功率衰减较快,对 RMS 数据的影响较大。虽然可以通过再次调整晶体角度恢复 266 nm 激光的



功率,但目前所产生的深紫外激光的 RMS 抖动仍较大。泵浦光功率的稳定性、晶体内部温度场分布的均匀性<sup>[19]</sup>、机械稳定性及高功率深紫外激光对晶体的退

化效应等是主要影响因素。上述问题可通过优化温度控制、改进机械设计并加入自动挪点等技术得到解决。

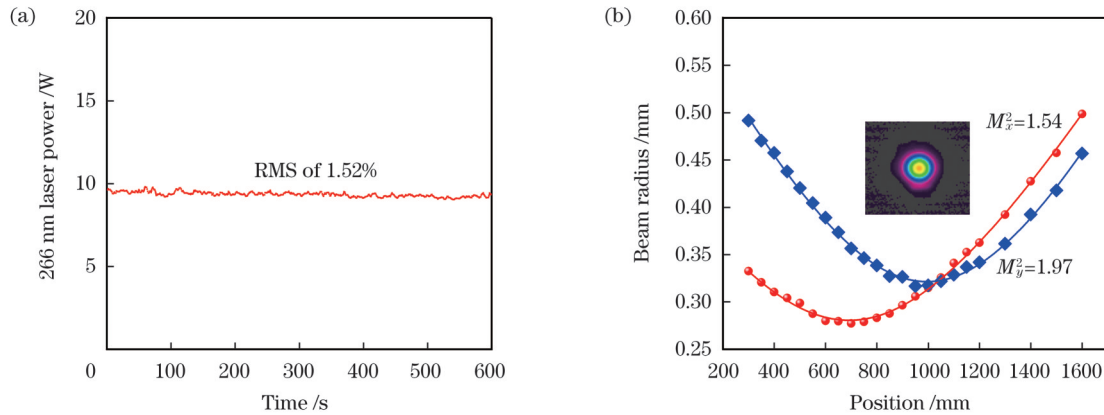


图 4 266 nm 激光功率稳定性和光束质量的测量结果。(a)使用 20 mm 长的 CLBO 晶体时 266 nm 激光功率稳定性的测量结果;(b) 266 nm 激光的光束质量(点为数据,线为拟合线),插图为使用凹透镜扩束后在 1.5 m 处测得的光斑

Fig. 4 Measurement results of power stability and beam quality of 266 nm laser. (a) Measured result of power stability of 266 nm laser with 20 mm long CLBO crystal; (b) beam quality of 266 nm laser (dot is data and curve is fitted curve) with beam spot measured at 1.5 m position after beam expansion using concave lens shown in inset

使用热释电阵列相机对 20 mm 长的 CLBO 晶体对应的 266 nm 激光光斑大小进行了测量,并拟合得到其光束质量因子。由于使用了 CaF<sub>2</sub> 棱镜,在分光过程中 266 nm 光斑会产生附加畸变,故测量过程中使用二向色镜将泵浦光和 266 nm 激光分离。受限于二向色镜的损伤阈值,266 nm 激光功率限制在 7 W。相机分辨率为 ~85 μm,无法提供足够的像素点,因此使用凹透镜( $f = -50$  mm)和凸透镜( $f = 500$  mm)组合对 266 nm 激光进行扩束,以增大束腰位置处光斑半径的大小。经扩束后光斑距离 CLBO 晶体约 3.5 m,不同位置处的光斑测量值如图 4(b)所示,拟合后得到 266 nm 激光的光束质量因子  $M_x^2$  为 1.54 及  $M_y^2$  为 1.97,接近于 532 nm

泵浦光的  $M^2$  (~1.5)。CLBO 晶体沿  $y$  轴方向的走离效应以及 532 nm 基频泵浦光斑在  $y$  轴方向上相对较大的  $M^2$  是造成  $y$  轴光束质量因子偏大的主要原因。在图 4(b)中, $x$  轴和  $y$  轴方向上的束腰位置有明显的偏离,主要是椭圆光斑形状的高功率泵浦光入射到晶体中在  $x$  轴和  $y$  轴方向上形成的热透镜焦距不同,因此光斑束腰大小和位置存在差异。对 266 nm 激光的远场光斑进行测量,结果如图 4(b)中的插图所示。插图是使用凹透镜扩束后在距离其 1.5 m 处获得的光斑形状,光斑呈圆形且光强分布均匀,进一步验证了其光束质量相对较好。

表 1 总结了基于 CLBO 晶体的固态深紫外激光的

表 1 基于 CLBO 晶体的固态深紫外激光的研究进展

Table 1 Research progress of solid-state deep-ultraviolet laser based on CLBO crystal

Year	Wavelength / nm	Crystal	Output power / W	Repetition rate	Pulse duration	$M^2$ (DUV)	Conversion efficiency (green to DUV)	Ref.
2000	266	15 mm long CLBO	20.5	10 kHz	46 ns	>10	19.4%	[23]
2003	266	15 mm long CLBO	40	7 kHz	80 ns	>10	20%	[16]
2006	266	40.15 mm long CLBO	28.4	10 kHz	80 ns	>6.24	23.7%	[17]
2009	258	30 mm long CLBO	14	5 MHz	1 ns	~1.7	37.7%	[24]
2015	258	20 mm long CLBO	3	6 kHz	~5 ns	<1.5	~50%	[24]
2016	257.5	6 mm long CLBO	6	100 kHz	4 ps	>1.5	18.5%	[26]
2017	258	20 mm long CLBO	10.5	10 kHz	3 ns	<1.5	42%	[18]
2020	266	15 mm long CLBO	14	200 kHz	13 ps	<1.2	54%	[19]
2022	266	15 mm long CLBO	25.4	600 kHz	<8 ps	~1.2	28.9%	[27]
2023	266	15 mm long CLBO	53	1 MHz	~14 ps	~1.9	32%	[20]
2023	266	10 mm long CLBO	1.7	5 kHz	~7 ns	~1.5	22%	This work
2023	266	20 mm long CLBO	14	100 kHz	1.8 ns	<2@7 W	41%	This work

研究进展。自 2000 年以来,基于 CLBO 晶体产生的深紫外激光的功率和效率随着晶体长度、泵浦功率和脉冲宽度不断变化。晶体长度集中在 10~30 mm 区间,皮秒泵浦光因扩大的泵浦光斑、大尺寸的 CLBO 晶体,更容易获得高转换效率。可以看到,在纳秒脉冲泵浦的结果中,本文使用国产商用 10 mm 和 20 mm 长的 CLBO 晶体,分别实现了 22% 和 41% 的转换效率,接近同类型实验的最好结果。

使用光纤光谱仪和双平面光电管分别测量高功率下 266 nm 深紫外激光的光谱和脉冲宽度,结果分别如图 5(a)、(b)所示。测量得到的 266 nm 激光的脉冲宽度为 1.8 ns,小于 532 nm 激光的脉冲宽度(2.7 ns)。窄化效应影响了泵浦光转换效率的上限。另一方面,理论上使用更窄线宽的泵浦源可以获得更好的深紫外激光转换效率。

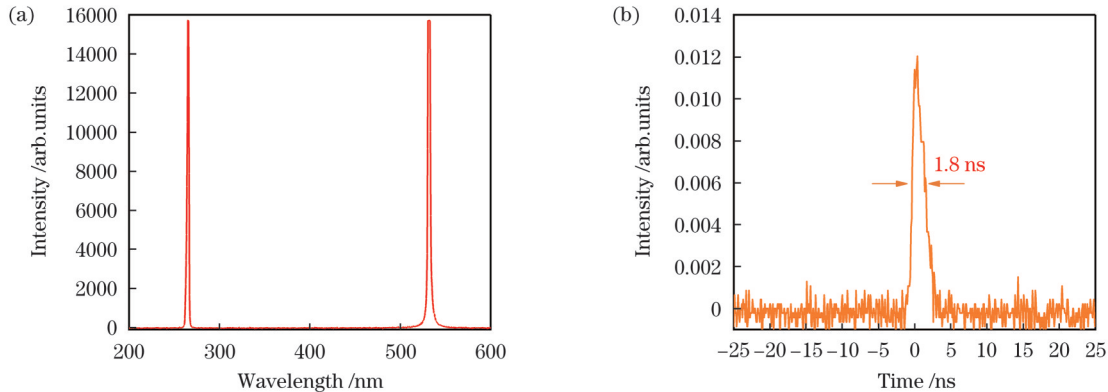


图 5 深紫外 266 nm 激光的光谱和脉宽。(a)光谱;(b)脉宽

Fig. 5 Spectrum and pulse width of deep-ultraviolet 266 nm laser. (a) Spectrum; (b) pulse width

## 4 结 论

利用纳秒 532 nm 激光器泵浦 20 mm 长的国产商用 CLBO 晶体,在 34.2 W 最大基频光入射功率下,实现了高功率、高效率的 266 nm 固态深紫外激光输出,其平均功率为 14 W,光-光转换效率为 41%;当平均功率为 7 W 时,其光束质量因子  $M_x^2$  为 1.54,  $M_y^2$  为 1.97。在国产 10 mm 长的 CLBO 晶体对比实验中,当 532 nm 基频光的功率为 8 W 时,也获得了 1.7 W 的输出功率。当输出功率为 10 W 时,266 nm 激光在 10 min 内的功率稳定性 RMS 为 1.52%。热分布、机械应力等是影响深紫外激光功率稳定性的主要原因。通过提升泵浦光功率及改进温度控制和机械设计等优化方案,可获得更高功率的深紫外激光并提高其光束质量,从而进一步推动高功率固态深紫外激光在工业科研领域中的应用和发展。

## 参 考 文 献

- [1] Imamiya Y, Akama S, Fujita Y, et al. Development of microfabrication technology using DUV laser[J]. Mitsubishi Heavy Industries Technical Review, 2016, 53(4): 49-54.
- [2] Häfner S, Wagner C, Shnirman B, et al. Deep UV for materials processing based on the industrial TruMicro Series of ultrafast solid-state laser amplifiers[J]. Proceedings of SPIE, 2021, 11670: 116701F.
- [3] 王少水, 朱兴邦, 孙权社, 等. 266 nm 紫外标准波长产生及应用技术研究[J]. 中国激光, 2014, 41(s1): s102007. Wang S S, Zhu X B, Sun Q S, et al. Research on generating and application in the 266 nm ultraviolet standard wavelength[J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(s1): s102007.
- [4] Sofronov A, Afinogenov B, Medvedev A, et al. Optical detection

- of deeply subwavelength nanoparticles for silicon metrology[J]. Physical Review Applied, 2021, 15(6): 064049.
- [5] Muramatsu N, Kon Y, Daté S, et al. Development of high intensity laser-electron photon beams up to 2.9 GeV at the SPring-8 LEPS beamline[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2014, 737: 184-194.
- [6] Tan B. Deep micro hole drilling in a silicon substrate using multi-bursts of nanosecond UV laser pulses[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2006, 16(1): 109-112.
- [7] Sudmeyer T, Imai Y, Masuda H, et al. 12 W continuous-wave 266-nm deep-UV generation through 24 W single-frequency 1064-nm light from a fiber MOPA[C]//2007 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO), May 6-11, 2007, Baltimore, MD, USA. New York: IEEE Press, 2008.
- [8] Oka M, Liu L Y, Wiechmann W, et al. All solid-state continuous-wave frequency-quadrupled Nd:YAG laser[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 1995, 1(3): 859-866.
- [9] Liu Q, Yan X P, Fu X, et al. High power all-solid-state fourth harmonic generation of 266 nm at the pulse repetition rate of 100 kHz[J]. Laser Physics Letters, 2009, 6(3): 203-206.
- [10] Nikitin D G, Byalkovskiy O A, Vershinin O I, et al. Sum frequency generation of UV laser radiation at 266 nm in LBO crystal[J]. Optics Letters, 2016, 41(7): 1660-1663.
- [11] Cha Y H, Kim S, Park H. Generation of 12 W 257 nm laser pulses by sum-frequency generation based on LBO crystals[J]. Laser Physics, 2022, 32(8): 085002.
- [12] Wang L R, Zhai N X, Liu L J, et al. High-average-power 266 nm generation with a  $\text{KBe}_2\text{BO}_3\text{F}_2$  prism-coupled device[J]. Optics Express, 2014, 22(22): 27086-27093.
- [13] Kanai T, Wang X Y, Adachi S, et al. Watt-level tunable deep ultraviolet light source by a KBBF prism-coupled device[J]. Optics Express, 2009, 17(10): 8696-8703.
- [14] 赵智刚, 玄洪文, 王景冲, 等. 真空紫外 193 nm 波段固体激光器研究进展综述[J]. 光学学报, 2022, 42(11): 1134010. Zhao Z G, Xuan H W, Wang J C, et al. Research progresses on vacuum-ultraviolet 193-nm band solid-state lasers[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(11): 1134010.

- [15] Mori Y, Kuroda I, Nakajima S, et al. New nonlinear optical crystal: cesium lithium borate[J]. Applied Physics Letters, 1995, 67(13): 1818-1820.
- [16] Nishioka M, Fukumoto S, Kawamura F, et al. Improvement of laser-induced damage tolerance in CsLiB<sub>6</sub>O<sub>10</sub> for high-power UV laser source[C]//Conference on Lasers and Electro-Optics, June 1-6, 2003, Baltimore, Maryland, United States. Washington, DC: OSA, 2003: CTuF2.
- [17] Wang G L, Geng A C, Bo Y, et al. 28.4 W 266 nm ultraviolet-beam generation by fourth-harmonic generation of an all-solid-state laser[J]. Optics Communications, 2006, 259(2): 820-822.
- [18] Xuan H W, Qu C, Ito S, et al. High-power and high-conversion efficiency deep ultraviolet (DUV) laser at 258 nm generation in the CsLiB<sub>6</sub>O<sub>10</sub> (CLBO) crystal with a beam quality of  $M^2 < 1.5$ [J]. Optics Letters, 2017, 42(16): 3133-3136.
- [19] Kohno K, Orii Y, Sawada H, et al. High-power DUV picosecond pulse laser with a gain-switched-LD-seeded MOPA and large CLBO crystal[J]. Optics Letters, 2020, 45(8): 2351-2354.
- [20] Orii Y, Yoshii K, Kohno K, et al. High-power deep-ultraviolet light generation at 266 nm from frequency quadrupling of a picosecond pulsed 1064 nm laser with a Nd:YVO<sub>4</sub> amplifier pumped by a 914 nm laser diode[J]. Optics Express, 2023, 31(9): 14705-14714.
- [21] 赵阳, 向阳, 李婷婷. 深紫外激光辐照加速材料老化系统的光学设计[J]. 光学学报, 2021, 41(5): 0522001.  
Zhao Y, Xiang Y, Li T T. Optical design of deep ultraviolet laser irradiation system for accelerating material aging[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(5): 0522001.
- [22] 许愿, 魏士钦, 张鹏飞, 等. 基于双凹型波导层的深紫外激光二极管辐射复合特性[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(15): 1514007.  
Xu Y, Wei S Q, Zhang P F, et al. Deep-ultraviolet laser-diode radiation recombination properties based on double-concave waveguide layers[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(15): 1514007.
- [23] Kojima T, Konno S, Fujikawa S, et al. 20-W ultraviolet-beam generation by fourth-harmonic generation of an all-solid-state laser [J]. Optics Letters, 2000, 25(1): 58-60.
- [24] Diening A, McLean S, Starodoumov A. High average power 258 nm generation in a nanosecond fiber MOPA system[J]. Proceedings of SPIE, 2009, 7195: 71950H.
- [25] Xuan H W, Zhao Z G, Igarashi H, et al. 300-mW narrow-linewidth deep-ultraviolet light generation at 193 nm by frequency mixing between Yb-hybrid and Er-fiber lasers[J]. Optics Express, 2015, 23(8): 10564-10572.
- [26] 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.
- [27] Orii Y, Kohno K, Tanaka H, et al. Stable 10, 000-hour operation of 20-W deep ultraviolet laser generation at 266 nm[J]. Optics Express, 2022, 30(7): 11797-11808.

## High-Conversion-Efficiency High-Power Deep-Ultraviolet 266 nm Laser Based on Domestic Commercially Available CLBO Crystal

Yu Hanghang<sup>1,2</sup>, Zhang Zhitao<sup>1,2</sup>, Xuan Hongwen<sup>1,3\*</sup>

<sup>1</sup>GBA Branch of Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510700, Guangdong, China;

<sup>2</sup>Guangdong Provincial Key Laboratory of Terahertz Quantum Electromagnetics, Guangzhou 510700, Guangdong, China;

<sup>3</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

### Abstract

**Objective** Deep-ultraviolet (DUV) lasers have important applications in fields such as laser processing and semiconductor photolithography because of their high photon energy. A DUV laser source must have both a high output power and good beam quality for laser machining. Sum-frequency generation (SFG) in nonlinear optical crystals can be used in a DUV laser to produce shorter and even vacuum ultraviolet wavelengths such as 193 nm. Hence, high-power DUV lasers with a good beam quality have been a hot research topic in recent decades. On the other hand, it is now possible to use a domestic commercially produced CLBO crystal as a key nonlinear optical material for high-power DUV solid-state laser generation. However, the crystal quality for high-power DUV operation has not yet been verified because of the hygroscopic problem. Here, we report a high-power DUV laser output with a good beam quality and high conversion efficiency produced using domestic commercially available CLBO crystals, which demonstrates the potential to achieve a higher power DUV laser output.

**Methods** In our study, we investigate DUV laser generation using CLBO crystals with different lengths. The research focuses on the characteristics of these high-power solid-state DUV light sources, including the output power, efficiency, power stability, beam quality, spectrum, and pulse width. The experimental setup is shown in Fig. 1. The pump power is regulated by a combination of a half-wave plate (HWP) and polarizing beam splitter (PBS). The pump spot diameter is adjusted using a plano-convex lens (L1) with a focal length of  $f = +200$  mm and plano-concave lens (L2) with a focal length of  $f = -100$  mm. The dimensions of CLBO crystals are 5 mm × 5 mm × 10 mm and 5 mm × 5 mm × 20 mm, respectively. In both, cutting angle ( $\theta$ ) is 61.7°, and the two end-faces of the crystals are polished but have no coating. The CLBO crystals are heated to a temperature greater than 150 °C and exposed in a noble gas environment to avoid the hygroscopic problem. The 266 nm DUV laser output is spatially separated from the 532 nm pump light using an uncoated CaF<sub>2</sub> prism.

**Results and Discussions** A 20 mm long CLBO crystal pumped by a solid-state 532 nm laser generates a 266 nm DUV laser with an average power of 14 W, a repetition rate of 100 kHz, and a pulse width of 1.8 ns. The pump power is 34.2 W, and the optical

conversion efficiency reaches 41%. The results are shown in Fig. 2. Comparative experiments are conducted on a 10 mm long CLBO crystal using another light source system with a pump power density similar to that mentioned above. The output power of the 266 nm laser is 1.7 W with a pump power of 8 W, corresponding to an efficiency of 22%. This indicates that the crystal length is an important parameter to achieve a high conversion efficiency. The power stability of the 266 nm laser generated by the 20 mm long CLBO crystal reaches 1.52% within 10 min. There are several factors that influence the power stability, including the stability of the fundamental pump power, inhomogeneous temperature distribution of the crystal, and instability of the mechanics. The measured beam quality of the 266 nm laser at an output power of 7 W is shown in Fig. 4. The transverse beam quality factor ( $M_x^2$ ) and longitudinal beam quality factor ( $M_y^2$ ) are 1.54 and 1.97, respectively. The inset shows the beam profile acquired at a distance of 1.5 m away from the crystal after beam expansion by a concave lens. The circular beam shape and homogenous distribution of the intensity also indicate the high beam quality of the generated 266 nm laser.

**Conclusions** A nanosecond 532 nm fundamental laser and a 20 mm long domestic commercially available CLBO crystal are used to generate a high-power DUV solid-state laser at 266 nm, with an average power of 14 W and a conversion efficiency of 41%. The beam quality factors,  $M_x^2$  and  $M_y^2$ , of the 266 nm laser have values of 1.54 and 1.97 at a power of 7 W, respectively. The root mean square value of the power stability at 10 W reaches 1.52% within 10 min. The temperature distribution and mechanical stress are the main factors influencing the DUV power stability. A 266 nm laser with higher power and better beam quality can be achieved by improving the temperature control system and mechanical design, as well as by increasing the pump power. This can be applied to laser machining, lithography, and vacuum ultra-violet laser generation in the future.

**Key words** lasers; deep ultraviolet laser; all solid-state laser; CsLiB<sub>6</sub>O<sub>10</sub> crystal; high power