量子光学学报 26(2)：194-201，2020
Journal of Quantum Optics

DOI：10.3788/JQO20202602.0901(2)

全固态连续单频 266 nm 深紫外激光器

赵彪[1]，秦玮霞[1]，李凤琴[1,2†]，卢华东[1,2]

（1.山西大学光电研究所 量子光学与光量子器件国家重点实验室，山西 太原 030006；
2.山西大学 极端光学协同创新中心，山西 太原 030006）

摘要： 采用Ⅰ类角度匹配的BBO晶体外腔倍频全固态连续单频532 nm绿光激光器，设计了紧凑稳定的四镜环形倍频腔结构，利用腔外偏振锁腔的方式，实现了高光束质量、高转换效率的全固态连续单频266 nm深紫外激光器。泵浦功率为3 W、输出镜在532 nm处定点透射率为2.5%时，获得了最大输出功率810 mW的紫外激光输出，当输出功率稳定在730 mW时，长期功率稳定性3 h内优于±1.5%，光束质量因子$M^2<1.5$。

关键词： 全固态；266 nm深紫外激光器；单频；连续波

中图分类号： TN248　　**文献标识码：** A　　**文章编号：** 1007-6654(2020)02-0194-08

紫外及深紫外波段的连续波激光器具有波长短、能量集中、分辨率高等优点，在高密度光盘、物质表面改性、超微细加工、金属探伤等工业领域以及紫外线影、细胞解析、微型手术刀等医学领域都具有广泛的应用前景[1-3]，尤其是近年来深紫外激光在激光快速成型、诱导荧光诊断、光生物学、大气污染检测、高分辨率光谱学、紫外光刻等领域的不断应用，引起了人们的高度重视[4-6]。目前，该波段范围的连续波激光光源主要是基于非线性光学频率转换的外腔倍频及和频全固态激光器，与非固态设计、结构庞大复杂、功率消耗较大、成本较高的准分子激光器、离子激光器和自由电子激光器相比，这种全固态紫外及深紫外激光器具有结构紧凑、线宽窄、可靠性较高等优点，在科学和工业应用领域中应用广泛。因此，小型化全固态连续波紫外及深紫外激光器的研究开发具有较高的应用价值。

对于全固态266 nm深紫外激光器的研究开发，目前国内外已经开展了众多研究工作，1995年Michio等人采用长度为5 mm的BBO晶体外腔倍频2.9 W全固态绿光激光器的方案获得了输出功率为1.5 W的单频连续266 nm激光输出，光-光转换效率为52%[7]。2008年，T. Südmeyer等人优化了BBO晶体的损伤阈值和绿光吸收系数、倍频腔结构及PDH锁腔方法，在采用光纤放大器将绿光输出功率放大为20 W的基础上，外腔倍频获得了最高功率为12.2 W的266 nm紫外连续单频激光输出，光-光转换效率为61%[8]。但是由于BBO晶体的走离效应比较严重，这些采用BBO作为倍频晶体的方案中倍

(2) 收稿日期：2019-12-20；接受日期：2020-03-06

基金项目：国家重点研发计划(2016YFA0301401)；国家自然科学基金(61975100)；山西省重点科学基金项目(201903D111001)；山西省“1331工程”重点学科建设计划资助的课题

作者简介：赵彪(1993－)，男，山西大同人，硕士研究生。从事光量子器件方面的研究。E-mail：sad163.com@qq.com

†通信作者：李凤琴，E-mail：lfq@sxu.edu.cn

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

频光的输出光束质量较差。2004年，Jun Sakuma等人使用走离角度较小、布儒斯特角切割的CLBO作为外腔倍频晶体，使用结构简单的Hänsch-Couillaud锁定方法，在532 nm泵浦功率为10 W时，获得了5 W的连续266 nm紫外输出，光-光转换效率为50%[9]。但是由于CLBO具有高度吸湿性而易于潮解，较难空气中长期工作，该方案不适用于全固态紫外激光器的长期稳定运转，限制了其在商业高功率UV激光器中的应用。近年来，在产生紫外及深紫外激光光源的应用方面，涌现了一些如KBBF、KABO及RBBF等新型非线性晶体[10-11]。2012年中科院物理所王丽荣等人采用单次穿过RBBF晶体倍频晶体的方案在重复频率为10 kHz的条件下最大输出3 W的266 nm脉冲激光，光-光转换效率较低[12]；2014年，该小组继续使用RBBF晶体倍频晶体，通过进一步优化RBBF晶体，在重复频率为10 kHz的条件下获得了最大输出功率为7.8 W的266 nm脉冲紫外光，将光-光转换效率提高为13.4%[13]。但是该系列晶体的生产技术目前还不是很成熟，还没有进入商业市场。综上所述，尽管非线性晶体BBO走离角度较大，容易带来光束质量变差、非线性转换效率降低的缺陷，但仍然以有效非线性系数较高、物理化学性能稳定等优点在全固态连续波266 nm深紫外激光光源产品的研制开发工作中占有一定的优势，成为科研人员的首选。

在本文中，为了获得结构紧凑、光束质量较好、功率稳定的266 nm波段全固连续单频激光器，我们优先采用Ⅰ类角度匹配的BBO晶体外腔倍频全固态高功率Nd:YVO_4/LBO 532 nm单频绿光激光器的方案，设计了高效稳定的四镜环形谐振腔结构，并且通过缩短谐振腔腔长的方式尽量扩大BBO晶体处的腰斑半径，从而尽量减小BBO晶体的走离效应带来的副作用，保证较高激光转换效率的条件下优化了266 nm紫外光的光束质量。实验中采用结构较为简单、易于操作的Hänsch-Couillaud锁定方法将倍频腔的振荡频率锁定到泵浦光频率上，有效地缩小了外腔倍频激光器系统的体积，同时使得激光器控制系统更加简单易操作。当注入泵浦光功率为3 W时，获得了最高输出为810 mW的连续单频266 nm紫外激光输出，最大光-光转换效率大于29.2%，光束质量因子优于1.5，长期功率稳定性在3 h内优于±1.5%。

1　全固态266 nm连续单频激光器的设计

1.1　谐振腔的设计

实验中，为了实现泵浦光与倍频腔之间的最佳模式匹配关系以及在谐振腔内获得一个较小腰斑位置来放置倍频晶体，以提高光-光转换效率及倍频效率，我们设计了如图1所示的由M_4、M_5、M_6、M_7组成的四镜环形谐振腔结构，其中M_4、M_5是两个平面镜，M_6、M_7是两个曲率半径相同的平凹镜，在平面镜M_4和M_5以及凹面镜M_6和M_7之间将分别产生一个腰斑位置，用于实现泵浦光与振荡光之间的最佳模式匹配关系以提高光-光转换效率以及放置倍频晶体实现非线性倍频转换。在折叠角度θ很小时，谐振腔可以展开为多元件直腔来进行分析[14]，如图2所示。

以镜M_7为参考面，可以得到环形谐振腔内高斯光束参数可实现自再现条件时，在子午面和弧矢面内的ABCD传输矩阵$\boldsymbol{M}_T$和$\boldsymbol{M}_S$分别表示为：

$$\boldsymbol{M}_T=\begin{bmatrix}A_t & B_t\\ C_t & D_t\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}1 & L_1\\ 0 & 1\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix}1 & 0\\ -\frac{1}{f_t} & 1\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix}1 & L\\ 0 & 1\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix}1 & 0\\ -\frac{1}{f_t} & 1\end{bmatrix} \tag{1}$$

$$\boldsymbol{M}_s=\begin{bmatrix}A_s & B_s\\ C_s & D_s\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}1 & L_1\\ 0 & 1\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix}1 & 0\\ -\frac{1}{f_s} & 1\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix}1 & L\\ 0 & 1\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix}1 & 0\\ -\frac{1}{f_s} & 1\end{bmatrix}, \tag{2}$$

其中，$f_t=\frac{r\cos\theta}{2}$，$f_s=\frac{r}{2\cos\theta}$，$\theta$为折叠角度$\theta=\frac{10^\circ\times 3.14}{180^\circ}$，$r$为平凹镜$M_6$和$M_7$的曲率半径，$L_1$为两凹面镜间的距离；在实验中为了有效避免走离效应对倍频效率的影响，我们将尽量选择总腔

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

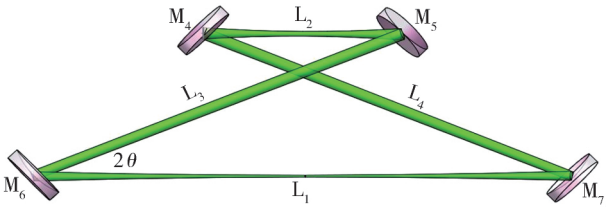

Fig. 1 Cavity structure

图 1 谐振腔结构

长较短的谐振腔结构($L = L_2 + L_3 + L_4 = 250$ mm),并选择曲率半径较大的平凹镜 M_6 和 M_7($r = 100$ mm),使得两平凹镜 M_6 和 M_7 之间的腰斑半径比较大,尽量保证非线性倍频转换效率的同时减小走离效应带来的副作用;根据 ABCD 传输矩阵,可以利用 Mathematica 程序计算分别得到谐振腔的稳定性参数 $|A+D|$、M_6 和 M_7 之间的束腰半径 ω_0、M_4 和 M_5 之间的束腰半径 ω_1 随着两凹面镜之间的距离 L_1 的变化曲线图,如图 3 所示。从图中可以看出,两个凹面镜之间的距离 L_1 的变化对谐振腔内 M_6 和 M_7、M_4 和 M_5 之间的高斯光束束腰半径 ω_0 和 ω_1 的影响较为明显。因此,实验中在其它谐振腔长不变的情况下,只需要微调 L_1 的长度就可以灵活调控两平面镜及两凹面镜之间的束腰大小,从而更容易实现泵浦光与谐振腔内振荡光之间的最佳模式匹配条件,获得更高的光-光转化效率及更好的光束质量。当两凹面镜之间的距离 L_1 为 132 mm,谐振腔处于最佳的稳定工作点,此时,M_6 和 M_7 及 M_4 和 M_5 之间的高斯光束束腰半径 ω_0、ω_1 分别为 50 μm(子午)×53 μm(弧矢)和 120 μm(子午)×122 μm(弧矢)。

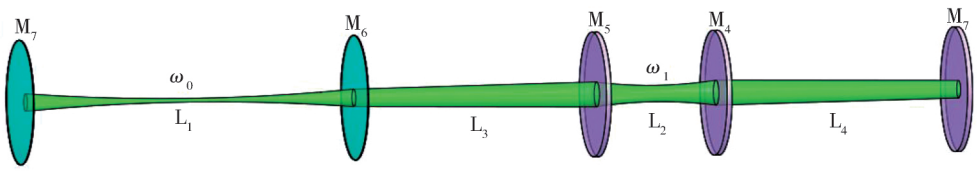

Fig. 2 Equivalent diagram of the ring resonator

图 2 环形腔多元件直腔等价图

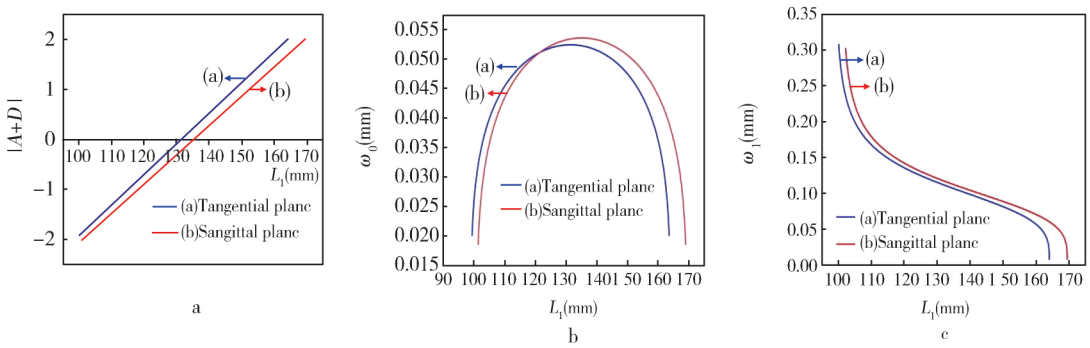

Fig. 3 Curves of resonant cavity parameters as a function of the distance L_1

a. the stability parameter $|A+D|$ of the cavity;

b. the waist ω_0 between concave mirrors M_6 and M_7 of the tangential and sagittal planes, respectively;

c. the waist between mirrors M_4 and M_5 of the tangential and sagittal planes, respectively.

图 3 谐振腔参数随 L_1 的变化曲线图

a. 谐振腔的稳定性参数 $|A+D|$ 随 L_1 的变化曲线;

b. 凹面镜 M_6 和 M_7 之间的束腰半径 ω_0 在子午面和弧矢面的变化曲线;

c. 平面镜 M_4 和 M_5 之间的束腰半径 ω_1 在子午面和弧矢面的变化曲线

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

1.2　倍频晶体的选择

非线性光学硼酸盐晶体通常具有较宽的光学透明度、优良的非线性光学特性、良好的物理化学稳定性和较高的损伤阈值，使得硼酸盐晶体成为科研工作中利用非线性频率转换产生高功率紫外激光的最佳选择。随着非线性材料的发展，目前已经涌现出有一些优秀的硼酸盐非线性光学晶体供科研工作者选择，如 β-BaB_2O_4（BBO）、$CsLiB_6O_{10}$（CLBO）、$K_2Al_2B_2O_7$（KABO）、$RbBe_2BO_3F_2$（RBBF）和 $KBe_2BO_3F_2$（KBBF）等[15-17]，已经凭借各自的优势被用于非线性倍频或者四倍频过程中产生紫外激光输出，其光学参数如表 1 所示。其中，CLBO 晶体具有较高的非线性系数、较小的走离角度以及对紫外波段的激光没有吸收作用等优点，有利于获得输出功率较高、光束质量较好的紫外光输出，但 CLBO 晶体具有很高的吸湿性，很难在空气中长时间工作，不利于紫外激光器的长期稳定运作。KABO、RBBF 和 KBBF 这三种晶体近年来已经被科研人员证实具有优良的光学特性，可用于非线性倍频过程以产生紫外光波段的激光，而且与 BBO 晶体相比其走离角度比较小，有利于获得较高光束质量的倍频光输出，但其有效非线性系数较小，生产技术还不够成熟，还没有形成稳定的商品，不利于获得较高功率的紫外激光输出。相比于其他晶体，BBO 晶体是较为成熟的一种非线性晶体，具有较大的有效非线性系数及较高的损伤阈值，且光学性能稳定、透光波长范围可以到达约 180 nm，是目前用来产生紫外及深紫外波段激光最广泛的一种晶体，并且其生产技术比较成熟。BBO 是负单轴晶体，它可以提供几乎在整个透明范围内的各种二阶相互作用的相位匹配（从 180 nm 到 3.3 μm），广泛应用于可见光及紫外光波段的激光器商品中[18-19]。因此，在我们的产品研发工作中，优先选用 Ⅰ 类角度匹配的 BBO 晶体作为倍频器，而且为了尽量减小走离效应带来的副作用以及由于 BBO 晶体对紫外波段激光的吸收作用带来的损耗，我们选用长度较短（$l=5$ mm）的 BBO 晶体，在保证获得较高倍频效率的基础上获得较高的光束质量。

表 1　非线性晶体的光学特性

Table 1　Optical properties of nonlinear crystals

Nonlinear Crystal	UV Cutoff (nm)	Interaction	d_{eff} (pm/V)	α_{UV}@ 266 nm (cm^{-1})	ρ(mrad)	Hygroscopicity
BBO	180	Type-Ⅰ(oo→e)	1.75	<0.17	85	Slight
CLBO	180	Type-Ⅰ (oo→e)	0.76	—	33	Highly
KABO	180	Type-Ⅰ (oo→e)	0.26	0.10	50.5	Non-Hygroscopicity
KBBF	160	Type-Ⅰ(oo→e)	0.39	0.11	52.8	Non-Hygroscopicity
RBBF	170	Type-Ⅰ (oo→e)	0.34	0.62	56.5	Non-Hygroscopicity

1.3　光学阻抗匹配

光学阻抗匹配是指通过选择输入耦合镜的最佳透射率，使得基频光尽可能全部耦合进入倍频腔，从而充分利用泵浦光，提高倍频光的转换效率，在图 1 所示的倍频腔中，平面镜 M_4 作为基频光输入耦合镜片，当基频光在倍频谐振腔内形成共振时，环形谐振腔内的循环功率 P_C 与输入基频光泵浦功率 P_ω^{in} 的比值可以由下式表示[20]：

$$\frac{P_C}{P_\omega^{in}}=\frac{T_1}{[1-\sqrt{(1-T_1)(1-\varepsilon)(1-\Gamma P_C)}]^2}\ , \tag{3}$$

式中 T_1 为输入耦合镜 M_4 在 532 nm 处的透射率；ε 为环形谐振腔内的额外损耗，主要包括倍频晶体对基频光的散射损耗、晶体端面在 532 nm 处的剩余反射率以及其他谐振腔镜高反膜的不完全反射等引起的对基频光的损耗，在实验中 $\varepsilon=1.5\times10^{-2}$；$\Gamma$ 是非线性倍频过程引起的损耗，用 W^{-1} 来表示。它由两部分组成：

$$\Gamma=\Gamma_{eff}+\Gamma_{abs}\ , \tag{4}$$

其中 Γ_{eff} 表示非线性转换系数：

$$\Gamma_{eff}=\frac{8\pi l^2 d_{eff}^2}{n_1^2\ n_2\lambda_1^2\ c\varepsilon_0\omega_0^2}\ , \tag{5}$$

其中 l 为晶体长度 5 mm，d_{eff} 表示有效非线性系数等于 1.75 pm/v，$n_1=1.55$，$n_2=1.67$，ω_0 表示

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

晶体处束腰半径，$c=3\times10^{8}$ m/s，$\lambda_1=532$ nm，$\varepsilon_0=8.85\times10^{-12}$ F/m；Γ_{abs} 表示倍频晶体对于基频光的吸收系数，实验 $\Gamma_{abs}=4\times10^{-5}$ W^{-1}。由(3)—(4)式可以获得基频光-倍频光的净功率转换效率 η 由下式表示[21]：

$$\sqrt{\eta}\left[2-\sqrt{1-T_1}\left(2-\varepsilon-\Gamma\sqrt{\frac{\eta P_{\omega}^{in}}{\Gamma_{eff}}}\right)\right]^2$$

$$4T_1\sqrt{\Gamma_{eff}P_{\omega}^{in}}=0\ 。 \tag{6}$$

由(6)式我们可以得到输入耦合镜 M_4 在 532 nm 处的最佳透射率应满足：

$$T^{opt}=\frac{\varepsilon}{2}+\sqrt{\left(\frac{\varepsilon}{2}\right)^2+\Gamma P_{\omega}^{in}}\ 。 \tag{7}$$

根据上式，我们计算得到输入耦合镜 M_4 在 532 nm 处的最佳透射率随着基频光输入功率以及倍频晶体处腰斑半径的变化曲线图，如图 4 所示，从图中可以看出，当输入功率相同时，倍频晶体处的腰斑半径越小，输入耦合镜在 532 nm 处的最佳透射率越大，在实验中我们选择当倍频晶体处的腰斑半径约为 50 μm，当注入泵浦光功率为 3 W 时，输入耦合镜的最佳透射率 T 应该设计为 2.5%。

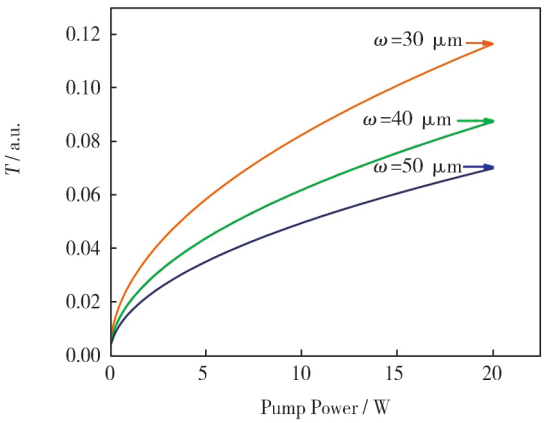

Fig. 4 Optimal transmission as a function of pump power

图 4 最佳透射率随着泵浦功率的变化曲线

2 实验装置与结果分析

实验装置如图 5 所示，泵浦源为自主研发生产的全固态 532 nm 单模单频绿光激光器(Yuguang Co. Ltd.)，其最大输出功率为 10 W[22]，光束质量因子 M^2 小于 1.1，经过两个焦距分别为 100 mm 和 400 mm 的平凸透镜 f_1 和 f_2 组成的望远镜系统聚焦至倍频腔内平面镜 M_4 和 M_5 的中心，聚焦后泵浦光束腰斑半径 ω_p 约为 121 μm，以实现泵浦光与倍频腔的模式匹配。M_1、M_2、M_3 分别为三个 45° 532 nm 高反镜(532 nm @ $R>99.9\%$)，在倍频腔前面的光路中加入 532 nm λ/2 波片(HWP_1)和 532 nm 分光棱镜(PBS_1)调整泵浦源绿光的注入功率。为了避免倍频腔对泵浦光的反馈造成绿光激光器内光学元件的损伤，在倍频腔前面加入具有高损伤阈值的 532 nm 隔离器(FI THORLABS IO-5-532-HP)，并且在隔离器的前面插入 532 nm λ/2 波片(HWP_2)，旋转 HWP_2 半波片用来调整输入隔离器的绿光偏振状态，使得泵浦光的偏振方向与隔离器的输入偏振方向一致，532 nm λ/2 波片(HWP_3)放置在隔离器的输出端，用于改变隔离器输出的绿光偏振状态，以满足倍频腔内非线性倍频晶体实现最佳位相匹配对泵浦光偏振态的需求，以提高倍频转换效率。谐振腔是由 $M_4-M_5-M_6-M_7$ 组成的四镜环形腔结构，其中 M_4 和 M_5 是两个平面镜，M_6 和 M_7 是两个曲率半径为 100 mm 的平凹镜，在 M_4 和 M_5、M_6 和 M_7 的中心分别产生两个腰斑位置，其腰斑半径分别为 ω_1 和 ω_0，分别用来实现泵浦光与倍频腔的模式匹配以及放置倍频晶体，由于 ω_1 和 ω_0 对谐振腔长 L_1 的变化比较敏感，因此微调 L_1 就可以良好地控制两个平面镜(M_4-M_5)中心的腰斑半径 ω_1 和两个凹面镜(M_6-M_7)之间的腰斑半径 ω_0 的大小，以灵活调节泵浦光与振荡光之间的最佳模式匹配关系及有效地提高倍频效率。作为输入耦合镜，平面镜 M_4 一面镀 532 nm 减反膜($R<0.2\%$ @ 532 nm)，一面镀 532 nm 定点透射膜，透射率 $T=2.5\%$ @ 532 nm；平面镜 M_5 的一面和平凹镜 M_6 的凹面均镀 532 nm 高反膜($R>99.9\%$ @ 532 nm)，M_6 固定在压电陶瓷上，改变压电陶瓷的电压以改变谐振腔长，用于将倍频腔的共振频率锁定在泵浦光的中心频率上；作为输出耦合镜，平凹镜 M_7 凹面镀 532 nm 高反膜($R>99.9\%$ @ 532 nm)及 266 nm 高透膜($T>90\%$ @ 266 nm)，平面镀 266 nm 减反膜($R<$

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

0.2% @ 266 nm)。当倍频腔的总腔长为 382 mm、两平凹镜间的距离为 132 mm 时，计算得到两个平面镜(M_4-M_5)中心的腰斑半径 ω_1 为 120 μm(子午)×122 μm(弧矢)和两个凹面镜(M_6-M_7)的腰斑半径 ω_0 为 50 μm(子午)×53 μm(弧矢)。采用Ⅰ类($o+o\rightarrow e$)临界相位匹配、长度较短的 BBO 晶体作为倍频晶体，该晶体的有效非线性系数为 $d_{eff}=1.75$ pm/v，其切割角度为 $\theta=47.7°$、$\varphi=0°$，几何尺寸为 4 mm×4 mm×5 mm，走离角度为 85 mrad，晶体的两个端面镀 532 nm 和 266 nm 双减反膜($R<0.2\%$)，采用控制精度为 0.01℃的高精度控温仪将其工作温度精确控制在 25.00℃，放置在两个平凹镜(M_6-M_7)之间的最小腰斑位置处。我们使用了 Hänsch-Couillaud 偏振锁定的方法实现倍频腔的锁定[23]，泵浦光经过腔镜 M_4 耦合进入环形谐振腔，在腔内形成共振并产生位相延迟，在腔镜 M_4 处部分反射光与腔内部分透射光组成的总反射光通过 λ/4 波片(QWP)后，被分光棱镜 PBS_2 分离成水平偏振光和竖直偏振光，分别使用两个光电探测器 PD_1 和 PD_2 进行直流探测，其探测信号进入锁定系统 LS(包括减法器、高压直流放大器、PID 控制模块)，经过减法器相减后获得误差信号，误差信号经过 PID 控制模块比例积分处理并经过高压放大器放大后，转换为电压信号反馈到腔镜 M_6 的压电陶瓷上，通过压电陶瓷的伸缩进而微调倍频腔腔长，使倍频腔的共振频率实时锁定到泵浦光的中心频率上，从而实现倍频腔与激光器之间的跟踪与锁定，产生稳定的高功率 266 nm 激光输出。

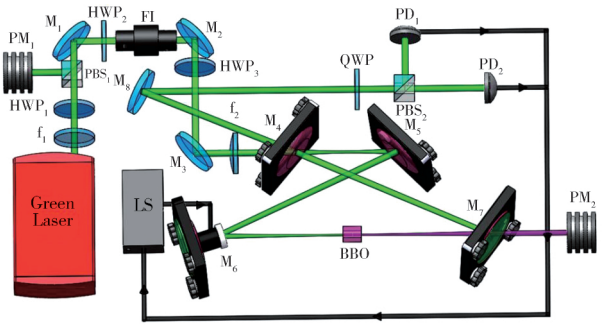

Fig. 5　Experimental setup

图 5　实验装置图

最终我们注入绿光功率为 3 W、锁定倍频腔系统时，获得了 810 mW 的 266 nm 单频连续激光的输出，光-光转换率最高达 29.2%。输出功率和转换效率随注入基频光功率的变化曲线如图 6 所示，图中(a)为输出功率随注入功率的变化曲线，图中(b)为转换效率随注入功率的变化曲线，当注入功率大于 2.5 W 时转换效率呈下降趋势，经过分析可能是由于 BBO 晶体吸收紫外光导致的转换效率下降。

当输出功率稳定运转至 730 mW 时，我们测量了 266 nm 紫外光的长期功率稳定性，如图 7 所示，三个小时内 266 nm 紫外光输出功率稳定性优于±1.5%，由于 BBO 晶体具有较大的走离角，输出光束呈椭圆高斯分布，采用光束质量分析仪(型号 WinCamD-UV，DataRay 公司，美国)测得 M^2 因子小于 1.5。图 8 为倍频谐振腔的透射光纵模模式监测曲线，根据输出纵模间的强度比例可以得出泵浦光与谐振腔模式之间的模式匹配效率大于 96%。

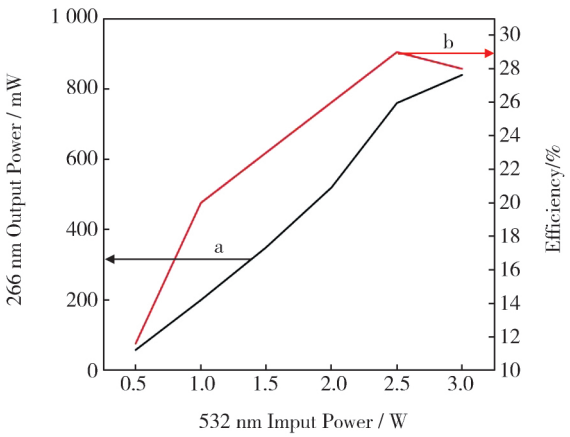

Fig. 6　Output power vs. input power

图 6　输出功率随输入功率的变化曲线

3　总结与展望

采用Ⅰ类角度匹配的 BBO 晶体外腔倍频全固态连续单频 532 nm 绿光激光器，设计了紧凑稳定的四镜环形倍频腔结构，利用腔外偏振锁腔的方式，实现了高光束质量、高转换效率的全固态连续单频 266 nm 深紫外激光器。泵浦功率为 3 W、输出镜在 532 nm 处定点透射率为 2.5%

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

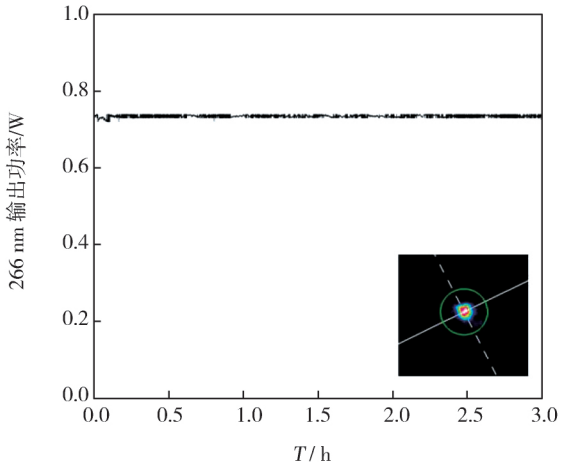

Fig. 7 Long-time stability of 266 nm laser

图 7 长期输出功率稳定性

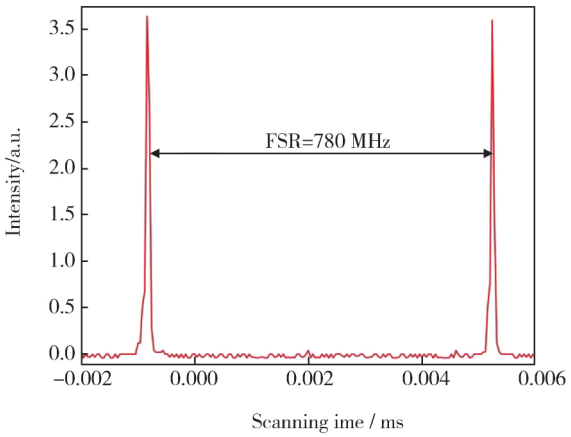

Fig. 8 Single-mode operation of the frequency doubling resonator

图 8 倍频谐振腔的透射光纵模监测曲线

时，获得了最大输出功率大于 810 mW 的紫外激光输出，稳定运转至 730 mW 时长期功率稳定性三小时内优于±1.5%，光束质量因子 $M^2<1.5$。下一步我们将继续优化谐振腔，增加注入泵浦光的功率，进一步提高输出 266 nm 激光的功率。

参考文献：

[1] Srinivasa Rao A, Apurv Chaitanya N, Samanta G K. High-power, High Repetition-rate, Ultrafast Fibre Laser based Source of DUV Radiation at 266 nm[J]. *OSA Continuum*, 2019, **99**(2): 99-106. DOI: 10.1364/OSAC.2.000099.

[2] Joachim Knittel, Kung A H. 39.5% Conversion of Low-power Q-switched Nd: YAG Laser Radiation to 266 nm by Use of a Resonant Ring Cavity[J]. *Opt Lett*, 1997, **22**: 366-368. DOI: 10.1364/OL.22.000366.

[3] Federico Belli, Amir Abdolvand, John C. Travers, and Philip St. J. Russell. Highly Efficient Deep UV Generation by Four-wave Mixing in Gas-filled Hollow-core Photonic Crystal Fiber[J]. *Opt Lett*, 2019, **44**(22): 5509-5512. DOI: 10.1364/OL.44.005509.

[4] Fang Zhi, Hou Zhanyu, Yang Feng, *et al*. High-efficiency UV Generation at 266 nm in a New Nonlinear Optical Crystal $NaSr_3Be_3B_3O_9F_4$[J]. *Opt Express*, 2017, **25**: 26500-26507. DOI: 10.1364/OE.25.026500.

[5] Chaitanya Kumar S, Canals Casals J, Wei Junxiong, *et al*. High-power, High-repetition-rate Performance Characteristics of β-BaB_2O_4 for Single-pass Picosecond Ultraviolet Generation at 266 nm[J]. *Opt Express*, 2015, **23**: 28091-28103. DOI: 10.1364/OE.23.028091.

[6] Liu Qiang, Yan Xingpeng, Gong Mali, *et al*. High-power 266 nm Ultraviolet Generation in Yttrium Aluminum Borate [J]. *Opt Lett*, 2011, **36**: 2653-2655. DOI: 10.1364/OL.36.002653.

[7] Oka M, Liu L Y, Wiechmann W, *et al*. All Solid-state Continuous-wave Frequencyquadrupled Nd: YAG Laser[J]. *IEEE J Sel Top in Quantum Electron*, 1995, **18**(59): 859-866. DOI: 10.1109/2944.473671.

[8] Sudmeyer T, Imai Y, Masuda H, *et al*. Efficient 2nd and 4th Harmonic Generation of a Single-frequency, Continuous-wave Fiber Amplifier[J]. *Opt Express*, 2008, **16**(3): 1546-1551. DOI: 10.1364/OE16.001546.

[9] Sakuma J, Asakawa Y, Obara M. Generation of 5 W Deep-UV Continuous-wave Radiation at 266 nm by an External Cavity with a $CsLiB_6O_{10}$ Crystal[J]. *Opt Lett*, 2004, **29**(92): 92-94. DOI: 10.1364/OL.29.000092.

[10] Zhang Yun, Sato Yusuke, Nobuyoshi Watanabe, *et al*. Generation of Quasi-continuous-wave Vacuum-ultraviolet Coherent Light by Fourth-harmonic of a Ti: Sapphire Laser with KBBF Crystal[J]. *Opt Express*, 2009, **17**: 8119-8124. DOI: 10.1364/OE.17.008119.

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

[11] Chen Chuangtian, Luo Siyang, Wang Xiaoyang, *et al*. Deep UV Nonlinear Optical Crystal: $RbBe_2(BO_3)F_2$[J]. *Opt Soc Am B*, 2009, **26**: 1519-1525. DOI: JOSAB. 26. 001519.

[12] Wang L R, Wang G L, Zhang X, *et al*. Generation of Ultraviolet Radiation at 266 nm with $RbBe_2BO_3F_2$ Crystal[J]. *Chin Phys Lett*, 2012, **29**(6): 064203. DOI: 10. 1088.

[13] Wang L R, Zhai N X, Liu L J, *et al*. [J]. *Opt Express*, 2014, **22**: 27086. DOI: 10. 1364/OL. 43. 005599.

[14] Hou Zhanyu, Liu Lijuan, Fang Zhi, *et al*. High-power 266 nm Laser Generation with a $NaSr_3Be_3B_3O_9F_4$ Crysta[J]. *Opt Express*, 2018, **43**: 5599-5602. DOI: 10. 1364/OE. 25. 026500.

[15] Chaitanya Kumar S, Canals Casals J, Wei Junxiong, *et al*. High-power, High-repetition-rate Performance Characteristics of β-BaB_2O_4 for Single-pass Picosecond Ultraviolet Generation at 266 nm[J]. *Opt Express*, 2015, **40**: 2397. DOI: 10. 1364/OE. 23. 028091.

[16] Yang Lei, Yue YinChao, Yang Feng, *et al*. 266 nm Ultraviolet Light Generation in Ga-doped $BaAlBO_3F_2$ Crystals[J]. *Opt Lett*, 2016, **41**: 1598-1600. DOI: 10. 1364/OL. 41. 001598.

[17] Wang Li, Men Yanbin. Comparison Study of $CsLiB_6O_{10}$ and β-BaB_2O_4 as Nonlinear Media for Optical Parametric Oscillators[J]. *Appl Opt*, 2003, **42**: 2720-2723. DOI: 10. 1364/AO. 42. 002720.

[18] Rehsea S J, Lee S A. Generation of 125 mW Frequency Stabilized Continuous-wave Tunable Laser Light at 295 nm by Frequency Doubling in a BBO Crystal[J]. *Opt Commun*, 2002, **213**: 347-350. DOI: 10. 1016/S0030-4018(02)02090-4.

[19] Hikaru Kouta, Yasuhiko Kuwano. Attaining 186 nm Light Generation in Cooled β-BaB_2O_4 Crystal[J]. *Opt Lett*, 1999, **24**: 1230-1232. DOI: 10. 1364/OL. 24. 001230.

[20] Le Targat R, Zondy J J, Lemonde P. 75%-Efficiency Blue Generation from an Intracavity PPKTP Frequency Doubler [J]. *Opt Commun*, 2005, **15**: 471-481. DOI: 10. 1016/j. optcom. 2004. 11. 081.

[21] Polzik E S, Kimble H J. Frequency Doubling with $KNbO_3$ in an External Cavity[J]. *Opt Lett*, 1991, **16**: 1400. DOI: 10. 1364/OL. 16. 001400.

[22] Wei Jiao, Lu Huadong, Jin Pixian, *et al*. Investigation on the Thermal Characteristic of MgO: PPSLT Crystal by Transmission Spectrum of a Swept Cavity[J]. *Opt Express*, 2017, **25**: 3545-3552. DOI: 10. 1364/OE. 25. 003545.

[23] **彭瑜, 赵阳, 李烨, 等**. 3 **种方法实现** 461 nm **外腔倍频激光器的锁定**[J]. **中国激光**, 2010, **37**(2): 345-350. DOI: CNKI: SUN: JJZZ. 0. 2010-02-008.

All-Solid-State CW Single-Frequency Deep UV 266 nm Laser

ZHAO Biao[1], QIN Wei-xia[1], LI Feng-qin[1,2], LU Hua-dong[1,2]

(1. *State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices, Institute of Opto-Electronics, Shanxi University, Taiyuan* 030006, *China*;
2. *Collabrative Innovation Center of Extreme Optics, Shanxi University, Taiyuan* 030006, *China*)

Abstract: A compact and stable all-solid continuous-wave (CW) single-frequency 266 nm deep ultraviolet (UV) laser was designed based on an external-cavity doubled all-solid-state single-frequency 532 nm laser using a type Ⅰ critical phase matched BBO crystal. A stable four-mirror external ring cavity structure was designed. By means of external polarization locking system, a high-beam quality and high-conversion efficiency all-solid continuous single-frequency 266 nm deep UV laser was realized. With the pump power of 3 W and the transmission of 2.5% at 532 nm, the highest output power of 810 mW at 266 nm was obtained. The long-term stability within three hours and the beam quality factor M^2 were better than ±1.5% and 1.5 at the output power of 730 mW, respectively.

Key words: all-solid-state; 266 nm deep UV laser; single-frequency; continuous-wave

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net