

全固态 266 nm 紫外脉冲激光器研究

张 辰,高兰兰,邵志强

(长春理工大学理学院,吉林 长春 130022)

摘 要:报道了利用激光二极管端面抽运 Nd:YAG 晶体,通过 Cr⁴⁺:YAG 晶体可饱和吸收被动调 Q, KTP 晶体腔内倍频及 BBO 晶体腔外四倍频,实现 266 nm 连续脉冲输出。通过优化激光器外谐振腔,提高腔外非线性变频转化效率。LD 抽运功率为 4.6 W 时,得到 532 nm 激光平均输出功率为 154 mW,与腔外直接倍频相比,532 nm 激光的平均功率提高了 3 倍,单脉冲能量和峰值功率提高了 2 倍,这有利于四倍频转化效率的提高。266 nm 紫外激光平均输出功率为 3 mW。

关键词:全固态;266 nm;外谐振腔;倍频

中图分类号:TN248 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2013.12.08

Study on all-solid-state 266 nm ultraviolet pulse laser

ZHANG Chen, GAO Lan-lan, SHAO Zhi-qiang

(Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: 266 nm ultraviolet pulse laser is obtained by passively Q-switched Cr⁴⁺:YAG, KTP crystal which are used for intra-cavity frequency doubling and BBO crystal which is used for extra-cavity frequency quadrupling. The laser is an LD end-pumped Nd:YAG laser. By optimizing external resonator of the laser, the efficiency of the nonlinear frequency conversion is improved. When the pump power is 4.6 W, the 532 nm laser average output power is 154 mW. Compared with external cavity frequency doubling, the average power of 532 nm laser is improved by three times, single pulse energy and peak power are improved by 2 times. The output power of 266 nm laser is 3 mW.

Key words: all-solid-state; ultraviolet; external-resonator; frequency doubling

1 引 言

紫外波段激光器(UV),由于波长短,能量更集中,分辨率高,在很多领域得到广泛应用^[1]。如工业零部件加工、微电子学、光谱分析、光数据存储、光盘控制、大气探测、光化学、光生物学、空间光通信及医疗等领域有着广泛的应用前景^[2]。特别是在工业加工领域,由于UV激光的短波长和高光子能量特点,其聚焦光斑可以更小,同时高能量UV光子直接破坏材料的分子键,相对于红外激光的“热熔”过程,UV激光加工时是“冷蚀”效应。这使得加工的尺寸可以更小,加工的精度得到提高^[3]。以355 nm和266 nm为代表的全固态UV激光在工业加工领域已经得到了广泛应用。

2003年,日本三菱公司和大阪大学合作,报道利用200W绿光作为基频光,采用15 mm长的I类相位匹配CLBO作为FOHG晶体对绿光倍频,得到了40 W的266 nm UV激光输出。2006年,中国科学院物理研究所报道了采用CLBO晶体对平均功率120 W绿光激光器进行倍频,得到28.4 W的266 nm UV激光^[4]。2007年,中科院物理研究所耿爱丛等报道采用CLBO晶体对平均功率5 W 532 nm绿光倍频,产生平均功率1.3 W的实用化266 nm激光^[5]。

作者简介:张 辰(1988-),男,硕士研究生,主要从事全固态激光技术及非线性频率变换技术等方面的研究。E-mail:ark470136569@163.com

收稿日期:2013-04-03; **修订日期:**2013-05-20

2012年,赵书云等报道通过LD端面泵浦Nd:YVO₄晶体,通过LBO晶体倍频,BBO晶体四倍频产生的平均功率1.12 W的实用化266nm激光^[6]。

目前,国内外对266 nm激光器的研究与报道仍集中在大功率LD或其阵列作泵浦源来实现紫外激光输出,而小功率LD泵浦266 nm激光器的研究与报道依然不多。通常情况下,对简单直腔266 nm激光器的报道多采用腔外直接倍频与四倍频的方式或采用耦合腔结构对基频光腔内倍频产生绿光的方式。

本文通过在1064 nm基频光谐振腔外插入基频光反射镜,与基频光输出镜构成简单外谐振腔的方式,以此提高基频光到绿光的转化效率。采用4.6 W LD端面泵浦Nd:YAG晶体,产生1064 nm基频光,通过KTP晶体Ⅱ类相位匹配倍频,产生平均功率为154 mW,重复频率为12.1 kHz的532 nm激光,与KTP腔外直接倍频相比,532 nm激光的平均功率提高了3倍,单脉冲能量和峰值功率提高了2倍,这有利于四倍频转化效率的提高。再通过BBO晶体Ⅰ类相位匹配腔外四倍频,得到平均功率3 mW的266 nm激光。

2 实验装置

实验装置如图1所示。

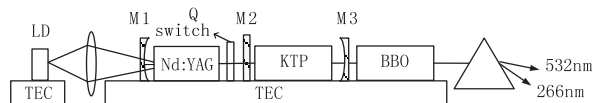


图1 实验装置图

Fig. 1 Schematic of experimental setup

M1为凹面镜,曲率半径为50 mm,镀有808 nm高透和1064 nm高反射膜。M1、M2构成1064 nm基频光谐振腔,M2为平面镜,镀有1064 nm部分反射膜, $T=10%$,两镜相距15 mm。M3为凹面镜,曲率半径为50 mm,镀有532 nm高透和1064 nm高反射膜,与M2相距10 mm。LD最大输出功率为4.6 W,波长为808 nm。工作物质为Nd:YAG晶体,尺寸为 $\phi 3 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$,掺杂浓度为1.0%,两端镀有808 nm和1064 nm双增透膜。

试验中选用Ⅱ类临界相位匹配KTP晶体进行倍频,KTP晶体两面镀1064和532 nm双增透膜,尺寸为 $2 \text{ mm} \times 2 \text{ mm} \times 9 \text{ mm}$,切割角 $\theta = 90.0^\circ$, $\varphi = 25.2^\circ$,此时有效非线性系数为 3.58 pm/V ,为了实现Ⅱ类临界相位匹配,KTP晶体光轴与水平成 45° 放置。

目前四倍频晶体可选用的比较少,有BBO和CLBO。CLBO虽然具有比较好的性能,但是潮解严重,且目前国内无法提供其产品,BBO晶体是比较优秀的四倍频晶体,其有效非线性系数大,并且市场上可以买到非常成熟的产品。实验中采用BBO晶体作为四倍频晶体,BBO晶体双面镀1064 nm、532 nm和266 nm增透膜,其切割角 $\theta = 44.7^\circ$ 。试验中我们选用被动调Q的方式,在谐振腔中插入Cr⁴⁺:YAG晶体进行调Q。

由于系统经过调Q后可以达到较高的峰值功率,因此未采用额外的聚焦系统,这样使整个系统非常紧凑。

装置中采用的晶体用铝箔包裹,放入铜槽并用TEC温控。

3 实验结果

在实验中,首先将KTP晶体与BBO晶体移除,并将M3移出谐振腔,M1与M2构成1064 nm激光谐振腔,获得平均功率401 mW的1064 nm调Q激光输出。然后将KTP晶体直接放在M1、M2腔外,此时构成腔外倍频532 nm激光器的结构,获得532 nm绿光输出,我们称之为第一种情况。然后将M3放入系统中,与M2构成532 nm外谐振腔,此时我们称之为第二种情况。

两种情况下532 nm绿光平均功率输出曲线如图2所示:第一种情况下,在LD抽运功率为4.6 W时,绿光平均功率为50 mW,此时重复频率为7.8 kHz,脉宽为10 ns,峰值功率为0.64 kW,单脉冲能量为 $6.4 \mu\text{J}$;第二种情况下,在LD抽运功率为4.6 W时,绿光平均功率为154 mW,此时重复频率为11.7 kHz,脉宽为10 ns,峰值功率为1.32 kW,单脉冲能量为 $13.2 \mu\text{J}$ 。

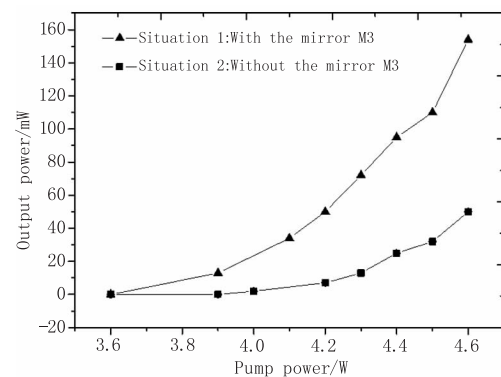


图2 532 nm平均功率随LD抽运功率的变化曲线

Fig. 2 Output power at 532 nm versus LD power

图3为放入BBO晶体后266 nm紫外激光平均功率随LD抽运功率变化曲线。当LD抽运功率为4.6 W, 532 nm绿光平均功率154 mW时,输出的266 nm紫外激光平均功率为3 mW。图4为266 nm激光光斑,如图所示,266 nm激光光斑成椭圆形,这是由BBO晶体走离效应所致。

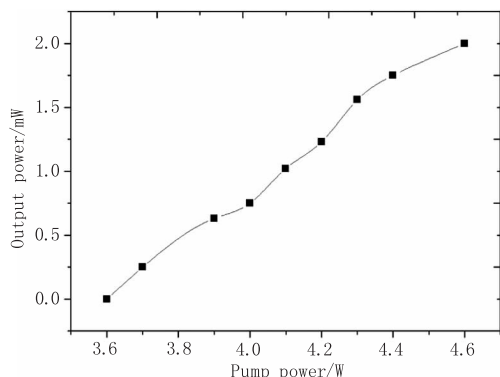


图3 266 nm 激光平均功率随LD抽运功率的变化曲线

Fig. 3 Output power at 266 nm versus LD power



图4 266 nm 激光光斑图

Fig. 4 Spot shape of the 266 nm laser

4 理论分析

放入M3镜,经过KTP后没有完全转化的1064 nm基频光照射到M3后反射,再照射到M2镜,因为M2对1064 nm基频光反射率为90%,因此部分1064 nm基频光会在此反射,其中部分基频光会沿光轴再次通过KTP晶体,产生非线性转化。因此在M2与M3构成的腔中,部分基频光会重复通过KTP晶体,从而提高了非线性变频的转化效率,提高532 nm激光的平均功率及单脉冲能量。

由激光原理知,基频光波到倍频光波的转化效率为:

$$\eta = \frac{2\omega_1^2 L^2 d_{\text{eff}}^2}{c^3 n_1^2 n_2} I_1(0) \text{sinc}^2(\Delta k L / 2) \quad (1)$$

式中, L 为倍频晶体的长度; d_{eff} 是倍频晶体的非线性有效系数; n_1 是基频光在倍频晶体中的折射率; n_2 是倍频光在倍频晶体中的折射率; c 是真空中光速; $I_1(0)$ 为入射的基频光的光强; ω_1 为入射

的基频光频率。由式(1)知,倍频转换效率正比于入射的基频光波的光强 $I_1(0)$,由于光波光强与其功率密度成正比,因此倍频转换效率与入射的基频光的功率密度也成正比关系,基频光的功率密度越高,倍频转换效率也越高。因此,在腔外倍频全固态激光器中,可以通过腔内调 Q 的方式,获得峰值功率密度高的基频光,从而提高倍频转换效率。另外,越短的激光脉冲会产生越高的峰值功率密度,因此基频光脉冲宽度越小则倍频转换效率越高^[7-8]。

由实验数据我们看出,放入M3透镜之后,532 nm激光的平均功率提高了3倍,单脉冲能量和峰值功率提高了2倍,这有利于四倍频转化效率的提高。

5 结论

本文通过在基频光谐振腔外插入基频光反射镜与基频光输出镜构成简单外谐振腔的方式,一定程度上提高了腔外倍频产生绿光的非线性转化效率,从而提高了四倍频的转化效率。

采用LD端面抽运Nd:YAG晶体,利用 Cr^{4+} :YAG的可饱和吸收被动调 Q ,KTP晶体倍频,获得532 nm脉冲输出,再经BBO晶体四倍频,实现266 nm连续脉冲输出。在LD注入功率为4.6 W时得到532 nm倍频光的平均输出功率154 mW,与KTP腔外直接倍频相比,532 nm激光的平均功率提高了3倍,单脉冲能量和峰值功率提高了2倍,这有利于四倍频转化效率的提高。得到266 nm紫外光的平均输出功率为3 mW,实现了小功率全固态266 nm紫外激光器。该激光器采用了直型谐振腔设计,并对谐振腔结构改进与提高倍频转化效率进行了一些探索。

实验中不足之处在于由于实验条件限制,1064 nm基频光输出镜M2未镀有532 nm高反射膜,限制了倍频转化效率的提高。未来我们可能采取在输出镜S2面镀532 nm高反射膜的方式,进一步提高倍频光的转化效率。此激光器结构简单紧凑、调节容易、成本较低,在小型266 nm紫外激光器产品化方面具有一定应用价值。

参考文献:

- [1] Gao Lanlan, Tan Huiming. LD pumped all-solid-state 355 nm ultraviolet pulse laser [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2003, 24(2): 94-96. (in Chinese)
高兰兰,檀慧明. LD泵浦全固态355nm紫外脉冲激光

- 器[J]. 半导体光电, 2003, 24(2): 94 - 96.
- [2] Zhang Baitao, Huang Haitao, Yang Jianfei, et al. . Generation of 7.8 W at 355 nm from an efficient and compact intracavity frequency-tripled Nd : YAG laser [J]. Optics Communications, 2010, 283 : 2369 - 2372.
- [3] Yu Jun, Zeng Zhijiang, Zhu Sangen, et al. Research on advantages of UV laser in fine progressing technology [J]. Infrared, 2008, 29(6) : 9 - 13. (in Chinese)
俞君, 曾智江, 朱三根, 等. 紫外激光在精细加工技术中的优势研究 [J]. 红外, 2008, 29(6) : 9 - 13.
- [4] Liu Qiang, Yan Xingpeng, Chen Hailong, et al. New progress in high-power all-solid-state ultraviolet laser [J]. Chinese Journal of Laser, 2010, 37(9) : 2289 - 2298. (in Chinese)
柳强, 闫兴鹏, 陈海龙, 等. 高功率全固态紫外激光器研究新进展 [J]. 中国激光, 2010, 37(9) : 2289 - 2298.
- [5] Geng Aicong, Zhang Hongbo, Wang Guiling, et al. Practical all-solid-state 266 nm laser [J]. Jernal of Optoelectronics · Laser, 2007, 18(7) : 767 - 769. (in Chinese)
耿爱丛, 张鸿博, 王桂林, 等. 实用化全固态 266nm 激光器的研究 [J]. 光电子 · 激光, 2007, 18(7) : 767 - 769.
- [6] Zhao Shuyun, Xiao Lei, Wang Xu, et al. Study on a practical 266 nm ultraviolet laser [J]. Laser & Infrared, 2012, 42(8) : 883 - 886. (in Chinese)
赵书云, 肖磊, 王旭, 等. 实用化 266nm 紫外激光器的研究 [J]. 激光与红外, 2012, 42(8) : 883 - 886.
- [7] Yan Jixiang. Laser principle and technology [M]. Beijing: Higher Education Press, 2004. (in Chinese)
阎吉祥. 激光原理与技术 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2004.
- [8] Yao Jianquan, Xu Degang. All solid state laser and nonlinear optical frequency conversion technology [J]. Beijing: Science Press, 2007. (in Chinese)
姚建铨, 徐德刚. 非线性光学频率变换及激光调谐技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2007.