

文章编号 1004-924X(2016)增-0212-04

全固态 210 nm 准连续深紫外激光器

崔建丰^{1,2*}, 高 涛², 张亚男², 王 迪², 岱 钦¹, 姚 俊¹

(1. 沈阳理工大学 理学院, 辽宁 沈阳, 110159;

2. 鞍山紫玉激光科技有限公司, 辽宁 鞍山, 114000)

摘要: 本文采用国产 808 nm 光纤输出半导体激光器作为抽运源, 研制了全固态深紫外激光器。该激光器采用激光二极管(LD)端面抽运 Nd:YLF 晶体和声光调 Q 技术实现了准连续 1 053 nm 的基波振荡, 腔外利用一块 LBO 晶体和两块 BBO 晶体对基频光进行二倍频、四倍频及五倍频, 实现了准连续 210 nm 的深紫外激光输出。实验研究了该激光输出功率与 LD 抽运功率的关系。LD 抽运功率为 13 W, 声光调 Q 激光器的调制频率为 1 kHz, 基波平均输出功率为 1.33 W 时, 能够获得平均输出功率 17 mW, 脉冲宽度 6.1 ns 的 210 nm 深紫外激光, 光束质量良好。该激光器腔外谐波变换无聚焦系统, 结构简单、易于操作, 有利于小型化生产。

关键词: 全固态激光器; 深紫外激光器; 五倍频; 准连续

中图分类号: TN248.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20162413.0212

All-solid-state 210 nm quasi-continuous deep ultraviolet laser

CUI Jian-feng^{1,2*}, GAO Tao², ZHANG Ya-nan², WANG Di², DAI Qin¹, YAO Jun¹

(1. School of Science, Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, China;

2. Anshan ZY Laser Technology Co., Ltd, Anshan 114000, China)

* Corresponding author, E-mail: cuijf@163.com

Abstract: By using a domestic fiber output semiconductor laser with 808 nm wavelength, an all-solid-state deep ultraviolet laser was developed. The Laser Diode (LD) end pump Nd:YLF crystal and acoustic-optical Q-switch were adopted to realize quasi-continuous fundamental frequency radiation at 1 053 nm, which was subjected to second harmonic generation, fourth harmonic generation and fifth harmonic by using one LBO crystal and two BBO crystals outside the cavity. Thus the output of quasi-continuous 210 nm deep ultraviolet laser was achieved. The relationship between the output power of the laser and the pump power were researched experimentally. When the pump power of LD is 13 W, the modulation frequency of acoustic-optical Q-switch laser is 1 kHz and the average output power of fundamental wave is 1.33 W, the average output power and the pulse width of the deep ultraviolet laser was 17 mW and 6.1 ns respectively. Furthermore the deep ultraviolet laser is characterized by good beam quality, simple configuration and easy operation, thus prone to minimization.

Key words: all-solid-state laser; deep ultraviolet laser; fifth harmonic generation; quasi-continuous

收稿日期: 2016-05-26; 修订日期: 2016-06-19.

基金项目: 科技部科技型中小企业技术创新基金资助项目(No. C262100678); 辽宁省科技计划资助项目(No. 2014220040); 沈阳市科技计划资助项目(No. F16-210-6-00)

1 引言

深紫外激光因其波长短、可聚焦能力强、光子能量大等优点,在激光精密加工、高密度光盘存储、激光医疗、光谱分析、科学研究等领域有着广泛的应用^[1-7]。利用深紫外非线性光学晶体进行光学频率变换是获得全固化深紫外激光最直接有效的方法。目前,国内外对深紫外固体激光器的报道主要集中在 213 nm 波段,通过非线性光学晶体五倍频 Nd:YAG、Nd:YVO₄ 等晶体的 1.06 μm 谱线,结合调 Q 技术,可以获得不同重复频率 213 nm 的深紫外光输出。Tsutomu 等^[8]采用 LD 侧面抽运 Nd:YAG 晶体电光调 Q 方式,利用三镜环形腔获得基模 1 064 nm 基频光,通过腔外五倍频获得了频率为 50 Hz,单脉冲能量为 4 mJ 的 213 nm 深紫外激光,用来眼内手术治疗玻璃体视网膜疾病。苏艳丽等^[9]采用 LD 抽运 Nd:YVO₄ 晶体腔外 KTP 倍频和两块 BBO 四倍频及五倍频获得了 213 nm 的深紫外激光,LD 抽运功率为 10.3 W,声光调 Q 开关频率为 20 kHz 时,深紫外激光平均输出功率为 3.1 mW,脉宽 7.5 ns。Gagn 等^[10]报道了可用于制作光纤布拉格光栅的脉冲能量为 10 J、脉冲宽度为 7 ns,重复频率在 0.1~30 kHz 可调的五倍频 213 nm 紫外激光器。岱钦等^[11]人采用脉冲 LD 侧面泵浦 Nd:YAG 晶体电光调 Q 方式获得了 10 瓦级 1 064 nm 的基频光输出,腔外利用多次倍频技术实现了最大功率为 151 mW,重复频率为 1 kHz 的高稳定性 213 nm 深紫外激光运转。而 Nd:YLF 晶体的 1 053 nm 基波谱线五倍频获得 210 nm 紫外波段的研究报道却很少,人们只是针对 Nd:YLF 晶体的 1 053 nm 谱线四倍频获得的 263 nm 紫外谱线进行了一些研究^[12]。

本文采用 LD 端面抽运 Nd:YLF 晶体和声光调 Q 技术实现了高重频的 1 053 nm 基频光运转,利用腔外五倍频技术,当 LD 抽运功率为 13 W,声光调 Q 频率为 1 kHz 时,获得了平均功率为 17 mW 的 210 nm 全固态准连续深紫外激光器,脉冲宽度为 6.1 ns。该激光器结构简单、易于操作,有利于深紫外激光器产品的小型化生产。

2 实验装置

210 nm 深紫外激光器的结构如图 1 所示。采用国产 808 nm 光纤输出半导体激光器作为抽运源,最大输出功率为 40 W,光纤芯径为 400

μm,数值孔径为 0.22。通过调节制冷系统的工作温度,使光纤激光器的工作波长在 806 nm 附近,与 Nd:YLF 晶体吸收峰匹配。通过耦合透镜将抽运光整形为直径 600 μm 左右的圆形光斑。Nd:YLF 晶体尺寸为 3 mm×3 mm×12 mm,a 轴切割,Nd³⁺ 离子掺杂浓度为 1.0 at.%,通光长度为 12 mm,两个通光面分别镀 1 053 nm 和 806 nm 的增透膜。为提高晶体的散热效率,晶体采用钢焊的方式直接焊接到紫铜晶体热沉上,晶体热沉采用循环水冷却,制冷温度设定在 19℃。谐振腔采用简单的线性腔结构,腔长 100 mm 左右,由腔镜 M₁ 和 M₂ 组成。平凹镜 M₁,曲率半径 R=-500 mm,平面镀 806 nm 的高透膜,凹面镀 806 nm 的高透膜和 1 053 nm 的高反膜。平面镜 M₂ 为输出镜一面镀 1 053 nm 部分透过膜,另一面镀 1 053 nm 高透膜。腔内插入布儒斯特片,抑制 Nd:YLF 晶体的 1 047 nm 谱线振荡。腔内插入声光 Q 开关(QS041-10G-IN2,英国古奇公司),重复频率设置为 1 kHz。LBO 二倍频晶体,采用 I 类临界相位匹配,切割角度 θ=90°,Φ=12°,尺寸为 4 mm×4 mm×25 mm,晶体两端面均镀 1 053 nm 和 527 nm 的增透膜。四倍频晶体 BBO 采用 I 类临界相位匹配,切割角度 θ=48.4°,Φ=0°的晶体两端面均镀 527 nm 和 263 nm 的增透膜。五倍频 BBO 晶体采用 I 类临界相位匹配,切割角度 θ=52.1°,Φ=0°晶体两端面均镀 1 053,263 和 210 nm 的增透膜。2 块 BBO 晶体尺寸均为 6 mm×6 mm×5 mm。3 块晶体均采用温控系统控温,控温精度为 ±0.1℃。为了减小走离角对激光输出的影响,三块非线性晶体尽量靠近放置。图 2 给出了 210 nm 深紫外激光各谐波偏振的匹配关系。4 种波长的激光通过一块棱镜分光。

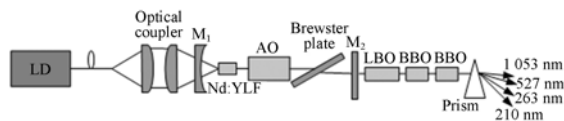


图 1 210 nm 深紫外激光器实验结构示意图
Fig. 1 Schematic diagram of 210 nm deep ultraviolet laser

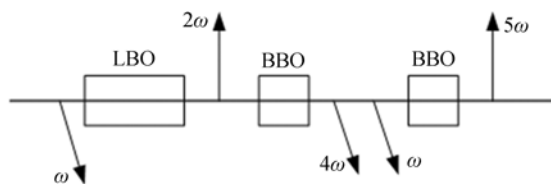


图 2 210 nm 深紫外激光各谐波偏振图
Fig. 2 Polarization of each harmonic in 210 nm deep ultraviolet laser

3 结果与分析

在重复频率为 1 kHz 时,实验测量了 1 053 nm 基频光、527 nm 绿光、263 nm 紫外光和 210 nm 深紫外光的输出功率,图 3 给出了 1 053 nm 基频光、527 nm 绿光和 263 nm 紫外光输出功率与 LD 抽运功率的关系。LD 抽运功率最大为 13 W,此时 1 053 nm 基频光功率为 1.33 W,527 nm 绿光功率为 525 mW,263 nm 功率为 112 mW,绿光到紫外的光转换效率为 21.33%。图 4 给出了 210 nm 深紫外激光输出功率与 LD 抽运功率的关系,210 nm 深紫外激光的最大输出功率为 17 mW。实验中继续增加 LD 抽运功率,210 nm 深紫外激光功率下降,虽然基频光和绿光功率随之增大,但是光束质量变差影响了 210 nm 深紫外激光的输出效率。

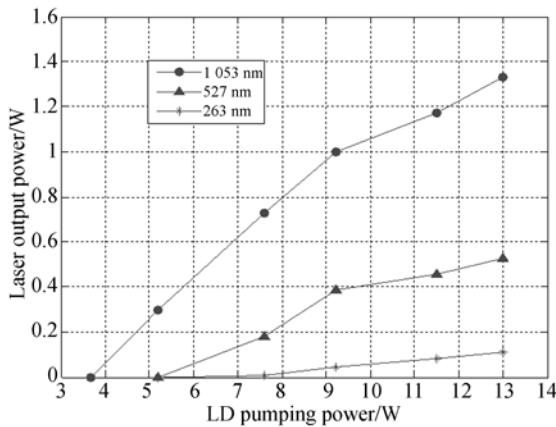


图 3 激光输出功率与抽运光功率的关系

Fig. 3 Output power versus pump power

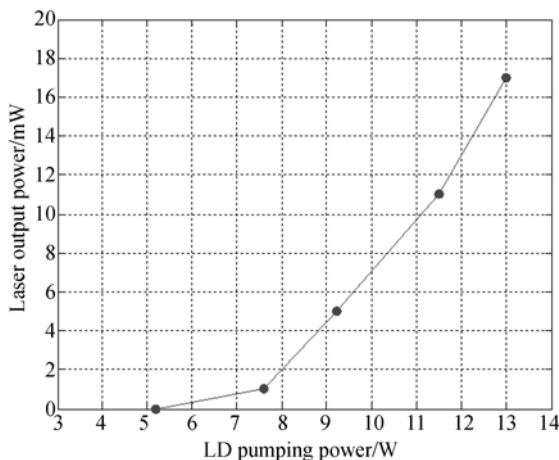


图 4 激光输出功率与抽运光功率的关系

Fig. 4 Output power versus pump power

这里采用 DET10A 型探测器 (THORLABS 公司) 和 Wavepro7200A 型存储示波器 (LeCory 公司) 测量激光脉冲宽度,210 nm 深紫外激光的脉冲形状如图 5 所示,激光脉冲宽度为 6.1 ns。

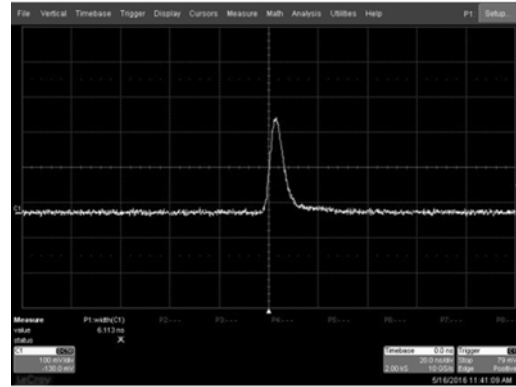


图 5 210 nm 深紫外激光单脉冲形状

Fig. 5 Single pulse shape of 210 nm deep ultraviolet laser

图 6 给出了棱镜分光后 263 nm 激光和 210 nm 激光的光斑照片,左边为 263 nm 的紫外光斑,右边为 210 nm 的深紫外光斑,BBO 晶体的走离效应对 210 nm 深紫外激光远场光斑有一定的影响。

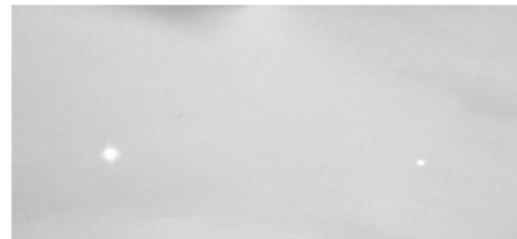


图 6 263 nm 和 210 nm 深紫外激光远场光斑

Fig. 6 Far field spots of 263 nm and 210 nm deep ultraviolet lasers

4 结论

本文采用 LD 端面抽运 Nd:YLF 晶体声光调 Q,腔外二倍频、四倍频及五倍频实现了准连续 210 nm 的深紫外激光输出。LD 抽运功率为 13 W,声光调 Q 激光器的调制频率为 1 kHz 时,210 nm 深紫外激光的最大平均输出功率为 17 mW,脉冲宽度为 6.1 ns,光束质量良好。该紫外激光器的腔外谐波变换无聚焦系统,结构简单、易于操作,有利于深紫外激光器产品的小型化生产。

参考文献:

- [1] 张永生, 郑国鑫. 500 fs 紫外激光系统及其在闪烁体荧光特性测试中的应用[J]. 光学精密工程, 2011, 19(2): 475-481.
ZHANG Y SH, ZHENG G X. 500 fs UV laser system and its application to fluorescence test of thin film scintillators[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(2): 475-481. (in Chinese)
- [2] 孟祥昊, 刘华刚, 黄见洪, 等. $Ba_{1-x}B_{2-yz}O_4Si_xAl_yGa_z$ 晶体和频可调谐深紫外飞秒激光器[J]. 物理学报, 2015, 64(16): 164205.
MENG X H, LIU H G, HUANG J H, *et al.*. Tunable deep ultraviolet femtosecond sum frequency laser based on $Ba_{1-x}B_{2-yz}O_4Si_xAl_yGa_z$ crystal[J]. *Acta Phys. Sin.*, 2015, 64(16): 164205. (in Chinese)
- [3] 徐明飞, 庞武斌, 徐象如, 等. 高数值孔径投影光刻物镜的光学设计[J]. 光学精密工程, 2016, 24(4): 740-746.
XU M F, PANG W B, XU X R, *et al.*. Optical design of high-numerical aperture lithographic lenses [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(4): 740-746. (in Chinese)
- [4] 王大辉, 钱航, 赵学庆, 等. 基于荧光成像的准分子激光系统多路光束自动准直[J]. 光学精密工程, 2015, 23(4): 949-955.
WANG D H, QIAN H, ZHAO X Q, *et al.*. Automatic alignment of multiplexed beams of excimer laser system based on fluorescence imaging[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(4): 949-955. (in Chinese)
- [5] OLGA R, CHRISTIAN L S, CHRISTOPH B, *et al.*. Quantitative bioimaging of p-boronophenylalanine in thin liver tissue sections as a tool for treatment planning in boron neutron capture therapy[J]. *Anal. Bioanal. Chem.*, 2015, 407: 2365-2371.
- [6] MASATAKA S, TAKUYA H, KATSUYOSHI Y, *et al.*. Photodissociation dynamics of C_3H_5I in the near-ultraviolet region[J]. *J. Chem. Phys.*, 2014, 141: 104316.
- [7] BERNADETTE M R, YUMIN L, MICHAEL B, *et al.*. Spin-polarized hydrogen Rydberg time-of-flight; Experimental measurement of the velocity-dependent H atom spin-polarization[J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2014, 85(5): 053103-1-053103-8.
- [8] TSUTOMU Y, YOUSEF Y, YU S W, *et al.*. Preliminary results of development of a single-mode Q-switched Nd: YAG ring laser at 213 nm and its application for the microsurgical dissection of retinal tissue ex vivo[J]. *Laser. Med. Sci.*, 2005, 19(4): 234-239.
- [9] 苏艳丽, 何京良, 姜其, 等. 激光二级管抽运 Nd: YVO₄ 晶体五倍频 213 nm 深紫外激光器[J]. 中国激光, 2006, 33(12): 1590-1592.
SU Y L, HE J L, JIANG Q, *et al.*. Efficient 213nm radiation fifth harmonic generation of a laser diode-pumped Nd: YVO₄ laser [J]. *Chin. J. Lasers*, 2006, 33(12): 1590-1592. (in Chinese)
- [10] GAGN M, KASHYAP R. New nanosecond Q-switched Nd: YVO₄ laser fifth harmonic for fast hydrogen-free fiber Bragg gratings fabrication[J]. *Opt. Commun.*, 2010, 283(24): 5028-5032.
- [11] 岱钦, 史瑞新, 崔建丰, 等. 脉冲 LD 泵浦电光调 Q 深紫外激光器[J]. 发光学报, 2016, 37(4): 463-466.
DAI Q, SHI R X, CUI J F, *et al.*. Pulse LD pumped EQ-Q switched DUV laser[J]. *Chin. J. Lumin.*, 2016, 37(4): 463-466. (in Chinese)
- [12] 王屹山, 赵尚弘, 于连君, 等. 高效全固化 263 nm 紫外激光脉冲的产生[J]. 光子学报, 2000, 29(10): 917-919.
WANG Y SH, ZHAO SH H, YU L J, *et al.*. The generation of high-efficiency, all-solid-state 263 nm ultraviolet laser pulse[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2000, 29(10): 917-919. (in Chinese)

作者简介:



崔建丰(1977—),男,吉林省吉林人,博士,高级工程师,2000年于长春光学精密机械学院(现长春理工大学)获得学士学位,2004年、2007年于长春光学精密机械与物理研究所分别获得硕士、博士学位,主要从高功率、大能量固体激光器及变频技术、皮秒激光器、亚纳秒激光器及激光加工系统的研究。
Email: cuijf@163.com