

doi: 10.3788/gzxb20124109.1019

应用于光刻领域中的固态紫外激光源的制作

雷亮, 李凡, 林清华, 周金运, 冉坐

(广东工业大学 物理与光电工程学院, 广州 510006)

摘 要:以半导体侧泵钕铝石榴石激光器为泵浦源, 采用腔内泵浦两块三硼酸铯晶体, 产生满足高功率与高光束质量要求的三倍频 355 nm 紫外激光. 通过使用法拉第旋转器谐振腔优化设计与热效应补偿提高输出光的光束质量, 并且使用体光栅作为输出镜, 在实现线宽窄化同时保持准相位匹配的高效性能. 该光刻用紫外激光源成功地替代准分子激光器, 使用在一套大面积亚纳米级投影式光刻系统上, 工作时紫外光输出功率为 4.37 W, 光束质量因子为 2.27.

关键词:半导体工业; 光刻技术; 三硼酸铯晶体; 紫外激光

中图分类号: TN241

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2012)09-1019-4

0 引言

传统的工业曝光(光刻)设备采用普通光源(如汞灯等荧光紫外光源), 对 20 μm 以下线宽的印制电路板(PCB)和氧化铟锡透明导电玻璃(ITO)的光刻几乎无能为力^[1]. 在面对下一代电子产品需要在光刻切割和钻孔方面取得突破、需要显示能力与高分辨率、高能量以及低损伤的微加工的要求下, 研究满足这些特性的紫外激光器显得非常重要^[2-3]. 现今的商用纳米准确度级光刻机皆以紫外甚至深紫外激光为光刻光源. 以 Intel 公司的光刻设备供应商 ASML 的尖端产品为例, 2010 年最新下线的投影型沉浸式光刻机(Immersion Lithography), 刻蚀线宽准确度 45 nm, 采用的正是输出波长为 193 nm 的准分子激光器作为光刻光源.

现行主流的光刻激光光源以其高功率与部分相干需求选择为准分子激光器, 然而准分子激光器作为气体光源、固有的落后于固体激光器的缺陷一直不容忽视, 包括有维护成本高、需要补充或置换气体、需要大型的高压电源伺服系统等^[4]. 而固态激光器虽然有成本与功率优势, 但由于输出的激光相干时间、相干长度过长而在微刻过程中产生衍射而一直不被重视^[5]. 本文探求一种新型的固态紫外激光光源, 配合有效的消相干与均匀化手段, 力争使得此类固体紫外激光器替代准分子激光器成为在亚十微米量级的主流曝光设备.

本文使用体光栅(Volume Bragg Grating, VBG)为输出镜的两块三硼酸铯(CsB_3O_5 , CBO)晶体置于 Nd:YAG 激光器内发生三倍频效应, 实现腔内的高功率、窄线宽的高光束质量紫外激光输出; 建立了一个配有 45°法拉第旋转器、并通过热补偿和谐振腔的优化设计, 进一步实现功率和光束质量提高的光路系统. 在实验上成功获得输出功率大于 4 W, 重复频率 8 kHz, 光束质量因子 $M^2 < 2.5$ 的稳定紫外激光输出.

1 采用高转换效率的三硼酸铯晶体

随着激光二极管泵浦技术的成熟和性能优良的非线性材料的出现, 半导体泵浦的全固态(Diode-Pumped Solid-State, DPSS)Nd:YAG 紫外激光器成为国内外研究的热点之一. 采用 1 064 nm Nd:YAG 激光器作为泵浦源激发三倍频 355 nm 紫外激光, 要获取高转换效率一般采用一块二倍频晶体与一块和频晶体级联产生, 而倍频与和频晶体通常采用三硼酸锂(LBO)或六硼酸铯锂(CLBO)晶体. LBO 是目前公认为最适合用于高平均功率全固态激光器的三倍频晶体^[6]. 在国内, 安徽光机所与山东大学曾分别用两块 LBO 实现 1.89 W 与 1.62 W 的 355 nm 紫外光输出^[7-8].

为了获得更高的紫外输出功率, 本文采用两块三硼酸铯(CBO)晶体^[9]、一块实现倍频另一块进行和频的 355 nm 紫外激光产生方式. CBO 抗激光损

基金项目: 国家自然科学基金(No. 61107029, No. 60977029)、广东省自然科学基金(No. 07001789)和广东省科技计划项目(No. 2007B010400071)广东省创新实验项目(1184510158、HSZJ2011089)资助

第一作者: 雷亮(1979—), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为紫外激光器制作与光刻系统. Email: leiliang@gdut.edu.cn

收稿日期: 2012-02-06; 修回日期: 2012-04-05

伤阈值高,可利用最大非线性系数使其转换效率是LBO的两倍,表明了紫外波段的频率转换CBO比LBO更为有利.

2 传统光路结构

内腔式无热效应补偿与起偏元件的三倍频紫外激光腔实验结构如图1. 两块CBO(分别为CBO₁、CBO₂)两端抛光且镀上增透膜,CBO₁尺寸为4×4×12 mm³,在腔内倍频1 064 nm基波产生532 nm二次谐波,采用I类临界相位匹配的摆放方式;CBO₂尺寸为3×3×10 mm³,基波和谐波再经三次谐波晶体腔内混频产生355 nm三次谐波,采用II类临界相位匹配方式. M₀和M₁分别与M₂构成1 064 nm激光腔和355 nm的振荡腔. 其中, M₁对1 064 nm高透、355 nm高反, M₂对1 064 nm高反、355 nm高透.

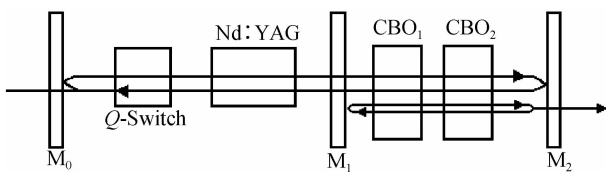


图1 内腔式无热效应补偿与起偏元件的三倍频紫外激光腔
Fig. 1 Intracavity frequency-tripling without polarizer or thermal effect compensation

利用图1所示光路结构实验上获得了重复频率为8 kHz,功率为2.3 W的355 nm激光输出,光斑呈椭圆形,光束质量因子 M^2 大约为10. 在这种传统的三倍频紫外激光产生方式中,虽然使用了新型的晶体CBO,但没有采取任何热效应补偿措施和起偏元件,所有腔镜均为平面镜;较差的光束质量主要是由线宽失配以及激光器内的热透镜和热致双折射效应所导致^[6].

3 采用体光栅的新型光路结构

传统光路结构由于采用转换效率更高的CBO晶体而得到了2.3 W的紫外激光输出,但光束质量较差而无法使用在要求严格的光刻系统中. 在提升功率与改善光束质量方面,参考了Perrett^[10]与Jacobsson^[11]在光学参量放大(Optical Parametric Amplifier, OPO)产生高功率中红外固态激光中所做的工作,认为需要添加线宽窄化的元件可有效提高紫外功率.

为了实现线宽窄化,人们最初采用的是在谐振腔内加入衍射光栅或标准具的方法,但这样会引入较高的腔内损耗,转换效率大约降低近一半^[10]. 本文提出一个新型光路结构:选用高频谱选择性的腔镜,限制反馈,即振荡频谱成分,达到线宽窄化的目

的. 体光栅又称为体全息光栅(Volume Holographic Gratings, VBG),是采用全息的方法在光敏玻璃中制作纵向衍射光栅,其反射或透射线宽一般在0.01 nm到几个纳米之间,比普通介质膜镜的线宽小近一个数量级;并且稳定性好(400℃时仍保持原有性能)、损伤阈值高($\sim 40 \text{ J/cm}^2 @ 8 \text{ ns}$). 选择所需波长、带宽和反射率的反射式体光栅(Reflecting Bragg Grating, RBG),并在表面镀上宽带增透膜,即可作为具有线宽窄化功能的输出镜使用.

另外一个影响功率与光束质量的主要原因是腔内的热透镜和热致双折射效应. 由于YAG晶体是一种各向同性晶体,在较高功率二极管泵浦下激光材料因吸收泵浦辐射而发热,激光棒较冷的外部制约较热的内部膨胀,温度梯度在棒内产生机械应力,通过材料中的弹光效应改变了材料的折射率,产生热透镜和热致双折射效应. 与固体固有的双折射现象不同的是,由于应力分布的不均匀性,造成激光棒内的折射率改变量逐点不同,也就是说,热致双折射是一种非均匀分布的双折射. 热致双折射的不均匀性,造成激光棒截面上各点的偏振态各不相同,即退偏效应. 因此要想完全补偿和消除热致双折射效应,必须对截面上所有各点进行点对点的补偿和消除. 本文在加入体光栅的基础上采纳了一个45°法拉第旋转器(Faraday Rotator)与一个可移动负透镜(Lens)以实现动态的补偿热透镜效应的目的.

新型光路结构如图2. 在激光棒与反射镜M₀之间放置45°法拉第旋转器来补偿径向和切向偏振光之间的相位差,光在每次往返中都要经过45°法拉第旋转器,因此偏振面旋转了90°,实现了热致双折射补偿的目的;通过可移动负透镜(Lens)实现动态的补偿热透镜效应的目的. 这种结构的优势是因加入M₃(HR@1 064 nm)所在侧臂,使得腔内激光是线偏振的,可以全部用来泵浦CBO晶体,充分利用泵浦功率,而且腔内功率密度也比较低,不容易造成光学元件的损伤. 实验中VBG不仅起着窄化线宽的功能,配合对1 064 nm高反、355 nm高透的M₂,作为三倍频的输出镜.

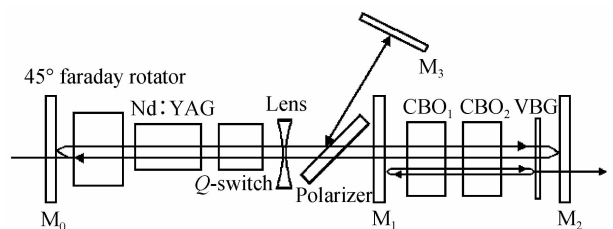


图2 内腔式热效应补偿线偏振泵浦的三倍频紫外激光腔
Fig. 2 Intracavity frequency-tripling with polarizer and thermal effect compensation

4 实验结果

采用新型光路结构所产生的 355 nm 紫外激光,实验测量得功率值为 4.37 W,重复频率为 8 kHz,线宽为 2.82 nm. Ophir-Spiricon 公司的 SP620 型光学质量分析仪对输出激光进行测量,在距离输出镜 50 mm 处检测得到的光束截面三维形貌如图 3,可见其截面光强分布基本为高斯分布. 另外使用 Ophir-Spiricon 公司的 M²-200s 型 Beam Propagation Analyzer 光束传播质量因子 M² 值为 2.27.

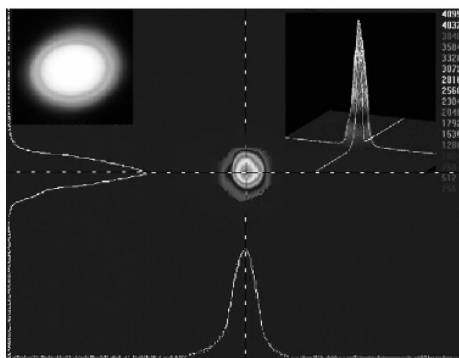


图 3 紫外输出激光的光束截面三维形貌
Fig. 3 The profile of the UV laser taken by a Spiricon laser beam profile analyzer

研究中开发的激光器主要是应用在本实验组主攻的光刻技术领域,因而高斯分布的截面输出需要经过均束系统,加工成正方形均匀分布且符合加工窗(即光强起伏变化误差) $<5\%$ 的要求,才能应用于高精度光刻系统. 光刻实验中,将此输出激光穿过由 9×9 微透镜阵列(Micro-Lens Array, MLA)与柱面镜所组成的均束系统,得到如图 4 所示的径向能量分布曲线,从图中曲线可计算出均束后的紫外激光输出能量起伏小于 4.6% ,满足光刻加工窗要求.

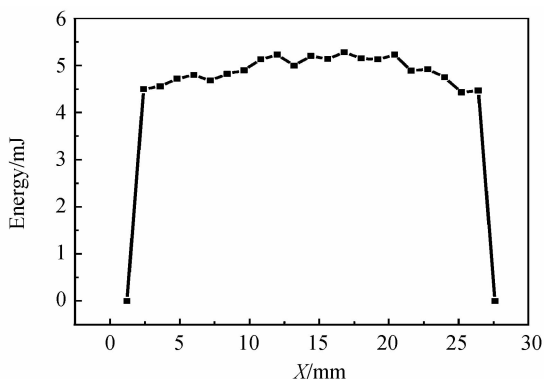


图 4 经过均束系统后的光束能量径向分布
Fig. 4 X-distribution diagram of energy after homogenizer

图 5 给出分别采用实验室所配备的准分子激光器(可调参量:功率 100 mW ~ 3 W,重复频率:1 ~ 100 Hz,单脉冲能量:15 ~ 500 mJ)与此新型固

态紫外激光器时得到的 PCB 曝光实验效果图. 实验时调节准分子激光器的功率以及重复率,使其到达 PCB 曝光面的曝光量跟此新型激光器的曝光量相同,皆为 $200 \text{ mJ}/\text{cm}^2$. 从曝光效果可见,虽然皆使用同一个由实验室自主研发的微米级投影式均束系统,但由于光源使用的不同而使得准确度有所提高. 但需要强调,激光器所作出的实验结果仅在亚十微米量级的曝光机范畴优于准分子激光器的实验结果,而在纳米量级的微纳光刻领域还有待探索.

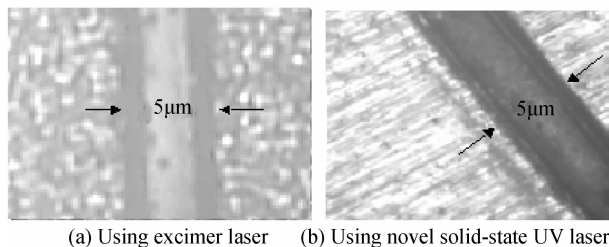


图 5 应用于投影光刻系统的 PCB 曝光效果对比
Fig. 5 Experimental PCB exposure diagrams in comparison

5 结论

本文研究了半导体泵浦全固态紫外激光器,使用体光栅 VBG 作为输出镜,将两块 CBO 晶体置于 Nd:YAG 激光器内发生三倍频效应,实现了腔内的高功率、窄线宽的高光束质量的紫外激光输出,并且建立了一个配有 45° 法拉第旋转器并进行热补偿和谐振腔的优化设计的光路系统. 该结构提高了功率和光束质量,在实验上稳定地得到了所产生的 355 nm 紫外激光功率值为 4.37 W,线宽为 2.82 nm,光束质量因子 M² 达到 2.2. 将此激光光源应用于亚十微米量级的曝光机领域,实验结果显示其曝光准确度优于传统的准分子激光光源.

参考文献

- [1] LIN K, JAIN K. Design and fabrication of stretchable multilayer self-aligned interconnects for flexible electronics and large-area sensor arrays using excimer laser photoablation[J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2009, **30**(1): 14-17.
- [2] ZIMMERMANN M, LINDLEIN N, VOELKEL R, et al. Microlens laser beam homogenizer: from theory to application [C]. *SPIE*, 2007, **6663**: 1-13.
- [3] LIU Shao-jin, LING Zhi-hua. UV photo-induced aligning liquid crystal phase grating[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(8): 1675-1677.
刘绍锦,凌志华. 紫外光诱导液晶相位光栅[J]. *光子学报*, 2008, **37**(8): 1675-1677.
- [4] AGNESI A, ACQUA S D, PICCININI E, et al. Efficient wavelength conversion with high power passively switched diode pumped neodymium lasers [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1998, **34**(8): 1480-1484.
- [5] KOJIMA T, KONNO U, FUJIKAWA S, et al. 2W ultraviolet beam generation by fourth-harmonic generation of all-solid-state laser[J]. *Optics Letters*, 2000, **25**(1): 58-60.
- [6] WU R F, PHUA P B, LAI K S, et al. Compact 21 W 2 μm intracavity optical parametric oscillator [J]. *Optics Letters*,

- 2000, **25**(7): 1460-1462.
- [7] DONG Yun-sheng, GUO Qiang, WANG Shou-zhang, *et al.* High power ultraviolet Nd : YAG laser pumped by laser-diode [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, **37**(3): 449-451.
董云升, 郭强, 王首长, 等. 激光二极管泵浦高功率 Nd : YAG 紫外激光器[J]. *红外与激光工程*, 2008, **37**(3): 449-451.
- [8] WAN Yun-fang, HAN Ke-zhen, ZUO Chun-hua, *et al.* An efficient diode-pumped Nd : YAG/LBO triple-frequency UV laser[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(12): 2182-2186.
万云芳, 韩克祯, 左春华, 等. 高效三倍频全固态 Nd : YAG/LBO 紫外激光器[J]. *光子学报*, 2007, **36**(12): 2182-2186.
- [9] WU Y C, SASAKI T. CsB3O5: A nonlinear optical crystal [J]. *Applied Physics Letters*, 1993, **62**(11): 2614-2617.
- [10] PERRETT B, TERRY J, MASON P, *et al.* Spectral line narrowing in PPLN OPO devices for 1 μ m wavelength doubling[C]. *SPIE*, 2004, **5620**: 275-279.
- [11] JACOBSSON B, TIHONEN M, PASISKEYICIUS V, *et al.* Narrowband bulk Bragg grating optical parametric oscillator[J]. *Optics Letters*, 2005, **30**(8): 2281-2284.

A Novel Ultra-violet Solid State Laser in Lithography

LEI Liang, LI Fan, LIN Qing-hua, ZHOU Jin-yun, RAN Zuo

(School of Physics and Optoelectronic Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: An intracavity frequency-tripling of a diode-edge-pumped passively Q-switched 1 064 nm Nd : YAG laser is presented to generate high power 355 nm UV laser. Several essential technologies are put forward to achieve the best beam quality such as a volume grating to maintain quasi phase matching with narrow linewidth, optimization and thermal effects compensation for cavity. The task first takes advantage of volume grating and two CBO crystals as SHG and THG nonlinear optical conversion material to obtain high UV laser power output more than 4 W, light quality factor $M^2 < 2.5$, meanwhile it is the first time to realize thermal effect using 45° Faraday rotator. The achievement is expected to be the popular light source system in lithography instead of conventional excimer laser.

Key words: Semiconductor industry; Lithography technology; CBO crystal; Ultraviolet laser