

高效铜激光倍频及在光刻中的应用 *

任 虹 梁培辉 路敦武 叶 韧 崔自强

(中国科学院上海光机所, 上海 201800)

提要 通过线聚焦将自滤波振荡行波放大后的铜激光在 BBO 晶体中倍频, 当基频光功率为 5.4 W 时, 倍频效率达 14.4%。用铜激光倍频光进行接触式光刻, 刻线分辨率优于 1.0 μm 。

关键词 铜激光, 倍频, 光刻

1 引 言

亚微米光刻技术是微电子工业发展的关键技术, 其中 5:1 窄带投影式准分子激光光刻是世界各国重点研究的方向。为了获得窄线宽以及稳定的中心波长, 在准分子激光器中需要附加一套复杂的光学系统, 这不仅大大降低了激光功率, 提高了价格, 而且降低了器件的稳定性和可靠性。商用准分子激光分步重复式光刻机已问世五年, 但系统还不实用^[1]。近年来铜蒸气激光器(CVL)得到了迅速的发展, 单台器件输出功率已超过 200 W, 其最高倍频效率已达 28%^[2]。铜激光倍频光是一种波长为 255.3 nm 的新型紫外光源, 1991 年有人曾提出用铜激光倍频光代替准分子激光实现亚微米光刻的新思想^[3], 铜激光倍频光与准分子激光相比具有高重复频率(5 kHz), 窄线宽(0.02 nm)的突出优点, 它被认为是下一代光刻机的理想光源。

提高铜激光倍频效率已成为光刻机光源实用化的关键, 提高铜激光在 BBO 晶体中倍频效率的主要方法有: 1) 提高在衍射极限发散角内有用的铜激光功率^[4]; 2) 采用线聚焦方案, 在相位匹配敏感的平面内充分满足相位匹配条件^[2]; 3) 降低铜激光的重复频率, 减小因热效应而引起的晶体内部的温度梯度^[5]。

本文采用自滤波振荡行波放大的铜激光系统, 并采用线聚焦方案, 在 BBO 晶体中获得了转换效率为 14.4% 的倍频光, 在此基础上用铜激光倍频光进行接触式光刻, 探索了用铜激光倍频光实现亚微米光刻的可行性。

2 自滤波振荡行波放大的铜激光系统

众所周知, CVL 的倍频效率正比于基频光峰值功率密度的平方, 但其最高峰值功率密度受 BBO 晶体破坏阈值的限制; 而在相同峰值功率密度的条件下, 会聚的 CVL 在 BBO 晶体中的倍频效率又随基频光会聚角的减小(即相位匹配因子的增加)而提高。我们采用自滤波振荡行波

* 国家自然科学基金项目。

收稿日期: 1994 年 7 月 21 日; 收到修改稿日期: 1994 年 8 月 25 日

放大的铜激光系统是为了改善基频光的光束质量,提高在接近衍射极限发散角内有用的激光功率,即在会聚透镜焦距相同的情况下,提高铜激光峰值功率密度,从而提高铜激光在 BBO 晶体内的倍频效率。

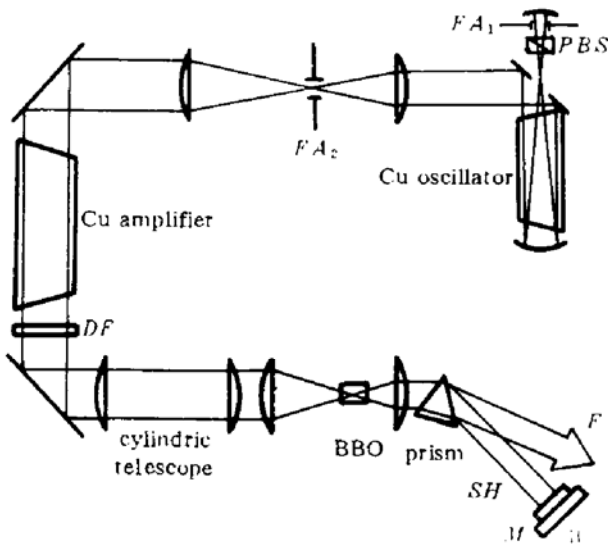


Fig. 1 Experimental setup

PBS: polarizing beam splitter; FA_1, FA_2 : filtering aperture; *DF*: dichromatic filter which transmits at 510.6 nm and reflects at 578.2 nm; *M*: mark; *W*: wafer; *F*: fundamental light at 510.6 nm; *SH*: second harmonic light at 255.3 nm

振荡器与放大器的通光口径及激活区长度分别为 $\phi 20 \times 580$ mm 及 $\phi 30 \times 890$ mm。为了使振荡器与放大器的通光口径匹配,采用由两块焦距分别为 2 m 及 3 m 的透镜组成扩束望远镜,并在扩束望远镜的焦点处放置一个直径为 0.8 mm 的滤波小孔 FA_2 ,滤除振荡器输出光中放大的自发辐射。调节振荡器与放大器的同步,使行波放大后输出激光功率最大。自滤波振荡行波放大的激光系统的输出特性在文献[7]中已有详细描述,现将主要结果列于表 1。在放大器的输出端有一块透过绿光(510.6 nm)全反黄光(578.2 nm)的分光板 *DF*,将激光器输出的两种波长的激光分开。在重复频率为 6 kHz 时,获得了发散角为 4.6 倍衍射极限,偏振度为 97%,绿光输出为 6.7 W 的铜激光。铜激光及其倍频光功率采用 Coherent 公司制造的 LM100 型功率计测量,光束方向性采用“套孔法”测量,并定义光束发散角 $\theta_{80\%}$ 为包含输出光总功率的 80% 所对应的全角发散角,本文所指的衍射极限(DL)发散角为全角, $\theta = 2.44(\lambda/D)$, $\lambda = 510.6$ nm。

Table 1 Output properties of the oscillator-amplifier system with a SFUR

	Output power of green line (W)	Polarization degree (%)	Width of pulse (ns)	Divergence $\theta_{80\%}$ (DL)
Oscillator with SFUR	0.5	99	20	2.5
Amplifier	6.7	97	25	4.6

3 高效铜激光倍频

BBO 晶体是优良的紫外倍频晶体,它不仅具有相对高的非线性光学系数,而且有高的破坏阈值和低的吸收率。采用波长为 510.6 nm 的铜激光作基频光,BBO 晶体的相位匹配角为 50.6 °C,离散角为 4.9 °C。

铜激光倍频效率正比于基频光峰值功率密度的平方,然而最高峰功率密度受 BBO 晶体破

自滤波振荡行波放大的铜激光系统的实验装置如图 1 所示,振荡器采用自滤波非稳腔(SFUR),其结构特点是在放大倍率 $M = 70$ 的负支非稳腔的基础上,将直径为 0.22 mm 的滤波小孔 FA_1 插入在紧靠后腔板的位置上,前后腔板均为凹面镜,它们的曲率半径分别为 3500 mm 及 50 mm,腔长为 1.7 m。SFUR 的设计及输出特性已在文献[6]中作了详细描述。为了获得偏振光输出,在 45°斜孔板及滤波小孔 FA_1 之间插入一块洛匈棱镜 *PBS* 作为起偏器。

振荡器与放大器的通光口径及激活区长度分别为 $\phi 20 \times 580$ mm 及 $\phi 30 \times 890$ mm。为了使振荡器与放大器的通光口径匹配,采用由两块焦距分别为 2 m 及 3 m 的透镜组成扩束望远镜,并在扩束望远镜的焦点处放置一个直径为 0.8 mm 的滤波小孔 FA_2 ,滤除振荡器输出光中放大的自发辐射。调节振荡器与放大器的同步,使行波放大后输出激光功率最大。自滤波振荡行波放大的激光系统的输出特性在文献[7]中已有详细描述,现将主要结果列于表 1。在放大器的输出端有一块透过绿光(510.6 nm)全反黄光(578.2 nm)的分光板 *DF*,将激光器输出的两种波长的激光分开。在重复频率为 6 kHz 时,获得了发散角为 4.6 倍衍射极限,偏振度为 97%,绿光输出为 6.7 W 的铜激光。铜激光及其倍频光功率采用 Coherent 公司制造的 LM100 型功率计测量,光束方向性采用“套孔法”测量,并定义光束发散角 $\theta_{80\%}$ 为包含输出光总功率的 80% 所对应的全角发散角,本文所指的衍射极限(DL)发散角为全角, $\theta = 2.44(\lambda/D)$, $\lambda = 510.6$ nm。

坏阈值的限制,我们的实验结果表明:BBO晶体的体破坏阈值在 $0.3\sim 0.4\text{ GW/cm}^2$ 。为了获得足够高的铜激光功率密度,通常采用点聚焦或线聚焦两种方案。BBO晶体的相位匹配容许角宽度在两个角度调谐平面内是不一致的^[2],就铜激光而言,在一个角度调谐平面内相位匹配容许角宽度很小,约 0.38 mrad ,而在另一个角度调谐平面内相位匹配容许角宽度则很大,约 31 mrad ,因此采用线聚焦能使光束在相位匹配敏感的平面内保持基本平行,而在另一个角度调谐平面内则以较大的角度会聚于BBO晶体内部,形成一细线,保持住一定的功率密度,故线聚焦比点聚焦有更高的倍频效率。在CVL的重复频率为 6 kHz 时,实验比较了点聚焦与线聚焦的倍频效率,结果如表2所示。线聚焦由三块柱面镜 L_1, L_2, L_3 组成,柱面镜 L_1 与 L_2 组成收缩望远镜,它们的焦距分别为 1.0 m 及 75 mm 。柱面镜 L_3 的焦距为 0.6 m ,它的会聚方向与 L_1, L_2 的会聚方向成 90° ,将激光尖锐地聚焦于BBO晶体内部,形成一条长 2.3 mm 的细线。

Table 2 Comparison of the SHG efficiency of CVL adapting a circular focus and a line focus at 6 kHz and 5 kHz

	Repetition rate (kHz)	Output Power of green line (W)	Width of pulse (ns)	Divergence $\theta_{1/e}$ (mrad)	Density of peak power (MW/cm ²)	SHG efficiency (%)
Circular focus	6	8.2	25	0.09	217	9.3
Line focus	6	7.4	25	0.09	40.3	11.9
Line focus	5	5.4	25	0.09	34.7	14.4

假设焦点处光强为高斯分布时,光束发散角 $\theta_{1/e}$ (取光强 $1/e$ 的全宽)为包含输出光总功率的 57% ,在此基础上计算出CVL的峰值功率密度。当基频光的功率为 7.4 W ,即峰值功率密度为 40.3 MW/cm^2 时,获得了 0.88 W 的紫外倍频光,其转换效率为 11.9% 。

点聚焦是将一块焦距为 2.0 m 的圆透镜替换三块柱面镜 L_1, L_2, L_3 ,当基频光功率为 8.2 W ,即峰功率密度为 217 MW/cm^2 时,获得了 0.76 W 的紫外倍频光,其转换效率为 9.3% 。这说明:尽管点聚焦的功率密度比线聚焦时高,但在点聚焦方案中,基频光在BBO晶体相位匹配敏感的平面内,由于会聚角大而导致部分光相位失配,故倍频效率比线聚焦时低。

在线聚焦的情况下,实验还比较了CVL的重复频率为 6 kHz 与 5 kHz 时的倍频效率,结果如表2所示。尽管基频光峰值功率密度在 5 kHz 时比在 6 kHz 时低,但前者的倍频效率明显高于后者,从而证实CVL的高重复频率、高平均功率会引起晶体内部热温度梯度,导致部分光相位失配,倍频效率下降。

4 接触式光刻

为了探索用铜激光倍频光实现亚微米光刻的可行性,我们用铜激光倍频光进行了接触式光刻。实验装置如图1所示,BBO晶体产生的铜激光倍频光先经过一块石英透镜,将紫外光在一个平面内准直,在另一个平面内以 3.0 mrad 的发散角传播,并通过一块石英棱镜将基频光与倍频光分开。为了获得较均匀的光斑,在较大的光斑面积内取 $10\times 8\text{ mm}^2$ 的照射面积进行曝光,当紫外光的功率为 0.3 W ,重复频率为 5 kHz 时,取曝光时间 0.8 s ,紫外光刻胶厚为 $0.8\text{ }\mu\text{m}$,最终在掩膜板上获得了如图2(a)所示的图案,为了标定刻线分辨率,同时拍摄了分

分辨率为 $1.0\ \mu\text{m}$ 的标准膜板的照片,如图 2(b) 所示。比较图 2(a)、(b) 可知:初期的实验获得了高于 $1.0\ \mu\text{m}$ 的刻线分辨率。同时我们也发现,由于铜激光倍频光有良好的空间相干性,在硅片和光刻胶中有散斑及驻波效应。下一步我们将采用 $1:1$ 折反式光刻物镜实现亚微米光刻,并采用大数值孔径的物镜来消除铜激光良好的空间相干性对光刻精度的影响。

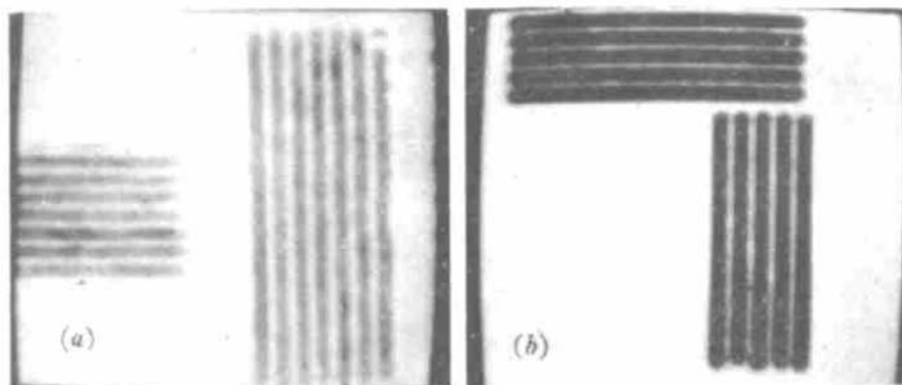


Fig. 2 Photographs from a part of the wafer (a) and a part of a master reticle (b) on which the resolution of lines is $1.0\ \mu\text{m}$

参 考 文 献

- 1 Y. Ichihara, S. Kawata, I. Hikima *et al.*. Illumination system of an excimer laser stepper. *Proc. SPIE*, 1989, 1138: 137
- 2 D. W. Coutts, J. A. Piper. One watt average power by second harmonic and sum frequency generation from a single medium scale copper vapor laser. *IEEE. J. Quant. Electr.*, 1992, QE-28: 1761
- 3 用硼酸钡(BBO)产生铜蒸气激光的二次谐波. *国外激光*, 1991, (9): 26
- 4 任 虹, 梁培辉, 沈琪敏 等. 用自滤波及注入锁定提高铜蒸气激光在 BBO 晶体中的倍频效率. *中国激光*, 1993, A20(11): 805
- 5 R. Pini, R. Salimbeni, G. Toci *et al.*. High-efficiency second-harmonic generation in BBO by a diffraction-limited copper vapor laser. in *Conference of Lasers and Electro-Optics*, 1991, Paper CTuW19
- 6 任 虹, 梁培辉, 叶 韧 等. 自滤波铜蒸气激光器的研究. *光学学报*, 1994, 14(10): 1017
- 7 任 虹, 梁培辉, 叶 韧 等. 自滤波振荡行波放大的铜激光系统. *中国激光*, 1995, A22(3): (待发表)

High-efficiency Second-harmonic Generation of a Copper Vapor Laser in BBO and Its Application in Photolithography

Ren Hong Liang Peihui Lu Dunwu Ye Ren Cui Ziqiang

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Shanghai 201800)

Abstract A second-harmonic of a copper vapor laser which is output from an oscillator-amplifier system with a self-filtering unstable resonator is generated in BBO crystal by a line focus. The conversion efficiency reached 14.4% at 5.4 W fundamental power. A pattern of $1.0\ \mu\text{m}$ lines and spaces is resolved by contact photolithography on 255.3 nm line for the first time.

Key words copper vapor laser, second-harmonic generation, photolithography