

文章编号: 0258-7025(2004)07-0785-04

一种改善准分子激光光束均匀性的 新型均匀器

李红霞, 楼祺洪, 董景星, 叶震寰, 魏运荣, 凌 磊

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘要 准分子激光作为当前光刻装置的主要光源, 要求其输出激光光束强度分布尽量均匀。为了改善其光束强度分布的均匀性, 介绍了一种新型梯形棱镜式准分子激光光束均匀器。从理论上分析了其工作原理及设计加工要求, 计算了最佳均匀截面位置, 并与普通棱镜均匀器进行了比较。实验中根据经梯形棱镜折射后光束能量在中间较强光束的本底基础上进行三分互补叠加的原理, 实现了其与普通棱镜均匀器在二维方向上的组合使用; 通过调节均匀器与接收屏之间的距离并同时记录每一位置处光束光斑的能量分布改善情况, 确定了最佳均匀截面位置并与理论计算相吻合。利用其改善准分子激光器输出光束强度的分布, 起伏优于 4%, 其均匀效果优于普通棱镜均匀器。

关键词 激光技术; 准分子激光; 光束均匀器; 梯形棱镜; 平顶因子

中图分类号 TN 248.2⁺2 **文献标识码** A

A Novel Homogenizer to Improve the Excimer Laser Beam Uniformity

LI Hong-xia, LOU Qi-hong, DONG Jing-xing, YE Zhen-huan, WEI Yun-rong, LING Lei

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract The excimer laser as the main light source of photolithographic device, whose energy distribution is required as homogeneous as possible. In order to improve the uniformity of its output energy density, this paper describes a novel trapezoid prism homogenizer. The working principle and the design requirement of the novel trapezoid prism are analyzed in theory. The optimal position of uniform section is calculated, and compared with the normal prism homogenizer. According to the theory that the beam energy refracted by the trapezoid prism is divided into 3 parts then overlapped in the base of the middle high energy, it realizes the use of association with the normal prism in two-dimensional. By means of adjusting the distance from homogenizer to receive screen, the optimal position of uniform section is determined which agreed with the theoretical calculation. Using this novel homogenizer, the fluctuation of beam uniformity of XeCl excimer laser is less than 4%, it is better than that obtained by using a normal prism homogenizer.

Key words laser technique; excimer laser; beam homogenizer; trapezoid prism; top-hat factor

1 引 言

准分子激光器作为紫外波段最有效的光源之一, 由于其波长短, 脉冲功率密度高, 脉宽窄及弱相干性等优点, 在半导体工艺及微电子微光学工业中得到广泛应用, 而这些应用, 都要求准分子激光器输

出的光束强度分布尽量均匀^[1,2]。

准分子激光的光场分布不同于普通的单模高斯光场分布, 光斑通常呈矩形, 纵横方向光强分布规律不同。一般在长边方向上具有平顶分布 (Top-Hat), 另一方向上则是近高斯分布、近平顶分布或介于二者之间。尽管准分子激光光场分布的均匀性

收稿日期: 2003-03-28; 收到修改稿日期: 2003-06-10

基金项目: 上海市科技发展基金(021111000)和国家 863ICF 基金(863-804-6-2)资助项目。

作者简介: 李红霞(1978—), 女, 山东安丘人, 中国科学院上海光学精密机械研究所硕士研究生, 主要从事紫外准分子激光的光束均匀性和激光的窄谱线压缩及相关技术研究。E-mail: lihongxia@mail.siom.ac.cn

已经比一般的非准分子激光的均匀性要好,但由于准分子激光器在大体积、高电压、高压状态下运转,容易导致放电增益不均匀,而且若工作气体比例改变,则在输出脉冲能量变化的同时,光束截面的强度分布也发生相当大的变化^[3],致使输出光强分布起伏较大,距离实际应用还有一定的差距。为了改善激光光束质量,人们进行了大量的理论和实验研究,并已发展了一些方法:两级复眼式均匀器^[4]需要高精密的加工技术,价格昂贵;矩形波导管均匀器^[5]制作简单,装调简易,但光能损失较大;楔形镜折叠光束式均匀器^[6]则装调较为困难。本文在普通棱镜均匀器的基础上,设计出一种梯形棱镜均匀器。通过使光束边缘部分在中间较强光强的本底基础上进行互补叠加,从而达到光束均匀性的进一步提高。

2 光束均匀器工作原理及设计实例

光束均匀器的工作原理如图 1 所示。一光强分布近似为高斯分布的准平行光束入射到梯形棱镜上,被分为三部分。其中,中间光强较强部分 I_1 垂直通过棱镜未发生偏折而直接出射,两侧光强较弱部分 I_2 和 I_3 ,通过梯形棱镜两腰折射,产生角位移向光轴方向偏折而互补叠加于光束中间部分,在距棱镜某一特定位置处达到光束均匀。由图 1 可以看出,光斑能量分布均匀的截面位置与棱镜夹角有关。夹角越大,光束偏折效果越强,从而均匀截面到棱镜的距离 L 越小。

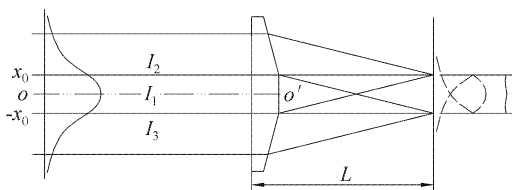


图 1 梯形棱镜均匀器工作原理图

Fig. 1 Scheme of the working principle of the trapezoid prism

图 2 为光束叠加原理图。入射光束光强分布近似为高斯函数分布

$$I(x) \approx A \exp(-2x^2/a^2)$$

通过梯形棱镜均匀器后,光束两侧光强较弱部分在中间较强光强的本底基础上进行互补叠加,从而使大范围的光强差别被填平。在光强分布曲线上

$$I_1(x) \approx A \exp(-2x^2/a^2)$$

叠加于光束中间部分的两侧光强较弱部分 I_2 和 I_3

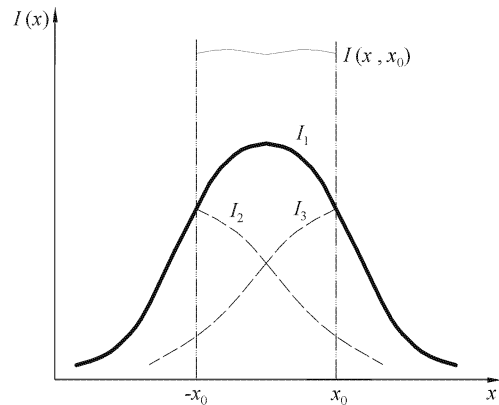


图 2 经梯形棱镜均匀器折射后光束能量叠加分布图

Fig. 2 Scheme of energy overlapping of incident beam with intensity-distribution refracted by the trapezoid prism

表达式分别为

$$I_2(x) \approx A \exp[-2(x+2x_0)^2/a^2]$$

$$I_3(x) \approx A \exp[-2(x-2x_0)^2/a^2]$$

其中, $-x_0 \leq x \leq x_0$, 从而出射光束的光强分布

$$I(x, x_0) \approx \exp(-2x^2/a^2) + \exp[-2(x+2x_0)^2/a^2] + \exp[-2(x-2x_0)^2/a^2] \approx I_1(x) + I_2(x, x_0) + I_3(x, x_0)$$

其中, $-x_0 \leq x \leq x_0$ 。

梯形棱镜均匀器用石英玻璃作光学材料,两折射面分别作光学加工。使用 308 nm XeCl 准分子激光器,输出光斑截面为 30 mm×20 mm,所设计梯形棱镜在水平长边方向上对光斑均匀性进行改善, $-x_0, x_0$ 位置取为光斑水平方向三等分处,楔角为 17°,由几何光学理论计算得均匀截面到棱镜距离为 63 mm,以实现与已有的楔角为 15°普通棱镜的组合使用及比较。

3 实验方法

实验是在紫外预电离放电抽运 XeCl 准分子激光器上进行的,工作气体为 HCl·Xe·Ne。XeCl 准分子激光器在工作气体 HCl 所占百分含量不同情况下,光束截面的强度分布也有相当大的变化。通过改变 HCl 所占百分比,可以使激光器输出原始光斑的强度分布均匀性达到最佳。而且,由于棱镜式均匀器对光束光斑均匀性的改善是在非相干光的基础上,使光斑不同光强部分互相混合叠加,通过能量叠加而实现的,获得均匀光束截面的位置对应于光楔的夹角。在实验中,首先调节工作气体中 HCl 的含

量,得到均匀性最佳的原始光斑,在此基础上,对在光路中分别放置普通棱镜及梯形棱镜的方法进行比较。

在初始充气总气压为 3.5×10^5 Pa, HCl 含量为 0.7% 的情况下,采取每次抽取一定量的混合气体,同时充入相同量的缓冲气体 Ne 气的方法,降低工作气体中 HCl 的含量,并记录每次输出光束光斑的能量分布情况,即可得到 HCl 的最佳含量,在此含量下准分子激光器输出光斑均匀性最佳。保持 HCl 的最佳含量不变,移动棱镜,调节棱镜到接收屏的距离 L ,同时记录棱镜每一位置处光束光斑的能量分布改善情况,即可得到均匀器对光束均匀性改善的最佳位置。光路如图 3 所示。在光路中最佳位置处,垂直方向即光斑短边上放置一普通棱镜均匀器固定不动。在水平方向上,则先后分别放置普通棱镜均匀器与梯形棱镜均匀器,对光束进行改善,光束会聚于玻璃屏上由 CCD 接收并进行处理比较。在实验过程中,由能量计观测每个脉冲的能量,并通过调节衰减器保证每次光斑的能量值维持恒定。

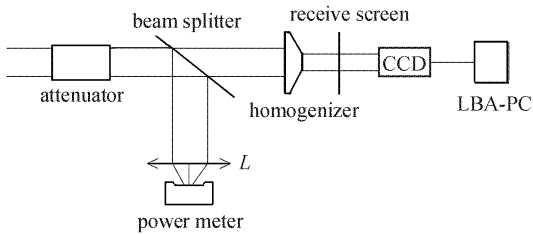


图 3 均匀器实验光路图

Fig. 3 Scheme of the experimental setup with a beam homogenizer

4 实验结果

光强分布的均匀性用平顶因子来衡量^[7],公式为

$$F = \frac{\sum_{f=1}^{PK-1} \frac{E_f + E_{f+1}}{2}}{PK}$$

其中, f 为阈值能量, PK 为峰值能量, E_f 为某一阈值能量之上的能量分数。它描述了整个光斑能量分布范围内的整体均匀效果。理想的具有平顶形状的光束,均匀性最好,平顶因子值为 1。因此,实际光束平顶因子数值越接近于 1,说明光束的均匀性越好。由科学 CCD 接收原始光斑及经整形均匀后的光斑,用美国 Spricon Inc 公司生产的 LBA-PC 型激光波面分析仪捕捉和处理信号,得到通过光斑形心

的 x 和 y 方向的光强分布曲线图及 3D 伪色彩图,并计算出光斑的平顶因子值。

图 4 为光束平顶因子随工作气体比例变化的关系图。由实验可得当工作气体总气压为 3.5×10^5 Pa 情况下, HCl 含量为 0.14% 时准分子激光器输出原始光斑均匀效果最好。图 5 给出了光束平顶因子随棱镜到接收屏的距离 L 变化的关系图。当均匀器到接收屏距离较小时,偏折光束未完全重合,光束能量分布不均匀,随着距离的增大,均匀效果逐渐增强,在 55~65 mm 范围内,均匀性最佳,随着距离的进一步增大,重叠光束又开始分离,均匀效果减弱。这与根据楔角所进行的理论计算结果相符。

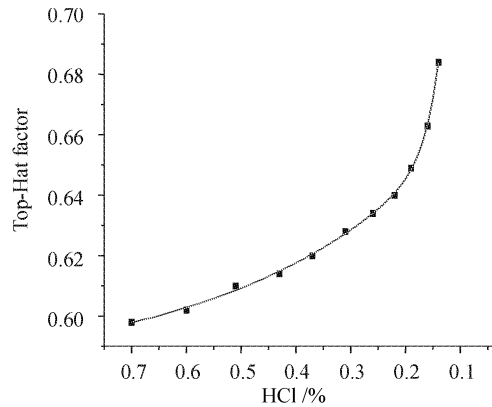


图 4 平顶因子随 HCl 含量变化关系示意图
Fig. 4 Relationship between the top-hat factor and the propotion of the working gas HCl

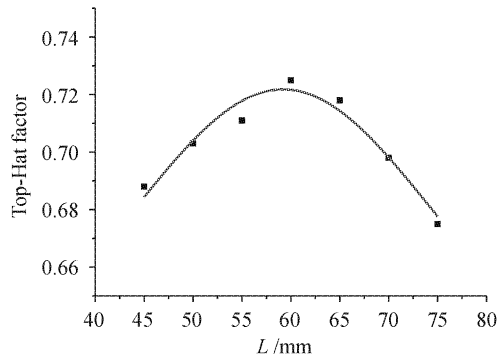


图 5 平顶因子随接收屏到均匀器间距离变化关系示意图

Fig. 5 Relationship between the top-hat factor and the distance from homogenizer to receive screen

原始光斑及分别通过普通棱镜和梯形棱镜均匀器整形后的光斑通过形心的 x 和 y 方向的光强分布曲线及 3D 伪色彩图如图 6~8 所示。普通棱镜及梯形棱镜均匀器改善后的光斑平顶因子分别为 0.747 和 0.83,经梯形棱镜式均匀器后改善效果提

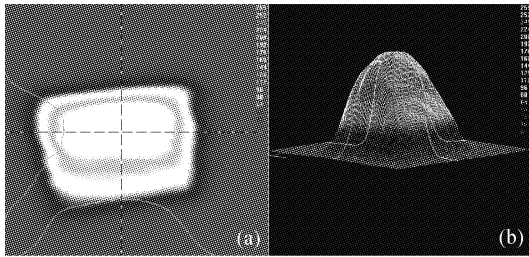


图6 原始光斑通过形心的 x 和 y 光强分布曲线(a)和光斑的 3D 伪色彩图(b)

Fig. 6 x and y profiles through the centroid (a) and the false color 3D-plot (b) without the homogenizer

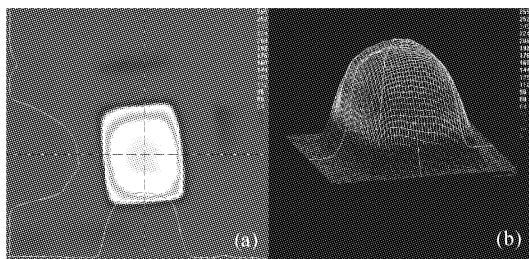


图7 通过普通棱镜均匀器后输出光斑通过形心的 x 和 y 光强分布曲线(a)和光斑的 3D 伪色彩图(b)

Fig. 7 x and y profiles through the centroid (a) and the false color 3D-plot (b) behind the normal prism

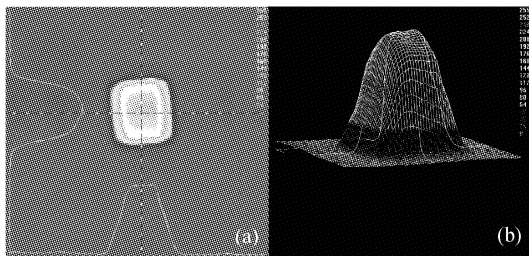


图8 通过梯形棱镜均匀器后输出光斑通过形心的 x 和 y 光强分布曲线(a)和光斑的 3D 伪色彩图(b)

Fig. 8 x and y profiles through the centroid (a) and the false color 3D-plot (b) behind the trapezoid prism

高达 11%，且输出平面上整个光束截面内光强起伏变化小于 4%。

5 结 论

梯形棱镜式准分子激光光束均匀器通过使边缘光束较弱部分在中间较强光强的本底基础上互补叠加,使光束均匀性效果比普通棱镜有较大提高。而且结构简单,设计加工方便,可以应用到各种类型的准分子激光器上,使激光光束分布均匀化。

参 考 文 献

- 1 Doh Hoon Kim, Byung-Ho Nam, Kag Hyeon Lee *et al.*. Probe beam scan type auto-focus system using position sensing detector for sub-half micron lithography tools [C]. *SPIE*, 1996, **2726**: 876~885
- 2 Doh Hoon Kim, Kag Hyeon Lee, Jong Soo Kim *et al.*. Performance of small field 193 nm exposure system [C]. *SPIE*, 1997, **3051**:922~932
- 3 Lou Qihong, Huo Yunsheng, Dong Jingxing *et al.*. Lifetime study of a transvers flow excimer laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 1987, **7**(6):481~485
楼祺洪,霍芸生,董景星等. 横流准分子激光器的寿命研究[J]. 光学学报, 1987, **7**(6):481~485
- 4 Li Chengde, Chen Tao, Zuo Tiechuan. Design of fly's eye homogenizer for excimer laser micromachining [J]. *Chinese J. Lasers*, 1999, **A26**(6):560~564
李呈德,陈涛,左铁钊. 两级复眼式准分子激光微加工均匀器的设计[J]. 中国激光, 1999, **A26**(6):560~564
- 5 Gao Hongyi, Lou Qihong, Dong Jingxing *et al.*. Beam homogenizer for XeCl excimer laser and its applications [J]. *Acta Optica Sinica*, 1996, **16**(10):1379~1382
高鸿奕,楼祺洪,董景星等. 准分子激光光束均匀器及其应用[J]. 光学学报, 1996, **16**(10):1379~1382
- 6 M. R. Latta, K. Jain. Beam intensity uniformization by mirror folding [J]. *Opt. Commun.*, 1984, **49**(6):435~439
- 7 G. Klauminzer, C. Abele. Excimer lasers need specifications for beam uniformity [J]. *Laser Focus World*, 1991, **27**(5):153~158