

用于光谱控制的棱镜扩束装置精密装调特性分析

王倩^{1,2,3}, 赵江山^{1,2}, 周翊^{1,2*}

¹中国科学院光电研究院, 北京 100094;

²北京市准分子激光工程技术研究中心, 北京 100094;

³中国科学院大学, 北京 100094

摘要 线宽压窄模块是光刻用准分子激光器的重要组成部分。线宽压窄模块中棱镜组及光栅的装配角度直接影响系统输出特性。为了进一步改进准分子激光器线宽压窄模块工程化安装与调试工艺,研究了棱镜扩束器中棱镜角度偏差对系统线宽及能量的影响。通过理论推导及实验验证,分析了单个棱镜角度偏转对准分子激光系统线宽及能量的影响,确定了每个棱镜的装调误差;实验结果与理论分析结果基本符合。根据确定的装调误差优化设计线宽压窄模块的装调方法,对模块的光谱控制工程化具有一定的指导意义。

关键词 激光器; 准分子激光器; 窄线宽; 棱镜扩束器; 装调误差

中图分类号 TN248

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0401012

Analysis on Precision Assembly Characteristics of Prism Expander Applied to Spectrum Control

Wang Qian^{1,2,3}, Zhao Jiangshan^{1,2}, Zhou Yi^{1,2}

¹Academy of Opto-Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;

²Beijing Excimer Laser Technology and Engineering Center, Beijing 100094, China;

³University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China

Abstract Linewidth narrowing module is an important component of excimer laser for lithography. The installation angles of prisms and gratings affect the system output characteristics directly. In order to improve installation and debugging technique of linewidth narrowing module, we study the influence of the angle deviation of the prism in the prism expander on the energy and linewidth of the system. Through the theoretical derivation and experimental verification, we analyze the influence of individual prism angle deflection on the energy and linewidth of the excimer laser system, and determine the alignment error of each prism. The experimental results are in good agreement with the theoretical analysis results. The alignment method for optimizing the linewidth narrowing module design according to the alignment error has guiding significance for the spectrum control engineering.

Key words lasers; excimer laser; narrow linewidth; prism expander; alignment error

OCIS codes 140.2180; 300.3700; 230.5480

1 引 言

光刻是利用光将掩模板上的特征图样投影给晶圆的过程。准分子激光器以其激光运转频率高、输出脉冲能量大、可实现窄线宽控制等特点成为目前国际半导体光刻机的主流光源^[1]。窄线宽是光刻光

源的突出特性,可以减少光刻过程中由色差带来的影响。由准分子激光器放电腔出射的激光光谱宽度达几百皮米^[2],无法满足光刻的要求[激光光谱的半峰全宽(FWHM)不大于 0.3 pm,包含 95%能量的光谱宽度不大于 1 pm],因此需要对光谱进行线宽窄化控制。基于准分子激光器中的典型线宽压窄控

收稿日期: 2017-09-30; 收到修改稿日期: 2017-11-08

基金项目: 国家科技重大专项(2013ZX02202)

作者简介: 王倩(1987—),女,博士研究生,工程师,主要从事准分子激光方面的研究。E-mail: wq@aoe.ac.cn

导师简介: 周翊(1970—),男,博士,研究员,主要从事准分子激光方面的研究。E-mail: zhouyi@aoe.ac.cn(通信联系人)

制方案,常采用棱镜扩束器和光栅组合的结构^[3],棱镜扩束器对光束进行一维准直和扩束^[4],光栅用于激光波长的选择和调谐^[5]。

国内外研究者对准分子激光器的线宽压窄技术及棱镜扩束器的优化设计做过诸多研究^[6-7]。棱镜扩束器的扩束倍率是影响激光器最终输出线宽的重要因素,扩束倍率由光束在棱镜表面的入射角及棱镜角度决定。根据目标线宽需求,通过优化棱镜顶角、光束入射角、光束出射方向、棱镜材料及晶格方向来保障扩束倍率,以实现目标线宽。在以往的棱镜安装调试过程中,保证棱镜精确安装角度需要复杂精密的工具,调试时间较长,不利于产品工程化。因此,系统深入研究棱镜安装角度误差对系统线宽及系统输出能量的影响,能够在误差允许范围内简化装调方式,从而有利于产品工程化的开展。

本文以光刻用氟化氩(ArF)准分子激光器线宽压窄模块中的棱镜扩束器为例,分析了单个棱镜角度误差对线宽及系统输出能量的影响,该研究对基于光谱控制的线宽压窄模块工程化装配具有一定的指导意义。

2 基本原理

ArF 准分子激光器线宽压窄模块结构如图 1 所示。

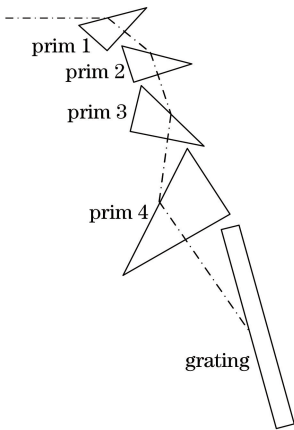


图 1 线宽压窄模块结构示意图

Fig. 1 Structural diagram of linewidth narrowing module

模块采用四棱镜(直角棱镜)-光栅系统。输出激光线宽的计算公式为

$$\Delta\lambda = \Delta\theta \left[\sqrt{NM} \left(\frac{\partial\theta_G}{\partial\lambda} \right)_G + \sqrt{N} \left(\frac{\partial\theta_P}{\partial\lambda} \right)_P \right]^{-1}, \quad (1)$$

式中 N 为在激光脉冲宽度时限内光束在腔内的往返次数; $\Delta\theta$ 为激光光束发散角; θ_G 为光栅色散角; θ_P 为棱镜色散角; M 为扩束倍率,其计算公式为

$$M = \prod_{i=1}^N \frac{\cos\phi_i \cos\gamma_i}{\cos\theta_i \cos\mu_i}, \quad (2)$$

式中 ϕ_i 为入射面折射角, γ_i 为出射面折射角,下标 i 表示棱镜次序, θ_i 为入射面入射角, μ_i 为出射面入射角。在棱镜色散为 0 及顶角确定的前提下,根据以往实验数据,可以得到输出激光线宽与入射角的经验公式为

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda_0 \theta_0}{1.7\sqrt{N} \tan\beta} \prod_{i=1}^N \frac{\cos\theta_i \cos\mu_i}{\cos\phi_i \cos\gamma_i}, \quad (3)$$

式中 λ_0 为激光中心波长, θ_0 为光束发散角, β 为光栅闪耀角。光束入射棱镜角度示意图如图 2 所示。

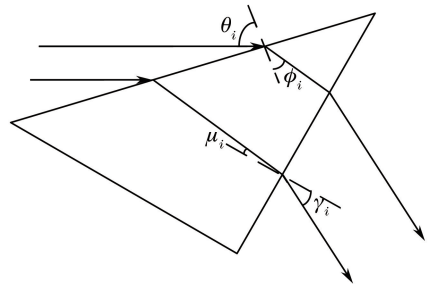


图 2 光束入射棱镜角度示意图

Fig. 2 Diagram of beam incident angle to prism

定义光束传播所在的平面为水平面,棱镜在水平面内的偏转为左右偏转,在与其垂直的平面内的偏转为俯仰偏转,如图 3 所示。单个棱镜的左右偏转、俯仰偏转,棱镜组整体的左右偏转、俯仰偏转以及光栅的角度均会影响系统的线宽及能量。根据实际需求,主要讨论单个棱镜左右偏转带来的影响。

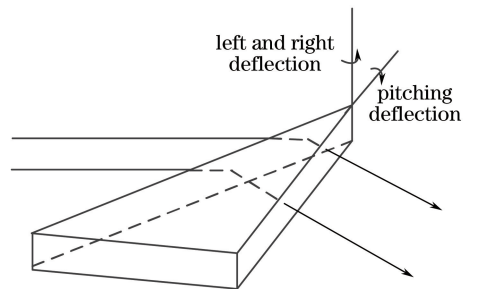


图 3 棱镜左右偏转及俯仰偏转角度示意图

Fig. 3 Diagram of left and right deflection and pitching deflection of prism

在装配过程中,光束在前序棱镜的入射角发生变化时,会影响后序光束在后续棱镜的入射角,进而改变光束的传播方向,影响系统输出能量及线宽。通过几何光学追迹计算方法可以得到光束在前序棱镜入射角与后续棱镜入射角间的关系,即

$$\theta_{i+1} = \theta_{\text{set}} + \gamma_i - \gamma'_i, \quad (4)$$

式中 θ_{set} 为光束在棱镜表面入射角的设计值, γ'_i 为光束入射角发生变化后在出射面的折射角。前序光束入射角变化对后序光束入射角的影响如图 4 所示。

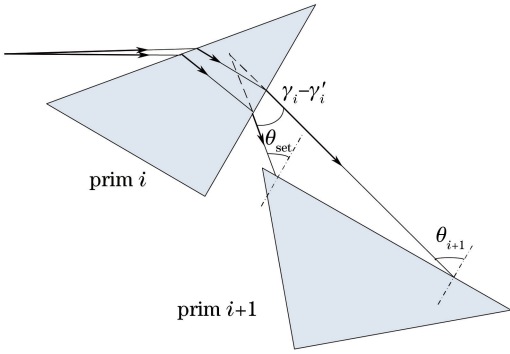


图 4 前序光束入射角变化对后序光束入射角的影响
Fig. 4 Effect of preorder beam incident angle change on postorder beam incident angle

假设棱镜顶角为 40.1° , 入射角为 71.6° , 棱镜组内各棱镜的相对位置保持不变, 光束在不同棱镜表面的入射角发生变化时, 线宽变化率随入射角的变化略有不同。扩束倍率变化率及线宽变化率从第 1 个棱镜到第 4 个棱镜依次减小, 前 2 个棱镜对线宽的影响最大, 第 4 个棱镜的角度变化对线宽的影响最小, 具体情况如表 1 所示。

棱镜左右偏转引起光束在棱镜表面的入射角发生变化, 进而影响光束的传播方向。当某个棱镜左右有微小偏转时, 可以通过调节光栅的角度保证光束传输不受影响。若棱镜偏转角度较大, 光束将偏移出光学元件的通光孔径, 造成能量损耗。

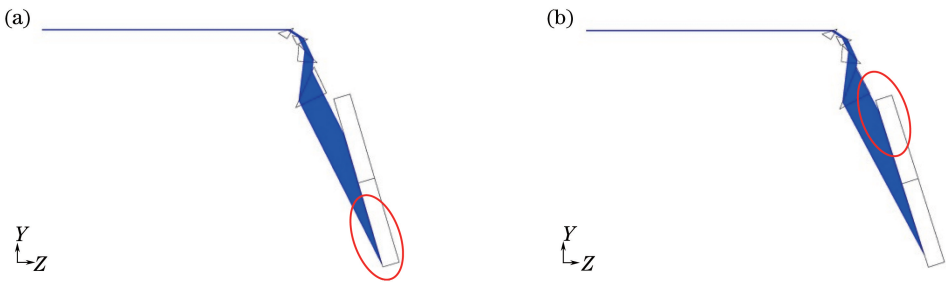


图 6 棱镜发生左右偏转时的光路传输示意图。(a) 光束在光栅的右边缘; (b) 光束在光栅的左边缘
Fig. 6 Diagram of optical path transmission under left and right deflection of prism.

(a) Beam is on right edge of grating; (b) beam is on left edge of grating

综上所述, 棱镜左右偏转会带来线宽和能量的变化, 且每个棱镜的转动对线宽及能量的影响并不相同。从计算结果来看, 线宽对于棱镜左右偏转的敏感性略高于能量, 综合考虑实际情况中对线宽及能量的需求, 确定棱镜 1~4 的左右偏转角度误差分别为 0.5° , 0.5° , 0.6° 和 1.0° 。

表 1 棱镜角度变化与线宽变化

Table 1 Changes of prism angle and linewidth

Prism	Variation in prism angle when linewidth changes $0.01 \text{ pm}/(^\circ)$	Variation in linewidth when angle changes $1^\circ/\text{pm}$
1	0.5	0.0189
2	0.5	0.0178
3	0.6	0.0153
4	1.0	0.0100

下面分析每个棱镜的左右偏转对光路的影响。在理想情况下, 光路仿真情况如图 5 所示。光束可以穿过棱镜照射在光栅上, 光栅可以完全接收光束并使其按原路返回。

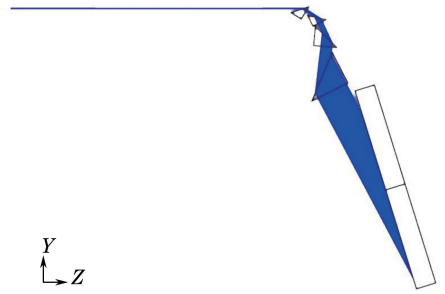


图 5 线宽压窄模块光路传输示意图

Fig. 5 Diagram of optical path transmission in linewidth narrowing module

使单个棱镜发生左右偏转, 其余棱镜保持位置不变, 观察光束传输情况。当棱镜偏转角度过大时, 光束照射在光栅边缘, 如图 6 所示。光束照射到光栅边缘时, 每个棱镜左右偏转的角度如表 2 所示。

3 实验结果

为了测量在目标输出线宽的条件下, 单个棱镜左右偏转对激光线宽和能量的影响, 在线宽压窄模块四棱镜扩束系统加光栅结构的基础上, 固定前 3 个棱镜的入射角, 第 4 个棱镜的入射角可以在 $70^\circ \sim$

表 2 光束照射到光栅边缘时棱镜左右偏转角度

Table 2 Left and right deflection angles when beam irradiates to edge of grating

Prism	Deflection angle / (°)	
	Irradiate to left edge of grating	Irradiate to right edge of grating
1	0.5	-0.6
2	0.6	-0.9
3	0.6	-4.7
4	1.5	-0.5

74°范围内调节,在调节第 4 个棱镜左右偏转角度的过程中,同时监测并记录激光输出光谱和能量。在测量线宽和能量的过程中,保证激光输出波长在1 pm范围内变化。实验装置如图 7 所示。在输出耦合镜(OC)前放置半反半透镜,透射光束直接照射到能量计上,用于监测激光器的输出能量;反射光束进入高分辨率中阶梯光栅光谱仪[ELIAS III 型, Lasertechnik Berlin 公司(LTB),德国],用于监测激光器线宽变化情况。具体测量结果如表 3 和图 8 所示。

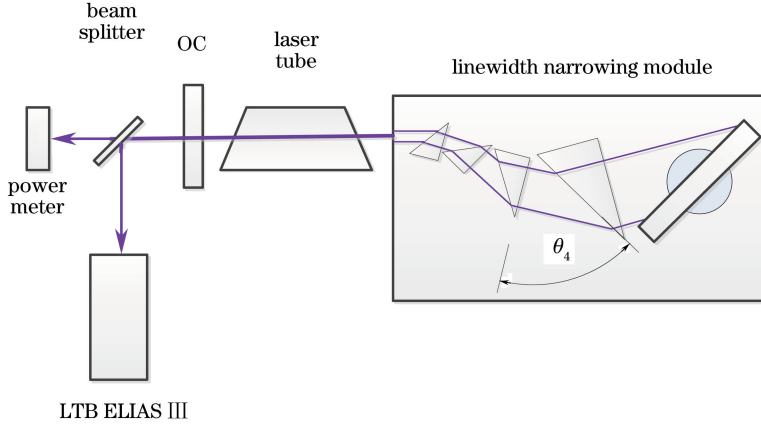


图 7 棱镜入射角度与线宽测量光路图

Fig. 7 Incident angle of prism and optical path of linewidth measurement

表 3 第 4 个棱镜左右偏转时能量 E 及 FWHM 测量结果

Table 3 Measurement results of energy E and FWHM under left and right deflection of prism 4

$\theta_4 / (^\circ)$	E / μJ	FWHM (average value in 60 s) / pm
74	111	0.972
73	110	0.985
72	112	1.000
71	113	1.020
70	115	1.047

增加。在入射角度增加的过程中,输出激光线宽逐渐减小,输出能量略有增加。以 72°入射角为例,角度变化 $\pm 1^\circ$ 对应的线宽变化约为 0.02 pm,激光输出能量变化可以忽略不计。综合考虑棱镜左右偏转对激光线宽及能量的影响,将第 4 个棱镜的装配误差控制在 $\pm 1^\circ$ 是合适的。以上实验结果与计算分析结果相符。

4 结 论

由以上理论分析及实验结果可以看出,激光线宽对棱镜角度左右偏转较为敏感,且对不同棱镜的敏感度不同。第 1 个棱镜左右偏转角度偏差超过 0.5°,线宽变化超过 0.01 pm;第 4 个棱镜左右偏转角度偏差超过 1°,线宽变化超过 0.01 pm。在实际线宽压窄模块的调节过程中,可以通过调节第 1、2 个棱镜粗调线宽,通过调节第 3、4 个棱镜对线宽进行精细调节。在装配过程中,应将单个棱镜的角度偏转误差控制在 $\pm 0.5^\circ$ 以内,以得到最佳的能量和线宽输出。

针对准分子激光器线宽压窄模块中棱镜扩束器角度偏差对系统线宽及能量的影响进行了理论分析和实验验证,确定了棱镜扩束器角度装配误差。根据

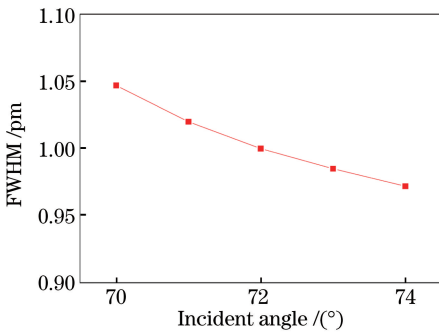


图 8 线宽随第 4 个棱镜入射角的变化

Fig. 8 Relationship between incident angle to prim 4 and linewidth

由以上实验结果可以看出,随着第 4 个棱镜发生左右角度偏转,光束在此棱镜上的入射角度逐渐

确定的棱镜装配误差可以进一步优化设计棱镜角度装配系统及装调方法,该研究对光刻准分子激光器线宽压窄模块的工程化装配具有一定的指导意义。

致谢 感谢中国科学院上海光学精密机械研究所袁志军、张海波为本工作提供的指导及帮助。

参 考 文 献

- [1] Stamm U, Paetzel R, Kleinschmidt J, *et al.* ArF excimer laser for 193-nm lithograph [C]. SPIE, 1998, 3334: 1010-1013.
- [2] Basting D, Marowsky G. Excimer laser technology [M]. Berlin: Springer-Verlag, 2005: 182-190.
- [3] Zhang H B, Lou Q H, Zhou J, *et al.* ArF excimer laser line narrowing technique[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2009, 46(12): 46-51.
张海波, 楼祺洪, 周军, 等. ArF 准分子激光器线宽压缩技术[J]. 激光与光电子学进展, 2009, 46(12): 46-51.
- [4] Barr J R M. Achromatic prism beam expanders[J]. Optics Communications, 1984, 51(1): 41-46.
- [5] Loewen E, Maystre D, Popove E, *et al.* Diffraction efficiency of echelles working in extremely high orders [J]. Applied Optics, 1996, 35(10): 1700-1704.
- [6] Zhang H B, Yuan Z J, Zhou J, *et al.* Optimal design of prism beam expander in line narrowed excimer laser cavity[J]. Chinese Journal of Lasers, 2011, 38(11): 1102008.
张海波, 袁志军, 周军, 等. 窄线宽准分子激光腔内棱镜扩束器的优化设计[J]. 中国激光, 2011, 38(11): 1102008.
- [7] Shan Y Y, Zhao J S, Li H, *et al.* Application study on fused silica prisms in excimer laser spectrum control[J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(4): 0402008.
单耀莹, 赵江山, 李慧, 等. 熔融石英棱镜在准分子激光光谱控制系统中的应用研究[J]. 中国激光, 2013, 40(4): 0402008.