

# 窄线宽准分子激光腔内棱镜扩束器的优化设计

张海波<sup>1,2</sup> 袁志军<sup>1\*</sup> 周 军<sup>1</sup> 董景星<sup>1</sup> 魏运荣<sup>1</sup> 楼祺洪<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海市全固态激光器与应用技术实验室, 上海 201800)  
<sup>2</sup>中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘要** 棱镜扩束器(PBE)广泛用在准分子激光腔内光谱压窄系统中,可以有效降低光束发散角和系统内能量密度。为了实现窄线宽激光输出并降低腔内损耗,需要对棱镜扩束器的棱镜个数、单棱镜扩束倍数和棱镜顶角进行优化设计。根据棱镜扩束倍数的理论,数值分析了入射角、顶角和出射角对棱镜扩束倍数的影响,并在实验上很好地验证了扩束倍数与入射角的关系。此外,推导了激光器线宽压窄系统实现一定激光线宽输出所需的总棱镜扩束倍数。优化设计了扩束倍数  $M$  为 13.3 的氟化钙消色散棱镜扩束器,在此基础上,实现了 0.915 pm 的窄线宽 ArF 激光输出,实验结果与理论设计吻合。

**关键词** 激光器;准分子激光器;棱镜扩束器;扩束倍数

**中图分类号** TN242;TN248.2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.1102008

## Optimal Design of Prism Beam Expander in Line Narrowed Excimer Laser Cavity

Zhang Haibo<sup>1,2</sup> Yuan Zhijun<sup>1</sup> Zhou Jun<sup>1</sup> Dong Jingxing<sup>1</sup>  
Wei Yunrong<sup>1</sup> Lou Qihong<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> Shanghai Key Laboratory of All Solid-State Laser and Applied Techniques, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)  
<sup>2</sup> Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract** Prism beam expander (PBE) is widely used in the spectral narrowing module of excimer lasers. The beam divergence and fluence could be reduced by the prism beam expander. The prism number, magnification of single prism and apex angle of the PBE should be optimized to improve the efficiency of the laser. Based on the magnification theory of the prism, the impact of the incidence angle, apex angle and exit angle of the prism on magnification are analyzed by numerical simulation. The dependence of magnification on incidence angle is demonstrated experimentally. Furthermore, to achieve a given linewidth of the laser, the minimal magnification of the line narrowing module is deduced. In addition, CaF<sub>2</sub> prism beam expander with magnification of 13.3 is designed. Finally, 0.915 pm linewidth ArF laser is obtained using the designed PBE. The experimental results agree with the theoretical analysis.

**Key words** lasers; excimer laser; prism beam expander; magnification of beam expander

**OCIS codes** 140.2180; 140.3300; 230.5480; 300.3700

## 1 引言

棱镜扩束器(PBE)具有结构紧凑、对准简单、成

本低廉和色差最小化的优点。其最重要的应用是对入射到光栅之前的光斑进行一维扩束和准直<sup>[1]</sup>,在

**收稿日期**: 2011-08-11; **收到修改稿日期**: 2011-08-20

**基金项目**: 国家重大科技专项资助课题。

**作者简介**: 张海波(1984—),男,博士研究生,主要从事准分子激光器及其线宽压窄方面的研究。

E-mail: haibohit@gmail.com

**导师简介**: 楼祺洪(1942—),男,研究员,博士生导师,主要从事准分子激光器、光纤激光器及其相干组束技术和陶瓷激光器等方面的研究。E-mail: qhlou@mail.shcnc.ac.cn

\* **通信联系人**。E-mail: zhijunyuan@gmail.com

降低光束发散角的同时减小光束的能量密度。在高增益激光腔内,这种扩束器和光栅装置可有效地压窄激光光谱线宽,并且具有反射损耗小和可调谐的特点<sup>[2]</sup>。因此棱镜扩束器广泛用于染料脉冲激光器<sup>[3,4]</sup>和准分子激光器的光谱线宽压窄模块中<sup>[5,6]</sup>。

非消色散棱镜扩束器具有色散本领,结合光栅的色散能有效增强线宽压窄效果。但是,激光腔内的非消色散棱镜扩束器与光栅结构会引起温度相关的波长漂移。利用利特罗(Littrow)结构光栅,消色散棱镜扩束器能够实现精确的激光波长调谐。Rick Trebino<sup>[7]</sup>分析表明,扩束器的各棱镜采用顶角上-上…上-下放置结构,可实现消色散棱镜扩束器。

ArF 准分子激光器(193 nm)广泛应用于 90 nm 以下节点的半导体大规模集成电路制造。优质的光刻光源要求对自由振荡的线宽约 500 pm 的激光光谱进行线宽压窄<sup>[8~10]</sup>。棱镜扩束器与中阶梯光栅组合是准分子激光线宽压缩的首选方案。为了得到较小的激光线宽,在使用具有高色散能力的大尺寸中阶梯光栅<sup>[11]</sup>的同时,通常需要增加扩束倍数。提高光束的棱镜入射角可有效地增加棱镜的扩束倍数,然而入射角过高将增强菲涅耳反射,进而增加激光腔内的损耗,同时将提高镀膜的成本和难度。当然,增加扩束棱镜的个数可在降低入射角的同时获得期望的扩束倍数,而棱镜过多会增加激光腔的反射损耗和腔长增加所产生的大气吸收,因而激光腔内的扩束棱镜一般不超过 5 个。为了降低扩束棱镜导致的损耗,提高棱镜扩束器的扩束倍数,从而有效地压窄激光光谱线宽,有必要对扩束棱镜进行优化设计。

本文对用于光刻级光谱线宽压窄的消色散棱镜扩束器进行了优化设计,通过优化和选择棱镜的顶角、入射角、出射方向和晶格方向来保证系统总的扩束倍数,同时使扩束器的透射率在扩束倍数一定的情况下达到最大。此外,推导了激光器线宽压窄模块实现一定激光线宽输出所需的总棱镜扩束倍数。最后,给出了氟化钙棱镜扩束器设计实例。

## 2 理论分析

### 2.1 棱镜光束扩束器设计

考虑相同材料棱镜光束扩束器的优化设计,因为实际上宽带的增透膜在大入射角度(大于等于 65°)情况下是很难实现的<sup>[7]</sup>,这里仅考虑出射面镀增透膜的情况。光束在棱镜和棱镜扩束器中的传播如图 1 和图 2 所示。

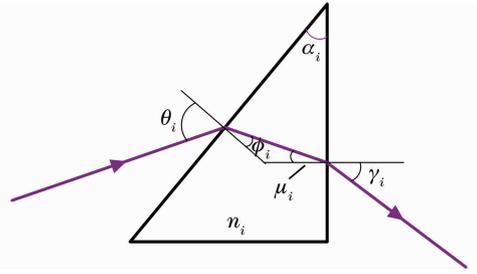


图 1 光束在棱镜内的传输

Fig. 1 Beam transmits in the prism

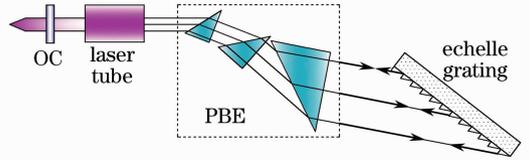


图 2 棱镜扩束器与中阶梯光栅组成的利特罗结构

Fig. 2 PBE and echelle grating in Littrow configuration

第  $i$  个棱镜的光束扩束倍数  $M_i$  为

$$M_i = \frac{\cos \phi_i}{\cos \theta_i} \cdot \frac{\cos \gamma_i}{\cos \mu_i}, \quad (1)$$

式中  $\theta_i$  为入射角,  $\phi_i$  为入射面的折射角,  $\mu_i$  为出射角,  $\gamma_i$  为出射面的折射角。

则  $N$  棱镜扩束器总光束扩束倍数  $M$  为

$$M = \prod_{i=1}^N M_i. \quad (2)$$

根据棱镜的入射面和出射面所满足的折射定律,以及棱镜顶角与两折射角的关系有

$$\begin{cases} n_0 \sin \theta_i = n_i \sin \phi_i \\ n_i \sin \mu_i = n_0 \sin \gamma_i, \\ \phi_i + \mu_i = \alpha_i \end{cases} \quad (3)$$

式中  $n_0$  和  $n_i$  分别为空气和棱镜的折射率。由(1)式和(3)式可分析扩束倍数与入射角、顶角和出射角的关系。

扩束器总扩束倍数  $M$  确定后,各棱镜扩束倍数相等时系统的透射率最大<sup>[12]</sup>。则单个棱镜优化的扩束倍数为

$$M_i^{\text{opt}} = M^{1/N}. \quad (4)$$

### 2.2 入射角与棱镜扩束倍数的关系

实验研究了棱镜扩束倍率与入射角之间的关系。采用顶角为 39° 的单 CaF<sub>2</sub> 直角棱镜,对水平方向为 2 mm 的 ArF 准分子激光进行一维扩束,不同入射角下的扩束倍率如图 3 所示。棱镜顶角一定的情况下,随着入射角度的增加,棱镜扩束倍数也显著地增加,多棱镜扩束器的总扩束倍数将对入射角的变化非常敏感。氟化钙晶体材料在 193 nm 波长处的折射率为 1.50143<sup>[13]</sup>,根据(1)式,数值计算了该

材料单棱镜扩束倍数与入射角的关系,理论计算与实验得到的数据基本吻合。相同入射角下,实验数据比理论值略微偏大,分析其原因为国产氟化钙晶体的折射率比理论计算值略高,从而造成了二者的偏差。因此,给定顶角的棱镜的扩束倍数主要由光束入射角决定。

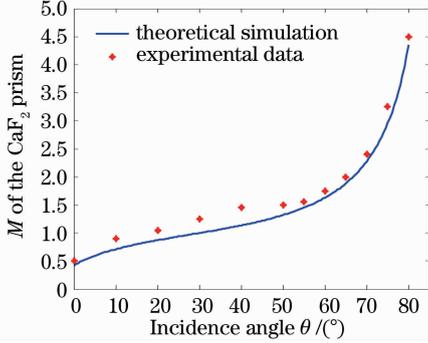


图3 顶角为39°的单CaF<sub>2</sub>棱镜扩束倍数与入射角的关系

Fig. 3 Relation between PBE magnifications of single CaF<sub>2</sub> prism with apex angle 39° and incident angles

### 2.3 出射角与棱镜扩束倍数的关系

出射角是影响棱镜扩束倍数的一个重要因素。顶角一定时,入射角的变化会影响棱镜出射角的大小。由(1)式和(3)式可得到扩束倍数与出射角的关系

$$M_i = \frac{\cos(\alpha_i - \mu_i)}{\cos \mu_i} \sqrt{\frac{n_0^2 - n_i^2 \sin^2 \mu_i}{n_0^2 - n_i^2 \sin^2(\alpha_i - \mu_i)}} \quad (5)$$

随着出射角的增加,棱镜扩束倍数逐步减小,如图4所示。特别地,出射角从0°增加到5°的范围内,棱镜扩束倍数迅速下降。出射角度较大时,棱镜甚至出现了光束产生缩束的作用,同时,顶角对棱镜扩束倍数的影响可忽略。因此,棱镜顶角一定时,光束垂直出射棱镜的扩束倍数最大。

垂直出射时 $\mu_i = 0$ ,根据(1)式单棱镜扩束倍数

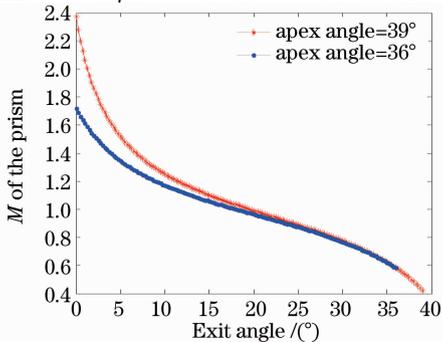


图4 单CaF<sub>2</sub>棱镜扩束倍数与出射角的关系

Fig. 4 Relation between beam expander magnification of single CaF<sub>2</sub> prism and exit angles

可简化为

$$M_i = \frac{\cos \phi_i}{\cos \theta_i} \quad (6)$$

则由(3)式和(6)式,可得到优化的棱镜入射角为

$$\theta_i^{\text{opt}} = \arcsin \left[ \sqrt{\frac{(M_i^{\text{opt}})^2 - 1}{(M_i^{\text{opt}})^2 - n_0^2/n_i^2}} \right] \quad (7)$$

棱镜扩束器的总扩束倍数确定后,根据棱镜材料和系统要求即可得到单个棱镜需要的扩束倍数,进而确定优化的入射角。通过优化,不仅能够保证总扩束倍数的要求,而且能使棱镜透射率最大化,降低激光腔内的损耗。

### 2.4 顶角与棱镜扩束倍数的关系

光束在棱镜内的传输方向与棱镜顶角有关,因而顶角的变化也将影响棱镜的扩束倍数。由(1)式和(3)式可得到棱镜扩束倍数与顶角的关系。图5给出了CaF<sub>2</sub>直角棱镜扩束倍数随顶角和入射角变化的三维曲线图。数值分析表明,顶角的选择对棱镜扩束倍数的影响比较明显。对于给定入射角情况下,棱镜的扩束倍数存在一个极大值,取该极值所对应的棱镜顶角可实现棱镜扩束倍数的优化。顶角过大的情况下扩束倍数 $M$ 为零,这是因为在棱镜出射面发生了全反射效应,并且入射角增加时顶角发生全反射的角度范围减小。另外,在相同顶角下,大入射角时得到的扩束倍数要高于低入射角所对应的扩束倍数,这与图3中得到的高入射角对应高扩束倍数的结论一致。

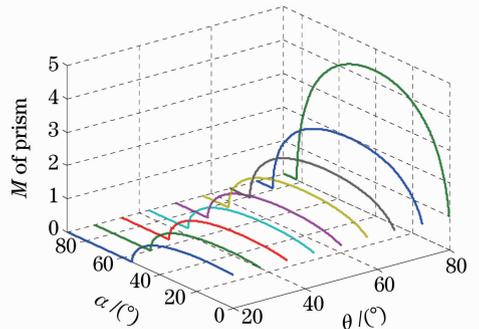


图5 棱镜扩束倍数与顶角和入射角的关系

Fig. 5 Relation between prism beam expander magnification and apex angles as well as incidence angles

垂直出射下,由(3)式可得到系统优化的棱镜顶角值为

$$\alpha_i^{\text{opt}} = \phi_i^{\text{opt}} \quad (8)$$

利用(7)式、(8)式和Snell定律可得到系统优化的棱镜顶角值

$$\alpha_i^{\text{opt}} = \arcsin \left[ n_0 \sqrt{\frac{(M_i^{\text{opt}})^2 - 1}{(n_i M_i^{\text{opt}})^2 - n_0^2}} \right] \quad (9)$$

## 2.5 入射角与棱镜透射率的关系

棱镜透射率受入射角的影响明显。光束透射率的大小直接影响着激光的效率,在保证光束扩束率的情况下,应尽量增加棱镜的透射率。考虑垂直分量,并忽略介质和空气的吸收,根据菲涅耳公式<sup>[14]</sup>,光束经过棱镜后的透射率为

$$T_i = \frac{4n_i \cos \phi_i / \cos \theta_i}{(n_i + \cos \phi_i / \cos \theta_i)^2}, \quad (10)$$

垂直出射时,由(6)式可将透射率简化为

$$T_i = \frac{4n_i M_i}{(n_i + M_i)^2}. \quad (11)$$

图6给出了顶角为 $39^\circ$ 的直角 $\text{CaF}_2$ 棱镜不同入射角情况下棱镜的透射率。由图可知,给定材料的棱镜透射率与入射角关系密切,随着入射角度的增加,棱镜的透射率迅速降低,为保证单个棱镜在未镀膜的情况下透射率高于 $90\%$ ,入射角应当小于 $75^\circ$ 。多棱镜扩束器的透射率随角度增加而快速降低。因此,通过优化棱镜设计来提高单棱镜扩束倍数并降低入射角,对提高激光效率和降低镀膜成本具有重要意义。

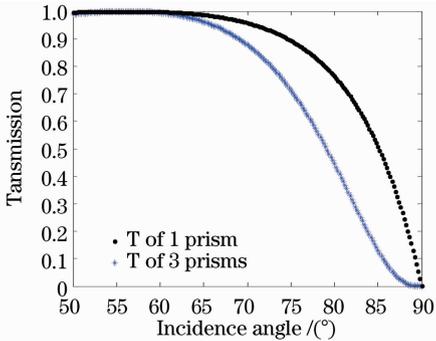


图6 棱镜透射率与入射角的关系,棱镜顶角为 $39^\circ$

Fig. 6 Relation between transmission of  $\text{CaF}_2$  prism with apex angle  $39^\circ$  and the incident angle

## 2.6 棱镜晶向的选择

$\text{CaF}_2$  因其在深紫外(VUV)波段良好的透射率,是制作准分子激光器腔内棱镜的优质材料<sup>[15]</sup>。对于光学晶体,体对称性是保证晶体折射率和吸收等光学特性各向同性的条件。然而,VUV波段光有限的波矢量将破坏晶体的体对称性,从而导致本征双折射效应<sup>[16]</sup>。双折射效应所导致的波前畸变、光斑分束、偏振态的改变等会严重降低激光的效率和性能。 $\text{CaF}_2$ 晶体在晶胞的轴向 $[100]$ 和体对角线 $[111]$ 等14个晶向无本征双折射效应,而在晶元的面角线 $[110]$ 等12个晶向的本征双折射效应最强<sup>[17]</sup>。同时, $[111]$ 晶向的平均折射率最高,相对于晶向 $[100]$ 的透射率更高。因此,选择 $[111]$ 晶向不

仅没有双折射效应,而且有助于棱镜透射率的提高。

采用直角棱镜能在提高棱镜扩束器光学性能的同时降低棱镜的尺寸和成本。光束沿斜面入射,并沿着顶角相邻的直角面出射,因棱镜的顶角通常是最小的内角,光束在棱镜较长的两个边入射和出射,这样可以有效地利用棱镜的光学平面。取 $[111]$ 晶向平行于棱镜顶角对应的直角边,光束沿棱镜直角面垂直出射方便其对准和调谐,同时能够有效地保证光束在棱镜内一直沿着无双折射效应的 $[111]$ 晶向传播。

## 3 激光线宽压缩模块中扩束倍数优化

消色散棱镜扩束器与光栅组合法压窄激光光谱线宽是实现高功率窄线宽激光输出的重要技术途径。这种方案具有线宽压缩率高、可调谐性好等优点而被广泛应用<sup>[18]</sup>。考虑原始光束发散角 $\theta_0$ 一定的情况下,激光在腔内往返 $N$ 次后,激光线宽的表达式为<sup>[2]</sup>

$$\Delta\lambda = \theta_0 (\sqrt{NM} \nabla_\lambda \Theta_G + \sqrt{N} \nabla_\lambda \Theta_P)^{-1}, \quad (12)$$

式中 $\nabla_\lambda \Theta_G$ 和 $\nabla_\lambda \Theta_P$ 分别为光栅和棱镜组的色散率。对于消色散棱镜扩束器,仅有光栅的色散对波长选择有贡献。Littrow结构下,闪耀角为 $\alpha_B$ 的光栅的色散率为<sup>[19]</sup>

$$\nabla_\lambda \Theta_G = \frac{\lambda}{2 \tan \alpha_B}, \quad (13)$$

则最终的激光输出线宽 $\Delta\lambda$ 为

$$\Delta\lambda = \frac{\theta_0 \lambda}{2M \sqrt{N} \tan \alpha_B}. \quad (14)$$

如待扩束光束的发散角与光斑尺寸确定后,可得到目标激光线宽相关的扩束倍数

$$M_\lambda = \frac{\theta_0 \lambda}{2\Delta\lambda \sqrt{N} \tan \alpha_B}. \quad (15)$$

Littrow结构下,激光器内线宽压窄装置所能承受的最大扩束倍数

$$M_{\max} = \frac{W_G \cos \alpha_B}{d_0}. \quad (16)$$

因而,线宽压窄模块的最大扩束倍数除了受原始光斑尺寸 $d_0$ 的影响之外,还受到有效光栅宽度 $W_G$ 和闪耀角的影响。高闪耀角在提高光栅色散能力的同时,对系统总扩束倍数有抑制作用。给定激光波长下,为保证期望的激光线宽,在选取光栅尺寸时,要保证 $M_{\max} \geq M_\lambda$ 。

## 4 设计实例

根据光栅尺寸和待扩束光斑尺寸可确定棱镜扩

束器所需的扩束倍数,进而优化选择棱镜入射角和顶角。优化对象主要包括单棱镜扩束倍数、透射率和棱镜顶角。下面给出三棱镜扩束系统的设计结果。

如光栅有效宽为 150 mm,闪耀角  $79^\circ$ ;光斑待扩束的水平方向尺寸和发散角分别为 2.1 mm 和 1.8 mrad,谐振腔长度为 1.5 m,对于脉宽为 20 ns 的激光脉冲可在腔内往返 2 次,由(16)式可得到最大扩束倍数为 13.6。

根据系统总扩束倍数可选择合适的扩束棱镜个数。总扩束倍数  $M$  为 13.6 时,二棱镜扩束器要求单个棱镜扩束倍数大、入射角度大,进而造成系统整体透射率过低,四棱镜扩束器虽然能够改善系统中单棱镜的透射率,但是棱镜个数太多,成本高,调节难度大,而且会增大腔长并增加空气吸收所产生的腔内损耗。而采用三棱镜扩束器不仅能够得到较好的透射率,而且棱镜扩束器的尺寸不会过大。

采用三棱镜扩束器时单个棱镜扩束倍数为 2.37。根据该单棱镜扩束倍数,采用顶角为  $39^\circ$  的  $\text{CaF}_2$  材料直角棱镜组成的一维扩束器,对于 2.1 mm 的光斑经过 3 个棱镜扩束后垂直出射的光斑尺寸  $D$  分别为 4.98、11.80 和 27.96 mm。

为了验证设计的棱镜扩束器的扩束效果,利用氟化钙晶体(博科力晶体,北京)加工了顶角为  $39^\circ \pm 3'$  的直角棱镜,表面平整度为  $\lambda/10@633 \text{ nm}$ 。利用该三棱镜扩束器在  $70.9^\circ$  入射角下对 ArF 准分子激光器光斑的水平方向做一维扩束。利用 CCD 光束分析仪(LBAPC2000, Spiricon)对扩束后的光斑成像,经各棱镜扩束后的光斑尺寸依次为 5、12 和 28 mm,如图 7 所示。对比理论设计值,发现扩束的实验结果与其吻合得很好。采用该棱镜扩束器和中阶梯光栅对 ArF 准分子激光器(EX100, Gamlaser)光进行光谱线宽压窄,利用光谱仪(ELIAS III, LTB Berlin)测量得到的窄线宽激光输出的半峰全宽(FWHM)为 0.915 pm,与理论值 0.9 pm 基本吻

合,如图 8 所示。

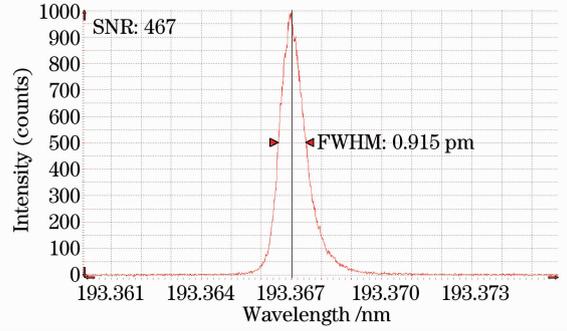


图 8 基于三棱镜扩束器和光栅系统的 0.915 pm 的 ArF 激光光谱

Fig. 8 ArF laser spectrum with 0.915 pm linewidth using three-prism beam expander and echelle grating

## 5 结 论

介绍了棱镜的相关参数对扩束器的影响,数值分析表明光束沿棱镜垂直出射是最优的,确定入射角后,根据光束垂直出射可确定优化的棱镜顶角值。取氟化钙的[111]晶向平行于直角棱镜顶角所对应的边,不仅能使光束在棱镜内传输而不会出现双折射效应,而且采用直角棱镜可降低棱镜的尺寸和成本。利用优化得到的结果,设计了扩束倍数  $M$  为 13.3 的三棱镜扩束器,入射角为  $70.9^\circ$ ,顶角为  $39^\circ$ ,对于光斑和发散角分别为 2.1 mm 和 1.8 mrad 的激光光束,实验中扩束光斑尺寸与理论设计值吻合得很好。用闪耀角为  $79^\circ$  的 150 mm 宽中阶梯光栅,该棱镜扩束器可实现 ArF 激光 0.915 pm 线宽输出。

## 参 考 文 献

- Zhang Guowei. Performance of the two-prism beam expanding system in dye laser resonator[J]. *Acta Optica Sinica*, 1983, **3**(7): 667~672  
张国威. 染料激光腔内双扩束棱镜系统的特性[J]. *光学学报*, 1983, **3**(7): 667~672
- F. J. Duarte. Multiple-return-pass beam divergence and the linewidth equation[J]. *Appl. Opt.*, 2001, **40**(18): 3038~3041
- F. J. Duarte. Solid-state multiple-prism grating dye-laser oscillators[J]. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(18): 3857~3860
- Chu Yuxi, Luo Caiyan. Multiline oscillation of pulsed dye laser with four-prism expander[J]. *Acta Optica Sinica*, 1993, **13**(7): 642~648  
诸玉喜, 罗才雁. 四棱镜扩束染料激光的多线振荡[J]. *光学学报*, 1993, **13**(7): 642~648
- T. R. Loree, K. B. Butterfield, D. L. Barker. Spectral tuning of ArF and KrF discharge lasers[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1978, **32**(3): 171~173
- R. S. Hargrove, J. A. Paisner. Tunable efficient VUV generation using ArF-pumped SRS in  $\text{H}_2[\text{C}]$ . Topical meeting on Excimer lasers, 1979, ThA6

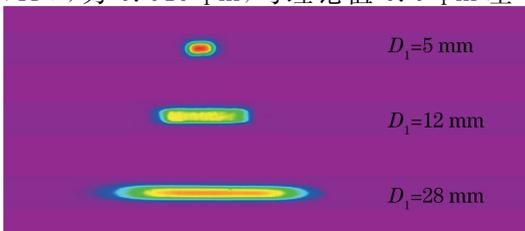


图 7 氟化钙三棱镜扩束器各棱镜扩束光斑

Fig. 7 Laser beams expanded by  $\text{CaF}_2$  three prisms respectively

- 7 Rick Trebino. Achromatic N-prism beam expanders; optimal configurations[J]. *Appl. Opt.*, 1985, **24**(8): 1130~1138
- 8 Lou Qihong, Xu Jie, Fu Shufeng *et al.*. Gas Laser with Pulsed Discharge[M]. Beijing: Science Press, 1993. 255~288  
楼祺洪, 徐捷, 傅淑芬等. 脉冲放电气体激光器[M]. 北京: 科学出版社, 1993. 255~288
- 9 Li Hongxia, Lou Qihong, Dong Jingxing *et al.*. Research on spectral-narrowing of excimer lasers[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2004, **2**(4): 44~47  
李红霞, 楼祺洪, 董景星等. 准分子激光光线宽压缩方法的研究[J]. 光学与光电子技术, 2004, **2**(4): 44~47
- 10 Zhang Haibo, Lou Qihong, Zhou Jun *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 准分子激光光线宽压缩技术[J]. 激光与光电子学进展, 2009, **46**(12): 46~51
- 11 E. Loewen, D. Maystre, E. Popov *et al.*. Diffraction efficiency of echelles working in extremely high orders[J]. *Appl. Opt.*, 1996, **35**(10): 1700~1704
- 12 J. R. M. Barr. Achromatic prism beam expanders[J]. *Opt. Commun.*, 1984, **51**(1): 41~46
- 13 R. Gupta, J. H. Burnett, U. Griesmann *et al.*. Absolute refractive indices and thermal coefficients of fused silica and CaF<sub>2</sub> near 193 nm[J]. *Appl. Opt.*, 1998, **37**(25): 5964~5968
- 14 B. Rácz, Zs. Bor, S. Szatmári *et al.*. Comparative study of beam expanders used in nitrogen laser pumped dye lasers[J]. *Opt. Commun.*, 1981, **36**(5): 399~402
- 15 Ch. Mühlig, W. Triebel, G. Töpfer *et al.*. Calcium fluoride for ArF laser lithography-characterization by in situ transmission and LIF measurements[C]. *SPIE*, 2003, **4932**: 458~466
- 16 J. H. Burnett, Z. H. Levine, E. L. Shirley. Intrinsic birefringence in calcium fluoride and barium fluoride[J]. *Phys. Rev. B*, 2001, **64**(24): 241102
- 17 J. H. Burnett, Z. H. Levine, E. L. Shirley *et al.*. Symmetry of spatial-dispersion-induced birefringence and its implications for CaF<sub>2</sub> ultraviolet optics[J]. *J. Microlith. Microfab. Microsyst.*, 2002, **1**(3): 213~224
- 18 Zhou Jun, Zhang Haibo, Zhao Hongming *et al.*. Line narrowing apparatus with beam shaping and rotational wavelength tuning [P]. China Patent, 101581866. 2010-12-29  
周军, 张海波, 赵宏明等. 含光束整形与波长转动调谐的线宽压缩装置[P]. 中国专利, 101581866. 2010-12-29
- 19 M. Born, E. Wolf, Principles of Optics [M]. 7th ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1998. 446~460

栏目编辑: 谢 婧