

文章编号: 0258-7025(2009)06-1428-05

双反射平行扩束偏光镜新设计

宋致堂¹ 盛宝立² 李国华¹ 彭捍东¹ 孔凡美¹

(¹曲阜师范大学激光研究所, 山东 曲阜 273165; ²滕州市西岗镇中心中学, 山东 滕州 277519)

摘要 为了提高平行分束偏光棱镜的扩束比,提出了一种新的复合式平行扩束偏光镜设计方案。运用棱镜光扩束原理和菲涅耳公式,分析了影响扩束比和透射比的结构角、折射率等因素,使其在高透射比的基础上,很好地实现增大剪切差的效果及结构的优化设计,并伴有光路转向的作用。这在一定程度上减小光路搭建的直线长度,节约实验平台的使用空间。测试结果表明,这种新的偏光镜透射比和剪切差比较理想,理论值和实验值基本吻合。该复合偏光镜是一种较理想的平行分束偏光器件,具有较高的实用价值。

关键词 物理光学; 双反射棱镜; 平行分束; 剪切差

中图分类号 O436.3 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20093606.1428

New Design of Bireflective Parallel Distensible Beam Splitting Polarization Prism

Song Zhitang¹ Sheng Baoli² Li Guohua¹ Peng Handong¹ Kong Fanmei¹

(¹*Institute of Laser Research, Qufu Normal University, Qufu, Shandong 273165, China*)
(²*The Middle School of Xigang Town, Tengzhou, Shandong 277519, China*)

Abstract In order to improve the extender ratio of parallelism beam splitting, a new design scheme of bireflective parallel distensible beam splitting prism is proposed. By using prism expanded beam principle and Fresnel formula, some factors, such as structure angle and refractive index, which influence the extender ratio and transmissivity are analyzed. The effects of increasing shear difference on the basis of high transmissivity and the optimal design of structure are properly realized in the new scheme. The scheme has the deflecting function which could decrease the linear length of rays path building and save space of flat roof in experiment. The testing results show that the transmissivity and the shear difference of this new polarization prism are perfect and the experimental values are in consistent with the theoretical analysis. It is an ideal parallel beam splitting polarization device and has important practical merits.

Key words physical optics; bireflective prism; parallel beam splitting; shear difference

1 引 言

偏光分束棱镜^[1~7]广泛应用于各种偏光技术领域;平行分束偏光镜^[1~4]是偏光分束棱镜的一种,它兼有起偏、分束两种功能,一般情况下可以把一束入射光分解为振动方向相互垂直、出射方向相互平行的两束平面偏振光,能够应用于激光调制、偏振状态传输以及偏振干涉等技术。这两束平行出射光的垂直间距称为剪切差^[8],它是表征平行分束偏光镜性能的重要参数。双反射平行分束偏光镜^[1]是利用晶

体的双反射原理设计的平行分束偏光镜,该类型棱镜由天然晶体冰洲石制作而成,有多种设计形式。其中单元式的几何结构是一个等腰直角三角形,其光轴方向和棱镜通光端面成 45° 。入射光经棱镜双全反射而分束,被分束的光平行出射,而光通过平行分束棱镜产生的剪切差 d 一般很小,即使一只边长 10 mm 的棱镜,剪切差 d 也仅有 1.08 mm 。如果要使剪切差 $d = 3\text{ mm}$,棱镜的边长需要达到 27.7 mm ,这对价格昂贵的冰洲石材料是很不经济

收稿日期: 2008-08-25; 收到修改稿日期: 2008-11-18

作者简介: 宋致堂(1979—),男,硕士研究生,主要从事激光偏光技术、偏光器件方面的研究工作。

E-mail: songzhitang2006@163.com

导师简介: 李国华(1937—),男,教授,博士生导师,从事偏光器件的设计和光学检测方面的研究。E-mail: ghli@163169.net

的。针对这一问题,有人设计了改进 Wollaston 棱镜的结构^[3]实现平行分束,缺点是结构复杂,剪切差较小;也有人用冰洲石-玻璃组合三元结构^[4]实现平行分束,此种设计可增大剪切差,但其结构复杂,加工比较困难。为此,本文提出利用棱镜光扩束原理和菲涅耳公式,对棱镜进行重新讨论和组合,并进行优化理论分析,得到了复合式平行扩束棱镜的新设计。

2 理论设计

设计光路如图 1 所示,图中(a)部分为双反射平行分束棱镜,(b),(c)为两相同的直角三角形棱镜,顶角为 α ,实现光路的转向和扩束。 d_1 、 d_2 和 d_3 分别为光束经过棱镜(a),(b),(c)的剪切差,为了实现 $d_3/d_1 > 1$ 的效果,同时简化设计,令平行光经直角棱镜出射时光路垂直于其出射端面。两棱镜设计为等角入射,设入射角为 θ ,出射角为 θ' ,则有

$$n_0 \sin \theta = n \sin \theta'. \quad (1)$$

由等角入射和转向棱镜光线垂直出射的条件,得到 $\theta' = \alpha$,则转向角度 A 的大小表示为

$$A = \frac{\pi}{2} + 2(\theta - \theta'). \quad (2)$$

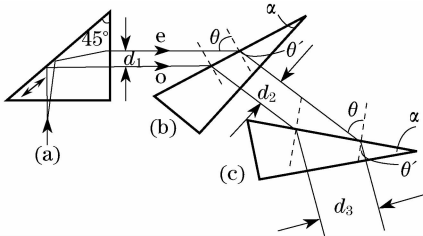


图 1 复合式平行扩束棱镜

Fig. 1 Multiplex parallel distensible beam splitting prism

由图中所示几何关系,可得

$$\begin{cases} \frac{d_1}{d_2} = \frac{\cos \theta}{\cos \alpha}; \\ \frac{d_2}{d_3} = \frac{\cos \theta}{\cos \alpha}. \end{cases}$$

根据(1)式可得 $\sin \theta = n \sin \theta' = n \sin \alpha$ 。

由以上式关系得

$$\frac{d_3}{d_1} = \frac{\cos^2 \alpha}{\cos^2 \theta} = \frac{1 - \sin^2 \alpha}{1 - \sin^2 \theta} = \frac{1 - \sin^2 \alpha}{1 - n^2 \sin^2 \alpha}. \quad (3)$$

由(3)式所示关系看出 $d_3/d_1 > 1$,即光线通过复合棱镜后,两光路的剪切差增大,达到了扩束的目的,而且,扩束能力的大小与棱镜结构角 α 和棱镜本身折射率 n 的大小有关。

下面讨论三者之间的变化关系,并给出最佳设

计方案,即在寻求最大扩束的基础上保证有较高的透射比。图 2 为 d_3/d_1 随 α 和 n 的变化曲线。 d_3/d_1 的大小随 α 和 n 的增大而增大。要想增大扩束比,就要在不影响透射比的情况下尽量选择较大的折射率 n 和较大的结构角 α 。

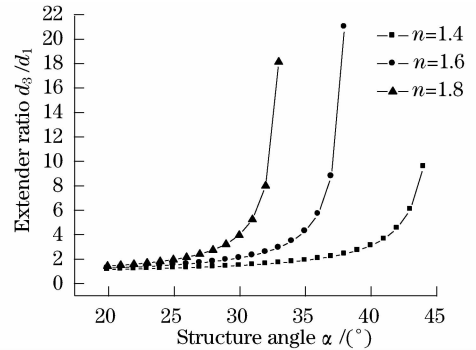


图 2 扩束比随折射率和结构角的变化曲线

Fig. 2 Curve of extender ratio with the change of refractive index and structure angle

设计过程中还必须考虑复合棱镜的光强透射比^[9-13]问题。从双反射平行分束棱镜中出射的两束平面偏振光 o 光和 e 光,在棱镜(b)两个表面的反射比分别为 R_{o1} 、 R_{o2} 、 R_{e1} 、 R_{e2} 。由菲涅耳公式有

$$\begin{aligned} R_{o1} &= \left(\frac{n_1 \cos i_1 - n_2 \cos i_2}{n_1 \cos i_1 + n_2 \cos i_2} \right)^2 = \\ &= \left[\frac{\sqrt{1 - n^2 \sin^2 \alpha} - n \sqrt{1 - \sin^2 \alpha}}{\sqrt{1 - n^2 \sin^2 \alpha} + n \sqrt{1 - \sin^2 \alpha}} \right]^2, \\ R_{o2} &= \left(\frac{n - 1}{n + 1} \right)^2, \\ R_{e1} &= \left(\frac{n_2 \cos i_1 - n_1 \cos i_2}{n_2 \cos i_1 + n_1 \cos i_2} \right)^2 = \\ &= \left[\frac{n \sqrt{1 - n^2 \sin^2 \alpha} - \sqrt{1 - \sin^2 \alpha}}{n \sqrt{1 - n^2 \sin^2 \alpha} + \sqrt{1 - \sin^2 \alpha}} \right]^2, \\ R_{e2} &= \left(\frac{n - 1}{n + 1} \right)^2, \end{aligned} \quad (4)$$

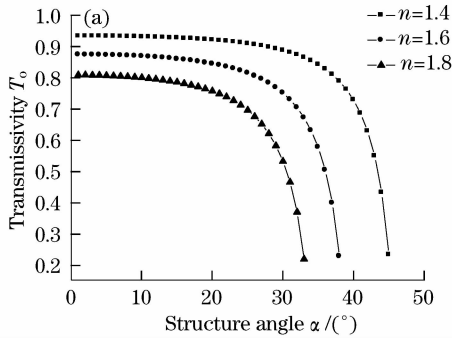
其中 n_1 为入射介质折射率, n_2 为出射介质折射率, i 为入射角, n 为棱镜(b)或(c)的折射率。则总的光强透射比 T_o 、 T_e 分别为

$$T_o = (1 - R_{o1})^2 (1 - R_{o2})^2 = \left[1 - \left(\frac{n - 1}{n + 1} \right)^2 \right]^2 \times \left[1 - \left[\frac{\sqrt{1 - n^2 \sin^2 \alpha} - n \sqrt{1 - \sin^2 \alpha}}{\sqrt{1 - n^2 \sin^2 \alpha} + n \sqrt{1 - \sin^2 \alpha}} \right]^2 \right]^2, \quad (6)$$

$$T_e = (1 - R_{e1})^2 (1 - R_{e2})^2 = \left[1 - \left(\frac{n - 1}{n + 1} \right)^2 \right]^2 \times \left[1 - \left[\frac{n \sqrt{1 - n^2 \sin^2 \alpha} - \sqrt{1 - \sin^2 \alpha}}{n \sqrt{1 - n^2 \sin^2 \alpha} + \sqrt{1 - \sin^2 \alpha}} \right]^2 \right]^2. \quad (7)$$

由(6),(7)两式可以看出,光强透射比和复合棱

镜的折射率 n 以及结构角 α 取值有关,其大小随折射



率 n 以及棱镜结构角 α 的变化如图 3(a),(b)所示。

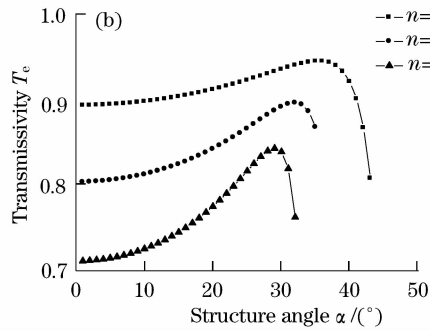


图 3 透射比 T_o (a)和 T_e (b)随 α 和 n 的变化曲线

Fig. 3 Curve of transmissivity T_o (a) and transmissivity T_e (b) with the change of α and n

由图 3 可知,两透射比随棱镜结构角 α 的改变有着不同的变化轨迹, o 光透射比随 α 的增大而减小, e 光透射比随 α 的增大而先增大后减小。但是,两者的透射比都随折射率 n 的增大而减小。由此看来,要保证扩束比和透射比同时比较理想,就要选择合适折射率的玻璃材料,同时还要先择合适的结构角。

下面以折射率 n 为 1.60 的玻璃为实例,阐述设计过程。将 $n=1.60$ 分别代入(3),(6)和(7)式,得到当 $n=1.60$ 时 $d_1/d_3, T_o, T_e$ 随 α 和 n 的变化曲线如图 4 所示。为便于比较,此处用 d_1/d_3 来表示 d_3/d_1 变化规律。从图中的变化关系可得,当设计为双光束输出时,可以选择适当的 α 值,使两束光具有较高的透射比且相差不大,同时剪切差达到一个理想的值。选取 $d_3/d_1 = 2$, 则 $\alpha = 29.5^\circ, T_e = 88.9\%, T_o = 75.9\%, \theta = 52^\circ$, 转角 $A = 135^\circ$, 选剪切差为 1.2 mm 的双反射平行分束棱镜,经过复合棱镜后剪切差可达到 2.4 mm。此时两束光光强相差不大,均具有较高透射比。取 $d_3/d_1 = 3, \alpha = 33.2^\circ, T_e = 89.3\%, T_o = 66.3\%, \theta = 61.2^\circ$, 转角 $A = 146^\circ$, 剪切差可达到 3.6 mm。此时,光路剪切差非常理想。当 $\alpha = 38.4^\circ$ 时,转角 $A = 180^\circ$, 此时光的透射比较低, $T_o = 12\%, T_e = 32\%$, 但 $d_3/d_1 \approx 50$, 能应用在一些微光探测实验中。

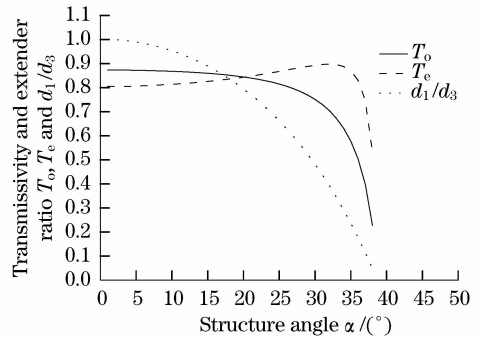


图 4 $n=1.6$ 时 T_o, T_e 和 d_1/d_3 随 α 的变化曲线
Fig. 4 Curve of T_o, T_e and d_1/d_3 with the change of α when $n=1.6$

为一个固定在步进电机上的 Glan-Taylor 棱镜,旋转角度可以精确到秒级。

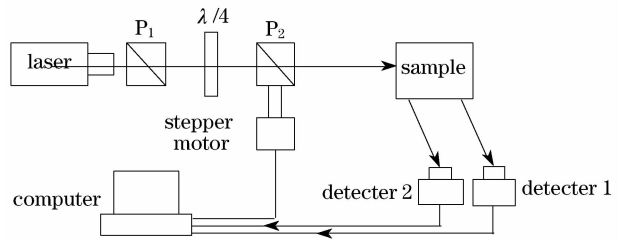


图 5 平行分束棱镜测试光路

Fig. 5 Testing light path of parallel beam splitting prism

选取 $d_3/d_1 = 2$ 的情况磨制样品,则样品的结构角 $\alpha = 29.5^\circ$, 入射角 $\theta = 52^\circ$, 冰洲石部分选剪切差为 1.2 mm 的双反射平行分束棱镜。以波长为 633 nm 的氦氖激光器作为入射光源,经多次测量,得到各光学参数的平均值,见表 1。可见,实验值与理论值基本符合。

表 1 实验测试结果

Table 1 Summary of measurement results

λ /nm	θ /(°)	T_e /%	T_o /%	Shear difference /mm
633	52	86.9	73.7	2.36

3 性能测试

为测试样品的透射比,搭建了如图 5 所示的测量光路。透射比的测量需要具有稳定的光源、精确旋转的起偏器、光电探测器和光功率计。在波长为 633 nm 的氦氖激光器后加上起偏器 P_1 和 $\lambda/4$ 波片的组合,将光源由部分偏振光调制成为圆偏振光,以消除该光源主偏振面旋转产生的影响。起偏器 P_2

4 误差分析

实验测试的误差主要来自两个方面,一个是材料的研磨误差,另一个是组合角度的定标误差^[14~18]。

对于材料的研磨,现已有很精密的测量技术,但仍存在一定的误差;各组合部分在胶合过程中组合角度的定标存在一定的误差,如图 1 组合棱镜中(a)和(b),(c)的组合角度存在误差,则入射角不严格为 θ 。由(3)式和误差传递公式,令

$$f(\theta, \alpha) = \frac{d_3}{d_1} = \frac{\cos^2 \alpha}{\cos^2 \theta},$$

则有

$$\Delta f(\theta, \alpha) = \left| \frac{\partial f(\theta, \alpha)}{\partial \theta} \right| \cdot \Delta \theta + \left| \frac{\partial f(\theta, \alpha)}{\partial \alpha} \right| \times$$

$$\Delta \alpha = \left| 2 \cos^2 \alpha \cdot \frac{\sin \theta}{\cos^3 \theta} \right| \cdot \Delta \theta + \left| \frac{2 \cos \alpha \sin \alpha}{\cos^2 \theta} \right| \cdot \Delta \alpha,$$

则当入射角 $\theta = 52^\circ$, $\alpha = 29.5^\circ$ 时,误差为

$$\Delta f(\theta, \alpha) = \left| 2 \cos^2(29.5^\circ) \cdot \frac{\sin(52^\circ)}{\cos^3(52^\circ)} \right| \times$$

$$\Delta \theta + \left| \frac{2 \cos(29.5^\circ) \sin(29.5^\circ)}{\cos^2(52^\circ)} \right| \cdot \Delta \alpha =$$

$$5.12 \cdot \Delta \theta + 2.26 \cdot \Delta \alpha.$$

这说明在入射角 $\theta = 52^\circ$, $\alpha = 29.5^\circ$ 附近微小的 $\Delta \theta$, $\Delta \alpha$ 变化会引起较大的扩束比误差。现在的工艺水平能使 $\Delta \theta$ 和 $\Delta \alpha$ 控制在 0.01° 的范围内,对于剪切差为 1.2 mm 的双反射平行分束棱镜,则扩束比误差 $\Delta f(\theta, \alpha)$ 的范围在 0.09 mm 以内。

在实验过程中也存在仪器调节精度和操作的误差因素,所以,得到的测量值与理论值有一定的误差。实验测试表明,测量结果在误差范围以内且与理论值吻合较好。

5 结 论

在双反射平行分束偏光镜和扩束棱镜的基础上,对棱镜重新组合,提出复合式平行扩束棱镜方案。经理论分析和对实验测试结果的分析可以看出,该棱镜不仅实现了较大的剪切差,而且能保持较高的透射比,并可以根据需要,选择不同的结构角 α 和折射率 n 以获得合适的剪切差。这是现有平行分束棱镜所不具备的。器件在使用时光路会有相应的转向,会在一定程度上减小光路搭建的直线长度,节约实验平台的使用空间。

该复合偏光镜的扩束部分由玻璃组成,减少了材料的成本,且在工艺上不存在任何困难,有较高的实用价值。

参 考 文 献

- Li Guohua, Wu Fuquan. The study of bireflective parallel beam-splitting polarization prism [J]. *J. Optoelectronics · Lasers*, 1990, **1**(1): 43~47
李国华, 吴福全. 双反射平行分束偏光镜研制[J]. 光电子·激光, 1990, **1**(1): 43~47
- Wu Fuquan, Li Guohua, Yu Dehong. Bireflective parallel beamsplitting device with adjustable beam-displacement [J]. *Journal of Qufu Normal University*, 1993, **19**(2): 59~62
吴福全, 李国华, 于德洪. 双反射可凋剪切差平行分束偏光器研制[J]. 曲阜师范大学学报, 1993, **19**(2): 59~62
- Ma Lili, Song Lianke, Wu Fuquan. Design of parallel and symmetric beam splitting prism based on Wollaston prism [J]. *Optical Technique*, 2003, **29**(5): 602~603
马丽丽, 宋连科, 吴福全. Wollaston 式平行分束与对称分束偏光棱镜设计[J]. 光学技术, 2003, **29**(5): 602~603
- Ren Shufeng, Wu Fuquan, Zhao Pei. Ternary parallel beam splitter combined of iceland and glass [J]. *Laser Technology*, 2006, **30**(3): 311~316
任树锋, 吴福全, 赵培. 冰洲石-玻璃组合三元结构平行分束偏光镜[J]. 激光技术, 2006, **30**(3): 311~316
- Wu Fuquan, Li Guohua. The study of single unit bireflective polarization beam-splitting prism with larger splitting angle [J]. *Laser Technology*, 1991, **15**(5): 317~320
吴福全, 李国华. 单元大分束角双反射偏光分束镜研制[J]. 激光技术, 1991, **15**(5): 317~320
- Meng Fanhua, Song Lianke, Kong Fanzhen *et al.*. A new symmetric beam-splitting polarization prism [J]. *Laser Technology*, 2006, **30**(6): 670~672
孟繁华, 宋连科, 孔凡震等. 一种新型对称分束偏光棱镜的设计[J]. 激光技术, 2006, **30**(6): 670~672
- Li Guohua, Zhao Mingshan, Wu Fuquan. Double-element bireflectant polarization beam splitting prism [J]. *Optical Technique*, 1992, (1): 12~14
李国华, 赵明山, 吴福全. 双反射偏光分束棱镜[J]. 光学技术, 1992, (1): 12~14
- Wu Lei, Zhang Chunmin, Yuan Yan. Exact calculation of the lateral displacement and optical path difference of savart polariscopes [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(7): 885~890
吴磊, 张淳民, 袁艳. 萨伐尔偏光镜横向剪切量和光程差的精确计算[J]. 光学学报, 2005, **25**(7): 885~890
- Ni Zhibo, Song Lianke, Liu Jianpin. Neotype high extinction ratio polarizer [J]. *J. Optoelectronics · Lasers*, 2007, **18**(1): 43~45
倪志波, 宋连科, 刘建苹. 新型高透射比偏光棱镜[J]. 光电子·激光, 2007, **18**(1): 43~45
- Liu Houtong, Li Guohua, Ren Guangjun. Theoretical research of effect of crystal membranous layer on light transmission of polarizing prism [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(8): 1143~1147
刘厚通, 李国华, 任广军. 晶体膜层效应对棱镜偏光镜透射比影响的理论研究[J]. 光学学报, 2005, **25**(8): 1143~1147
- Bi Jia, Wu Fuquan, Zheng Mengmeng. Study on the transmittance of Marple-Hess prism undulating with the incident angle [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(4): 716~719
毕佳, 吴福全, 郑萌萌. 马普-赫斯棱镜透射比随入射角变化的波动研究[J]. 光学学报, 2007, **27**(4): 716~719
- Jia Peng, Li Guohua, Peng Handong. Thermodynamic effect on transmitted intensity perturbation of Glan-Thompson prism [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(3): 534~538
贾朋, 李国华, 彭捍东. 格兰-汤普森棱镜透射光强扰动的温度效应[J]. 光学学报, 2008, **28**(3): 534~538
- Zhao Tingsheng, Li Guohua, Peng Handong *et al.*. Modified Glan-Taylor prisms and its characteristics [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(10): 1383~1387

- 赵廷生, 李国华, 彭捍东等. 格兰-泰勒棱镜的改进设计及其特性[J]. *中国激光*, 2007, **34**(10): 1383~1387
- 14 Zheng Chunhong, Song Lianke, Liang Rongrao. Optimizational design scheme for three-in-one composite achromatic $\lambda/4$ waveplate[J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(6): 662~664
- 郑春红, 宋连科, 梁荣饶. 三元复合式消色差 $\lambda/4$ 波片的优化设计[J]. *中国激光*, 2004, **31**(6): 662~664
- 15 Xu Yuxian, Cai Xin, Zhang Zhili. Design of modified Wollaston prisms[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2001, **9**(2): 131~134
- 徐毓娟, 蔡 昕, 张志利. 改进型 Wollaston 棱镜设计[J]. *光学精密工程*, 2001, **9**(2): 131~134
- 16 Li Guahua, Zhao Mingshan, Di Zhengqiang. A new type single-element polarization prism [J]. *Journal of Qufu Normal University*, 1991, **7**(3): 58~61
- 李国华, 赵明山, 狄振强. 新型单元式激光偏光棱镜[J]. *曲阜师范大学学报*, 1991, **7**(3): 58~61
- 17 Su Fufang, Wu Fuquan, Wang Wei. Analysis of optical path character of Wollaston prisms in the diversity compound mode [J]. *Optical Technique*, 2003, **29**(6): 680~684
- 苏富芳, 吴福全, 王 伟. 渥拉斯顿棱镜在不同方式组合下的光路特性分析[J]. *光学技术*, 2003, **29**(6): 680~684
- 18 Chen Xiyuan, San Ming. Studies of characteristic of double Wollaston prisms[J]. *Applied Laser*, 2003, **23**(3): 161~163
- 陈西园, 单 明. 双 Wollaston 棱镜分光特性的研究[J]. *应用激光*, 2003, **23**(3): 161~163