

文章编号: 1001-3806(2009)04-0440-03

## 分束李普奇与分束汤普逊棱镜性能的比较分析

邵俊平, 吴福全\*, 郝殿中, 洪芳  
(曲阜师范大学 激光研究所, 曲阜 273165)

**摘要:** 为了更好地设计和选择使用分束李普奇棱镜和分束格兰-汤普逊棱镜, 从理论上分析了分束李普奇棱镜与分束格兰-汤普逊棱镜的分束角、分离角和光强分束比。结果表明, 分束李普奇棱镜和分束格兰-汤普逊棱镜的分束角和光强分束比与棱镜的结构角和副结构角有关; 对于相同的结构角和副结构角, 两种棱镜的分束角相同, 但它们的光强分束比不同。出射的  $o$  光与  $e'$  光的分离角与副结构角有关; 对于  $o$  光垂直出射的需要, 选用分束李普奇棱镜设计为好; 对于大分束角的需要, 选用分束格兰-汤普逊棱镜设计为好。选用最佳设计方案可以分别实现两种棱镜光强的对称分束, 实验结果与理论计算相符。

**关键词:** 物理光学; 分束角和光强分束比; 比较分析; 分束李普奇棱镜; 分束格兰-汤普逊棱镜  
**中图分类号:** O436 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2009.04.031

### Performance comparison between splitting Lippich prism and Thompson prism

SHAO Jun-ping, WU Fu-quan, HAO Dian-zhong, HONG Fang  
(Institute of Laser Research, Qufu Normal University, Qufu 273165, China)

**Abstract:** In order to design and use the splitting Lippich prism and the splitting Grand-Thompson prism, the splitting angle, separation angle and splitting ratio of light intensity were analyzed. The results show: the splitting angle and splitting ratio of light intensity of the splitting Lippich prism and the splitting Grand-Thompson prism are dependent on the structure angle and the vice structure angle; both the prisms have the same splitting angle and different light intensity splitting ratios if they have the same structure angle and vice structure angle. The separation angle about beam  $o$  and beam  $e'$  is dependent on the vice structure angle; the design of splitting Lippich prism is better for the need of normal output of beam  $o$ ; the design of splitting Grand-Thompson prism is better for the need of a big splitting angle. With optimum design symmetric beam splitting of light intensity can be achieved for both the prisms. The experiment data are in accordance with the theoretical results.

**Key words:** physical optics; splitting angle and splitting ratio of light intensity; comparison analysis; splitting Lippich prism; splitting Grand-Thompson prism

### 引言

随着现代偏光技术及激光应用技术的发展, 各种各样的偏光器件得到了越来越广泛的应用, 其中, 棱镜型激光偏光镜<sup>[1]</sup>比较常用, 它按功能大体可分为激光偏光镜<sup>[2]</sup>和偏光分束镜。对于偏光分束镜, 按出射的两束光的特点又可分为横向剪切分束棱镜<sup>[3]</sup>(即出射光的分束角为  $0^\circ$ , 如平行分束偏光镜<sup>[4]</sup>)和角剪切分束棱镜<sup>[5-6]</sup>(如 Wollaston 棱镜<sup>[7]</sup>、Rochon 棱镜<sup>[8]</sup>)。在众多的偏光分束器件<sup>[9]</sup>中, 格兰型以其大的分束角得到广泛的应用, 主要有 4 种形式: 分束李普奇棱镜和与之对应的空气隙格兰-泰勒棱镜, 分束格兰-汤普逊棱镜和与之对应的空气隙型格兰-付科棱镜。格兰-汤

普逊棱镜和李普奇棱镜结构相同、外形相同, 晶体的光轴都在入射端面内, 只是晶体光轴方向相差  $90^\circ$ , 正是光轴的这一变化引起了二者的较大差异。关于空气隙型的格兰-付科棱镜和格兰-泰勒棱镜的差异性已有深入的分析<sup>[10-11]</sup>, 本文中对分束李普奇棱镜和分束格兰-汤普逊棱镜的性能<sup>[12]</sup>(分束角、小分离角和光强分束比)进行比较分析。

### 1 分束李普奇棱镜与格兰-汤普逊棱镜分束角的比较

#### 1.1 分束李普奇棱镜的分束角

分束李普奇棱镜的光路如图 1 所示。图中双箭头表示晶体光轴的方向,  $S$  是棱镜的结构角,  $\Delta S$  称其为副结构角, 规定  $\Delta S$  以  $o$  光垂直出射的边为起始边, 逆时针为正, 顺时针为负;  $\theta$  是  $o$  光和  $e$  光在棱镜胶合界面上的入射角, 且  $\theta = S$ ;  $\theta_e$  是  $e'$  光波 ( $e$  光反射部分)

作者简介: 邵俊平 (1982-), 女, 硕士研究生, 主要从事偏光技术研究和偏光器件的设计与测量工作。

\* 通讯联系人。E-mail: sqwu@ mali. qfnu. edu. cn

收稿日期: 2008-05-08; 收到修改稿日期: 2008-06-03

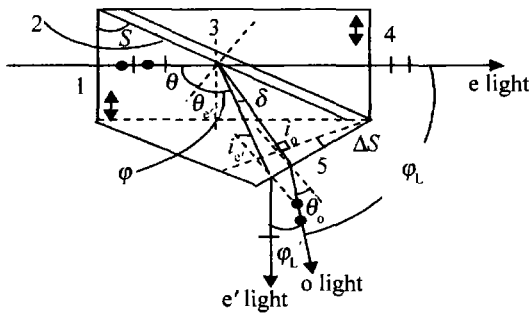


Fig. 1 The splitting Lippich prism optical analysis

的反射角;  $\delta$  是晶体中  $e'$  光波与  $o$  光波的分离角;  $i_e, i_o$  分别是光波  $e'$  和  $o$  光在界面 5 的入射角;  $\theta_o$  是  $o$  光的出射角;  $\varphi_L, \varphi_L'$  分别是分束李普奇棱镜的分束角和分离角,  $\varphi$  是  $e'$  光波与晶体光轴的夹角。

由图 1 可以得出分束李普奇棱镜的分束角为:

$$\varphi_L = \pi - 2S + \theta_o - i_o \quad (1)$$

由界面 5 出射的  $e'$  光与  $o$  光的分离角  $\varphi_L'$  由下式给出:

$$\varphi_L' = |\sin^{-1}(n_o \sin i_o) - \sin^{-1}(n_e \sin i_e)| \quad (2)$$

将图 1 的几何关系  $i_o = \Delta S, i_e = \delta + \Delta S, \delta = S - \sin^{-1}(n_e/n_o \sin S)$  代入(1)式和(2)式中得:

$$\varphi_L = \pi - 2S + \sin^{-1}(n_o \sin \Delta S) - \Delta S \quad (3)$$

$$\varphi_L' = |\sin^{-1}(n_o \sin \Delta S) -$$

$$\sin^{-1}\{n_e \sin[\Delta S + S - \sin^{-1}(n_e/n_o \sin S)]\}| \quad (4)$$

式中,  $n_e$  为  $e$  光波的折射率,  $n_o$  为  $e'$  光波的折射率, 且由下式给出<sup>[8]</sup>:

$$n_e = \frac{n_o n_c}{(n_o^2 \sin^2 \varphi + n_c^2 \cos^2 \varphi)^{1/2}} \quad (5)$$

$\varphi$  是  $e'$  光波与晶体光轴的夹角, 此处由下式确定<sup>[10]</sup>:

$$\tan \varphi = \frac{n_c^2 \tan^2 S - n_o^2}{2n_o \tan S} \quad (6)$$

由(3)式和(4)式可以发现,  $\varphi_L$  和  $\varphi_L'$  是结构角和副结构角的函数。

### 1.2 分束格兰-汤普逊棱镜的分束角

分束格兰-汤普逊棱镜的结构如图 2 所示。与分束李普奇棱镜结构相似, 只是晶体光轴方向扭转了  $90^\circ$ 。为了方便与分束李普奇棱镜的比较, 对角度做相似的标注。从图 1 和图 2 的比较可以发现, 在分束李

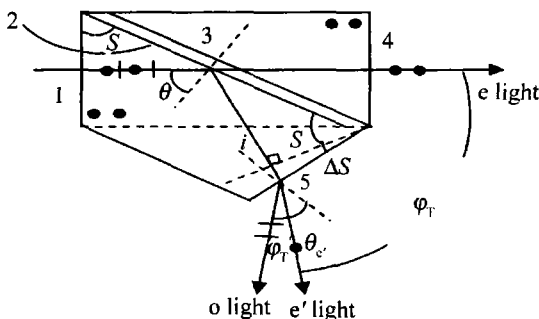


Fig. 2 Optical analysis of splitting Grand-Thompson prism

普奇棱镜的胶合层界面 2 上反射的  $o$  光波和  $e'$  光波有分离角  $\delta$ , 而分束格兰-汤普逊棱镜的  $o$  光波和  $e'$  光波的方向是一致的, 其原因是在分束格兰-汤普逊棱镜中  $e$  光波反射前后都取主折射率  $n_e$ 。若反射的  $o$  光和  $e'$  光垂直界面 5 (图中虚线) 出射, 出射棱镜后仍同向传播, 其结果无疑会影响  $o$  光的偏振度, 因此, 更需要副结构角  $\Delta S$ , 以将  $e$  光和  $o$  光分开一角度, 以保证出射  $o$  光的偏振度。在图 2 的界面 5, 由菲涅耳公式  $n_e \sin i = \sin \theta_e, n_o \sin i = \sin \theta_o$  以及  $i_o = \Delta S$ , 得分束角  $\varphi_T$  和分离角  $\varphi_T'$  可表示为:  $\varphi_T = \pi - 2S + \theta_o - i =$

$$\pi - 2S + \sin^{-1}(n_o \sin \Delta S) - \Delta S \quad (7)$$

$$\varphi_T' = |\theta_o - \theta_e| =$$

$$|\sin^{-1}(n_o \sin \Delta S) - \sin^{-1}(n_e \sin \Delta S)| \quad (8)$$

### 1.3 分束李普奇棱镜与分束格兰-汤普逊棱镜分束角和分离角的比较分析

(3)式与(7)式是完全相同的, 这说明当结构角  $S$  与副结构角  $\Delta S$  相同时, 无论分束李普奇棱镜还是分束格兰-汤普逊棱镜对于某一波长光的分束角是相同的。图 3 是由(3)式计算得到的  $S = 71.5^\circ$ , 入射光波长  $633\text{nm}$  时, 两类棱镜的分束角与副结构角  $\Delta S$  的关系曲线。由图中曲线可见: 随着  $\Delta S$  的由负到正的变化, 分束

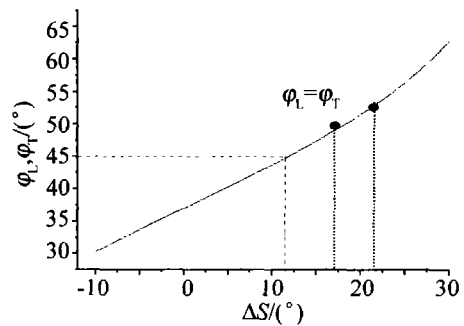


Fig. 3  $\varphi_L, \varphi_T$  change with vice structure angle  $\Delta S$

角由小到大变化;  $\Delta S = 12^\circ$  时, 可实现  $45^\circ$  分束。

同样在  $S = 71.5^\circ$ 、入射光波长为  $633\text{nm}$  时, 由(4)式和(8)式计算的  $\varphi_L', \varphi_T'$  与  $\Delta S$  的关系曲线如图 4 所示。由图中曲线可见: (1) 当  $\Delta S = 0^\circ$  时,  $\varphi_T' = 0^\circ$ , 而  $\varphi_L' > 2^\circ$ ; 当  $\Delta S = 15^\circ$  时,  $\varphi_L' = 0^\circ$ , 而  $\varphi_T' > 2^\circ$ ; (2) 当  $\Delta S = 7.5^\circ$  时,  $\varphi_L' = \varphi_T' = 1^\circ$ ; 当  $\Delta S < 7.5^\circ$  时,  $\varphi_L' > \varphi_T'$ ;

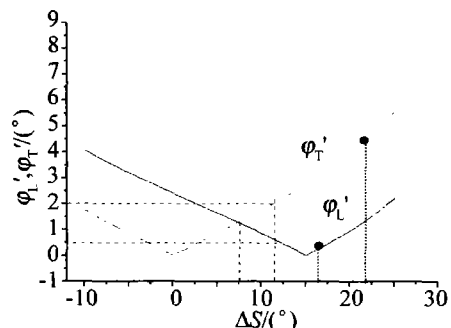


Fig. 4  $\varphi_L', \varphi_T'$  change with vice structure angle  $\Delta S$

当 $\Delta S > 7.5^\circ$ 时,  $\varphi_L' < \varphi_T'$ ; 即若需要小的分束角, 采用分束李普奇棱镜设计为好, 尤其是 o 光垂直出射的情况; 若需要大些的分束角(如  $\varphi = 45^\circ$ ), 采用分束格兰-汤普逊棱镜设计为好, 可以保证 o 光的偏振度。

### 2 光强分束比

分束李普奇棱镜 e 光和 o 光的透射比分别用  $T_{e,L}$  和  $T_{o,L}$  分别为:

$$T_{e,L} = \left[ \frac{16n_e^2 n_2 \cos\gamma_e \cos S}{(1+n_e)^2 (n_e \cos\gamma_e + n_2 \cos S)^2} \right]^2 \quad (9)$$

$$T_{o,L} = \frac{16n_o^2 \cos\theta_o \cos i_o}{(1+n_o)^2 (n_o \cos i_o + \cos\theta_o)^2} \quad (10)$$

式中,  $n_2$  为胶合层的折射率,  $\gamma_e$  和  $\theta_o$  由菲涅耳公式得

$$\text{到: } \gamma_e = \sin^{-1}\left(\frac{n_e}{n_2} \sin S\right), \theta_o = \sin^{-1}(n_o \sin \Delta S)。$$

分束格兰-汤普逊棱镜 e 光和 o 光的透射比  $T_{e,T}$  和  $T_{o,T}$ , 分别为:

$$T_{e,T} = \left[ \frac{16n_e^2 n_2 \cos\gamma_e \cos S}{(1+n_e)^2 (n_e \cos S + n_2 \cos\gamma_e)^2} \right]^2 \quad (11)$$

$$T_{o,T} = \frac{16n_o^2 \cos\Delta S \cos\theta_o}{(1+n_o)^2 (n_o \cos\theta_o + \cos\Delta S)^2} \quad (12)$$

定义  $L, T$  为李普奇棱镜、格兰-汤普逊棱镜的光强分束比, 则可得:

$$L = \frac{T_{e,L}}{T_{o,L}} = \frac{1}{\cos\theta_o \cos i_o} \times$$

$$\left[ \frac{4n_e^2 n_2 \cos\gamma_e \cos S (1+n_o) (n_o \cos i_o + \cos\theta_o)}{n_o (1+n_e)^2 (n_e \cos\gamma_e + n_2 \cos S)^2} \right]^2 \quad (13)$$

$$T = \frac{T_{e,T}}{T_{o,T}} = \frac{1}{\cos\Delta S \cos\theta_o} \times$$

$$\left[ \frac{4n_e^2 n_2 \cos\gamma_e \cos S (1+n_o) (n_o \cos\theta_o + \cos\Delta S)}{n_o (1+n_e)^2 (n_e \cos S + n_2 \cos\gamma_e)^2} \right]^2 \quad (14)$$

对应  $\lambda = 633\text{nm}$  时, 冰洲石晶体的主折射率  $n_e = 1.48515$ ,  $n_o = 1.65567$ 、取  $n_2 = 1.53$ ,  $S = 71.5^\circ$ , 由(13)

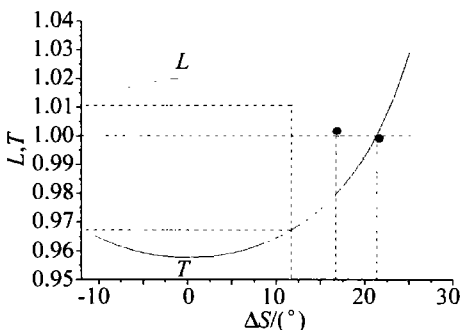


Fig. 5  $L, T$  change with vice structure angle  $\Delta S$

式和(14)式计算的  $L, T$  与  $\Delta S$  的关系曲线如图 5 所示。从图中可以看出:  $\Delta S$  在  $-10^\circ \sim 25^\circ$  的范围内变化时, 分束李普奇棱镜和分束格兰-汤普逊棱镜的光强分束比  $L$  和  $T$  随  $\Delta S$  的变化有小的波动, 在  $1 \pm 0.04$  以内; 当  $\Delta S = 17^\circ$  时,  $L = 1$ ; 当  $\Delta S = 21.5^\circ$  时,  $T = 1$ 。

### 3 实验测试

分别选用  $\Delta S = 17^\circ$  的分束李普奇棱镜和  $\Delta S = 21.5^\circ$  分束格兰-汤普逊棱镜样品进行验证性实验。实验原理如图 6 所示。

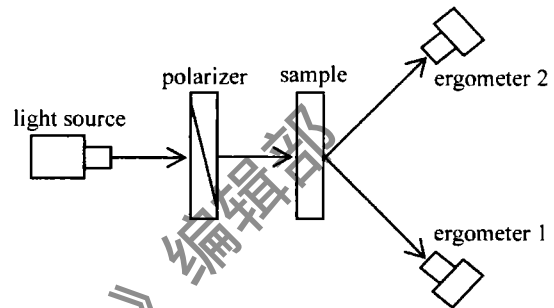


Fig. 6 The test principle

为便于与理论相比较, 测试结果分别标记在理论曲线图 3、图 4 和图 5 中, 可以发现: 实验结果与理论分析符合得很好; 通过分析可以得到实验与理论的绝对误差都在  $\pm 0.1\%$ 。

### 4 结论

根据分束李普奇棱镜和分束格兰-汤普逊棱镜设计结构和光路, 分析了棱镜的结构角  $S$  和副结构角  $\Delta S$  对两种分束棱镜的分束角、分离角以及光强分束比的影响。从比较分析的结果看: (1) 棱镜的分束角和光强分束比均受  $S$  和  $\Delta S$  的影响; 对于相同的  $S$  和  $\Delta S$ , 两种分束棱镜的分束角相同, 但它们的光强分束比却不同; 对于确定的波长和胶合剂, 完全可以通过设计  $S$  和  $\Delta S$  分别实现  $L = 1$  和  $T = 1$  的光强分束比; (2) 棱镜的分离角依赖于  $\Delta S$ , 当  $\Delta S = 0$  时,  $\varphi_T' = 0^\circ$ , 而  $\varphi_L' > 2^\circ$ , 这说明若需要光垂直输出, 则选用分束李普奇棱镜设计, 以保证 o 光的偏振度不受影响, 对于大分束角的需要(如  $\varphi = 45^\circ$ ), 选用分束格兰-汤普逊棱镜设计为好; (3) 通过实验验证了最佳设计方案的可行性。

#### 参考文献

[1] JIN G F, LI J Zh. Laser surveying [M]. Beijing: Science Press, 1998: 219-226 (in Chinese).  
 [2] WU F Q, LI G H, SONG L K. Study of high efficiency laser polarizers [J]. Chinese Journal of Lasers, 1995, 22(1): 37-39 (in Chinese).

(下转第 445 页)

是由于格兰-付科型钽酸铋偏光分束棱镜的胶合层是空气隙,因空气层极薄,光在空气隙传播时,会产生多光束干涉。当入射角变化时,光在胶合层间多光束干涉的强度的不同<sup>[10]</sup>。

实验值比理论值略微偏低,因为在实际测量过程中有系统误差及实验误差的存在。引起误差产生的原因主要有:(1)起偏镜方位的精度及消光比的精度可影响测试结果,在转动过程中应尽量细致地来回转动找到最大值点,以尽可能减小其引起的误差;另外,应选用高消光比的棱镜,以达到较好的实验结果。(2)光源起伏的不稳定性。(3)光路的准直性问题,应尽可能地确保光路准直,减小实验误差。

### 3 结 论

根据理论分析和实验研究:钽酸铋偏光分束棱镜在非正入射情况下,光强分束比随入射角的增大而减小,以负角度入射时光强分束比都大于1(即出射的o光光强大于e光光强)。以上数据可为用户使用钽酸铋偏光分束棱镜提供参量依据,适当改变入射角,可以调整两束光的强度相等。另外,研究表明,棱镜光强分束比的实验误差随着入射角的增大而减小,在入射角为3°入射时,误差值最小。因此,建议科技工作者在实验过程中可调整入射的角度,来减小系统误差和实验误差,正入射并不一定是明智之举。

### 参 考 文 献

- [1] TANG H J, WU F Q, DENG H Y. Transmittance comparison of Glan-Taylor prism and Glan-Foucault prism [J]. *Laser Technology*, 2006, 30(2): 215-217 (in Chinese).
- [2] NI Zh B, SONG L K, LIU J P, *et al.* Neotype high extinction ratio polarizer [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2007, 18(1): 43-45 (in Chinese).
- [3] WANG W, WU F Q, SU F F. Researches of splitting angle and splitting intensity ratio of OE double escape prism [J]. *Laser Technology*, 2003, 27(6): 560-562 (in Chinese).
- [4] ZHU H F, SONG L K, PENG H D, *et al.* Distribution transmitted light of Glan-Taylor prism [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, 34(12): 1881-1883 (in Chinese).
- [5] WANG C M, SONG L K, WANG L, *et al.* Effect of incident angle on splitting ratio of Glan polarizing splitting prisms [J]. *Laser Technology*, 2008, 32(2): 212-214 (in Chinese).
- [6] WU F Q, HUANG J Y, FENG T Zh, *et al.* Reach on beamsplitting intensity ratio of polarization beamsplit prism [J]. *Laser Technology*, 1994, 18(5): 310-312 (in Chinese).
- [7] BORN M, WOLF E. Principles of optics (volume one) [M]. Beijing: Science Press, 1978: 64-65 (in Chinese).
- [8] SHI H Sh, ZHANG G, SHEN H Y. Measurement of principal refractive indices and the thermal refractive index coefficients of yttrium vanadate [J]. *Journal of Synthetic Crystals*, 2001, 33(1): 85-88 (in Chinese).
- [9] KONG W J, WU F Q, HAO D Zh, *et al.* The design and test of narrow wavelength thin film polarizing beam-splitting prism [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, 33(11): 1373-1376 (in Chinese).
- [10] LI H X, WU F Q, FAN J Y. Thermodynamic effect on transmitted intensity perturbation of air-gaped Glan-type polarizing prisms [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, 52(8): 2081-2085 (in Chinese).
- [3] WU F Q, YU D H, LI G H. The design of a parallel beam splitting device with adjustable beam displacement [J]. *Journal of Applied Optics*, 1993, 14(6): 22-24 (in Chinese).
- [4] LI G H, WU F Q. Study on the design of parallel beam splitter [J]. *Journal of Applied Laser*, 1989, 7(4): 215-217 (in Chinese).
- [5] LI G H, WU F Q, YU D H. The dependence of beamsplitting angle of adjustable beamsplitting prism on the incident angle [J]. *Journal of Qufu Normal University (Natural Science)*, 1991, 17(2): 54-57 (in Chinese).
- [6] SHI M, WU F Q. The principle design and performance analysis of two way symmetric splitting angle beamsplitting prism [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, 35(3): 440-442 (in Chinese).
- [7] DENG H Y, WU F Q, ZHENG M M. Splitting intensity ratio of three-element Wollaston prism [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, 36(7): 1331-1334 (in Chinese).
- [8] WU F Q, ZHENG H Y. Characteristic study of backward-use of the rochan prism [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2002, 13(10): 1010-1012 (in Chinese).
- [9] KONG W J, WU F Q, HAO D Zh. The design and test of narrow wavelength thin film polarizing beam-splitting prism [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, 33(11): 1373-1376 (in Chinese).
- [10] TANG H J, WU F Q, DENG H Y. Transmittance comparison of Glan-Taylor prism and Glan-Foucault prism [J]. *Laser Technology*, 2006, 30(2): 215-217 (in Chinese).
- [11] ZHU H F, SONG L K, ZHENG Ch H. Study of light intensity transmission of crystal polarizing prisms [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, 33(4): 204-207 (in Chinese).
- [12] YU W H, LIU W U. Crystal physics [M]. Hefei: China Science and Technology University Press, 1998: 20-124 (in Chinese).
- [13] LI G H, WU F Q. Studies on beam-splitting Wollaston prisms [J]. *Journal of Qufu Normal University (Natural Science)*, 1990, 16(4): 43-45 (in Chinese).

(上接第442页)