

复合式剪切差可调谐平行分束偏光镜

马丽丽 吴福全 苏富芳

(曲阜师范大学激光研究所, 山东 曲阜 273165)

摘要 为了克服现有平行分束偏光镜剪切差较小且不可调谐的缺点, 拓宽平行分束偏光镜的应用范围, 采用冰洲石晶体和两块间距可调的三角形玻璃棱镜, 制作出造价相对低廉、剪切差大范围内可调谐、且具有优越的分束比和透射比的复合式剪切差可调谐平行分束偏光镜。从理论上分析了该复合式棱镜的剪切差可调谐范围、e 光和 o 光的分束比及未镀增透膜的情况下总的透射比随复合式棱镜中玻璃棱镜的结构角及两块玻璃棱镜的间距等结构参数的变化, 并给出了仿真计算结果。依据该结果设计了实验样品, 剪切差在 1.4~50.2 mm 范围内可调谐, e 光和 o 光的光强分束比优于 1.1, 且在未镀增透膜的情况下总的透射比大于 80%。

关键词 几何光学; 偏光棱镜; 剪切差; 平行分束

中图分类号 O436.3 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0216002

Composite Parallel Splitting Prism with Tunable Shear Difference

Ma Lili Wu Fuquan Su Fufang

(Institute of Laser, Qufu Normal University, Qufu, Shandong 273165, China)

Abstract In order to overcome the shortcoming of small and untunable shear difference in the existing parallel splitting prisms, and expand the application scope of the parallel splitting prisms, a composite parallel splitting prism is made by one iceland crystal prism and two triangle glass prisms with adjustable distance. The composite prism has the following advantages: low cost, shear difference tunable in a large scale, excellent splitting ratio and total transmission ratio. The changes of tuning scale, the e light and o light splitting ratio and the total transmission ratio without antireflection film coating of the composite prism with the the change of structure parameters including the distance between the two glass prisms and the glass prism angles are analyzed theoretically. Computer simulation results are given too. Based on the results, an experimental sample is designed and fabricated. When the distance between two glass prisms changes from 15 mm to 180 mm, for the transmitted light via Iceland crystal prism with 3 mm shearing distance, the shearing distance can be tuned between 1.4~50.2 mm. And the splitting ratio of e light and o light is less than 1.1, the total transmission ratio is higher than 80%.

Key words geometric optics; polarizing prism; shear difference; parallel splitting beams

OCIS codes 220.3620; 230.1360; 230.5440; 230.5480

1 引 言

偏振光在现代光学技术领域具有重要的作用^[1~5], 平行分束偏光棱镜可以将自然光分解为偏振方向相互垂直、传播方向一致的两束线偏振光。常规的平行分束偏光镜通常由一块天然晶体冰洲石制成, 晶体切割面与光轴成一定角度^[6,7], 光经过该棱镜后, 分成振动方向相互垂直、出射方向相互平行

的两束平面偏振光。这两束平行出射光的垂直间距称为剪切差, 是表征平行分束偏光镜性能的重要参量。对于常规的平行分束偏光棱镜, 它产生的剪切差是一个定值, 不可调谐, 且很小, 一般小于 5 mm^[6]。虽然利用由双折射晶体和特殊形状的玻璃块组合成的复合式棱镜设计可以改变剪切差, 但是要调谐剪切差就必须更换玻璃块且重新调整光

收稿日期: 2011-09-14; **收到修改稿日期**: 2011-10-14

基金项目: 国家青年科学基金项目(11104161)资助课题。

作者简介: 马丽丽(1977—), 女, 博士研究生, 主要从事偏光技术与器件设计等方面的研究。E-mail: Lily9981@tom.com

导师简介: 吴福全(1952—), 男, 教授, 主要从事偏光技术与器件设计等方面的研究。E-mail: fqwu@mail.qfnu.edu.cn

(通信联系人)

路,并且这种结构的棱镜不能实现剪切差连续调谐^[7,8]。当然,可以利用组合渥拉斯顿偏光棱镜或组合冰洲石晶体的方法得到剪切差连续可调的平行分束偏光镜^[9~11],但其结构较为复杂,且要耗费较多昂贵的冰洲石材料,这是很不经济的^[12~14]。另外,由于常用的冰洲石晶体和以冰洲石晶体做成的渥拉斯顿棱镜的尺寸的限制,一般调谐后的最大剪切差不会超过10 mm,鉴于这一数值的限制,剪切差可调谐范围不会超过10 mm。本文利用由冰洲石和两块截面为三角形的普通玻璃棱镜,设计制作了剪切差可调谐的平行分束偏光镜,通过调节两玻璃棱镜的间距,可实现对剪切差的大范围调节。利用菲涅耳公式对出射光的透射比和光强分束比进行了分析,并对理论分析的结果进行了计算机仿真,通过讨论分析,优化了设计参数,设计制作出了剪切差可调的复合式平行分束偏光镜样品,并对理论结果进行了实验验证。新设计的棱镜对最大剪切差的限制只与玻璃棱镜有关,玻璃棱镜可以做得很大,因此最大剪切差可以达到 50.2 mm,且在 1.4~50.2 mm 范围内可调谐,可调范围达 48.8 mm,远远大于传统设计的棱镜。

2 设计原理

复合式剪切差可调谐平行分束偏光镜的设计光路如图 1 所示,图中 A 为冰洲石晶体,其光轴与棱镜通光端面的夹角 $\phi=45^\circ$ 。入射自然光进入棱镜 A 后分为 o 光、e 光两束平面偏振光,o 光的光矢量的振动方向垂直于入射面,e 光光矢量的振动方向与入射面平行。经棱镜 A 后,o 光和 e 光彼此分开,剪切差为 d_1 。B 和 C 为棱脊相对放置的两块由 K9 玻璃制成的三角形棱镜,棱镜底角即结构角均为 γ ,玻璃棱镜底面与入射光方向垂直,且棱脊位于 d_1 的平分线上。光在棱镜 B 的后表面发生折射,且入射角和折射角分别为 α_1 、 α_2 ,由斯涅耳定律^[15,16]可得

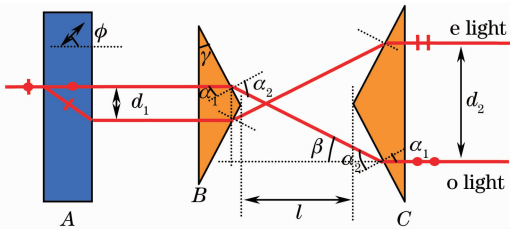


图 1 剪切差可调谐平行分束偏光棱镜结构示意图
Fig. 1 Schematic of shear difference tunable parallel beam splitting polarizing prism

$$n \sin \alpha_1 = \sin \alpha_2, \quad (1)$$

式中 $\alpha_1 = \gamma$, n 为棱镜的折射率。同样,在 C 的前表面,也满足(1)式。光经棱镜 B 和 C 后,剪切差 d_2 满足

$$d_2 = \frac{d_1 \tan \gamma \tan \beta + 2l \tan \beta - d_1}{1 - \tan \gamma \tan \beta}, \quad (2)$$

式中 l 为 B 和 C 两棱镜棱脊之间的距离, $\beta = \alpha_2 - \alpha_1$ 。另外,由图 1 可以看出,要使光束经棱镜 C 后出射的是平行光,棱镜 B 和 C 的距离 l 应存在最小值 l_{\min} ,只有当 $l > l_{\min}$ 时,从棱镜 C 出射的 o 光和 e 光才平行,且满足

$$l_{\min} = \frac{d_1/2}{\tan \beta} - \frac{d_1}{2} \tan \gamma. \quad (3)$$

入射光进入棱镜 A 后,被分为 o 光和 e 光,设 o 光和 e 光在棱镜 A 前端面上的光强反射系数分别为 R_o 和 R_e ,由于棱镜 A 的前后端面平行,所以 o 光和 e 光在棱镜 A 后端面上的光强反射系数也分别为 R_o 和 R_e 。从棱镜 A 出射后二者在棱镜 B 前端面的光强反射系数均为 R_1 ,在棱镜 B 的后端面,o 光和 e 光的光强反射系数分别为 R'_o 和 R'_e 。与棱镜 B 类似,在棱镜 C 的前端面 o 光和 e 光的光强反射系数分别为 R'_o 和 R'_e ,在棱镜后端面,二者的光强反射系数均为 R_1 。则最后从棱镜 C 出射的 o 光和 e 光相对于进入棱镜 A 的入射光的透射比分别为^[16~19]

$$\begin{cases} T_o = \frac{1}{2} (1 - R_o)^2 (1 - R_1)^2 (1 - R'_o)^2 \\ T_e = \frac{1}{2} (1 - R_e)^2 (1 - R_1)^2 (1 - R'_e)^2 \end{cases}, \quad (4)$$

式中 $R_o = \frac{(n_o - 1)^2}{(n_o + 1)^2}$, $R_e = \frac{(n_e - 1)^2}{(n_e + 1)^2}$, 其中 $\frac{1}{n_e^2} = \frac{\sin^2 \phi}{n_e^2} + \frac{\cos^2 \phi}{n_o^2}$, n_o 、 n_e 分别为棱镜 A 中 o 光和 e 光的主折射率, $R_1 = \frac{(n - 1)^2}{(n + 1)^2}$, $R'_o = \frac{\sin^2(\alpha_2 - \alpha_1)}{\sin^2(\alpha_2 + \alpha_1)}$, $R'_e = \frac{\tan^2(\alpha_2 - \alpha_1)}{\tan^2(\alpha_2 + \alpha_1)}$ 。则通过复合棱镜出射的 e 光和 o 光的光强分束比为

$$P = \frac{T_e}{T_o} = \frac{(1 - R_e)^2 (1 - R'_e)^2}{(1 - R_o)^2 (1 - R'_o)^2}. \quad (5)$$

3 计算机仿真

选取棱镜 A 为冰洲石晶体,入射光的波长 $\lambda = 632.8 \text{ nm}$,则 o 光和 e 光的主折射率分别为 $n_o = 1.65567$, $n_e = 1.48515$ 。取 $d_1 = 3 \text{ mm}$, $n = 1.515$, γ 在 $1^\circ \sim 40^\circ$ 范围内取值,则复合式剪切差可调谐平行

分束偏光镜工作特性的计算机仿真结果如图 2 所示。图 2(a)给出了棱镜 B 和 C 之间的最小距离与棱镜结构角之间的关系。由图可知,随着棱镜结构

角的增大,棱镜 B 和 C 之间的最小距离 l_{\min} 先减小,再增大,当 $\gamma < 5^\circ$ 时, l_{\min} 变化很快,而当 $\gamma > 5^\circ$ 时, l_{\min} 变化较小,且保持在 40 mm 以下。

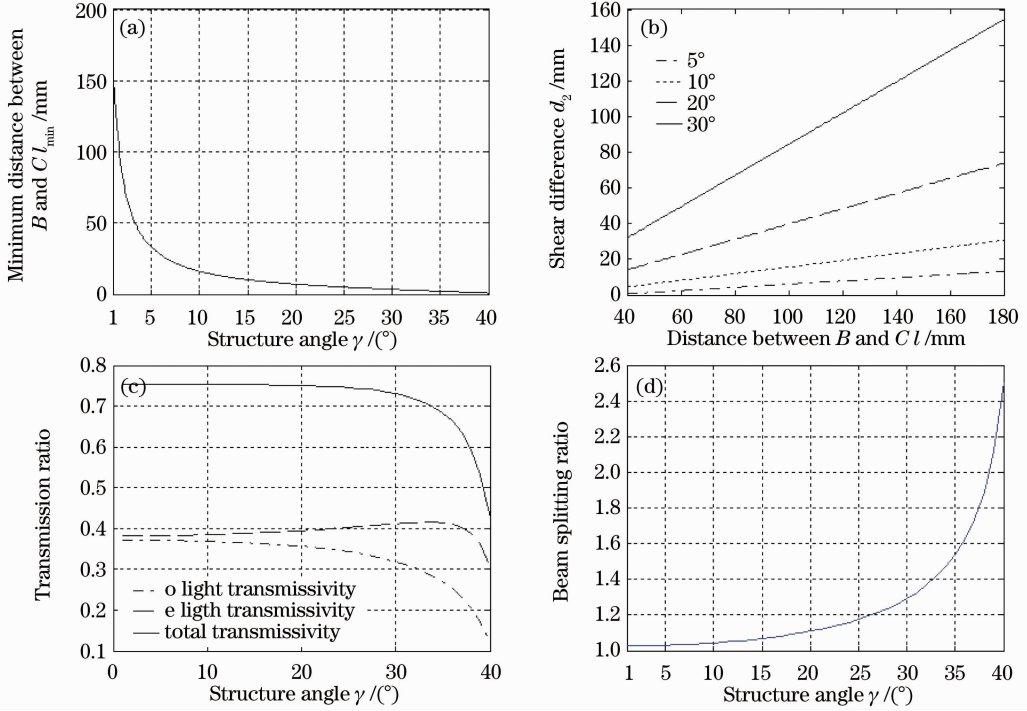


图 2 理论计算的计算机仿真结果。(a) B 与 C 最小距离与棱镜结构角关系;(b)剪切差 d_2 随 C 变化关系;(c) o 光和 e 光及总光强透射比随棱镜结构角 γ 的变化;(d) e 光和 o 光光强分束比随棱镜结构角的变化

Fig. 2 Results of theoretical calculation and computer simulation. (a) Relationship between the minimum distance between B and C and the structure angle; (b) relation between the shear difference and the distance between B and C; (c) o and e light transmittance changing with the structure angle; (d) relationship between the splitting ratio (e light intensity divided by o light intensity) and the structure angle

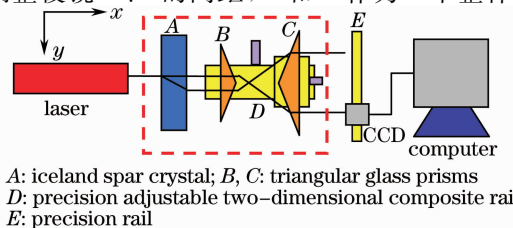
图 2(b)给出当 γ 分别取 5° 、 10° 、 20° 和 30° 时,剪切差 d_2 随 l 的变化曲线, l 的取值范围为 40 ~ 180 mm。由图可知,当 γ 一定时, d_2 与 l 成线性关系,且 γ 越大,直线的斜率越大,即当 l 的取值范围一定时, γ 越大,剪切差的可调范围越大。图 2(c)给出了 o 光和 e 光及总的光强透射比随棱镜结构角 γ 的变化关系。由图可知,对于 e 光,其透射比随 γ 的增大,先增大后减小,而 o 光及总的光强透射比则单调减小。当 $\gamma > 30^\circ$ 时,总的光强透射比衰减很快。图 2(d)给出了 e 光和 o 光的光强分束比随棱镜结构角的变化关系。由图可知,随着棱镜结构角的增大,光强分束比单调增大,且结构角越大,分束比增大的幅度也随之增大。但当 $\gamma < 25^\circ$ 时,光强分束比小于 1.2。由此可见,虽然结构角的增大能使棱镜 B 和 C 之间的距离在一定范围内变化时剪切差的可调范围增大,但同样也会使 e 光和 o 光的光强分束比增大,且过大的结构角还会引起光强透射比的显著下降,所以在应用时应考虑实际的需要选择合适的

结构角。

4 实验验证及误差分析

4.1 实验装置及数据测量

实验光路如图 3 所示:虚线框内为复合式剪切差可调谐平行分束偏光镜,冰洲石晶体 A 的两个通光面与三角形玻璃棱镜 B 和 C 的底面平行,且 B 与 C 棱脊的连线与 A 的通光面垂直, B 和 C 放置在二维可调精密复合导轨 D 上, C 可沿 x 方向精密移动,以调整棱镜 B、C 的间距, B 和 C 作为一个整体可沿



A: iceland spar crystal; B, C: triangular glass prisms
D: precision adjustable two-dimensional composite rail
E: precision rail

图 3 实验装置示意图

Fig. 3 Schematic of experimental setup

y 轴精密移动,以保证 B 和 C 的棱脊正好位于 A 的两束出射光的中间,E 为一维精密导轨,其上 CCD 可沿 y 方向移动,CCD 采集的数据由计算机进行处理,对出射光束的位置及相对强度做出精确判断。实验中所采用的精密导轨,其测量精度均为 0.01 mm。

实验中采用的光源为 He-Ne 激光器,出射光的波长 $\lambda=632.8\text{ nm}$,棱镜 A 采用冰洲石晶体,光轴与入射界面的夹角 $\phi=45^\circ$,o 光和 e 光的主折射率分别为 $n_o=1.65567$ 、 $n_e=1.48515$,从 A 出射的光的剪切差 $d_1=3\text{ mm}$,棱镜 B 和 C 采用 K9 玻璃,折射率 $n=1.515$,结构角 $\gamma=15^\circ$ 。当 B、C 之间的距离 l 在 40~180 mm 的范围内取值时,实验中测得的剪切差与理论值的比较如图 4 所示。另外由(5)式可知,光强分束比 P 与 l 无关,且由实验条件给出的数据可以计算 $P=1.069$ 。表 1 给出了实验测得的光强分束比。分束比相对理论值的平均相对误差为

$$\delta = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|P_i - P|}{P} \quad (6)$$

由表 1 数据计算可得: $\delta=1.03\%$ 。

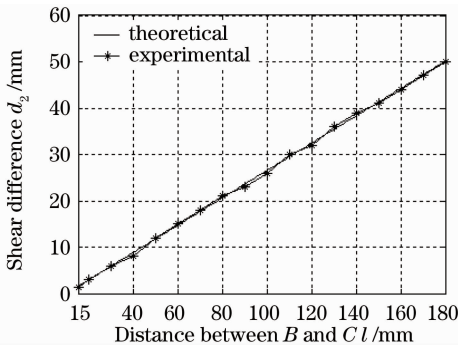


图 4 剪切差随棱镜 B 和 C 之间距离变化的理论和实验对比

Fig. 4 Comparison between theoretical and experimental results when the shear difference changing with the distance between B and C

表 1 不同 l 取值下测得的光强分束比

Table 1 Light intensity splitting ratio measured under different l

l / mm	P_i	l / mm	P_i
40	1.07	120	1.07
50	1.06	130	1.06
60	1.05	140	1.07
70	1.07	150	1.08
80	1.08	160	1.07
90	1.10	170	1.09
100	1.06	180	1.05
110	1.09		

4.2 误差分析

实验中的误差主要来源:1)晶体 A 的前后端面、玻璃棱镜 B 的前端面、C 的后端面无法确保与入射光线严格垂直;2)组成器件 A、B、C 加工时存在一定的加工误差;3)器件 A、B、C 对 p 光和 s 光的吸收差异;4)光源发光强度的波动。其中 1)、2)将对剪切差及分束比的实验测量造成影响,而 3)、4)只影响分束比的测量。

5 结 论

利用一块冰洲石晶体和两块三角形玻璃棱镜,设计出了一种复合式剪切差可调谐的平行分束偏光镜,并利用斯涅耳定律和菲涅耳定律,详细分析了光在各个棱镜表面的传播行为,最终给出了复合棱镜的横向尺寸、剪切差的可调范围、光的透射比及光强分束比与棱镜结构角的关系。利用计算机进行了仿真计算,结果表明,考虑到复合式棱镜的横向尺寸不宜过大,棱镜结构角应大于 5° ,此时,两个三角形棱镜的最小间距小于 4 cm。另外,随着棱镜结构角的增大,在两个三角形玻璃棱镜可调范围一定的情况下,可调剪切差随之增大,但光强透射比亦随之减小,且当棱镜结构角大于 35° 时,e 光和 o 光的透射比均迅速下降。所以实际设计时,应根据需要使用,合理选择棱镜结构角。最后,利用结构角为 15° 的三角形 K9 玻璃棱镜设计组装成复合式平行分束偏光镜,两玻璃棱镜的可调范围为 15~180 mm,测量了剪切差及光强分束比随棱镜间距的变化,实验结果与理论计算相吻合。

参 考 文 献

- Guo Zhenwu, Zhang Hongxia, Jia Dagong *et al.*. Measurement of polarization coupling and analysis of vibration disturbance signal[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(8): 0805009
郭振武,张红霞,贾大功等. 偏振耦合测试及其振动干扰信号分析[J]. *中国激光*, 2011, **38**(8): 0805009
- Huang Xufeng, Bu Yang, Wang Xiangzhao. Effect of polarization analyzers perpendicular error on measurement accuracy of polarization position system[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(1): 0108002
黄旭锋,步扬,王向朝. 偏振正交误差对偏振光导航定位系统测量精度的影响[J]. *中国激光*, 2011, **38**(1): 0108002
- Li Fanyue, Han Jie, Zeng Aijun *et al.*. Method for measuring retardation by swinging quarter-wave plate with phase modulator [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(2): 0208003
李凡月,韩杰,曾爱军等. 基于相位调制和样品摆动的 1/4 波片相位延迟量测量方法[J]. *中国激光*, 2011, **38**(2): 0208003
- Wu Lianghai, Gao Jun, Fan Zhiguo *et al.*. Scattering of particles in the atmosphere and their influence on celestial polarization patterns[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(7): 0701005
吴良海,高隽,范之国等. 大气粒子散射特性及其对空间偏振

- 分布的影响[J]. 光学学报, 2011, **31**(7): 0701005
- 5 Ni Ming, Cao Chunyan, Hu Zhengliang *et al.*. Polarization diversity technology and its application in fiber optic sensors[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(7): 0706005
倪明, 曹春燕, 胡正良等. 偏振分集技术及其在光纤传感器中的应用[J]. 光学学报, 2011, **31**(7): 0706005
- 6 J. M. Bennett. Handbook of Optics[M]. New York: McGraw-Hill, 1995, 3.1~3.19
- 7 Jia Peng, Li Guohua, Peng Handong. New design of turning composite parallel splitting prism[J]. *Laser Technology*, 2008, **32**(2): 154~156
贾朋, 李国华, 彭捍东. 转向型复合式平行分束棱镜的新设计[J]. 激光技术, 2008, **32**(2): 154~156
- 8 Zheng Mengmeng, Wu Fuquan, Bi Jia *et al.*. Design of polarizer which can scaling or blooming the parallel beam splitter's shear difference[J]. *Laser Journal*, 2007, **28**(2): 24~25
郑萌萌, 吴福全, 毕佳等. 用于平行分束偏光镜剪切差调整的缩·扩束棱镜设计[J]. 激光杂志, 2007, **28**(2): 24~25
- 9 Wu Fuquan, Yu Dehong, Li Guohua. The design of a parallel beam splitting polarizer with adjustable micro-beam-displacement [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 1993, **4**(6): 383~385
吴福全, 于德洪, 李国华. 可调微剪切差平行分束偏光器设计[J]. 光电子·激光, 1993, **4**(6): 383~385
- 10 Wu Fuquan, Yu Dehong, Li Guohua *et al.*. The design of a parallel beamsplitting device having adjustable beam-displacement [J]. *Optics and Precision Engineering*, 1994, **2**(3): 66~69
吴福全, 于德洪, 李国华等. 可调微剪切差平行分束偏光器[J]. 光学精密工程, 1994, **2**(3): 66~69
- 11 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. 双反射可调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
- 12 Wu Fuquan, Yu Dehong, Li Guohua. The design of a new kind of parallel beamsplitting device with adjustable beam-displacement [J]. *Laser Journal*, 1993, **14**(3): 131~133
吴福全, 于德洪, 李国华. 新型可调剪切差平行分束偏光器设计[J]. 激光杂志, 1993, **14**(3): 131~133
- 13 Wang Tao, Wu Fuquan, Ma Lili. Effect of air-gap polarizing prism on distribution of light intensity of single-mode Gaussian beam[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(9): 1335~1339
王涛, 吴福全, 马丽丽. 空气隙偏光镜对单模高斯光束光强分布影响的分析[J]. 光学学报, 2006, **26**(9): 1335~1339
- 14 Wang Tao, Wu Fuquan, Ma Lili. Measurement of air-space thickness of Glan-Taylor prisms[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(3): 676~681
王涛, 吴福全, 马丽丽. 格兰-泰勒棱镜空气隙厚度的测量[J]. 光学学报, 2009, **29**(3): 676~681
- 15 Wang Tao, Wu Fuquan, Ma Lili. Effects on single-mode beams of Glan-Foucault prisms[J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2009, **20**(2): 264~268
王涛, 吴福全, 马丽丽. 格兰-傅科棱镜对单模高斯光束的影响[J]. 光电子·激光, 2009, **20**(2): 264~268
- 16 M. Born, E. Wolf. Principles of Optics [M]. Yang Jiasun Transl. Beijing: Science Press, 1978. 61~71
M. 玻恩, E. 沃耳夫. 光学原理[M]. 杨葭荪译. 北京: 科学出版社, 1978. 61~71
- 17 Wang Tao, Wu Fuquan, Ma Lili *et al.*. Effects of Nicol prism on the intensity distribution of single-mode Gaussian light beam[J]. *Physics Experimentation*, 2008, **28**(4): 1~5
王涛, 吴福全, 马丽丽等. 尼科耳棱镜对单模高斯光束光强分布的影响[J]. 物理实验, 2008, **28**(4): 1~5
- 18 Wang Tao, Wu Fuquan, Ma Lili *et al.*. Effects of Marple-Hess prism on distribution of light intensity of single-mode Gaussian beam[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(7): 1473~1477
王涛, 吴福全, 马丽丽等. 马普-赫斯棱镜对单模高斯光束光强分布影响的分析[J]. 光子学报, 2008, **37**(7): 1473~1477
- 19 Li Jingzhen. Handbook of Optics[M]. Xi'an: Technology and Science Press of Shaanxi, 1986. 497~521
李景镇. 光学手册[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1986. 497~521

栏目编辑: 李文喆