

文章编号: 1001-3806(2016)06-0843-05

## 钽酸钇 Wollaston 棱镜分束特性分析

岳增友<sup>1</sup>, 吴福全<sup>2\*</sup>, 孙丹<sup>1</sup>

(1. 曲阜师范大学 山东省激光偏光与信息重点实验室, 曲阜 273165; 2. 曲阜师范大学 激光研究所, 曲阜 273165)

**摘要:** 为了解钽酸钇 Wollaston 棱镜的分束特性, 通过棱镜中的光路分析, 得到光束正入射时 o 光光束和 e 光光束的分束特性公式, 并用 MATLAB 软件拟合得到棱镜的分束特性关于入射光波长和结构角的变化关系曲线。结果表明, 对于一定结构角的棱镜, 其分束角具有明显的色散特性, 波长越短, 分束角越大, 且变化也越快, 在红外光谱范围, 波长对棱镜分束角的影响减小, 其分束角趋于稳定; 分束角的对称性受波长变化的影响较小, 应用中可以忽略。棱镜的结构角与入射光波长对棱镜的透射比均有影响, 当棱镜的结构角一定时, 透射比随入射光的波长呈振荡性变化, 且 o 光透射比的光谱效应更为明显。该研究可以为棱镜的设计制作和实际使用提供有价值的参考。

**关键词:** 偏振光学; 钽酸钇晶体; Wollaston 棱镜; 分束角; 光强分束比

中图分类号: O436.3

文献标志码: A

doi:10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2016.06.015

### Analysis of splitting characteristics of YVO<sub>4</sub> Wollaston prisms

YUE Zengyou<sup>1</sup>, WU Fuquan<sup>2</sup>, SUN Dan<sup>1</sup>

(1. Shandong Provincial Key Laboratory of Laser Polarization and Information, Qufu Normal University, Qufu 273165, China;

2. Laser Research Institute, Qufu Normal University, Qufu 273165, China)

**Abstract:** In order to investigate splitting properties of YVO<sub>4</sub> Wollaston prisms, by analysis of wave propagation in the prism, the formulas of o beam and e beam at normal incidence were obtained. The curve of splitting properties of the prism changing with wavelength and structure angle was obtained by MATLAB software. The results show that for the prism with the given structure angles, the dispersion property of splitting angle is evident. The shorter the wavelength, the greater the splitting angle, the faster the change. In infrared region, the effect of incident wavelength on splitting angle reduces and splitting angle is stable. The effects of wavelength changes on the symmetry of splitting angle are so little that they can be ignored in the application. The structure angles of the prism and the incident light wavelength have effects on the transmission ratio of prism. For the given structure angles of prism, transmission ratio changes with the wavelength of incident light oscillatory. Spectral effects of o light transmission ratio are more obvious. The research provides an important and valuable reference to the design and application of YVO<sub>4</sub> prisms.

**Key words:** polarization optics; yttrium vanadate crystal; Wollaston prism; splitting angle; light intensity splitting ratio

## 引言

Wollaston 棱镜是非常重要的偏光分束器件, 在椭圆偏测量<sup>[1]</sup>和精密光学遥感系统<sup>[2]</sup>中得以广泛应用。到目前为止, 使用最多的 Wollaston 棱镜<sup>[3-4]</sup>是由冰洲石晶体制作的。无色透明的光学级方解石 (CaCO<sub>3</sub>) 称为冰洲石晶体, 它是一种天然矿物, 具有大的双折射

率, 在 350nm ~ 2800nm 的光谱范围有高的透射比。尽管方解石在地球上仅次于石英储量较大的天然矿物, 但达到无杂质、无气泡、无包裹体、无裂隙、无节瘤等缺陷、透明无色的光学级晶体极少, 现已显现出不能满足越来越多需求的困境。因此, 在人工生长冰洲石晶体仍未获成功的情况下, 近年来已开始用人工双折射晶体研制偏光器件。目前试用的主要有钽酸钇 (YVO<sub>4</sub>)<sup>[5]</sup>和 α-BBO<sup>[6-7]</sup>两种单轴晶体。钽酸钇晶体化学稳定机械性能好、透明波段宽 (400nm ~ 5000nm), 它的双折射率  $\Delta n$  ( $\Delta n > 0.2$ ) 大于冰洲石晶体, 接近金红石<sup>[8-9]</sup>, 生长尺寸达到  $\varnothing(30 \sim 35) \text{mm} \times 50 \text{mm}$ <sup>[10]</sup>, 是研制偏光棱镜合适的晶体材料。WANG 等人给出了钽酸钇格兰-付科棱镜的设计<sup>[11]</sup>。而 WANG 等人给出了钽酸钇 Wollaston 棱镜的设计<sup>[12]</sup>, 但未对钽酸钇 Wollaston 棱镜分束特性的分析。本文

基金项目: 山东省高等学校科技计划资助项目 (J13LJ06); 山东大学晶体材料国家重点实验室开放课题资助项目 (KF1406); 曲阜师范大学博士科研启动基金资助项目 (bsqd033000112)

作者简介: 岳增友 (1990-), 男, 硕士研究生, 现主要从事偏振光学与器件的研究。

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

收稿日期: 2015-10-08; 收到修改稿日期: 2015-10-15

中研究了波长和结构角对棱镜分束角以及光强分束比的影响,为钽酸钷棱镜的制作设计和实际使用提供有价值的参考。

## 1 钽酸钷 Wollaston 棱镜分束角特性

### 1.1 钽酸钷 Wollaston 棱镜分束角的理论计算

为明晰起见,本文中约定:经棱镜分束后 o, e 两束线偏振光的称谓均是以光在棱镜前部分的属性而定。一束自然光或部分偏振光垂直入射于棱镜 o 光和 e 光在钽酸钷 Wollaston 棱镜中传播的光路如图 1 所示。

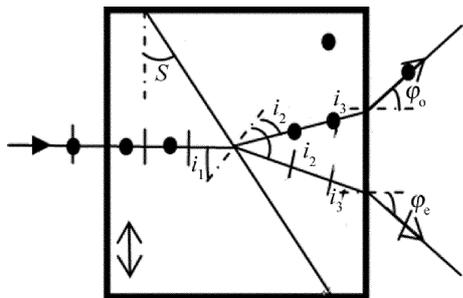


Fig. 1 Schematic diagram of optical path in an YVO<sub>4</sub> Wollaston prism

图 1 中 S 是棱镜的结构角,  $i_1 \sim i_3$  是光线在棱镜中的折对角。光束依次经入射端面、胶合面和出射端面折射得到 o 光光束出射角  $\varphi_o$  和 e 光光束出射角  $\varphi_e$ 。由 o 光在各界面上的折射:

$$\begin{cases} n_o \sin i_1 = n_e \sin i_2 \\ n_e \sin i_3 = \sin \varphi_o \end{cases} \quad (1)$$

图 1 中的三角关系为:

$$\begin{cases} i_1 = S \\ i_2 + i_3 = S \end{cases} \quad (2)$$

可以得到 o 光光束的出射角  $\varphi_o$  为:

$$\varphi_o = \arcsin \left\{ n_e \sin \left[ S - \arcsin \left( \frac{n_o}{n_e} \sin S \right) \right] \right\} \quad (3)$$

式中,  $n_o, n_e$  分别是钽酸钷晶体中 o 光和 e 光的主折射率。

同理,可以得到 e 光光束的出射角  $\varphi_e$  为:

$$\varphi_e = \arcsin \left\{ n_o \sin \left[ \arcsin \left( \frac{n_e}{n_o} \sin S \right) - S \right] \right\} \quad (4)$$

钽酸钷 Wollaston 棱镜的分束角  $\varphi$  为 o 光出射角  $\varphi_o$  和 e 光出射角  $\varphi_e$  的和:

$$\varphi = \varphi_o + \varphi_e \quad (5)$$

为分析钽酸钷 Wollaston 棱镜分束角的对称性,把 o 光和 e 光出射棱镜的折射角比值称为分束角的对称度,用  $\eta$  表示为:

$$\eta = \frac{\varphi_o}{\varphi_e} \quad (6)$$

### 1.2 钽酸钷 Wollaston 棱镜分束角的光谱效应

设钽酸钷 Wollaston 棱镜的结构角为 21.6°, 光垂

直入射于棱镜,将修正后的 Sellmeier 方程<sup>[13]</sup>为:

$$n_e^2 = 4.59905 + 0.110534 / (\lambda^2 - 0.04813) - 0.0122676\lambda^2 \quad (7)$$

$$n_o^2 = 3.77843 + 0.069736 / (\lambda^2 - 0.04724) - 0.0108133\lambda^2 \quad (8)$$

分别代入(3)式~(5)式,拟合出 o 光和 e 光的折射角以及棱镜的分束角随入射波长  $\lambda$  的变化曲线,如图 2 所示。分束角的对称度  $\eta$  与波长的关系曲线如图 3 所示。

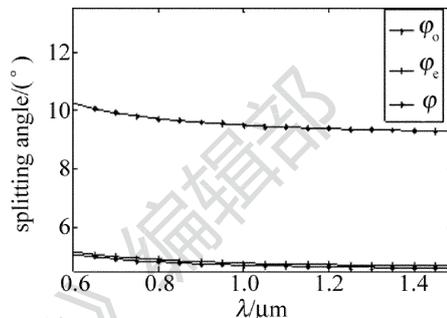


Fig. 2 Splitting angle versus wavelength

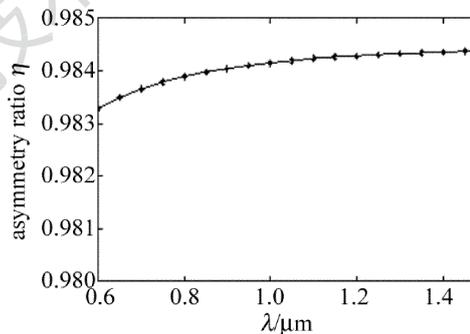


Fig. 3 Asymmetry of splitting angle versus wavelength

由图 2 可见,当光垂直入射时:在可见光波段, o 光和 e 光的出射角随波长的增加而变小;在红外波段,出射角基本不变。即对于钽酸钷 Wollaston 棱镜,分束角在可见光波段内,受入射波长变化影响较大,分束角具有明显的色散特性;而在红外波段具有很好的色散稳定性。由图 3 中曲线可知,分束角的对称度随着波长增加而增大,但是增大的幅度很小,从 500nm ~ 1200nm,对称分束比增加了不到 0.002,由此可见:分束角的对称性受波长变化影响不大,可以忽略。

制作了结构角为 21.6° 和 30° 的两只棱镜,在波长 Table 1 Splitting angle of YVO<sub>4</sub> Wollaston prisms with 21.6° and 30° structure angles

wavelength	21.6°			30°		
	o light angle	e light angle	splitting angle	o light angle	e light angle	splitting angle
632.8nm	5°01'	5°04'	10°05'	7°14'	7°30'	14°44'
670nm	4°57'	5°04'	10°01'	7°09'	7°29'	14°38'
1064nm	4°39'	4°47'	9°26'	6°47'	7°01'	13°48'

632.8nm, 670nm 和 1064nm 下做了测试, 测试结果如表 1 所示, 两只棱镜在 3 个波长下测得分束角的实验值和理论值符合得很好, 以上实验数据进一步证明了棱镜的光谱效应。

### 1.3 棱镜结构角对分束角的影响

在 Wollaston 棱镜设计中, 结构角的选择直接影响棱镜的分束特性, 为分析结构角对分束角特性的影响, 取波长为 670nm 的光波垂直入射, 由 (3) 式 ~ (5) 式做出分束角随结构角的变化曲线, 如图 4 所示。由 (3) 式、(4) 式和 (6) 式做出的分束角的对称度关于结构角的关系曲线如图 5 所示。

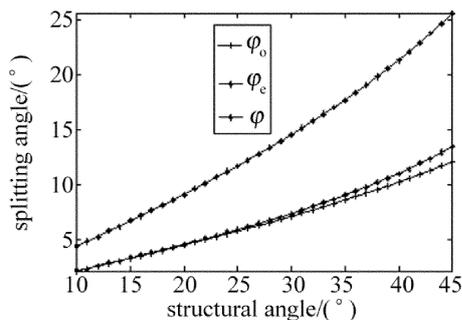


Fig. 4 Splitting angle versus structure angle

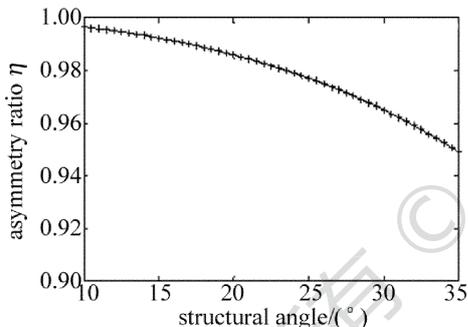


Fig. 5 Asymmetry of splitting angle versus structure angle

由图 4 和图 5 中曲线得到, 对于垂直入射的单色光束, o 光和 e 光的折射角随着结构角的增大而增大; 在小的结构角设计时 (小于 15°), o 光和 e 光基本保持对称分束, 随着结构角的变大, 分束角的对称度变差; 当设计结构角取 35° 时 (由于胶合剂界面存在全反射的限制, 结构角一般应小于 40°<sup>[14]</sup>), o 光和 e 光出射角的差值为 0.465°。表 1 中两只棱镜在波长 670nm 时测得的实验数据与图 4 中计算得到的值符合得很好, 证明了结构角对分束角的影响。

## 2 钽酸铋 Wollaston 棱镜的透射比和光强分束比

### 2.1 钽酸铋 Wollaston 棱镜的透射比

图 6 为钽酸铋 Wollaston 棱镜中 e 光的光路, 在入射端面 1 光垂直入射, 依次经过胶合界面 2 和界面 3,

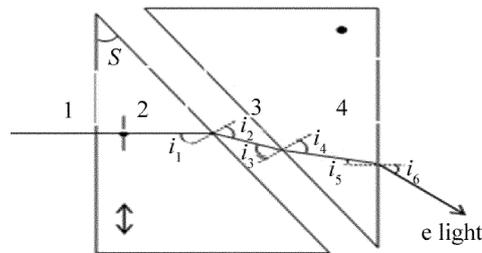


Fig. 6 Schematic diagram of optical path of e light in prism

由端面 4 折射后出射,  $i_1 \sim i_5$  为光线在棱镜中的折射角。由菲涅耳公式得到入射面 1 和出射面 4 的光强透射比为:

$$T_{1,e} = \frac{4n_e}{(1+n_e)^2} \quad (9)$$

$$T_{4,e} = 1 - R_{4,e} = 1 - \frac{\tan^2(i_5 - i_6)}{\tan^2(i_5 + i_6)} \quad (10)$$

在胶合界面 2 和界面 3 处, 若考虑到光束由棱镜胶合层引起的多光束干涉的影响<sup>[15]</sup>, 光强透射比为:

$$T' = \frac{(1 - r_{2,e}^2)(1 - r_{3,e}^2)}{1 + r_{2,e}^2 r_{3,e}^2 + 2r_{2,e} r_{3,e} \cos \delta_e} \quad (11)$$

式中,  $r_{2,e}, r_{3,e}$  为界面 2 和界面 3 的 e 光振幅反射系数,  $\delta_e$  为 e 光经界面 3、界面 2 各一次反射的光与直接透射的光由胶合层产生的相位差, 由菲涅耳公式得:

$$\begin{cases} r_{2,e} = \frac{n \cos S - n_e \cos i_2}{n \cos S + n_e \cos i_2} \\ r_{3,e} = \frac{n_o \cos i_3 - n \cos i_4}{n_o \cos i_3 + n \cos i_4} \end{cases} \quad (12)$$

$$\delta_e = \frac{4\pi}{\lambda} h n \cos i_2 \quad (13)$$

式中,  $h$  和  $n$  分别为胶合层厚度和胶合剂折射率。

由以上分析可知, 一束自然光通过钽酸铋 Wollaston 棱镜后, e 光透射比为:

$$T_e = T_{1,e} T_{4,e} T' = \frac{4n_e}{(1+n_e)^2} \left[ 1 - \frac{\tan^2(i_5 - i_6)}{\tan^2(i_5 + i_6)} \right] \times \frac{(1 - r_{2,e}^2)(1 - r_{3,e}^2)}{1 + r_{2,e}^2 r_{3,e}^2 + 2r_{2,e} r_{3,e} \cos \delta_e} \quad (14)$$

同理, 可以得到 o 光透射比为:

$$T_o = T_{1,o} T_{4,o} T' = \frac{4n_o}{(1+n_o)^2} \left[ 1 - \frac{\sin^2(i_5 - i_6)}{\sin^2(i_5 + i_6)} \right] \times \frac{(1 - r_{2,o}^2)(1 - r_{3,o}^2)}{1 + r_{2,o}^2 r_{3,o}^2 + 2r_{2,o} r_{3,o} \cos \delta_o} \quad (15)$$

一束光强为  $I_0$  的自然光或圆偏振光通过棱镜后的 e 光透射比与 o 光透射比的比值为棱镜的光强分束比, 用  $M$  表示为:

$$M = \frac{T_e}{T_o} \quad (16)$$

### 2.2 透射比的光谱效应

仍然以棱镜结构角为  $21.6^\circ$ 、光正入射为例,取胶合层厚度  $h = 5\mu\text{m}$ 、胶合剂折射率  $n = 1.55$ ,由(7)式、(8)式、(14)式、(15)式和(16)式拟合做出 o 光和 e 光的透射比随波长的变化曲线及棱镜的光强分束比随波长的变化曲线,如图 7 和图 8 所示。

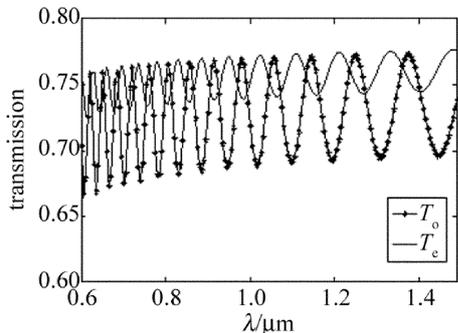


Fig. 7 Intensity transmission versus wavelength

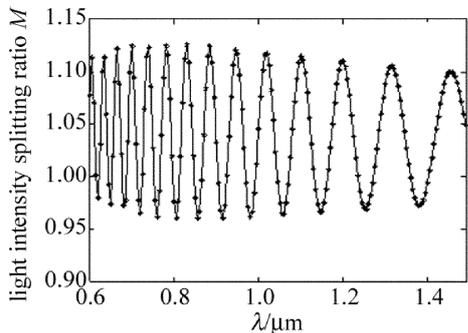


Fig. 8 Intensity splitting ratio versus wavelength

由图 7 可知, o 光和 e 光的透射比都随波长呈周期性变化,且入射波长越长,透射比的波长变化周期延长。o 光透射比振幅随波长变化范围较大(0.66 ~ 0.77), e 光透射比变化范围较小(0.73 ~ 0.77)。由图 8 可见:棱镜光强分束比同样随波长变化呈周期性变化,且入射波长越长,变化周期延长,幅度减小。

### 2.3 结构角对透射比的影响

取波长为 670nm 的单色光垂直入射,由(14)式和(15)式做出 e 光和 o 光的透射比随结构角的变化关系曲线,如图 9 所示。由(16)式得到棱镜光强分束比随结构角的变化关系曲线,如图 10 所示。

由图 9 可知, o 光和 e 光透射比随棱镜的结构角呈周期性变化,其周期随着结构角的增大而减小, e 光透射比振幅随结构角的增大而减小,结构角大于  $30^\circ$  时透射比基本不变。o 光透射比振幅随结构角的增大而增大。图 10 中的曲线表现出棱镜的光强分束比随结构角的增加呈周期性变化,周期的大小随结构角增大而减小。总体而言,棱镜的光强分束比随结构角的增大而变差。可见,结构角对 o 光透射比影响更显著,分束比随结构角的增大振动加剧,因此,小的结构角设

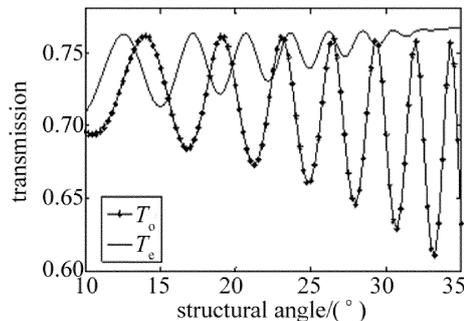


Fig. 9 Intensity transmission versus structure angle

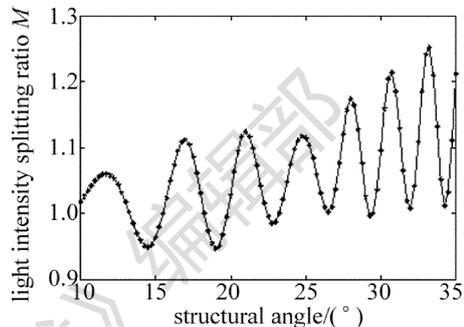


Fig. 10 Intensity splitting ratio versus structure angle

计有利于减弱结构角变化引起的光强分束比的振动。

## 3 结论

通过光路分析,分别得到出射端面的 o 光光束和 e 光光束的分束角特性公式和透射特性公式,并分析了波长和结构角对棱镜分束特性的影响。分析表明:对于一定结构角的棱镜,其分束角具有明显的色散特性,波长越短,分束角越大,且变化也越快,在红外光谱范围,波长对棱镜分束角的影响减小,其分束角趋于稳定;分束角的对称性受波长变化的影响较小,应用中可以忽略;棱镜的结构角与入射光波长对棱镜的透射比均有影响,当棱镜的结构角一定时,透射比随入射光的波长呈振荡性变化,且 o 光透射比的光谱效应更为明显。通过分析钽酸钷 Wollaston 棱镜的分束特性,为棱镜的设计制作和实际使用提供有价值的参考。

### 参考文献

- [1] CHEN L G, HONG J, QIAO Y L, et al. Accuracy analysis of polarimetric measurement based on double Wollaston prisms [J]. Laser Technology, 2008, 32(5):468-470 (in Chinese).
- [2] ZHAO K C, LU H, YOU Z. Automatic detection system for skylight polarized pattern [J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(2):239-244 (in Chinese).
- [3] LI H, LI G H, SHAO J P. Effect of incident angles on splitting ratio of YVO<sub>4</sub> polarizing splitting prisms [J]. Laser Technology, 2009, 33(4):443-445 (in Chinese).
- [4] XUE L, WU F Q, JIANG L L. Effect of Wollaston prism on splitting properties of divergent beam [J]. Laser Technology, 2011, 35(6):833-835 (in Chinese).
- [5] ZHU J K, WU F Q, REN Sh F. Forward and backward splitting an-

- gles of Wollaston prisms and their symmetry[J]. Laser Technology, 2012,36(5):636-638(in Chinese).
- [6] MENG X M, SONG L K, ZHU H F, *et al.* Design of structural and field angles of  $\alpha$ -BBO crystal polarizing prisms[J]. Laser Technology, 2011,35(3):326-329(in Chinese).
- [7] YANG H L, SONG L K, WANG R X, *et al.* Design of  $\alpha$ -BBO crystal Wollaston prism-based on the imaging spectrometer[J]. Laser Technology, 2014,38(1):79-82(in Chinese).
- [8] HUANG H Z, LI H S. YVO<sub>4</sub> crystal and its applications in fiber optic communication[J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2002,13(2):212-214(in Chinese).
- [9] WANG Y W, CHENG H B, LI J H. Growth and analysis on completeness of YVO<sub>4</sub> birefringent crystal[J]. Journal of Synthetic Crystals, 2003,32(1):41-42(in Chinese).
- [10] LI G S, WU X Q, WEI M, *et al.* Growth of large-size and high-quality YVO<sub>4</sub> birefringent crystal[J]. Journal of Synthetic Crystals, 1999, 28(1):28-29(in Chinese).
- [11] WANG C M. Study on the properties of YVO<sub>4</sub> polarizing prism[D]. Qufu: Qufu Normal University, 2008: 8-1(in Chinese).
- [12] WANG R X. Design and reaserch of YVO<sub>4</sub> Wollaston prism[D]. Qufu: Qufu Normal University, 2014: 5-25(in Chinese).
- [13] SHI H S, ZHANG G, SHEN H Y. Measurement of principal refractive indices and the thermal refractive index coefficients of yttrium vanadate[J]. Journal of Synthetic Crystals, 2001,30(1):86-88(in Chinese).
- [14] WANG R X. Design and reaserch of YVO<sub>4</sub> Wollaston prism[D]. Qufu: Qufu Normal University, 2014: 6-30(in Chinese).
- [15] ZHU H F, NAN Y J, YUN M J, *et al.* Precise analysis of the intensity splitting ratio of double Wollaston prism[J]. Acta Optica Sinica, 2012,32(6):0623002(in Chinese).

《激光技术》编辑部

版权所有 ©