

文章编号: 1001-3806(2009)03-0310-04

## 洛匈棱镜对单模高斯光束影响的分析

王涛<sup>1,2</sup>, 吴福全<sup>1\*</sup>, 马丽丽<sup>1</sup>

(1. 曲阜师范大学 激光研究所, 曲阜 273165; 2. 曲阜师范大学 物理工程学院, 曲阜 273165)

**摘要:** 为了研究洛匈棱镜对单模高斯光束的影响, 采用分析棱镜胶合剂介质层中的光的干涉效应的方法, 对洛匈棱镜对单模高斯光束的影响进行了详细的理论分析。结果表明, 对于给定的入射单模高斯光束, 若光在胶合层界面上的人射角、胶合层的厚度和胶合剂的折射率, 三者确定其二, 棱镜对透射光束光强分布的影响将随另一参量的变化作周期性振荡, 且透射高斯光束的形状也随之改变。比较而言, 棱镜对透射 o 光的影响要小于 e 光, 但从总体上看, 棱镜无论对 o 光还是对 e 光的影响均小于 1%。

**关键词:** 激光光学; 偏光棱镜; 高斯光束; 干涉

**中图分类号:** O436.3 **文献标识码:** A

## Effect of Rochon prism on single-mode Gaussian beam

WANG Tao<sup>1,2</sup>, WU Fu-quan<sup>1</sup>, MA Li-li<sup>1</sup>

(1. Institute of Laser Research, Qufu Normal University, Qufu 273165, China; 2. College of Physics Engineering, Qufu Normal University, Qufu 273165, China)

**Abstract:** In order to study the effect of Rochon prism on single-mode Gaussian beam, the interference in the cementing layer was analyzed in detail. The results reveal that for a given incident single-mode Gaussian beam, the intensity of transmitted polarizing light oscillates periodically with one of the three parameters, i. e. the incident angle at the interface of the cementing layer, the thickness and the refractive index of the cementing layer, and the shape of transmitted beam will be changed. Comparatively, the effect of prism on o light is less than e light. But in general, the effect on the transmitted Gaussian beam is less than 1%.

**Key words:** laser optics; polarizing prism; Gaussian beam; interference

### 引言

洛匈棱镜发明于 1783 年<sup>[1]</sup>, 是最常见的一种偏光分束镜。洛匈棱镜常在光度学中用到; 由于经棱镜后透射的两束偏振光中一束传播方向保持不变, 因此也可作为检偏器使用; 消除一束出射偏振光后, 也可作为偏光镜使用。这种棱镜通常由两块光轴相互垂直的冰洲石晶体直角棱镜胶合而成, 由于冰洲石晶体具有光学性能稳定、双折射率大、透射光谱范围宽等特点<sup>[1-7]</sup>, 所以, 以其为原料制成的洛匈棱镜具有消光比高(优于  $10^{-5}$ )、透射比大(大于 87%)、抗损伤域值高等一系列优点, 是当前激光应用技术中广泛使用的偏光分束棱镜<sup>[8]</sup>。

单模高斯光束作为基本的激光光束, 在激光光学领域有重要的理论和实用价值, 广泛应用在实验室和

激光应用技术中, 单模高斯光束通过各种介质及光学系统的传输和变换规律已有比较成熟的研究成果, 相关的理论和技术已在激光技术领域广泛应用<sup>[2,6]</sup>。洛匈棱镜作为基本的偏光分束棱镜, 在激光技术中得到普遍应用, 因此, 研究洛匈棱镜对单模高斯光束的影响, 有重要的理论和实用价值, 研究成果可以为相应的应用研究提供必要的参考。

### 1 理论分析

对于洛匈棱镜, 单模高斯光束进入棱镜的前半部分, 由于光的传播方向与晶体光轴平行, 所以不存在 e 光; 光束由胶合剂介质层进入棱镜的后半部分时, 被分成 e 光和 o 光, o 光的传播方向不变, 而 e 光发生偏折, 如图 1 所示, 图中  $S$  为棱镜的结构角,  $i_1$  和  $i_2$  为两条正入射于棱镜的光线。

不考虑晶体非线性效应的影响, 则高斯光束在前后端面上反射和折射对光强分布产生的影响可以忽略, 所以, 棱镜对高斯光束光强分布的影响来源于光在通过胶合剂介质层时发生的多次反射, 以 o 光为例, 若

作者简介: 王涛(1977-), 男, 讲师, 硕士研究生, 主要从事光学实验教学和偏光器件理论与参量的测试研究。

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

收稿日期: 2008-04-02; 收到修改稿日期: 2008-06-06

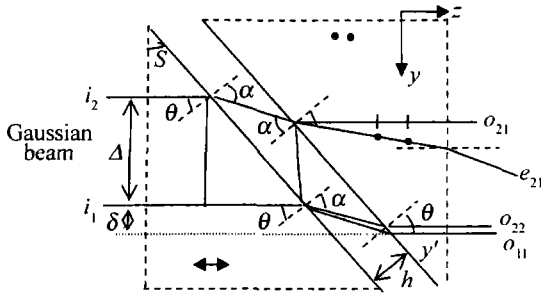


Fig. 1 Beam path map at the interface of cementing layer

设  $i_1$  入射到胶合层上的光强为 1, 对于波长  $\lambda = 633\text{nm}$ , 有 o 光的主折射率  $n_o = 1.65567$ , e 光的主折射率  $n_e = 1.48515$ , 取胶合层介质折射率  $n = 1.54$ , 光在晶体-胶合层界面上的入射角  $\theta = 26.73^\circ$ , 那么经两次反射后, 透射光束  $o_{22}$  的光强为  $4.6503 \times 10^{-7}$ , 4 次反射后, 透射光束的光强为  $2.1655 \times 10^{-13}$ , 可见, 4 次及 4 次以上的反射光对高斯光束光强分布的影响可以忽略; 同样, 对于 e 光, 也忽略 4 次及 4 次以上的反射光的影响, 因此, 只考虑经两次反射后的出射光束  $o_{22}$  与直接透射光束  $o_{11}$  在  $y'$  处相遇时形成的干涉。  $\alpha$  为光在胶合层中的折射角, 由折射定律可得<sup>[9]</sup>:

$$n_o \sin \theta = n \sin \alpha \quad (1)$$

对于单模高斯光束, o 光和 e 光在  $(x, y, z)$  处的电场  $U_{00}$  均可表示为<sup>[10]</sup>:

$$U_{00}(x, y, z) = E_0 \frac{w_0}{w(z)} \exp \left[ -\frac{r^2}{w^2(z)} \right] \times \exp \left\{ -i \left[ k \left( z + \frac{r^2}{2R} \right) - \psi \right] \right\} \quad (2)$$

式中,  $E_0$  为原点处电矢量的振幅,  $w_0$  为高斯光束的腰斑半径,  $z$  为棱镜距离束腰的距离,  $w(z) = w_0 \left[ 1 + \left( \frac{z}{f} \right)^2 \right]^{1/2}$ ,  $r^2 = x^2 + y^2$ ,  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ ,  $f = \frac{\pi w_0^2}{\lambda}$ ,  $R = R(z) = z + \frac{f^2}{z}$ ,  $\psi = \arctan \left( \frac{z}{f} \right)$ ,  $\lambda$  为波长,  $f$  为共焦参量, 其光强分布:

$$I_0(x, y, z) = E_0^2 \frac{w_0^2}{w^2(z)} \exp \left[ -\frac{2(x^2 + y^2)}{w^2(z)} \right] \quad (3)$$

对  $x$  积分后, 得到:

$$I_0(y, z) = \sqrt{\frac{\pi}{2}} E_0^2 \frac{w_0^2}{w(z)} \exp \left[ -\frac{2y^2}{w^2(z)} \right] \quad (4)$$

取  $w_0 = 0.146\text{mm}$ ,  $z = 200\text{mm}$ ,  $\lambda = 633\text{nm}$ , 则 (4) 式中  $\sqrt{\frac{\pi}{2}} E_0^2 \frac{w_0^2}{w(z)}$  为常数, 令其为 1, 则单模高斯光束沿  $y$  方向的光强分布由下式给出:

$$f_0(y) = \exp \left[ -\frac{2y^2}{w^2(z)} \right] \quad (5)$$

坐标系如图 1 所示, 对于 o 光, 刚进入胶合层时, 设  $o_1 = U_{00}(x, y, z)$ , 则  $o_2 = U_{00} \left( x, y - \Delta, z + \frac{2nh}{\cos \alpha} - n_o \Delta \tan \theta \right)$ , 因为  $\frac{2nh}{\cos \alpha} - n_o \Delta \tan \theta \ll z$ , 所以不考虑其对  $z$  产生的影响, 并略去在胶合层中 4 次及 4 次以上反射对透射光的影响, 只虑经两次反射后的出射光束与直接透射光束相遇时形成的干涉, 则在  $y_1'$  处的光强为:

$$I(x, y + \delta, z) = (1 - R_1)(1 - R_2) \left\{ I_0(x, y, z) + R_1 R_2 I_0(x, y - \Delta, z) + 2 \left[ R_1 R_2 I_0(x, y, z) \times I_0(x, y - \Delta, z) \right]^{0.5} \cos \phi(y + \delta) \right\} \quad (6)$$

且经棱镜后光束光强沿  $y$  方向的分布为:

$$f(y) = (1 - R_1)(1 - R_2) \left\{ f_0(y - \delta) + R_1 R_2 f_0(y - \Delta - \delta) + 2 \left[ R_1 R_2 f_0(y - \delta) f_0(y - \Delta - \delta) \right]^{0.5} \cos \phi(y) \right\} \quad (7)$$

式中,  $\Delta = 2h \tan \alpha \cos \theta$ ,  $\phi(y) = k \left[ n_o \Delta \tan \theta - \frac{2nh}{\cos \alpha} + \frac{(y - \delta)^2 - (y - \Delta - \delta)^2}{2R} \right]$ ,  $h$  为胶合层的厚度,  $\delta = \frac{h}{\cos \alpha} \times \sin(\alpha - \theta)$ ,  $R_1$  为光在棱镜前半部分与胶合层分界面上的反射系数,  $R_2$  为光在胶合层与棱镜后半部分分界面上的反射系数。  $R_1, R_2$  对于 o 光取  $R_{o1}, R_{o2}$ , 对于 e 光取  $R_{e1}, R_{e2}$ , 它们分别由下式给出<sup>[9]</sup>:

$$\begin{cases} R_{o1} = \frac{(n \cos \theta - n_o \cos \alpha)^2}{(n \cos \theta + n_o \cos \alpha)^2} \\ R_{o2} = \frac{(n_o \cos \alpha - n \cos \theta_o)^2}{(n_o \cos \alpha + n \cos \theta_o)^2} \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} R_{e1} = \frac{(n_o \cos \theta - n \cos \alpha)^2}{(n_o \cos \theta + n \cos \alpha)^2} \\ R_{e2} = \frac{(n \cos \alpha - n_e \cos \theta_e)^2}{(n \cos \alpha + n_e \cos \theta_e)^2} \end{cases} \quad (9)$$

$\theta_o$  和  $\theta_e$  分别是 o 光和 e 光在棱镜后半部分中的折射角。 则棱镜对透射光束光强分布的影响由下式给出:

$$\Delta f(y) = f_0(y) - f(y) \quad (10)$$

## 2 棱镜对透射光束光强分布的影响

### 2.1 入射角的影响

对于正入射于棱镜的光, 这时棱镜的结构角  $S$  即为光在晶体-胶合层界面上的入射角  $\theta$ 。 取胶合层厚度  $h = 0.01\text{mm}$ , 入射光波长  $\lambda = 633\text{nm}$ , 设胶合层介质为加拿大树脂, 其折射率  $n = 1.54$ , 考虑到通过棱镜后, 两偏振光束之间的分束角一般在  $2.5^\circ \sim 7.5^\circ$  的范围内取值, 此时对应结构角  $S$  的取值范围为  $14.30^\circ \sim 36.52^\circ$ , 图 2a 和图 2b 中分别给出了 o 光和 e 光在这一范围内取值时, 棱镜对透射光束光强分布的影响

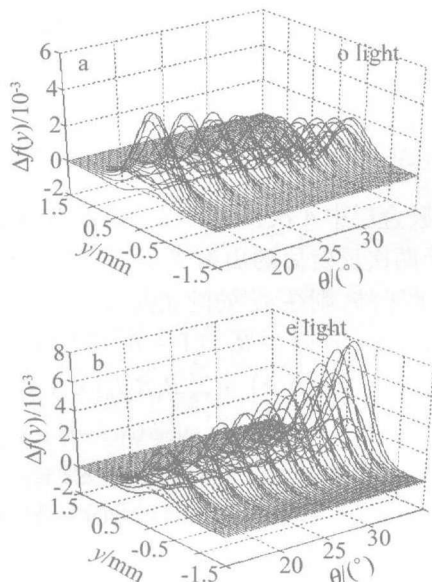


Fig. 2 Characteristics of transmitted o light and e light changing with prism's structure angle

$\Delta f(y)$  随入射角  $\theta$  的变化关系。

由图可见,当入射角  $\theta$  增大时,棱镜对 o 光和 e 光光束的影响  $\Delta f(y)$  均呈现周期性的振荡,且随着入射角的增大,振荡频率会增加,对于 o 光,随着入射角的增大,振荡的振幅减小且  $\Delta f(y)$  总的趋势是减小的,即入射角增大时,洛匈棱镜对 o 光透射光束光强分布的影响减小。e 光与 o 光相比,随着入射角的增大,振荡的振幅增大,并且  $\Delta f(y)$  总的趋势是增大的,即入射角增大时,洛匈棱镜对 e 光透射光束光强分布的影响增加。比较图 2a 和图 2b 可见,当入射角  $\theta < 20^\circ$  时,棱镜对 o 光的影响大于 e 光;当  $\theta > 20^\circ$  时,棱镜对 o 光的影响小于 e 光。总的来看,棱镜结构角在  $14.30^\circ \sim 36.52^\circ$  的范围内取值时, $\Delta f(y)$  对于 o 光最大不超过  $6.0 \times 10^{-3}$ ,e 光最大不超过  $8.0 \times 10^{-3}$ ,可见棱镜结构角的变化对透射光束光强分布的影响不大。

## 2.2 胶合层厚度的影响

取胶合层介质折射率  $n = 1.54$ ,  $n_o = 1.65567$ ,  $n_e = 1.48515$ ,  $S = 26.73^\circ$  (对应  $5^\circ$  分束角),对于正入射的光,棱镜对 o 光和 e 光光强分布的影响  $\Delta f(y)$  随胶合层厚度  $h$  的变化分别如图 3a 和图 3b 所示。

由图可见,对于 o 光和 e 光,当胶合层厚度  $h$  增大时,棱镜对光束的影响  $\Delta f(y)$  呈现较高频率的周期性振荡,并且胶合层厚度越大,这种振荡的振幅越大。比较图 3a 和图 3b 可知,对于 o 光,在  $\Delta f(y) < 0$  的区域内振荡幅度要大于 e 光,而在  $\Delta f(y) > 0$  的区域内振荡的幅度要明显小于 e 光,从总体上看,棱镜对 o 光光强分布的影响小于 e 光。胶合层厚度  $h$  在  $0.005\text{mm} \sim 0.015\text{mm}$  的范围内取值时, $\Delta f(y)$  对于 o 光最大不超过  $3.2 \times 10^{-3}$ ,e 光最大不超过  $4.5 \times 10^{-3}$ ,可见胶合层厚

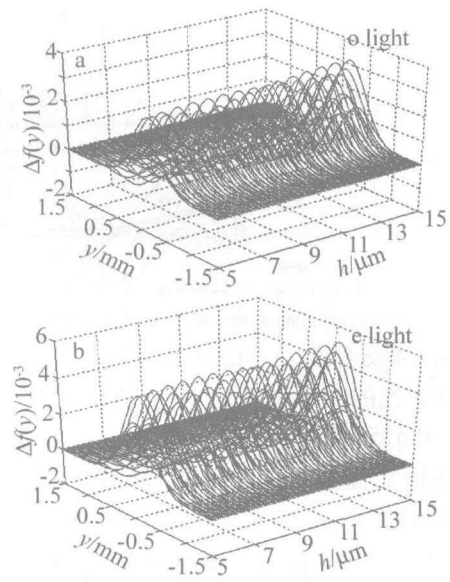


Fig. 3 Effect thickness of cementing layer on the light intensity of single-mode Gaussian beam

度的变化对透射光束光强分布的影响很小。

从图 2 和图 3 可以看出, $\Delta f(y)$  随  $y$  的变化有类似高斯分布的特点,这是因为在棱镜胶合层中,当直接透射的光束光强增大时,两次反射后的光束光强也会随之增大,由 (7) 式可知,干涉后出射光束光强的绝对改变量  $f(y)$  也会增加,又由于入射光束的  $f_0(y)$  呈高斯分布,所以,二者的差值  $\Delta f(y)$  随  $y$  的变化有类似高斯分布的特点。

## 2.3 胶合层介质折射率的影响

取胶合层厚度  $h = 0.01\text{mm}$ ,  $n_o = 1.65567$ ,  $n_e = 1.48515$ ,  $\theta = 26.73^\circ$ ,对于 o 光和 e 光, $\Delta f(y)$  随胶合层介质折射率  $n$  的变化分别如图 4a 和图 4b 所示。

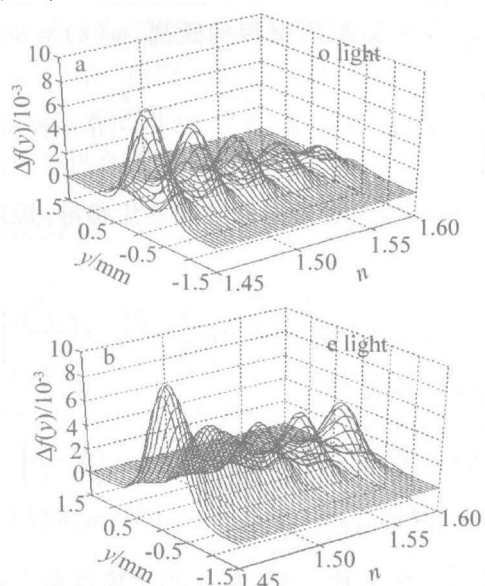


Fig. 4 Effect of refractive index of the cementing layer on the light intensity of single-mode Gaussian beam

由图可知,当胶合层介质折射率  $n$  增大时,对于 o 光和 e 光,棱镜对光束的影响  $\Delta f(y)$  均呈现周期性的

振荡。比较图4a和图4b可知,对于o光,随着介质折射率 $n$ 的增大, $\Delta f(y)$ 振荡的幅度逐渐变小,即棱镜对单模高斯光束光强分布的影响减小;相比之下,对于e光, $\Delta f(y)$ 先减小,在 $n > 1.5$ 的区域又有增加的趋势。总的来看,介质折射率 $n$ 在1.45~1.54范围内取值时, $\Delta f(y)$ 对于o光最大不超过 $8.5 \times 10^{-3}$ ,e光最大不超过 $1.0 \times 10^{-2}$ ,可见胶合层介质折射率的变化对透射光束光强分布的影响很小。

### 3 结论

由于光的干涉效应,导致了单模高斯光束通过洛匈棱镜后,棱镜会对透射光束的光强分布产生影响,这种影响除了与入射光本身的性质,如波长、腰斑半径等有关以外,还与棱镜的结构角、胶合层的厚度以及胶合层介质的折射率有关,当三者确定其二时,这种影响均会随另一参量的变化而呈现周期性振荡,且振荡的状态也会相应的发生变化。其物理原因是在胶合层中,两次反射光束与直接透射光束的光程差会随这一参量呈周期性改变,这一现象对干涉后的出射光束产生周期性的影响。总体上看,棱镜对透射光束光强分布的影响均小于1%,所以,在要求不是太严格的情况下,可以忽略洛匈棱镜对高斯光束光强分布的影响。

(上接第299页)

中也进一步发现,预处理过程中部分关键参量如扫描能量增幅、扫描能量上限值等,对最终的预处理效果有着明显的影响,紫外脉冲激光预处理的最佳工艺参量,还需要进一步加以研究。

#### 参考文献

- [1] CHEN F, MENG Sh X. Damage mechanism of optical material [J]. *Physics Evolvement*, 1998, 18(2): 198-206 (in Chinese).
- [2] BRUSASCO R M, BUTLER J A, HRUBESH L W, *et al.* CO<sub>2</sub> laser polishing reducing of 351nm surface damage initiation in fused silica [EB/OL]. [2008-08-10]. <http://www.osti.gov/dublincore/ecd/servlets/purl/15004628-Ys6Db3/native/15004628.pdf>.
- [3] BRUSASCO R M, HRUBESH L W, BULTER J A, *et al.* Localized CO<sub>2</sub> laser treatment for mitigation of  $3\omega$  damage growth on fused silica [EB/OL]. [2008-08-10]. [www.osti.gov/energycitations/servlets/purl/15002005-8yk6fj/native/15002005.pdf](http://www.osti.gov/energycitations/servlets/purl/15002005-8yk6fj/native/15002005.pdf).

#### 参考文献

- [1] LI J Zh. Handbook of optics [M]. Xi'an: Technology and Science Press of Shaanxi, 1986: 497-521 (in Chinese).
- [2] WANG T, WU F Q, MA L L. 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 (in Chinese).
- [3] 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).
- [4] REN Sh F, WU F Q, ZHAO P, *et al.* Ternary parallel beam splitter combined combined of iceland and glass [J]. *Laser Technology*, 2006, 30(3): 311-312 (in Chinese).
- [5] NI Zh B, SONG L K, LIU J P, *et al.* The design and performance analysis of modular structural reflected polarizing prism of equal splitting angl [J]. *Laser Technology*, 2008, 32(2): 151-153 (in Chinese).
- [6] WANG T, WU F Q, MA L L, *et al.* Effects of Nicol prism on the intensity distribution of single-mode Gaussian light beam [J]. *Physics Experimentation*, 2008, 28(4): 1-5 (in Chinese).
- [7] JIA P, LI G H, PENG H D. New design of turning composite parallel splitting prism [J]. *Laser Technology*, 2008, 32(2): 154-156 (in Chinese).
- [8] WU F Q, ZHENG Ch H, XUE D. Characteristic study of backward-use of the rochan prism [J]. *Journal of Optoelectronic · Laser*, 2002, 13(10): 1010-1012 (in Chinese).
- [9] BORN M, WOLF E. Principles of optics [M]. Beijing: Science Press, 1978: 61-71 (in Chinese).
- [10] ZHOU B K, GAO Y Zh, CHEN T R, *et al.* Laser principle [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2000: 71-74 (in Chinese).

- [4] HUANG J, ZHAO S N, LÜ H B, *et al.* Damage-threshold increase of pickoff optics using 1064nm wavelength laser [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, 19(5): 728-732 (in Chinese).
- [5] BRUSASCO R M, PENETRANTE B M, PERTSON J E, *et al.* UV laser conditioning for the reduction of 351nm damage initiation in fused silica [EB/OL]. [2008-08-10]. <http://www.osti.gov/energycitations/servlets/purl/15005418-qybuky/native/15005418.pdf>.
- [6] MENDEZ E, BAKER H J, NOWAK K M, *et al.* Highly localised CO<sub>2</sub> laser cleaning and damage repair of silica optical surface [J]. *SPIE*, 2005, 5647: 165-175.
- [7] ZHU Y N. Discussion of the measurement methods for laser induced damage threshold of optics coating [J]. *Laser Technology*, 2006, 30(5): 532-535 (in Chinese).
- [8] HUANG J, LÜ H B, YE L, *et al.* Damage threshold improvement of fused silica chip by CO<sub>2</sub> laser pretreatment [J]. *Chinese Journal of Laser*, 2007, 34(5): 723-727 (in Chinese).