

文章编号: 1001-3806(2010)01-0109-03

Wollaston 棱镜对单模高斯光束光强分布影响的分析

王涛¹, 马丽丽², 吴福全², 宋连科², 郝殿中²

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

摘要: 为了研究 Wollaston 棱镜对单模高斯光束光强分布的影响, 采用分析光在棱镜胶合层中干涉效应的方法, 对透射 o 光和 e 光分别进行了分析。对于某一给定的两偏振模兼并的单模高斯光束, 透射 o 光和 e 光均随入射光在胶合层介质面上入射角、胶合层的厚度及层中介质的折射率的变化作周期性振荡, 且振荡的幅度和频率也随之变化, 这种振荡对透射光束的影响小于 0.65%。结果表明, 在实际应用中, 只要对透射光束光强相对变化的要求不小于 0.65%, 即可忽略 Wollaston 对高斯光束光强分布的影响。

关键词: 物理光学; 偏光棱镜; 高斯光束; 透射光强; 干涉

中图分类号: O436.3 **文献标识码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1001-3806.2010.01.031

Effects of Wollaston prism to the distribution of light intensity of single-mode Gaussian beam

WANG Tao¹, MA Li-li², WU Fu-quan², SONG Lian-ke², HAO Dian-zhong²

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

Abstract: In order to study the effect of Wollaston prism on the intensity of single-mode Gaussian beam, the transmitting o light and e light were studied respectively by analyzing interference in the prism cementing layer. For a given single-mode Gaussian beam merged with two polarizing modes, the transmission polarizing light intensity of o and e oscillates in period with the incident light angle at the interface of the cementing layer, the thickness of the cementing layer, and the refracting index of the transmitter in the cementing layer, and that the amplitude and frequency of the oscillation change with them too. But in general, the effect on the transmitted Gaussian beam is less than 0.65%. In practice, if the relative intensity is required larger than 0.65%, the effect of Wollaston prism on the transmitting characteristics of Gaussian beam can be neglected.

Key words: physical optics; polarizing prisms; Gaussian beam; transmitted light intensity; interference

引言

Wollaston 棱镜通常由天然光学晶体冰洲石制成^[1-3]。由于冰洲石晶体的光学性能稳定、透射光谱范围宽(240nm~2800nm)^[4-5]、双折射率大,所以 Wollaston 棱镜可以产生较大的分束角且具有很高的消光比(优于 10^{-5}),是当前激光应用技术中使用最多的偏光分束镜^[5-7]。当前激光技术中,单模高斯光束应用广泛,本文中对两偏振模兼并的单模高斯光束通过 Wollaston 棱镜时,棱镜对 o 光和 e 光的光强分布的影响进行了详细分析,为激光偏光应用技术提供有益的参考。

1 理论分析

单模高斯光束进入 Wollaston 棱镜的前半部分,被分成 o 光和 e 光(本文中 o 光、e 光的属性均相对于棱镜的后半部分),但传播方向一致,当通过胶合层后,o 光、e 光被分开,由于胶合层介质的折射率 n 小于晶体中 o 光主折射率 n_o 而大于 e 光主折射率 n_e ,所以入射光束 i_1 进入胶合层时,e 光向下偏转,而 o 光向上偏

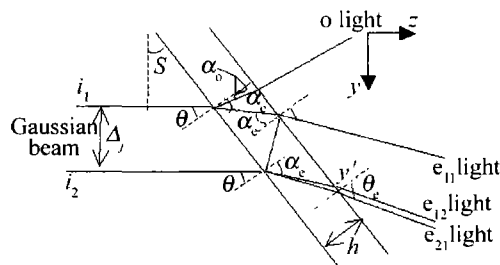


Fig. 1 Beam path map at the interface of cementing layer

作者简介:王涛(1977-),男,讲师,主要从事光学实验教学 and 偏光器件理论与参量测试研究。

E-mail: whappyt@126.com

收稿日期:2008-09-22;收到修改稿日期:2008-11-14

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。棱镜的前半部分,晶体光轴在图1中的纸面内且平行于棱镜的入射端面(即虚线),棱镜的后半部分,晶体光轴垂直于纸面。

光在通过胶合层时将发生多次反射。以 e 光为例,若设光束 i_1 中 e 振动的光强为1,对于 $\lambda = 632.8\text{nm}$,有 $n_o = 1.6550, n_e = 1.4848$,取胶合层介质折射率 $n = 1.54$,那么经两次反射后,透射光束 e_{12} 的光强为 2.9594×10^{-7} ,4次反射后,透射光束的光强为 8.7589×10^{-14} ,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;因此,只考虑经两次反射后的出射光束 e_{12} 与直接透射光束 e_{21} 相遇时形成的干涉。对于 o 光同样也是只考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。

对于由两个偏振模兼并的单模高斯光束, o 光和 e 光在 (x, y, z) 处的电场 U_{00} 均可表示为^[8]:

$$U_{00}(x, y, z) = E_0 \frac{w_0}{w(z)} \exp\left[-\frac{r^2}{w^2(z)}\right] \times \exp\left\{-i\left[k\left(z + \frac{r^2}{2R}\right) - \psi\right]\right\} \quad (1)$$

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, $w(z) = w_0\left[1 + \left(\frac{z}{f}\right)^2\right]^{1/2}$, f 为瑞利长度,且 $f = \frac{\pi w_0^2}{\lambda}$, $r^2 = x^2 + y^2$, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$, R 为等相位面的曲率半径,且 $R = R(z) = z + \frac{f^2}{z}$, ψ 为相移,且 $\psi = \arctan\left(\frac{z}{f}\right)$,其光强分布:

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

对 x 积分后,得到:

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

取 $w_0 = 0.146\text{mm}, z = 200\text{mm}, \lambda = 632.8\text{nm}$,则(3)式中 $\sqrt{\frac{\pi}{2}} E_0^2 \frac{w_0^2}{w(z)}$ 为常数,并令其为1,则光束的光强分布由下式给出:

$$f_0(y) = \exp\left[-\frac{2y^2}{w^2(z)}\right] \quad (4)$$

坐标系如图1所示,在光刚进入胶合层处,设 $i_2 = U_{00}(x, y, z)$,则 $i_1 = U_{00}(x, y - \Delta_j, z - \frac{2nh}{\cos\alpha_j} + n_j \Delta_j \tan\theta_j)$,对于 o 光, $j = o$;对于 e 光, $j = e$,因 $\frac{2nh}{\cos\alpha_j} + n_j \Delta_j \tan\theta_j \ll z$,所以不考虑其对 z 方向产生的影响,并略去在空气隙中3次以上的反射对透射光的影响,则

在 y_1' 处的合光强为:

$$I(x, y + \delta_j, z) = (1 - R_o)(1 - R_e) \times \{I_0(x, y, z) + R_e R_o I_0(x, y - \Delta_j, z) + 2[I_0(x, y, z) R_e R_o I_0(x, y - \Delta_j, z)]^{0.5} \cos\phi_j\} \quad (5)$$

$$f(y) = (1 - R_o)(1 - R_e) \times \{f_0(y - \delta_j) + R_e R_o f_0(y - \Delta_j - \delta_j) + 2[R_e R_o f_0(y - \delta_j) f_0(y - \Delta_j - \delta_j)]^{0.5} \cos\phi_j\} \quad (6)$$

式中, $\Delta_j = 2h \tan\alpha_j \cos\theta$, $\phi_j = k\left[\frac{2nh}{\cos\alpha_j} - n_j \Delta_j \tan\theta - \frac{\Delta_j(2y - \Delta_j)}{2R}\right]$, h 为胶合层的厚度, $\delta_j = \frac{h}{\cos\alpha_j} \sin(\alpha_j - \theta)$, $\theta = S$ 。 o 光和 e 光的反射率 R_o 和 R_e 分别由下式给出^[7]:

$$\begin{cases} R_e = \frac{\tan^2(\theta - \alpha_e)}{\tan^2(\theta + \alpha_e)} \\ R_o = \frac{\sin^2(\theta - \alpha_o)}{\sin^2(\theta + \alpha_o)} \end{cases} \quad (7)$$

则Wollaston棱镜对单模高斯光束光强分布所产生的影响由下式给出:

$$\Delta f(y) = f_0(y) - f(y) \quad (8)$$

2 棱镜结构对高斯光束光强分布的影响

2.1 结构角的影响

设光正入射于棱镜的入射端面,这时棱镜的结构角 S 便是光在胶合层界面上的入射角 θ 。取棱镜胶合层的厚度 $h = 0.02\text{mm}$,介质折射率 $n = 1.54, n_o = 1.6550, n_e = 1.4848$ 。对于 o 光和 e 光, $\Delta f(y)$ 随光在胶合层界面上入射角的变化分别如图2a、图2b所示。

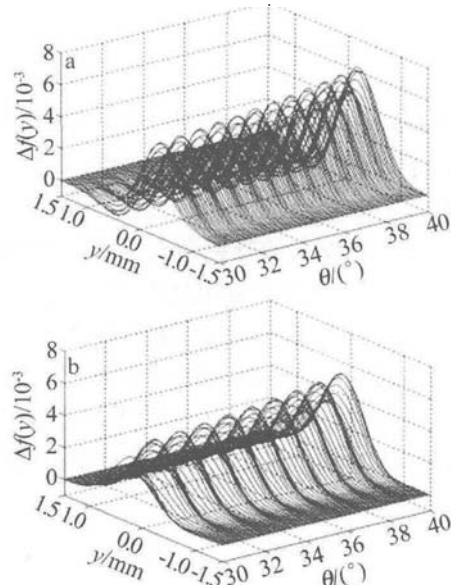


Fig. 2 Changes of transmitting light characteristics with prism's structure angle
a— o light b— e light

由图可见,无论对于 o 光还是 e 光,当入射角 θ 增大时,棱镜对光束的影响 $\Delta f(y)$ 将呈现周期性的振荡,

并且入射角越大,这种振荡的振幅越大,同时振荡频率也会增加。另外,随着入射角 θ 的增大, $\Delta f(y)$ 总的趋势是增大的,也就是说,入射角增大时,棱镜对透射光束的影响增大。比较图 2a、图 2b 可知,对于 o 光,随着入射角 θ 的增大, $\Delta f(y)$ 振荡的幅度和频率均比 e 光大,且 $\Delta f(y)$ 增加的总趋势要比 e 光明显,即棱镜对 o 光光强分布的影响大于 e 光。总的来看,棱镜结构角在 $30^\circ \sim 40^\circ$ 的范围内取值时, $\Delta f(y)$ 对于 o 光最大不超过 6.5×10^{-3} , e 光最大不超过 5.5×10^{-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 $\theta = 35^\circ$, 胶合层介质折射率 $n = 1.54$, $n_o = 1.6550$, $n_e = 1.4848$, 对于 o 光和 e 光, 胶合层厚度 h 的变化对 $\Delta f(y)$ 的影响分别如图 3a、图 3b 所示。

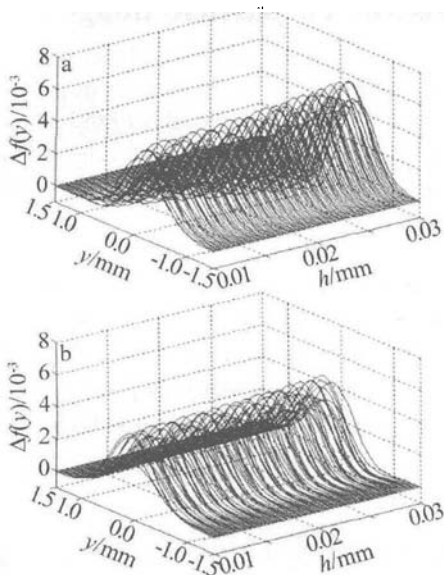


Fig. 3 Effects of cementing layer thickness to the light intensity of single-mode Gaussian beam
a—o light b—e light

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、图 3b 可知,对于 o 光,随着胶合层厚度的增大, $\Delta f(y)$ 振荡的幅度和频率均比 e 光大,且 $\Delta f(y)$ 增加的总趋势要比 e 光明显,即棱镜对 o 光光强分布的影响大于 e 光。总的来看,胶合层厚度 h 在 $0.01\text{mm} \sim 0.03\text{mm}$ 的范围内取值时, $\Delta f(y)$ 对于 o 光最大不超过 5.5×10^{-3} , e 光最大不超过 4.5×10^{-3} ,可见胶合层厚度的变化对透射光束光强分布的影响很小。

2.3 胶合层介质折射率的影响

取 $\theta = 35^\circ$, 胶合层厚度 $h = 0.02\text{mm}$, $n_o = 1.6550$, $n_e = 1.4848$, 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、图 4b 所示。

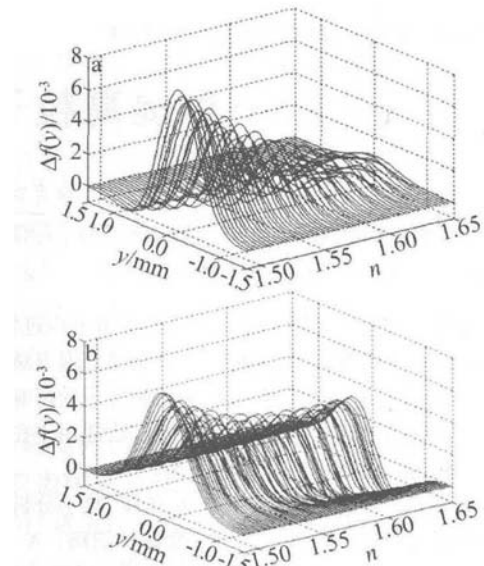


Fig. 4 Effects of refraction of the transmitter in the cementing layer to the light intensity of single-mode Gaussian beam
a—o light b—e light

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、图 4b 可知,对于 o 光,随着介质折射率 n 的增大, $\Delta f(y)$ 振荡的幅度明显变小,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, $\Delta f(y)$ 在大于 0 的区域振幅降低,而在小于 0 的区域振幅增加,且振幅峰值明显偏离 $y = 0$ 的位置。总的来看,介质折射率 n 在 $1.49 \sim 1.65$ 范围内取值时, $\Delta f(y)$ 对于光最大不超过 6.0×10^{-3} , e 光最大不超过 5.0×10^{-3} ,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 Wollaston 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。当三者固定其二时,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。总体上看,棱镜对透射光束光强分布的影响均小于 0.65% ,所以,只要对透射光束光强相对变化的要求不小于 0.65% ,可以忽略 Wollaston 棱镜对高斯光束光强分布的影响。

参考文献

[1] 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).
[2] FAN J Y, LI H X, WU F Q. A study on transmitted intensity of disturbance for air-spaced Glan-type polarizing prisms [J]. Opt Commun, 2003, 223(1/3): 11-16.

由(1)式可知,对于增加 Q_v ,可有3种方式:一是提高激光功率,激光体能量与功率成正比;二是减小光斑直径,激光体能量与光斑直径的平方成反比;三是降低焊接速度,激光体能量与焊接速度成反比。因此,从理论上分析可知,减小光斑直径 d 比增加功率 P 更为有效。故激光光斑直径 d 对接头强度的影响较激光功率与焊接速度更为显著。

3 结 论

采用激光焊接 HDPE 是可行的。接头拉伸实验表明,随着激光光斑直径减小和激光功率增加,焊接接头的熔深增加,接头强度提高。与激光功率和焊接速度相比,光斑直径对接头强度的影响更大。综合分析可知,激光体能量 Q_v 可作为评价焊件接头强度的一个综合参量。合理的匹配光斑直径、焊接速度、光斑直径可得到较好的焊接质量。

本实验条件下,激光焊接参量为光斑直径 2mm、激光功率 75W、脉冲频率 10Hz、脉冲宽度 4.5ms 和焊接速度 2mm/s 时,获得的接头强度较高且塑性较好。

参 考 文 献

[1] WANG X, DING G M, LIU H X. Investigation on laser welding plastics

(上接第 111 页)

- [3] WANG T, WU F Q, MA L L, *et al.* Effect of semarmont prism on distribution of light intensity of single-mode Gaussian beam [J]. *Laser Technology*, 2008, 32(3): 268-271 (in Chinese).
- [4] MA L L, SONG L K, WU F Q, *et al.* Splitting angle and light intensity splitting ratio of single-element polarized beams plitting prisms [J]. *Laser Technology*, 2008, 32(3): 299-301 (in Chinese).
- [5] NI Zh B, SONG L K, LIU J P, *et al.* The design and performance analysis of modular structural reflectrd polarizing prism of equal splitting

technology [J]. *Laser Journal*, 2007, 28(4): 68-69 (in Chinese).

- [2] ZHANG Sh Y, ZHANG Sh H. Laser welding of plastics [J]. *Engineering Plastics Application*, 2000, 28(2): 15-17 (in Chinese).
- [3] WANG X, HANG H Zh, DING G M, *et al.* Investigation on influence of additive on welding quality of laser transmission welding plastics [J]. *Applied Laser*, 2007, 27(4): 314-317 (in Chinese).
- [4] YUAN H, LAI J J, HE Y G. Experimentnal study on laser welding of thermoplastics [J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2005, 3(1): 18-21 (in Chinese).
- [5] XIE L, LIU L M. Laser welding technology and properties of macromolecule material plastics [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2007, 28(5): 97-100 (in Chinese).
- [6] WAN Y L, CAI Y, WANG J Ch, *et al.* Technology of laser welding plastics [J]. *Applied Laser*, 2006, 26(2): 93-96 (in Chinese).
- [7] LIU H X, ZHANG H Zh, JI J Q, *et al.* Methods and present status of laser welding of plastics [J]. *Laser Technology*, 2008, 32(2): 167-170 (in Chinese).
- [8] ZHANG Sh Y. Application of plastics welding in automobile industry [J]. *Plastics*, 2004, 33(6): 89-94 (in Chinese).
- [9] ZHAO X L, QI Sh H, ZHANG J, *et al.* The newest progress on modification research of phenolic resin [J]. *Modern Plastics Processing and Applications*, 2003, 15(5): 58-62 (in Chinese).
- [10] QIN G L, LIN Sh Y. Laser welding volume energy and its influence on weld penetration in laser deep penetration welding [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2006, 27(7): 74-76 (in Chinese).
- angle [J]. *Laser Technology*, 2008, 32(2): 151-156 (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] BASS M. *Handbook of optics* [M]. New York: McGraw-Hill, 1995: II 3. 1- II 3. 19.
- [8] ZHOU B K, GAO Y Zh, CHEN T R, *et al.* *Laser principle* [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2000: 71-74 (in Chinese).