

文章编号: 1001-3806(2015)01-0096-04

胶合剂折射率对格兰-汤普逊棱镜性能影响的分析

栗开婷¹, 吴福全^{2*}, 彭敦云¹, 李丁丁¹

(1. 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: 为了分析胶合剂折射率对 Glan-Thompson 棱镜性能的影响, 采用理论分析的方法, 得出棱镜视场角以及光正入射和斜入射时棱镜的透射比与胶合剂折射率的关系式。在此基础上, 针对几种确定长度孔径比的 Glan-Thompson 棱镜, 利用计算机拟合, 取得棱镜视场角及透射比随胶合剂折射率变化的关系曲线, 并进行了实验验证。结果表明, 对于不同长度孔径比的棱镜, 最大视场角不同, 且对应不同的胶合剂折射率值; 胶合剂折射率等于 e 光的主折射率时, 棱镜有最大透射比; 由于棱镜的长度孔径比、最大视场角、透射比以及胶合剂折射率之间有相互制约的关系, 采用长度孔径比为 2.5 的棱镜设计和折射率为 1.45 ~ 1.46 的胶合剂是一种较佳的方案。这一结果对优化 Glan-Thompson 棱镜的视场角和透射比是有帮助的。

关键词: 光学器件; Glan-Thompson 棱镜; 胶合剂折射率; 视场角; 透射比

中图分类号: O436.3 **文献标志码:** A **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2015.01.019

Analysis of cement refractive index effect on Glan-Thompson prism

LI Kaiting¹, WU Fuquan², PENG Dunyun¹, LI Dingding¹

(1. Shandong Provincial Key Laboratory of Laser Polarization and Information, Qufu 273165, China; 2. Institute of Laser Research, Qufu Normal University, Qufu 273165, China)

Abstract: In order to analyze effect of refractive index of cement on a Glan-Thompson prism, the field angle of the prism and the relationship between the transmittance of the prism and refractive index of the cement at normal incidence or oblique incidence were obtained after theoretical analysis. On this basis, for several Glan-Thompson prisms which the ratio of length to aperture was determined, the relation curve of field angle and transmittance with the change of refractive index of cement was drawn by means of computer simulation. It is found that with the different ratios of length to aperture, the maximum field angle of the prism is different corresponding to different refractive index of cement. The prism has the maximum transmittance when refractive index of the cement is equal to the main refractive index of e light wave. Due to the mutual restraint relationship of the ratio of length to aperture, the largest field angle, the transmittance and the refractive index, It is optimum when the ratio of length to aperture is 2.5 and the refractive index of the cement is in the range from 1.45 to 1.46. The result is helpful for optimizing the field angle and transmittance of a Glan-Thompson prism.

Key words: optical devices; Glan-Thompson prism; refractive index of cement; field angle; transmittance

引 言

偏光棱镜是偏光应用技术中不可缺少的器件。胶合剂是组合光学器件不可缺少的一部分^[1-3], 对于利用天然晶体冰洲石制作的偏光棱镜^[4-7], 其胶合的形式分空气隙胶合和胶合剂胶

合, 前者最具代表的是 Glan-Taylor 棱镜, 后者则是 Glan-Thompson 棱镜。在关于 Glan-Thompson 棱镜的研究中, QI 等人^[8]利用冰洲石晶体的双折射特性, 得到了两类晶体光轴不平行时 Glan-Thompson 棱镜出射光束偏离角、消光比和透射比的理论计算公式; WANG 等人^[9]则把胶合层作为一层薄膜, 利用薄膜光学的基本原理, 分析了棱镜透射比与胶合层的厚度和光学胶折射率的关系, 但只取了几个特定的胶合剂折射率的值, 没有具体分析; 作者以 Glan-Thompson 棱镜为例, 具体分析胶合剂折射率变化对棱镜视场角和透射比的影响, 并找到其中的规律, 为优化 Glan-Thompson 棱镜的视场角

基金项目: 上海市全固态激光器与应用技术重点实验室开放课题基金资助项目(2012ADL02)

作者简介: 栗开婷(1987-), 女, 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: 2014-01-10; 收到修改稿日期: 2014-03-24

和透射比提供理论依据。

1 胶合剂折射率对 Glan-Thompson 棱镜视场角的影响

格兰型棱镜的视场角原则上取决于不需要的光(通常是 o 光)在切割面上全反射时的最小角,或者由需要的光(e 光)能够透过切割面时的最大角决定^[10]。图 1 是 Glan-Thompson 棱镜的结构和光路图,图中双点表示晶体光轴的方向(该图中晶体光轴垂直于纸面),S 是棱镜的结构角, n_2 是胶合剂的折射率, n_e, n_o 分别为 e 光, o 光的折射率, r_1 和 r_1' 分别为光线 A 和光线 B 的折射角。

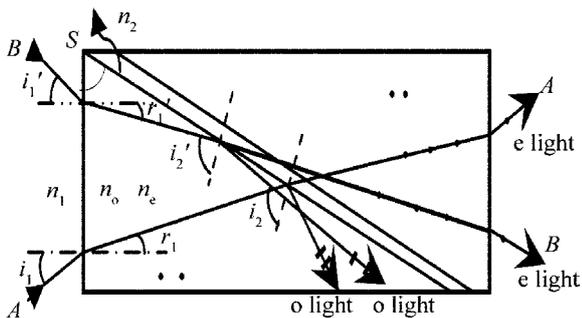


Fig. 1 Field angle of a Glan-Thompson prism

为了使寻常光在切割面上全内反射,图 1 中光线 A 在切割面上的入射角必须大于下式所决定的值:

$$\sin i_2 = n_2/n_o \quad (1)$$

式中, n_2 是胶合剂的折射率, i_2 的最小值对应于光线 A 在空气与棱镜交界面上的入射角 i_1 的最大值,结合图 1 中的几何关系 $r_1 + i_2 = S$ 可得:

$$n_1 \sin i_{1,\max} = (n_o^2 - n_2^2)^{1/2} \sin S - n_2 \cos S \quad (2)$$

式中, n_1 是入射介质(空气)的折射率。

在计算非常光(e 光)不能透过棱镜的角度范围时,有两种情况:(1)当 $n_2 > n_e$ 时,e 光不会发生全内反射;(2)当 $n_2 \leq n_e$ 时,e 光有全反射临界角。对于第一种情况,极限角假设是一个这样的角,对它来说,光线 B 的折射角等于 $(90^\circ - S)$,因此,折射的 e 光应平行于切割界面传播,因此有:

$$n_1 \sin i_{2,\max}' = n_e \sin(90^\circ - S) \quad (3)$$

对于第 2 种情况,e 光允许的最大入射角由下式给出:

$$n_1 \sin i_{1,\max}' = n_2 \cos S - (n_e^2 - n_2^2)^{1/2} \sin S \quad (4)$$

Glan-Thompson 棱镜的视场角 I 则是(2)式和(3)式或(3)式和(4)式中的 i_1 和 i_2' 或 i_2' 和 i_1' 中较小值的 2 倍。由(2)式、(3)式、(4)式可见:当入射介质为空气且棱镜的结构角一定时,对于某一波长

的光,棱镜的视场角与胶合剂的折射率有关。

由于知道棱镜的长度孔径比 $L/D = \tan S$,下面以 633nm ($n_o = 1.65567, n_e = 1.48515$) 为例,分别取 $L/D = 3$ ($S = 71.6^\circ$), $L/D = 2.5$ ($S = 68.2^\circ$), $L/D = 2$ ($S = 63.4^\circ$),由(2)式、(3)式和(4)式做出 Glan-Thompson 棱镜的视场角随胶合剂折射率的变化曲线,如图 2 所示。

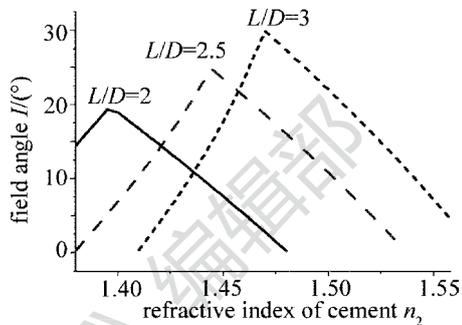


Fig. 2 Curve between I and n_2

由图 2 曲线可见: n_2 的范围在 1.41 ~ 1.53 时,对于 $L/D = 3$ 和 $L/D = 2.5$ 的棱镜设计,随着胶合剂折射率的增大,视场角 I 先增大后减小,且最大视场角随 L/D 取值的增大而增大。对于 $L/D = 3$ 的棱镜, $n_2 = 1.47$ 时有最大视场角 29.9° ;对于 $L/D = 2.5$, $n_2 = 1.45$ 时有最大视场角 23.5° ,对于 $L/D = 2.0$, $n_2 = 1.40$ 时有最大视场角 19.5° 。

2 胶合剂折射率对 Glan-Thompson 棱镜透射比的影响

2.1 光正入射时透射比与胶合剂折射率之间的关系

透射比也是偏光棱镜的重要参量,首先对于光正入射于棱镜的情况,分析棱镜透射比与胶合剂折射率间的关系。因为 e 光在胶合剂与冰洲石中的折射率几乎相同,因此不考虑在胶合层中反射光引起的多光束干涉问题,进而不考虑胶合层的厚度对透射比造成的影响。在光垂直入射时,光路如图 3 所

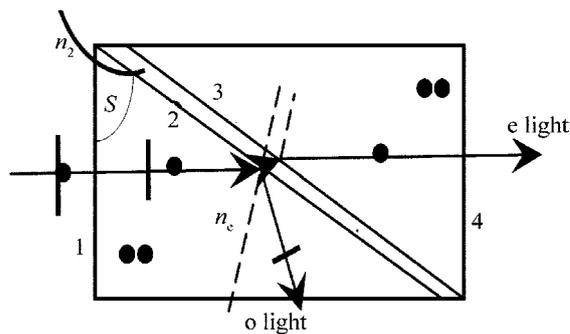


Fig. 3 Light path in a Glan-Thompson prism when incident normally

示,图3中1为入射端面,4为出射端面;2和3是胶合界面。依据菲涅耳公式^[11]得到透射的e光在各界面的反射比为:

$$R_1 = R_4 = \frac{(n_e - 1)^2}{(n_e + 1)^2} \quad (5)$$

$$R_2 = R_3 = \frac{\sin^2(S - \theta_1)}{\sin^2(S + \theta_1)} \quad (6)$$

则总的透射比为:

$$T = (1 - R_1)^2(1 - R_2)^2 = \frac{16n_e^2 \sin^2(2S) \sin^2(2\theta_1)}{(1 + n_e)^4 \sin^4(S + \theta_1)} \quad (7)$$

式中, θ_1 为光在胶合层中的折射角,且:

$$n_e \sin S = n_2 \sin \theta_1 \quad (8)$$

由(7)式和(8)式可得到透射比 T 与胶合剂折射率 n_2 之间的关系:

$$T = \frac{16n_e^2 \sin^2(2S) \sin^2\left(2\arcsin \frac{n_e \sin S}{n_2}\right)}{(1 + n_e)^4 \sin^4\left(S + \arcsin \frac{n_e \sin S}{n_2}\right)} \quad (9)$$

同样以 633nm ($n_o = 1.65567, n_e = 1.48515$) 为例,分别取 $L/D = 3$ ($S = 71.6^\circ$), $L/D = 2.5$ ($S = 68.2^\circ$), $L/D = 2$ ($S = 63.4^\circ$),由(9)式做出棱镜透

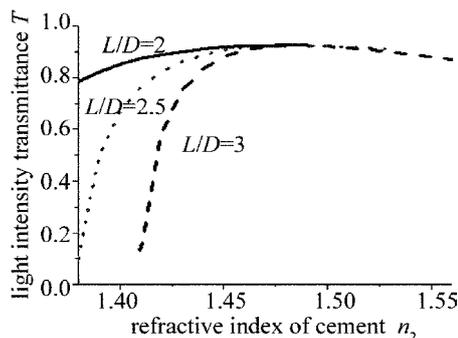


Fig. 4 Curve between T and n_2

射比 T 与胶合剂折射率 n_2 之间的关系曲线,如图4所示。

由图中曲线可知:(1)无论是 $L/D = 3, L/D = 2.5$ 还是 $L/D = 2$,当 $n_2 = n_e$ 时,棱镜有最大透射比 0.925;(2)若使棱镜有大于 0.90 的透射比,对于 $L/D = 3$ 的设计, n_2 的取值范围是 1.46 ~ 1.52;对 $L/D = 2.5$ 的设计, n_2 的取值范围是 1.45 ~ 1.54;对 $L/D = 2$ 的设计, n_2 的取值范围是 1.43 ~ 1.57。

2.2 光斜入射时透射比与胶合剂折射率之间的关系

若光不是正入射(如图1所示),根据图中的几何关系并类比正入射的方法,对于光线A,透射比 T 与胶合剂折射率 n_2 及入射角 i_1 之间的关系为:

$$\begin{cases} T = \frac{\sin^2(2i_1) \sin^2\left(2\arcsin \frac{\sin i_1}{n_e}\right) \sin^2\left[2\left(S - \arcsin \frac{\sin i_1}{n_e}\right)\right] \sin^2(2\theta_1)}{\sin^4\left(i_1 + \arcsin \frac{\sin i_1}{n_e}\right) \sin^4\left(S - \arcsin \frac{\sin i_1}{n_e} + \theta_1\right)} \\ \theta_1 = \arcsin\left[\frac{n_e \cos\left(S - \arcsin \frac{\sin i_1}{n_e}\right)}{n_2}\right] \end{cases} \quad (10)$$

对于B光线,类似的方法可得透射比 T 与胶合剂折射率 n_2 及入射角 i_1' 之间的关系:

$$\begin{cases} T = \frac{\sin^2(2i_1') \sin^2\left(2\arcsin \frac{\sin i_1'}{n_e}\right) \sin^2\left[2\left(S + \arcsin \frac{\sin i_1'}{n_e}\right)\right] \sin^2(2\theta_1')}{\sin^4\left(i_1' + \arcsin \frac{\sin i_1'}{n_e}\right) \sin^4\left(S + \arcsin \frac{\sin i_1'}{n_e} - \theta_1'\right)} \\ \theta_1' = \arcsin\left[\frac{n_e \sin\left(S + \arcsin \frac{\sin i_1'}{n_e}\right)}{n_2}\right] \end{cases} \quad (11)$$

取入射角 i (包括 i_1 和 i_1') 的范围为 $-10^\circ \sim 10^\circ$, n_2 的范围为 1.38 ~ 1.56,由(10)式和(11)式做出透射比 T 与入射角 i 和 n_2 之间的关系曲线,如图5所示。

由图5可知:(1)在 $-10^\circ \sim 10^\circ$ 的范围内,当 $n_2 = n_e$ 时,棱镜有最大透射比,且最大透射比随入射

角的减小(即 $10^\circ \sim -10^\circ$) 而变小;(2)若综合考虑棱镜视场角,认为对于 $L/D = 3$ 的棱镜设计,取 n_2 为 1.47 ~ 1.49 的胶合剂为好;对于 $L/D = 2.5$ 的棱镜设计,取 n_2 为 1.45 ~ 1.46 的胶合剂为好;对于 $L/D = 2$ 的棱镜设计,取 n_2 为 1.39 ~ 1.41 的胶合剂为好。

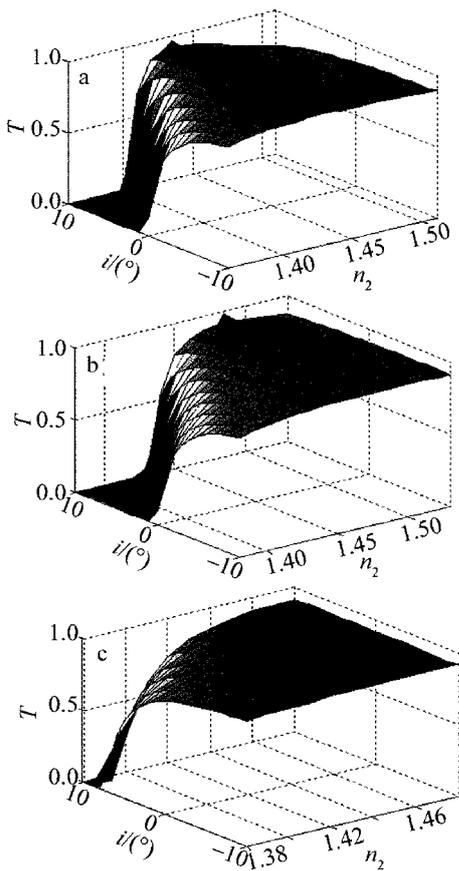


Fig. 5 Curve of T , i and n_2
a— $L/D=3$ b— $L/D=2.5$ c— $L/D=2$

3 实验测试

为了验证理论分析的结果,作者选取 $L/D = 3$ 和 $L/D = 2.5$, 通光孔径为 $\Phi = 10\text{mm}$ 的棱镜样品 (各3个), 胶合剂分别采用紫外固化环氧树脂胶 OG134 ($n_2 = 1.45$) 和 OG125 ($n_2 = 1.47$) 以及冷杉胶 ($n_2 = 1.52$) 进行实验测试, 实验结果见表1 (其中 I 为视场角, T 为正入射时的透射比)。

Table 1 The experimental results

	$L/D=3$			$L/D=2.5$		
n_2	1.45	1.47	1.52	1.45	1.47	1.52
I	17.68°	29.87°	16.32°	23.47°	18.56°	5.14°
T	0.87	0.91	0.89	0.91	0.92	0.91

由表1可知, 测试结果符合图2和图4中的理论分析曲线。

4 结论

光学胶合剂是 Glan-Thompson 棱镜中的一个重

要组成部分。作者从理论上系统分析了胶合剂折射率对 Glan-Thompson 棱镜的视场角以及透射比的影响, 结果发现: 胶合剂折射率对棱镜的视场角和透射比均有显著的影响, 在 633nm, 对于 $L/D = 3$ 的棱镜, $n_2 = 1.47$ 时有最大视场角 29.9°; 对于 $L/D = 2.5$ 的棱镜, $n_2 = 1.45$ 时有最大视场角 23.5°; 对于 $L/D = 2$ 的棱镜, $n_2 = 1.40$ 时有最大视场角 19.5°。当 $n_2 = n_e$ 时, 棱镜有最大透射比。通过本文中的分析可以认为: $L/D = 2.5$ 的棱镜设计, 使用折射率为 1.45~1.46 的胶合剂是一种较佳的方案, 这样, 棱镜不仅有大于 0.90 的透射比和大于 20° 的视场角, 并可节约昂贵的天然晶体冰洲石材料。

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] WANG H F, WU F Q. Research on refractive index of optical cement used in Glan-Thompson prisms[J]. Chinese Optics Letters, 2007, 5(2): 108-110.
- [3] LI J L, WANG Y W, LI Y H, et al. Research on performance of calcite crystals polarizing device[J]. Journal of Synthetic Crystals, 2002, 31(4): 413-416 (in Chinese).
- [4] LI G H. Optics[M]. Ji'nan: Shandong Education Press, 1991: 405 (in Chinese).
- [5] XIA W, HU H N. Development of machining technique for iceland spar crystal[J]. Optical and Precision Engineering, 1995, 3(1): 1-6 (in Chinese).
- [6] GAO H G, PEI Q K. The production technique for Glan-Thompson calcite prisms[J]. Optical Instrument, 1994, 16(1): 30-36 (in Chinese).
- [7] REN Sh F, WU F Q. Design of bireflective parallel beam-splitting polarization prisms combined of iceland and glass[J]. Laser Technology, 2012, 36(5): 686-689 (in Chinese).
- [8] QI X, WU F Q, HAO Zh R. Effect of misalignment of the crystal optical axis on the performance of a Glan-Thompson prisms[J]. Laser Technology, 2011, 35(6): 775-777 (in Chinese).
- [9] WANG H F, WU F Q, HAO D Zh, et al. Analysis on membrane effect of cement used in Glan-Thompson prisms[J]. Journal of Qu-fu Normal University, 2008, 34(1): 73-77 (in Chinese).
- [10] LI J Zh. Handbook of optics[M]. Xi'an: Science and Technology Press, 1986: 506-512 (in Chinese).
- [11] CAI L Zh. Optics[M]. 3rd ed. Beijing: Science Press, 2007: 119-126 (in Chinese).