

文章编号: 0253-2239(2005)08-1143-5

# 晶体膜层效应对棱镜偏光镜透射比影响的理论研究

刘厚通 李国华 任广军 彭捍东 郝殿中

(曲阜师范大学激光研究所, 曲阜 273165)

**摘要:** 为满足现代光信息技术对偏光器件各项技术指标的苛刻要求, 利用膜层理论推导出线偏振光垂直入射时棱镜偏光镜透射比的数学解析表达式, 并对影响棱镜偏光镜技术指标的每个物理参量作了定量分析。通过计算机定量模拟表明: 晶体厚度对透射比的影响幅度与中间空气膜层的透射比有着密切的关系, 在晶体折射率等参量取某些特定值, 中间空气隙的厚度  $h=26.2\ \mu\text{m}$  和  $27.4\ \mu\text{m}$  时, 格兰-泰勒(Glan-Taylor)棱镜晶体厚度对总透射比的影响幅度分别为 5.934% 和 7.034%, 格兰-傅科(Glan-Foucault)棱镜晶体的厚度对总透射比的影响分别为 1.24%, 8.893%; 晶体厚度, 空气膜层厚度, 棱镜结构角共同影响棱镜偏光镜的透射比。这一理论研究克服以前棱镜偏光镜透射比公式不能定量分析晶体厚度对棱镜偏光镜透射比影响的缺点, 对偏光器件的设计, 具有重要的应用价值。

**关键词:** 薄膜光学; 棱镜偏光镜; 晶体膜层效应; 透射比; 膜层互联函数

中图分类号: O436 文献标识码: A

## Theoretical Research of Effect of Crystal Membranous Layer on Light Transmission of Polarizing Prism

Liu Houtong Li Guohua Ren Guangjun Peng Handong Hao Dianzhong

(Laser Research Institute, Qufu Normal University, Qufu 273165)

**Abstract:** For meeting rigor demands of modern light communication technology on each technic target of polarizer, a mathematically analytical expression of polarizing prism is deduced by means of theory of membranous layer when incident light is vertical to the crystal plane. Each physical parameter of affecting polarizing prism transmission technic target is analysed quantitatively. Computer simulations show that influential range of crystal thickness on transmission of polarizing prism associates with transmission of air inter layer. When parameters, such as crystal refractive index etc. are endowed with given values, for thickness of air inter layer  $h=26.2\ \mu\text{m}$  and  $27.4\ \mu\text{m}$ , influential ranges of crystal thickness on transmission of Glan-Taylor prism are 5.934% and 7.034% respectively, and influential ranges of crystal thickness on transmission of Glan-Foucault prism are 1.24% and 8.893%. Transmission of polarizing prism is affected by crystal thickness, air inter layer thickness and configuration angle. This theoretical research overcomes the shortcoming of previously transmission formulas of polarizing prism. They cannot analyse influence of crystal thickness on light transmission of polarizing prism quantitatively. The theory has importantly applied worthiness to polarimeter design.

**Key words:** thin film optics; polarizing prism; crystal membranous layer effect; light transmission; interconnecting function with respect to membranous layer

### 1 引 言

由双折射晶体<sup>[1~5]</sup>制作的棱镜偏光镜, 因具有抗光损伤阈值高, 透射比高等优点被广泛应用于光信息技术与激光技术。透射比是棱镜偏光镜的一个重要的技术指标。现在普遍采用在棱镜偏光镜各通

光面上镀硬膜的方法来提高其透射比<sup>[6~8]</sup>, 但却导致它的另一个重要参量——抗光损伤阈值的下降。当光线垂直入射到棱镜偏光镜的通光面上时, 光线在棱镜的两个通光面之间发生多次反射与透射。每次反射与透射光线两次经过中间空气膜层。把光在

作者简介: 刘厚通(1969~), 男, 山东新泰人, 曲阜师范大学激光所硕士研究生, 主要从事偏光器件理论与参量测试研究。

E-mail: liuhoutong6@163.com

收稿日期: 2004-06-11; 收到修改稿日期: 2005-01-20

棱镜两通光面及空气膜层间的多次反射与透射现象总称之为晶体膜层效应。用晶体膜层理论详细地研究棱镜偏光镜透射比问题少见有关文献报道。由于垂直入射时棱镜前后两通光面的反射比为 0.03811 ( $n_e$  取 1.48518), 考虑光线在棱镜前后两通光面之间的多次反射与透射时, 有时发生干涉相长, 有时发生干涉相消, 其干涉结果直接影响棱镜偏光镜的透射比。本文利用膜层理论定量分析了晶体膜层效应特别是棱镜晶体厚度对透射比的影响, 为棱镜偏光镜的设计开发提供了可靠的理论依据。

## 2 透射比数学解析式的理论推导

### 2.1 棱镜偏光镜的透射比公式的推导

光线通过格兰-泰勒(Glan-Taylor)棱镜物理过程如图 1 所示。一束光线垂直入射到格兰-泰勒棱镜上, 依次经过第一通光面、空气膜层到达第二通光面, 有一部分光透射, 另一部分光被反射, 被反射的光依次在偏光镜前后两通光面和空气膜层之间振荡反射和透射, 出射光将是多光束干涉的结果。由于入射光是垂直通光面入射的, 上面的过程要反复无数次, 这种现象和光线经过膜层产生的现象相似, 把这种现象总称为“晶体膜层效应”。棱镜虽然是各向

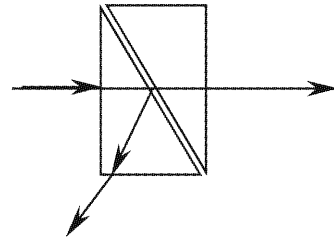


图 1 光线通过棱镜偏光镜的示意图

Fig. 1 Abridged general view of light passing through a prism polarizer

异性介质, 但对特定方向的相互平行的入射光线来说其折射率是不变的, 可以看成“各向同性”介质用膜层理论来处理。光线在第一块晶体楔子中产生的相位差在第二块晶体楔子中又得到补偿, 最后的出射光线满足相干光的条件。设  $A^{(i)}$  是入射光电矢量振幅, 并假定入射光是线偏振光。无论在反射光还是透射光中, 每束光和它前面一束光的相位之差对应于介质膜层内两段“之”字形路程, 这一相位差为  $\delta = 4\pi n' h \cos \theta' / \lambda_0$ 。式中  $h$  是空气膜层的厚度,  $\lambda_0$  为真空波长, 设格兰-泰勒棱镜的中间空气隙的透射系数为  $m$ , 从左到右棱镜偏光镜的各面的透射系数依次为  $t_1, t_2, t'_2, t'_1$ , 反射系数依次为  $r_1, r_2, r'_2, r'_1$ , 从晶体偏光镜透射出来的各束光的复振幅依次为

$$t_1 t'_1 m A^{(i)}, t_1 t'_1 r_1'^2 m^3 A^{(i)} \exp(i\delta_1), t_1 t'_1 r_1'^4 m^5 A^{(i)} \exp(2i\delta_1), \dots, t_1 t_1'^{2p-1} r_1'^{2p-1} m^{2p-1} A^{(i)} \exp[i(p-1)\delta_1], \dots$$

如果前  $P$  个透射光相叠加, 则透射光振幅如下:

$$A^{(v)} = t_1 t'_1 m \{ 1 + m^2 r_1'^2 \exp(i\delta_1) + m^{2(p-1)} r_1'^{2(p-1)} \exp[i(p-1)\delta_1] \} A^{(i)} = t_1 \frac{1 - m^{2p} r_1'^{2p} \exp(ip\delta_1)}{1 - m^2 r_1'^2 \exp(i\delta_1)} t_1 t'_1 A^{(i)}, \tag{1}$$

利用透射光的强度公式  $I = A^{(v)} A^{(v)*}$  且  $P \rightarrow \infty$  时

$$I^{(v)} = \frac{T_1^2 \frac{T_2^2}{1 + R_2^2 - 2R_2 \cos \delta_2}}{1 + \left( \frac{T_2^2}{1 + R_2^2 - 2R_2 \cos \delta_2} \right)^2 R_1^2 - \frac{2T_2^2 R_1 [\cos \delta_1 - 2R_2 \cos(\delta_1 - \delta_2) + R_2^2 \cos(\delta_1 - 2\delta_2)]}{(1 + R_2^2 - 2R_2 \cos \delta_2)^2}} I^{(i)}. \tag{2}$$

### 2.2 各物理量的说明与约定

(2) 式中  $T_1 = t_1 t'_1, T_2 = t_2 t'_2, R_1 = r_1 r'_1, R_2 = r_2 r'_2, T_1, R_1$  分别为棱镜偏光镜前后两通光面面的透射比与反射比,  $T_2, R_2$  分别为空气膜层的每个面的透射比与反射比;  $\delta_1 = 4\pi n_e d / \lambda_0, \delta_2 = 4\pi h \cos \theta / \lambda_0,$

$\frac{T_2^2}{1 + R_2^2 - 2R_2 \cos \delta_2}$  项为空气膜层的透射比, 设为  $M$ 。

在透射比的公式中, 设

$$N = 2M^2 R_1 [\cos \delta_1 - 2R_2 \cos(\delta_1 - \delta_2) + R_2^2 \cos(\delta_1 - 2\delta_2)],$$

$$W = \cos \delta_1 - 2R_2 \cos(\delta_1 - \delta_2) + R_2^2 \cos(\delta_1 - 2\delta_2),$$

由于  $M$  是空气膜层的透射比, 它是空气膜层厚度  $h$  的函数, 所以  $N$  实际上是  $d, h$  和结构角  $\theta$  的互联函数, 我们称  $N$  为膜层互联函数。

这样公式就可以表示为 
$$T = \frac{T_1^2 M}{1 + M^2 R_1^2 - N / T_2^2}. \tag{3}$$

### 3 晶体膜层效应对棱镜偏光镜透射比影响的定量分析

晶体膜层效应对棱镜偏光镜透射比的影响表现为三方面：1) 透射比  $T$  随棱镜晶体厚度  $d$  的变化而变化；2) 透射比  $T$  随空气膜厚  $h$  变化的幅度随棱镜晶体厚度  $d$  的变化而变化；3) 棱镜结构角对棱镜偏光镜透射比的影响。

#### 3.1 晶体膜层厚度 $d$ 对总透射比 $T$ 的影响

3.1.1  $h$  不变时，棱镜偏光镜透射比  $T$  与  $d$  的关系  
在膜层互联函数  $N$  中， $W$  项是与晶体厚度有关的函数 ( $\delta_1 = 4\pi ned/\lambda_0$ )。 $d$  变化会引起  $N$  值发生变化，从而引起总透射比的变化。图 2 是格兰-泰勒棱镜的总透射比随棱镜晶体厚度变化的曲线： $d$  变化时，总透射比在最大值与最小值之间周期性的变化。

3.1.2  $d$  对棱镜偏光镜透射比的影响幅度与  $h$  的关系

从图 2 中还可看出， $h$  取不同值时，棱镜晶体厚度对总透射比的影响幅度不同：对格兰-泰勒棱镜，

$h = 26.2 \mu\text{m}$  和  $27.4 \mu\text{m}$  时，晶体厚度对总透射比的影响幅度分别为 5.934% 和 7.034% [图 2(a)]；对格兰-傅科棱镜来说， $h = 26.2 \mu\text{m}$  和  $h = 27.4 \mu\text{m}$  时，晶体的厚度对总透射比的影响分别为 1.24%，8.893% [图 2(b)]。这说明晶体厚度  $d$  对透射比的影响幅度与空气膜层的厚度  $h$  有关。以格兰-傅科棱镜 [图 2(b)] 为例，当  $h$  取某些值时空气膜层的透射比  $M$  很小，使  $N$  的值变小，使棱镜晶体厚度对总透射比的影响幅度变小 (如  $h = 26.2 \mu\text{m}$ ，棱镜晶体厚度对总透射比的影响幅度为 1.24%)；当  $h$  取另一些值时，空气膜层的透射比  $M$  较大，使  $N$  的值较大，从而使棱镜晶体厚度对总透射比的影响幅度变大 (如  $h = 27.4 \mu\text{m}$ ，棱镜晶体厚度对总透射比的影响幅度为 8.893%)。

棱镜晶体厚度对总透射比的影响幅度较小时，研究它对总透射比的影响意义不大；只有  $h$  取某些值使空气膜层的透射比较大时，研究棱镜晶体厚度对总透射比的影响才有比较现实的意义。

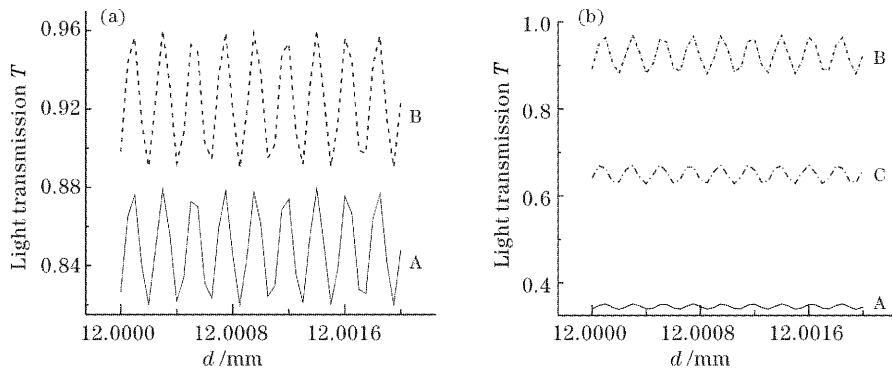


图 2  $h$  变化时格兰-泰勒棱镜(a)和格兰-傅科棱镜(b)的  $T$  与  $d$  的关系曲线

Fig. 2 Relational curve between  $d$  and  $T$  of Glan-Taylor prism (a) and Glan-Foucault prism (b) when  $h$  is changed

(A:  $h = 26.2 \mu\text{m}$ , B:  $h = 27.4 \mu\text{m}$ , C:  $h = 26.7 \mu\text{m}$ )

#### 3.2 空气膜层厚度 $h$ 对总透射比的影响幅度与棱镜晶体厚度 $d$ 的关系

棱镜偏光镜的透射比与空气膜层厚度  $h$  有密切的关系，图 3(a)，(b) 分别是格兰-泰勒棱镜和格兰-傅科棱镜的透射比  $T$  与  $h$  之间的关系曲线，从图 3 中可以看出：两种棱镜的透射比都随  $h$  的变化而变化，格兰-泰勒棱镜的变化幅度小，格兰-傅科棱镜的变化幅度较大。 $d$  不变时，同一棱镜偏光镜的透射比随  $h$  变化的幅度一般不会变化。 $d$  变化时，棱镜偏光镜的透射比随  $h$  变化的幅度会发生变化，格兰-泰勒棱镜的透射比的变化幅度在  $d = 12 + 1.4 \times 10^{-3} \text{ mm}$  和  $d = 12 + 1.7 \times 10^{-3} \text{ mm}$  时为 8.396%，7.489% [图 3(a)]，变化幅度不大；但  $d$  取不同值

时，格兰-傅科棱镜的透射比随  $h$  的变化幅度受  $d$  的影响较大： $d = 12 + 2 \times 10^{-3} \text{ mm}$  和  $d = 12 + 1.4 \times 10^{-3} \text{ mm}$  时，其透射比的变化幅度分别为 54.271% 和 62.618%，变化了 8.347%。棱镜偏光镜的透射比随  $h$  的变化幅度随  $d$  发生变化的大小归根结底是由膜层互联函数  $N$  决定： $d$  变化时，不同棱镜偏光镜的  $W$  项的变化幅度一般不会相差很大，变化相差较大的是空气膜层的透射比  $M$ ，由于格兰-傅科棱镜的空气膜层的透射比  $M$  的变化幅度比格兰-泰勒棱镜的大得多，导致格兰-傅科棱镜透射比的变化幅度随  $d$  变化的值比格兰-泰勒棱镜的大。

需要说明的是，并不是所有的棱镜偏光镜都有明显的晶体膜层效应，晶体膜层效应的明显与否与膜层

互函数  $N$  值的大小有关,对不同的棱镜偏光镜,  $N$  中的  $W$  项的值相差不大(约  $-1.2 \sim 1.2$ ), 相差较大

的是空气膜层的透射比  $M$ ,  $M$  值大的棱镜偏光镜的晶体膜层效应明显, 否则, 晶体膜层效应不明显。

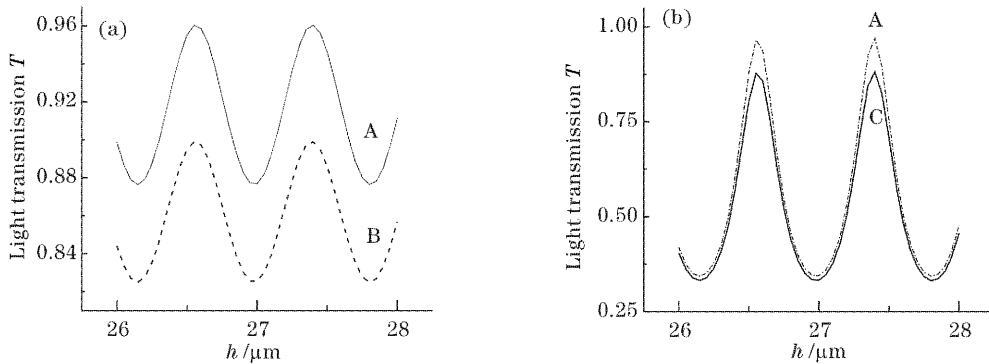


图 3  $d$  变化时格兰-泰勒棱镜(a)和格兰-傅科棱镜(b)的  $T$  和  $h$  的关系曲线

Fig. 3 Relational curve between  $h$  and  $T$  of Glan-aylor prism (a) and Glan-Foucault prism (b) when  $d$  is changed

(A:  $d=12+1.4 \times 10^{-3}$  mm, B:  $d=12+1.7 \times 10^{-3}$  mm, C:  $d=12+2 \times 10^{-3}$  mm)

### 3.3 膜层效应对偏光镜的透射比与其结构角关系的影响

棱镜偏光镜的透射比与其结构角有密切的关系,随着结构角增大,格兰-泰勒棱镜的透射比总体下降。透射比随结构角变化非常明显,随着结构角增加,透射比在最大值与最小值之间周期性的波动。但对同一结构角,当棱镜晶体的厚度  $d$  不同或空气

膜层的厚度  $h$  不同时,棱镜偏光镜的透射比明显不同[如图 4(a), (b)], 这一点可从公式(2)明显看出。棱镜晶体的厚度,空气膜层的厚度、偏光镜的结构角之间相互联系,共同影响它的透射比,所以,在设计棱镜偏光镜的结构角时,也必须同时考虑棱镜晶体厚度和空气膜层厚度对其透射比的影响。

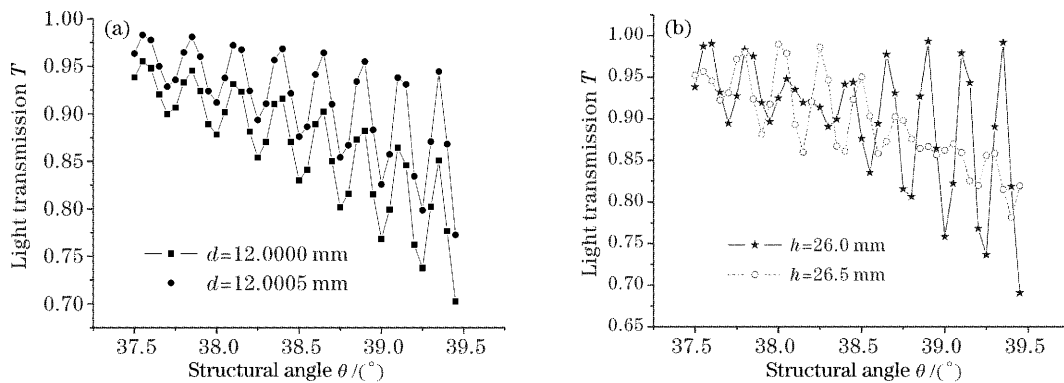


图 4 棱镜偏光镜的透射比  $T$  与棱镜结构角  $\theta$  的关系

Fig. 4 The relationship between transmission of prism polarizer and its structural angle

## 4 结 论

本文从理论上定量得出棱镜偏光镜的透射比与棱镜晶体厚度、空气膜层厚度和棱镜结构角之间的关系,为棱镜偏光镜的设计提供了可靠的理论依据。利用公式(2)不仅得到晶体膜层和空气膜层的厚度对棱镜偏光镜透射比影响幅度的范围,而且能精确计算出透射比很高时棱镜晶体厚度和空气膜层的厚度,从而达到提高透射比的目的,这正是提出“晶体膜层效应”概念的现实意义所在。随着器件加工技

术的提高,人们不仅能精确控制棱镜晶体的厚度,控制空气膜层的厚度也并不是很困难的,这样可使棱镜偏光镜的透射比达到设计的要求。格兰-泰勒棱镜是最具代表性的棱镜偏光镜,在当今世界提供的棱镜偏光镜中其用量占 60% 以上。本所在该领域几十年的工作证明,上述理论结果与大量器件测试统计结果基本一致,证明该理论研究对改进器件设计和提高器件质量有实际的指导意义。

## 参 考 文 献

- 1 Walter G. Drscoll, William Vaugham. *Handbook of Optics* [M]. New York: Megraw-Hill, 1978. 10-43~10-45
- 2 M. Born, E. Wolt. *Principles of Optics* [M]. Yang Jiasun transl., Beijing: Science Press, 1978. 422~426 (in Chinese)  
M. 玻恩, E. 沃耳夫. 光学原理[M]. 杨葭孙译. 北京: 科学出版社, 1978. 422~426
- 3 Jin Guofan, Li Jingzhen. *Laser Metrology* [M]. Beijing: Science Press, 1998. 220~225 (in Chinese)  
金国藩, 李景镇. 激光测量学[M]. 北京: 科学出版社, 1998. 220~225
- 4 Sun Yanhua, Zhang jiakun. *Optics* [M]. Hangzhou: Hangzhou University Press, 1991. 255 (in Chinese)  
孙雁华, 张家琨. 光学[M]. 杭州: 杭州大学出版社, 1991. 255
- 5 Li Guohua. *Optics* [M]. Shandong: Shandong Education Press, 1991. 406~408 (in Chinese)  
李国华. 光学[M]. 济南: 山东教育出版社, 1991. 406~408
- 6 Zhu Huafeng, Song Lianke, Wu Fuquan *et al.*. Cause of "minute fluctuation" on the transmission curve of Taylor polarizing prism [J]. *Chin. J. Lasers*, 2004, **31**(1): 40~44 (in Chinese)  
朱化风, 宋连科, 吴福全等. 泰勒检偏棱镜透射比随旋转角周期抖动的理论分析[J]. 中国激光, 2004, **31**(1): 40~44
- 7 Li Hongxia, Wu Fuquan, Fan Jiyang. An analytical study on modulated intensity's perturbation for the polarizing prisms [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(12): 1456~1459 (in Chinese)  
李红霞, 吴福全, 范吉阳. 偏光棱镜调制器调制光强扰动的理论分析[J]. 光学学报, 2003, **23**(12): 1456~1459
- 8 Zhang Chunwei, Xiang Shiqing, Wang Changan. Coupling efficiency analysis for the micro-prism sided-coupling method of double-cladding fiber [J]. *Chin. J. Lasers*, 2003, **30**(7): 597~600 (in Chinese)  
张春伟, 向世清, 王常安. 双包层光纤抽运光的微型棱镜侧面耦合法的耦合效率分析[J]. 中国激光, 2003, **30**(7): 597~600