

文章编号: 0258-7025(2004)01-0041-04

泰勒检偏棱镜透射比随旋转角 周期“抖动”的理论分析

朱化凤¹, 宋连科¹, 吴福全¹, 李国华¹, 左战春², 范树海¹

(曲阜师范大学¹ 激光研究所, ² 物理系, 山东 曲阜 273165)

摘要 采用光束分割法及光的干涉原理, 对线偏振激光通过泰勒(Taylor)偏光棱镜后的透射比变化情况进行了分析。通过分析入射光线、棱镜透光表面法线和胶合面的法线之间的相对位置, 以及相应数学模型的建立, 推导出分割后相邻光束元之间的位相差与仪器旋转角度之间的关系, 成功地解释了 Taylor 棱镜激光透射比随其旋转角周期“抖动”变化的成因。

关键词 物理光学; 偏光棱镜; 光束分割法; 透射比; 偏振光; 相位差; 毛刺

中图分类号 TH 744.2 文献标识码 A

Cause of “Minute Fluctuation” on the Transmission Curve of Taylor Polarizing Prism

ZHU Hua-feng¹, SONG Lian-ke¹, WU Fu-quan¹,

LI Guo-hua¹, ZUO Zhan-chun², FAN Shu-hai¹

(¹Laser Research Institute, ²Department of Physics, Qufu Normal University, Qufu, Shandong 273165, China)

Abstract On the basis of the interference theory, by decomposing the single wave beam, the transmission of polarized light passing through a rotating Taylor analyzer is calculated. By transforming the comparative position of incident light, the normal direction of light transmission plane of the prism, and the normal direction of the glued plane into geometric model, the relationship of incident light and the rotating angle of analyzer is given, according to which it is succeed in explaining the cause of “minute fluctuation” appearing along with the transmission curve of polarizing prism.

Key words physical optics; polarizing prism; segmentation of light; transmittance; polarized light; phase difference; minute fluctuation

1 引言

由于光纤通讯、激光调制、光信息处理等现代光学技术的发展, 出现了多种类型的偏光器件: 二元衍射光栅式偏光器件^[1]、单元式激光偏光棱镜^[2]、单超高透偏光棱镜^[3]和组合式激光偏光棱镜等。其中组合式激光棱镜以其制作较为简单、偏光性能稳定、使用方便等特点, 应用最为广泛。组合式偏光棱镜一般分为两大类: 胶合型和空气隙型^[4,5]。当一束强度为 I_0 的线偏振光通过一个偏光棱镜时, 随着线偏

振光振动方向与偏光棱镜的透光方向之间夹角 θ 的变化, 透射光的强度 I 也随之发生变化, 它们之间的关系应该符合马吕斯定律, 即

$$I = I_0 \cos^2 \theta \quad (1)$$

由此可得到出射光的透射比 $T = I/I_0 = \cos^2 \theta$, 据此所描述的 $T-\theta$ 关系曲线应该为一光滑的余弦函数曲线。但在应用 Taylor 结构的偏光棱镜时发现, 虽然曲线大体上是按照 $\cos^2 \theta$ 变化的, 但并不光滑, 而是有一些周期性“抖动”。这些“抖动”称之为“毛刺”

收稿日期: 2002-06-04; 收到修改稿日期: 2002-07-18

作者简介: 朱化凤(1977—), 女, 曲阜师范大学激光研究所硕士研究生, 主要从事偏光器件与偏光参数测试研究。E-mail: cathyfeng@www.cnki.net

现象。“毛刺”现象对精确测量工作产生极为不利的后果。

为了研究分析产生这种现象的原因,建立了如图 1 所示的基础实验光路系统。让激光依次通过起偏器、检偏器、光探测器和光信息处理系统。起偏器和检偏器选用高抗损伤阈值和高消光比的 Glan-Taylor 型棱镜,检偏器在步进电机控制下旋转,步进角可调,即 θ 角度可以连续变化 360° 。系统数据的采集处理和步进电机的运转均由微机控制自动完成。由光信息处理系统得到透射比随旋转角度的变化曲线,看起来“毛刺”具有一定的周期性,并且强度受到调制,如图 2 所示。经分析,产生上述现象的主要原因在于检偏棱镜内空气隙间光的干涉。

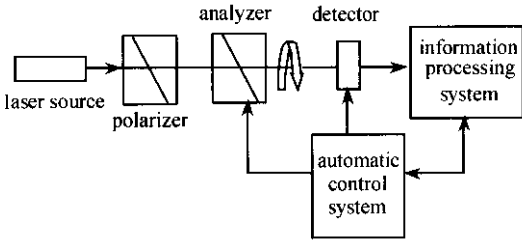


图 1 实验装置

Fig. 1 Setup of experiment

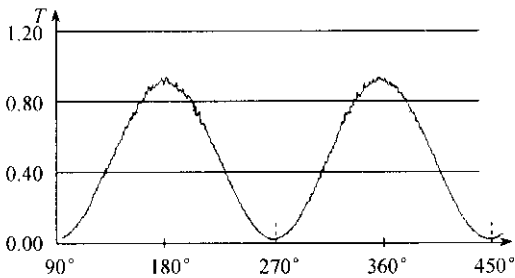


图 2 线偏振光通过旋转的偏光棱镜时透射率的变化

Fig. 2 Transmissivity of polarized light passing through a rotating analyzer

2 理论模型

由于作为检偏器的 Taylor 偏光棱镜是由两半晶体棱镜胶合而成,两个晶体胶合表面的光洁度相当好,且两界面间留有空气隙,不可避免地在两表面上发生反射,从而引起反射光束和透射光束的干涉。我们认为这种胶合层间的干涉不同于传统意义上的干涉,它是造成上述透射比曲线上出现“毛刺”的主要因素。

图 3 是偏光棱镜胶合面间空气隙示意图,一般光束的横截面尺寸较空气隙的厚度大得多,可以认为在界面 b 上反射的部分光和在界面 a 上的透射光

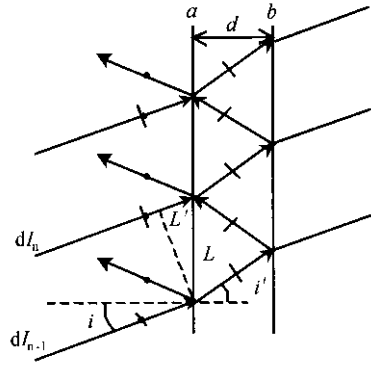


图 3 缝隙间光的反射及干涉

Fig. 3 Reflection and interference of light in the gap

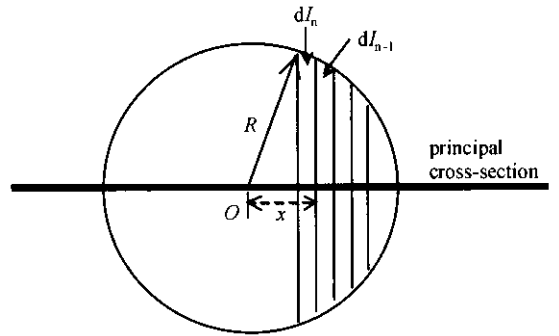


图 4 单色光束横截面的分解

Fig. 4 Decomposition of single wave beam

在空气隙中发生干涉。如图 3 和图 4 所示,将光束分成若干小光束,每束小光束的反射光与相邻的另一束小光束发生干涉,干涉后的光强满足

$$dI' = dI_n' + dI_{n-1}' + 2(dI_n' dI_{n-1}')^{1/2} \cos \delta \quad (2)$$

dI_n' 是光强为 dI_n 的小光束透过胶合面 a 后的透射光强; dI_{n-1}' 是光强为 dI_{n-1} 的小光束透过胶合面 a 后,先后经界面 b 和界面 a 两次反射后的光强; δ 为 dI_n' 和 dI_{n-1}' 之间的位相差,且

$$\delta = 2\delta' - \delta_1 \quad (3)$$

其中 δ' 是光强为 dI_{n-1} 的小光束透过胶合面 a 后到达胶合面 b 时的相位变化值, δ_1 是光强为 dI_{n-1} 与光强为 dI_n 的小光束到达胶合面 a 时的位相差。下面我们以横截面为圆形的光束为例,沿垂直于棱镜主截面方向,将光束分割,如图 4 所示。设光束横截面的半径为 R ,分割的小光束的横向宽度为 dx ,距中心的距离为 x ,光强的密度为 ρ ,结合马吕斯定律,则有

$$dI_n = 2(R^2 - x^2)^{1/2} \cdot t \cdot \rho \cdot dx \cdot \cos^2 \theta \quad (4)$$

t 为界面光强透过率,其表达式为 $(1 - r)$ (r 为反射率)。由于 dI_n 和 dI_{n-1} 相邻,由(4)式,可近似认为 $dI_n = dI_{n-1} \cdot dI_{n-1}$ 经过两次反射后得到的光强为:

$dI_{n-1}^r = r^2 dI_{n-1}' \approx r^2 dI_n' = r^2(1-r)dI_n$, 将以上结果代入(2)式后可以求得从界面 b 出射的光束元的强度

$$dI = dI'(1-r) = (1-r)^2 [(1+r^2)dI_n + 2rdI_n \cos\delta] \quad (5)$$

将(4)式代入(5)式后进行定积分可得到出射的总光强为

$$I = 2 \int_{-R}^R (1-r)^2 (1+2r\cos\delta + r^2) \cdot 2(R^2 - x^2)^{1/2} \rho dx \cdot \cos^2\theta = \pi R^2 \rho (1-r)^2 (1+2r\cos\delta + r^2) \cos^2\theta \quad (6)$$

原入射光束的光强可表示为 $I_0 = \pi R^2 \rho$, 所以检偏器的透射比可表示为

$$T = I/I_0 = (1-r)^2 (1+2r\cos\delta + r^2) \cos^2\theta \quad (7)$$

由(7)式可以看出, 随检偏棱镜的转动, 线偏振光的透射比 T 大体按 $\cos^2\theta$ 的规律变化, 但受到 $[(1-r)^2(1+2r\cos\delta + r^2)]$ 因子调制。

现在来看一下 $[(1-r)^2(1+2r\cos\delta + r^2)]$ 对透射比曲线的调制遵循什么样的规律。如图3所示, 设缝隙的宽度为 d , 对于界面 a 来说, 入射角和反射角分别为 i 和 i' , 由折射定律可得

$$n_e' \sin i = n \sin i'$$

则 $\cos i' = [1 - (n_e'^2/n^2) \sin^2 i]^{1/2}$

n_e' 为棱镜晶体内非常光折射率, n 为缝隙间胶合介质的折射率; 由三角关系可得

$$L = d/[1 - (n_e'^2/n^2) \sin^2 i]^{1/2}$$

$$L' = 2d \sin i = 2d \tan i' \sin i$$

所以

$$\delta' = 2\pi L n / \lambda = 2\pi n d / \{\lambda [1 - (n_e'^2/n^2) \sin^2 i]^{1/2}\} \quad (8)$$

$$\delta_1 = 2\pi n_e' L' / \lambda = 4\pi n_e' d \cdot \tan i' \sin i = 4\pi n_e'^2 d \cdot \sin^2 i / [\lambda (n^2 - n_e'^2 \sin^2 i)^{1/2}] \quad (9)$$

所以 $\delta = 2\delta' - \delta_1 = 4\pi d [(n^2 - n_e'^2 \sin^2 i)^{1/2}] / \lambda$ (10)

在使用检偏棱镜时, 很难保证入射光线与检偏棱镜通光表面是垂直的, 实际光线的入射方向总是与棱镜通光表面法线有一定的偏离。设这个偏离角为 β , 棱镜通光表面法线与胶合界面法线夹角为 α , 如图5所示, 当以棱镜表面中心法线为轴旋转棱镜时, 光束在胶合界面上的入射角 i 将是一个连续变化量。建立图6所示的数学模型, 在其所示的坐标系中, 棱镜通光表面法线方向与 y 轴重合, 胶合界面法线由 n 所示, OA 代表光入射的方向。经分析可得, 平面 AOC 和平面 AOC' (主截面) 之间的夹角 θ' 与检偏

棱镜旋转角 θ 之间的关系满足 $\theta' = 180^\circ - 2\theta$ 。令 $OA = 1$, 由图6三角关系可以求得

$$\cos i = \cos\alpha \cdot \cos\beta + \sin\alpha \cdot \sin\beta \cdot \cos\theta \quad (11)$$

将(11)式代入(10)式可得

$$\delta = 4\pi d \{n^2 - n_e'^2 [1 - (\cos\alpha \cdot \cos\beta + \sin\alpha \cdot \sin\beta \cdot \cos\theta')^2]\}^{1/2} / \lambda \quad (12)$$

由于 β 的范围一般很小 ($\beta \leq 3^\circ$), 在这个范围内可以认为 $n_e' \approx n_e$ 。这样(12)式近似为

$$\delta = 4\pi d \{n^2 - n_e^2 [1 - (\cos\alpha \cdot \cos\beta - \sin\beta \cdot \sin\alpha \cdot \cos 2\theta)^2]\}^{1/2} / \lambda \quad (13)$$

由(13)式得到相位差 δ 与棱镜旋转角之间的关系。

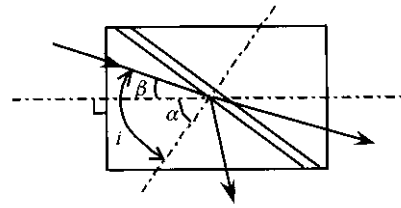


图5 线偏振光在晶体中的光路图

Fig. 5 Rote of polarized light in a polarizer

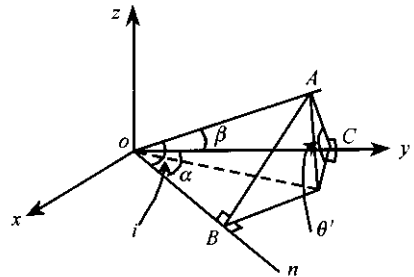


图6 入射光线、棱镜通光表面的法线及胶合面法线相对位置的几何模型

Fig. 6 Geometric model of polarized light passing through a polarizer

3 实验结果与理论分析

Taylor 棱镜的胶合层间的介质为空气, 此时(13)式简化为

$$\delta = 4\pi d \{1 - n_e^2 [1 - (\cos\alpha \cdot \cos\beta - \sin\beta \cdot \sin\alpha \cdot \cos 2\theta)^2]\}^{1/2} / \lambda \quad (13)'$$

一般 r 的值很小, 在 $\beta \leq 3^\circ$ 的范围内, 可认为 r 为定值, (7)式变为 $T = (1+2r\cos\delta + r^2) \cos^2\theta$ 。这样, 一旦将偏光棱镜置于光路中, (13)式中 α, β, λ 都是常数, δ 就随着 θ 的变化而变化, 并且 δ 的变化速率比 θ 的变化要快得多, 由此使得透射比 T 表达式中的调制因子在 θ 变化一个周期的范围内, 将变化许多个周期, 造成 $T-\theta$ 曲线在一个周期内呈现周期性

的微小抖动,产生了“毛刺”。

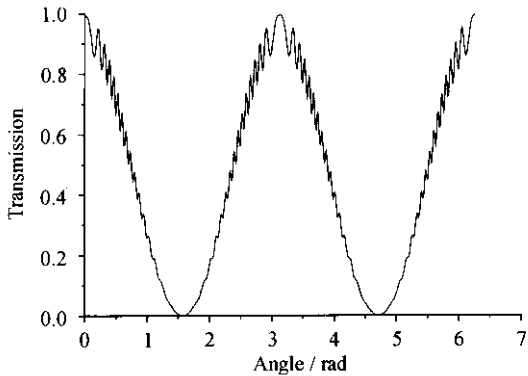


图 7 理论曲线

Fig. 7 Theoretical curve

实验中所用的 Taylor 棱镜胶合界面间空气隙厚度 d 约为 $15 \mu\text{m}$, 结构角 α 为 38.78° , $n_e = 1.438$ 。实验激光波长 λ 为 $0.67 \mu\text{m}$, 将上述参数代入 (13) 式进行验证, 由微机制图所得的结果见图 7。将理论曲线与实验曲线进行比较可得: 1) 实验曲线上的“毛刺”较理论曲线上的要稠密。由式 (13) 可得, d 越大, δ 比 θ 变化得就越快。而胶合层的厚度, 除了垫片的原始厚度之外, 还有胶的厚度以及垫片不平整所引起的 d 明显增大, 致使实验所得的“毛刺”比理论所得的要稠密。2) 理论曲线的透射比较大, 这是由于在理论计算的过程中, 忽略了晶体对光的吸收和光在通光面上的反射损失所致。3) 实验曲线上的“毛刺”的周期性不如理论曲线明显, 这与检偏棱镜旋转的平稳性有关, 但也不排除其他因素的影响。4) 实验曲线上的“毛刺”的振幅较理论曲线上的要小。以上是在假设没有其他因素影响的情况下得出的结果, 实际上影响光束输出强度的还有其他因素, 如表面的平整度等, 可能抵消一部分由于缝间干涉所产生的影响。5) 实验曲线中的最小透射率不为零, 这是由于实际的 Taylor 棱镜的消光比不为零或杂散光影响的缘故。6) 在理论推导过程中假设光束横截面的光强密度均匀, 而实际的光束光强分布一般为高斯分布, 这也对所得理论结果有一些影响, 特别使透射率的峰值处的结果与实验结果偏差较大。7) 此外, 步进电机是跳跃式转动而不是连续转

动, 这也影响透射率曲线的平滑程度。我们在空载 (使用平板玻璃代替检偏棱镜) 的情况下进行测试, 得到平板玻璃的透射率曲线近乎平滑, 但不完全平滑, 并且不同的步进速度对透射率的影响略有不同, 但相对于缝间干涉的影响要小得多。

4 结 论

通过理论和实验分析可以得到: “毛刺”的产生主要由两方面因素引起: 一是使用不当造成的, 由 (13) 式可以看出, 当偏离角 $\beta = 0$ 时, δ 和 θ 无关, 此时 (7) 式中调制因子 $(1 + 2r\cos\delta + r^2)$ 为定值, $T-\theta$ 曲线完全由 $\cos^2\theta$ 决定, 此时曲线没有“毛刺”。在实际调整过程中无论如何调整总不能使透射率曲线完全平滑, 这反映了步进电机的跳跃式转动的影响; 另一因素是棱镜制造工艺, 当棱镜通光面法线与其外壳中心轴线不平行时或空气隙厚度不合适时, 容易出现“毛刺”。

参 考 文 献

- 1 Yang Lianchen, Li Guohua, Song Lianke *et al.*. Design of polarizing devices based on the binary-grating diffraction [J]. *Acta Photonica Sinica*, 1998, 27(9): 833~836
杨连臣, 李国华, 宋连科等. 二元衍射光栅式偏光器件设计[J]. *光子学报*, 1998, 27(9): 833~836
- 2 Li Guohua, Zhao Mingshan, Di Zhenqiang. A new type single-element polarization prism [J]. *Journal of Qufu Normal Univ.*, 1991, 17(3): 58~61
李国华, 吴福全, 狄振强. 新型单元式激光偏光棱镜[J]. *曲阜师范大学学报*, 1991, 17(3): 58~61
- 3 Li Guohua, Wu Fuquan. Study and manufacture of the single super-high transmittance polarizer [J]. *Journal of Qufu Normal Univ.*, 1988, 14(1): 31~34
李国华, 吴福全. 单式超高透偏光镜的研制[J]. *曲阜师范大学学报*, 1988, 14(1): 31~34
- 4 M. Born, E. Wolf. Principles of Optics [M]. Beijing: Science Press, 1985. 346
M. 玻恩, E. 沃耳夫. 光学原理[M]. 北京: 科学出版社, 1985. 346
- 5 M. Born, E. Wolf. Principles of Optics [M]. Beijing: Science Press, 1985. 338
M. 玻恩, E. 沃耳夫. 光学原理[M]. 北京: 科学出版社, 1985. 338
- 6 Li Guohua. Optics [M]. Jinan: Shandong Educational Press, 1990. 272~279
李国华. 光学[M]. 济南: 山东教育出版社, 1990. 272~279