

文章编号: 0253-2239(2004)07-881-4

倾斜入射时偏振分束棱镜的角宽压缩效应*

徐学科 汤兆胜 范正修 邵建达

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘要: 从理论上计算了由于光束倾斜入射产生的棱镜起偏系统角谱宽度的压缩效应, 计算结果表明, 入射光束相对于棱镜入射面的入射角越大对角谱宽度的压缩就越明显, 不同材料的基底折射率的差别对角谱宽度的压缩影响不大。通过举例从膜系设计的角度进一步论证了这一结论。还指明在实际系统中可以保持入射光束的相对角度不变的情况下, 通过改变棱镜的形状来达到倾斜入射的目的从而实现角谱宽度的压缩。对如何设计出高性能的宽角宽光谱偏振分束镜具有重大的指导意义。

关键词: 薄膜光学; 偏振分束镜; 倾斜入射; 角谱宽度; 压缩效应

中图分类号: O484.4⁺1 文献标识码: A

Compression Effect of Angular Width for Polarization Beam Splitter Under Tilted Incidence

Xu Xueke Tang Zhaosheng Fan Zhengxiu Shao Jianda

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

(Received 19 June 2003; revised 12 August 2003)

Abstract: Compression effect of angular width for polarizing beam splitter under tilted incidence is calculated. The calculated result shows that the larger the tilted angle is, the more distinct the compression effect, difference of substrate refractive index has little influence on the compression effect. The conclusion is testified by the designing of thin film coatings ulteriorly. In practical use when the direction of incident light is kept invariable the compression effect of angular acceptance width can be realized by changing the shape of the PBS prism. The result has a great help to design polarizing beam splitter with a wide angular acceptance and spectrum bandwidth in practice.

Key words: thin film optics; polarization beam splitter; tilted incidence; angular acceptance; compression effect

1 引 言

宽角度宽光谱棱镜偏振分光系统(Polarization beam splitter, PBS)在光电仪器中有着广泛的应用, 特别是在背投显示系统的光学引擎中对整个器件的起偏性能有着更高的要求^[1], 因为角谱的宽窄、偏振度的高低直接影响整个系统输出图像的衬比度。

为此很多人从膜系设计的角度做了大量的研究工作, 到目前为止从文献报道的结果可以看出除了 Li Li^[2] 根据受抑全反射原理(FTIR)获得了既有宽

光谱又有宽角谱的棱镜起偏系统外, 其它的很多研究都是以牺牲宽角谱换取宽光谱, 或者牺牲宽光谱获取宽角谱为代价的^[3,4]。本文第二节首先从理论上计算和分析了光束倾斜入射时对棱镜起偏系统角谱宽度的压缩效应; 第三节通过举例从膜系设计的角度进一步论证了这一结论; 最后指明了在实际系统中可以保持入射光束的相对角度不变的情况下, 通过改变棱镜的形状来达到倾斜入射的目的从而实现角宽的压缩。角宽压缩效应的结论对如何设计出高性能的宽角宽光谱偏振分束膜具有重大的指导意义。

* 上海光科技专项基金(012261054)资助课题。

E-mail: xuxk@opfilm.com

收稿日期: 2003-06-19; 收到修改稿日期: 2003-08-12

2 原理分析

2.1 理论原理

图 1 是一个典型的迈克尼尔 (MacNeille) 棱镜的示意图, 当一束光以 θ 入射时, 它在偏振分束膜面的入射角 θ_D 满足以下关系:

$$\theta_D = \arcsin\left(\frac{\sin \theta}{n}\right) + \theta_{\text{sub}}, \quad (1)$$

其中 θ_{sub} 是 $\theta = 0$ 时光束在膜面的入射角, n 为基底折射率。

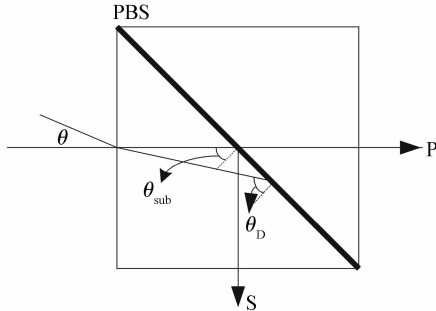


Fig. 1 MacNeille prism model under tilted incidence

显然 $\theta_{\text{sub}} = 45^\circ$, 因此由 (1) 式便可以得到

$$\sin \theta_D - \cos \theta_D = \sqrt{2} \sin \theta / n, \quad (2)$$

(2) 式求得

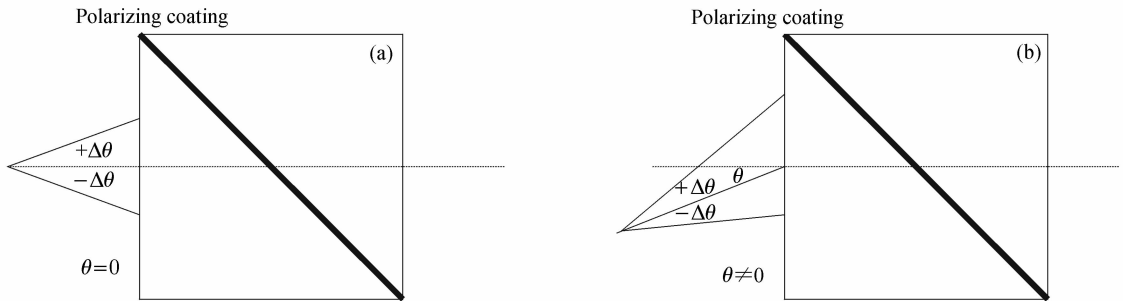


Fig. 2 Schematic of polarization beam splitter cube at different incidence angle ($\theta = 0$ and $\theta \neq 0$)

Table 1 Data of $\Delta\theta$ and $\Delta\theta_D$ at different incidence angle

$\Delta\theta_D$ \ θ	n	1.52	1.64	1.74	1.83
0°		$\pm 7.8^\circ$	$\pm 7.3^\circ$	$\pm 6.9^\circ$	$\pm 6.5^\circ$
10°		$\pm 7.7^\circ$	$\pm 7.2^\circ$	$\pm 6.8^\circ$	$\pm 6.4^\circ$
20°		$\pm 7.5^\circ$	$\pm 7.0^\circ$	$\pm 6.6^\circ$	$\pm 6.2^\circ$
30°		$\pm 7.1^\circ$	$\pm 6.6^\circ$	$\pm 6.2^\circ$	$\pm 5.8^\circ$
40°		$\pm 6.6^\circ$	$\pm 6.1^\circ$	$\pm 5.7^\circ$	$\pm 5.3^\circ$

从表 1 中的数据可以看出, 随着角度 θ 的变大, $\Delta\theta_D$ 呈现压缩的趋势越明显; 对于不同折射率材料的基底, $\Delta\theta_D$ 每改变 10° 所带来的 $\Delta\theta_D$ 的相对变化值的规律基本相同。

$$\frac{d\theta}{d\theta_D} = \frac{\sqrt{2}n}{2} \left(\frac{\cos \theta_D + \sin \theta_D}{\cos \theta} \right),$$

即

$$\frac{d\theta}{d\theta_D} = \sqrt{\frac{n^2 - \sin^2 \theta}{1 - \sin^2 \theta}},$$

因为 $n > 1$, 所以

$$1 < \frac{d\theta}{d\theta_D} < \sqrt{\frac{n^2 - \sin^2 \theta}{1 - \sin^2 \theta}}, \quad (3)$$

从 (3) 式可以发现, $\theta = 0$ 时

$$d\theta/d\theta_D = n,$$

$0 < \theta < \pi/2$ 时

$$\frac{d\theta}{d\theta_D} = \sqrt{\frac{n^2 - \sin^2 \theta}{1 - \sin^2 \theta}} > n,$$

上式表明, 当入射光以 θ ($\theta \neq 0$) 角度倾斜入射的时候, 如图 2(b), θ 每发生一个 $\Delta\theta$ 的变动, 所对应的 $\Delta\theta_D$ 的大小是在 $\theta = 0$ 时 [如图 2(a)], 由于 $\Delta\theta$ 的变化所对应的 $\Delta\theta_D$ 的 $\frac{n}{\sqrt{(n^2 - \sin^2 \theta)/(1 - \sin^2 \theta)}}$ 倍。

一般的投影系统中偏振分束棱镜空气中角度要求 $\Delta\theta = \pm 12^\circ$, 表 1 是在该角度范围内不同基底折射率 n 和不同倾斜入射角 θ 所带来的 $\Delta\theta_D$ 之间的关系。

同时当入射光线以特定角度 θ 从水平轴下方 (和图 1 所示入射角呈轴对称) 入射的时候我们可以得到 θ 和 θ_D 之间的关系式:

$$\theta_D = \theta_{\text{sub}} - \arcsin\left(\frac{\sin \theta}{n}\right),$$

经过同样的运算步骤我们可以得到同样的结果:

$$\left| \frac{d\theta}{d\theta_D} \right| = \sqrt{\frac{n^2 - \sin^2 \theta}{1 - \sin^2 \theta}}. \quad (4)$$

由 (3) 式, (4) 式可以得出以下结论, 相对于传统的迈克尼尔棱镜的入射角度以垂直入射面法线对称分布的方式来说 [图 2(a)], 当我们以与法线成一定角度直线为轴呈对称分布角度做入射角度时 [图 2(b)], 可以实现棱镜和膜面之间入射角谱宽度的压缩效应。

3 倾斜入射和膜系设计

根据折射定律,我们很容易求得传统迈克尼尔起偏棱镜实现起偏时高低折射率应该满足的条件:

$$n_0 \sin \theta_0 = \frac{n_H n_L}{(n_H^2 + n_L^2)^{1/2}},$$

其中 n_0 为基底折射率, θ_0 为棱镜和膜层之间的入射角, n_H 、 n_L 分别为高低折射率材料的折射率值。

为了实现 415~580 nm 光谱范围,空气中 $\pm 3^\circ$ 角度内实现起偏,我们分别设计中心入射角 θ_0 分别为 45° 、 61° 两个膜系(基底折射率为 1.64):

$$1) n_H = 1.92, n_L = 1.46$$

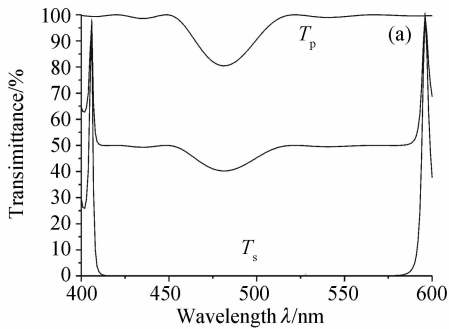
膜系结构:

$$(HL)^m H$$

m 为整数。

$$2) n_H = 2.2, n_L = 1.92$$

膜系结构:



$$x_1(HL)^{m_1} x_2(HL)^{m_2} x_3(HL)^{m_3} x_3 H$$

m_1, m_2, m_3 为整数, x_1, x_2, x_3 为实系数。

经过计算在空气中入射角度 θ 分别为 0° 、 28.6° , 根据前面的理论可以得到相应的 $\Delta\theta_D$ 分别为 $\pm 1.83^\circ$ 、 $\pm 1.69^\circ$ 。

$$\text{压缩比为 } \frac{1.83 - 1.69}{1.83} \times 100\% = 7.6\%。$$

图 3(a)是空气中 $\pm 3^\circ$ 的角宽在正入射时的光谱曲线(膜面的入射角度为 $45^\circ + 1.83^\circ$),图 3(b)以 28.6° 斜入射时候的光谱曲线(膜面的入射角度为 $61^\circ + 1.69^\circ$)。显然由于倾斜入射带来的角谱压缩效应,使得倾斜入射时膜系仍然保持着良好的偏振分束特性。

图 3(c)和图 3(d)是在 480 nm 处(此波长是角宽加大时光谱特性变化最敏感的点),正入射($45^\circ \pm 1.83^\circ$)和斜入射($61^\circ \pm 1.69^\circ$)时的角谱变化曲线。

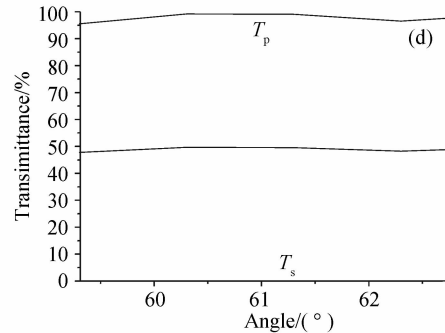
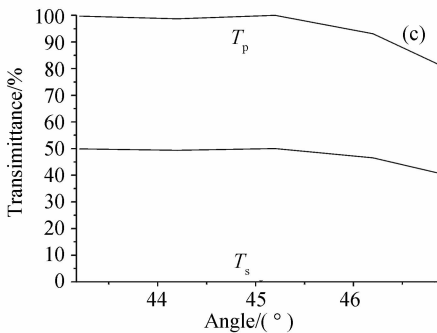
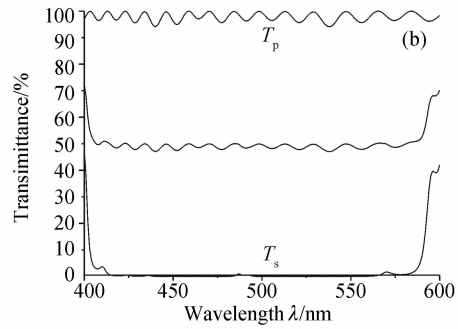


Fig. 3 Transmittance of polarization beam splitter cube at tilted angle of 28.6° and 0° which satisfied same angular acceptance ($\pm 3^\circ$)

从以上结果很容易得出结论:当我们在空气中以同样角度范围入射的时候,倾斜入射相对于正入射可以压缩其在基底和膜面之间的入射角度范围,这从一定程度上减轻了膜系设计的难度。

4 倾斜入射的实现

倾斜入射的方案可以让我们进一步设想在实际

系统中保持入射光束的相对角度不变的同时,我们可以改变棱镜系统的形状可以实现倾斜入射从而达到角谱宽度压缩的目的。

图 4 为改变后的棱镜形状示意图,尽管入射光束没有发生偏转,但由于棱镜入射面的角度效应同样可以得到和以上分析相同的效应,即可以压缩光束在膜面上的入射角谱宽度。

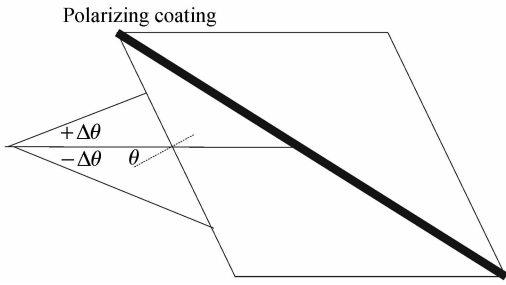


Fig. 4 Schematic of transformed shape of prism

结论 本文在没有考虑经过棱镜起偏后,两种偏振态的出射光束之间夹角的变化,我们从理论上计算和分析后得出以下结论:

1) 当入射光束以一定角度倾斜入射的时候,相对于正入射的情况下可以压缩其在棱镜和膜层之间的入射角谱宽度。

2) 根据偏振分束膜的特点,在实际的应用系统中保持入射光束角度相对不变的情况可以通过改变

棱镜的形状能同样达到倾斜入射的效果。

3) 有了这样的理论根据可以指导我们的膜系设计,以及如何将不同特性的膜系应用到实际的系统中去。

参 考 文 献

- 1 Yao Liying, Yi Kui, Yang Jian *et al.*. Design and fabrication of polarizing beam splitter for projection display system. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2002, **22**(9): 1116~1118 (in Chinese)
- 2 Li Li, Dobrowolski J A, Sullivan B T *et al.*. Novel thin film polarizing beam-splitter and its application in high efficiency projection displays. *Proc. SPIE*, 1999, **3634**: 52~62
- 3 Li Li, Dobrowolski J A. Visible broadband, wide-angle, thin-film multilayer polarizing beam splitter. *Appl. Opt.*, 1996, **35**(3):2221~2225
- 4 Baumeister P. Rudiments of the design of an immersed polarizing beam divider with a narrow spectral bandwidth and enhanced angular acceptance. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(16):3610~3613