

文章编号: 1001-3806(2010)05-0670-03

## 应力对薄膜偏振分束镜性能的影响及改进工艺

王庆, 吴福全\*, 郝殿中, 齐瑞云, 吴闻迪, 彭捍东, 尹延学

(曲阜师范大学 激光研究所 山东省激光偏光与信息技术重点实验室, 曲阜 273165)

**摘要:** 为了研究应力对薄膜偏振分束镜性能的影响和减少应力的方法, 通过在镀制分光膜之前预镀  $Al_2O_3$  过渡层, 镀制过程中提高真空度、升高基底温度、减慢薄膜沉积速率, 以及封装过程中采用光学光敏胶紫外光照射快速凝固法来减少薄膜应力。利用 CCD 采集了工艺改进前后薄膜偏振分束镜反射光和透射光的光斑图像, 利用消光比测试系统测量了工艺改进前后薄膜偏振分束镜反射光和透射光的消光比。结果表明, 改进工艺后反射光和透射光的光斑能量更加集中, 散斑现象变小; 反射光和透射光的消光比特性明显提高。由此可见, 通过改进镀制工艺和封装工艺可以使薄膜偏振分束镜的指标达到使用要求。

**关键词:** 薄膜; 偏振分束镜; 应力; 光斑; 消光比

**中图分类号:** O484.2

**文献标识码:** A

**doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2010.05.025

## Effect of stress on performance of thin film polarizing beam splitters and improvement process techniques

WANG Qing, WU Fu-quan, HAO Dian-zhong, QI Rui-yun, WU Wen-di, PENG Han-dong, YIN Yan-xue

(Shandong Provincial Key Laboratory of Laser Polarization and Information Technology, Institute of Laser Research, Qufu Normal University, Qufu 273165, China)

**Abstract:** In order to investigate effect of the stress on the thin film polarizing beam splitters and seek the techniques to reduce stress, prior to the deposition polarizing splitter coatings,  $Al_2O_3$  buffer layer was coated, the degree of vacuum was improved, the substrate temperature was increased, the film deposition rate was slowed down during deposition processes. During encapsulation process, optical photosensitive adhesive rapid solidification under UV irradiation was used. The spot images of reflected light and transmitted light of the thin film polarizing beam splitter were collected with CCD before and after process improvement respectively. The extinction ratios of reflected light and transmitted light of the thin film polarizing beam splitter were measured before and after process improvement respectively. The results indicate that after applying improved technologies, the spot energy of reflected and transmitted light is more concentrated, speckle phenomenon becomes smaller; the extinction ratios characteristic of reflected and transmission light dramatically are improved. Thus, thin film polarizing beam splitters can reach the application requirements by optimizing the process and packaging technology.

**Key words:** thin film; polarizing beam splitter; stress; light spot; extinction ratio

### 引言

偏振分束镜是重要的光学器件, 广泛应用于光学实验、光存储、光通信和 LCOS 投影显示系统<sup>[1-2]</sup>。传统的偏振分束镜 (polarized beam splitter, PBS) 由天然方解石晶体制成<sup>[3-5]</sup>, 这种晶体偏振分束镜具有使用光谱宽、透射光和反射光的消光比都非常高、视场角大等优点。但是光学级天然方解石晶体非常稀少, 并且尺

寸都很小。人工生长的方解石晶体只能生长到几个毫米, 达不到制作偏光器件的要求。这些原因造成天然方解石晶体偏光镜价格较高, 不能制造大口径的棱镜, 限制了方解石晶体偏光镜的使用。利用光学薄膜原理制造的偏振分束镜在实际中获得了广泛的应用, 国内外学者对 Macneille 型薄膜偏振分束镜都进行了广泛深入的研究<sup>[6-12]</sup>。薄膜偏振分束镜制作过程中的应力会造成偏振分光膜的开裂、褶皱和起泡脱落, 导致偏振分束镜的性能变坏。本文中研究了 1/4 对称膜系薄膜偏振分束镜制作过程中的应力情况, 并通过加镀过渡层、改善镀制工艺和选用合适的胶合剂等方法, 增加了薄膜的附着力, 减少了应力, 使薄膜偏振分束镜达到了使用要求。

基金项目: 山东省教育厅科技计划资助项目 (J06P06)

作者简介: 王庆 (1982-), 男, 硕士研究生, 主要从事薄膜光学和偏振光学器件的研究。

\* 通讯联系人。E-mail: fqwu@mail.qfnu.edu.cn

收稿日期: 2009-11-11; 收到修改稿日期: 2009-12-17

## 1 偏振分束镜的原理与设计

对称膜系偏振分束镜的结构和分光光路如图1所示。它是将多个周期的3层对称结构介质膜镀制在光

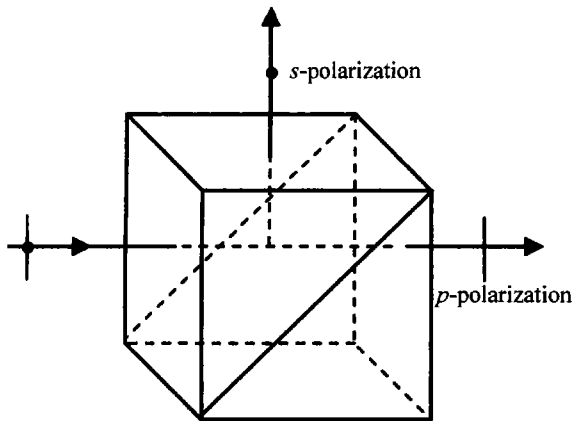


Fig. 1 Schematic diagram of thin film PBS

学玻璃棱镜的斜面上,然后用光学胶合剂将两棱镜胶合起来。

由于光线倾斜入射时的偏振效应,对称结构膜系对  $s, p$  偏振分量具有不同的等效折射率。通过选取适当薄膜材料、封装用光学玻璃和入射角度,使对称结构膜系  $p$  偏振分量的等效折射率与封装用光学玻璃内  $p$  偏振分量的光学导纳相等,则  $p$  偏振分量就相当于在同一种介质中传播,则  $p$  偏振分量可以完全透射;同时使对称膜系  $s$  偏振分量的等效折射率为纯虚数,即进入对称膜系  $s$  偏振分量等效折射率的截止带,当  $s$  偏振分量的相位厚度足够厚时,  $s$  偏振分量就可以被完全反射而不能透射。

周期性3层对称膜系有两种膜系结构,  $(LHL)^N$  和  $(HLH)^N$ , 其中  $H, L$  和  $N$  分别代表高、低折射率薄膜材料和膜层的周期数。基于上述原理设计了  $(LHL)^N$  膜系结构的偏振分束镜,标记为样品1。封装用光学玻璃和高低折射率薄膜材料分别为  $ZF_6$  型号的玻璃、 $ZnS$  和  $MgF_2$ 。

## 2 器件制成过程中应力的解决方法

### 2.1 器件镀制过程中应力的解决方法

偏光分束膜的镀制是在韩国产 EB900 真空镀膜机上完成的。实验中的膜系是  $1/4$  规整膜系,所以采用光学极值法监控薄膜厚度。工艺改进前后的沉积制备条件分别标记为  $1^{\#}$  和  $2^{\#}$ ,具体参量见表1。

Table 1 The deposition parameters of the PBS before and after techniques improvement

PBS	vacuum	temperature	monitor	deposition speed/( $\text{nm} \cdot \text{s}^{-1}$ )	
	/Pa	/ $^{\circ}\text{C}$	wavelength /nm	$MgF_2$	$ZnS$
$1^{\#}$	$1.6 \times 10^{-3}$	100	550	1.5	1.5
$2^{\#}$	$1.2 \times 10^{-3}$	130	550	1.3	1.3

工艺改进前蒸镀的偏振分束膜取出后,出现了起泡、卷曲的现象,导致薄膜与基板材料剥离掉膜,这是由于镀制过程中产生的压应力造成的。为了减少成膜过程中的残余应力,改变镀制工艺:提高真空度、升高基板温度、减慢薄膜沉积速率。

$MgF_2$  与基板的附着力不强,容易造成薄膜脱落。为了提高第1层膜与基板的附着力,经常采用在基底与膜系之间预镀过渡层<sup>[13]</sup>的方法。 $Al_2O_3$  与基板的结合力强<sup>[14]</sup>,所以,在基底与膜系之间预镀了一层  $1/4$  监控波长的  $Al_2O_3$  过渡层以增加附着力。按照上述工艺参量镀制的偏振分束膜取出后没有出现开裂、起泡和剥离的现象,成膜质量较好。

### 2.2 器件封装过程中应力的解决方法

将镀制完偏振分束膜的两块直角棱镜用冷杉树脂胶胶合在一起,放入温控装置  $80^{\circ}\text{C}$  烘烤 48h。待胶合剂完全固化后,将棱镜取出。棱镜取出后偏振分束膜出现了开裂现象,说明封装过程中产生了过大的张应力。为了解决偏振分束膜封装过程中的应力问题,进行了对照试验。方法1是选用冷杉树脂胶胶合棱镜,并且烘烤使其凝固;方法2是选用冷杉树脂胶胶合棱镜,不烘烤凝固,而是让其在室温下自然风干;方法3是选用光学光敏胶胶合棱镜,然后在紫外光下照射 10min,让其迅速凝固。

采用方法1,开裂现象非常明显,反射光和透射光光斑能量分散非常严重,器件性能达不到使用要求;采用方法2后,开裂现象有所减轻,但还是有开裂现象;采用方法3后,封装的薄膜没有出现明显的开裂现象,封装效果较好,达到了使用要求。

## 3 应力对器件性能的影响

### 3.1 应力对光斑能量分布的影响

薄膜中残余应力过大时,会造成薄膜的起泡、褶皱和开裂等现象<sup>[15]</sup>,导致薄膜表面变得非常粗糙。光束的光斑经过薄膜反射或者透射后会发生散射,使反射和透射光束的光斑质量变坏。为了验证优化镀制工艺和选择合适封装胶合剂和胶合工艺对改善薄膜应力的效果,用 CCD 采集了镀制工艺和封装工艺优化前后光束光斑的图像,如图2所示。采集图像时所用光源波长为  $650\text{nm}$ 。从图中可以清楚地看到,制作工艺改进后,反射光束和透射光束的光斑质量都得到了明显改善。工艺改进前由于薄膜表面开裂造成的散射把光斑能量发散的很严重,工艺改进后光斑能量集中,由此可见,减少薄膜应力对改善反射和透射光束光斑质量的效果非常明显。

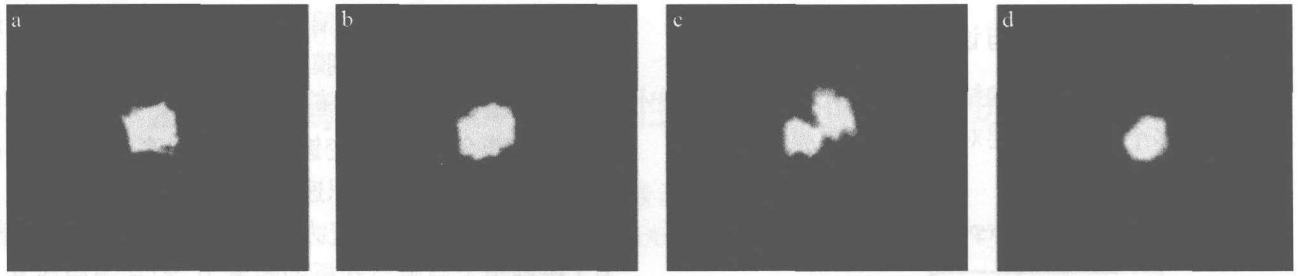


Fig. 2 Light spot before and after process optimization

a—reflective light spot before process optimization b—reflective light spot after process optimization c—transmittance light spot before process optimization d—transmittance light spot after process optimization

### 3.2 应力对消光比的影响

消光比是偏光棱镜的重要特性参量,为了研究薄膜应力对器件消光比特性的影响,分别测量了制作工

艺改进前后反射光和透射光的消光比。测量的消光比如表2所示。从表2可以看出,制成工艺改进后器件反射光和透射光的消光比特性都得到了明显的提高。

Table 2 The extinction ratios of PBS before and after techniques improvement

before techniques improvement		after techniques improvement	
reflectivity extinction ratios	transmittance extinction ratios	reflectivity extinction ratios	transmittance extinction ratios
$8.15 \times 10^{-3}$	$4.42 \times 10^{-2}$	$2.15 \times 10^{-3}$	$2.20 \times 10^{-4}$

## 4 结论

薄膜中的应力会导致偏振分束膜破裂、脱落,使薄膜偏振分束镜的性能变坏。薄膜偏振分束镜中的应力主要有两部分组成:一部分是偏振分束膜镀制过程中薄膜的本征应力,以及由于薄膜与基板的热膨胀系数不同所产生的热应力;另一部分是封装过程中光学胶合剂凝固过程中产生的应力。这两部分应力之和导致了偏振分束镜特性变坏。通过在镀制偏振分束膜之前加镀  $1/4$  监控波长波长的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  过渡层,增加薄膜与基板的附着力;在镀制过程中提高真空度、升高基板温度、减慢薄膜材料的沉积速率等镀制参量,减少了成膜过程中的应力;封装过程中,用光学光敏胶紫外光照射快速凝固法代替冷杉树脂胶高温烘干法。经测试,采取上述改进工艺后,薄膜偏振分束镜反射光和透射光的光斑特性得到了较大改善,光斑能量更加集中;消光比特性得到了提高,消光比特性平均可以提高一个数量级。改善镀制和封装工艺后的对称膜系薄膜偏振分束镜性能较好,达到了使用要求。

### 参 考 文 献

- [1] FENG J B, ZHOU Zh P. Polarization beam splitter using a binary blazed polarization beam splitter using a binary blazed grating coupler [J]. *Opt Lett*, 2007, 32(12):1662-1664.
- [2] LI L, SULLIVAN B T, DOBROWOLSKI J A. High efficiency projection displays having thin film polarizing beam splitter; U S, 5982541 [P]. 1999-11-09.
- [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 C, WU F Q, *et al.* Splitting angle and light intensity splitting ratio of single-element polarized beam splitting prisms [J]. *Laser Technology*, 2008, 32(3): 299-301 (in Chinese).
- [5] ZHANG Sh, WU F Q. The optimum design of ultraviolet polarizing prism of iceland and barium fluoride [J]. *Laser Technology*, 2007, 31(3): 285-287 (in Chinese).
- [6] von BLANCKENHAGEN B. Practical layer designs for polarizing beam-splitter cubes [J]. *Appl Opt*, 2006, 45(7): 1539-1543.
- [7] LI L, DOBROWOLSKI J A. Visible broadband, wide-angle, thin-film multilayer polarizing beam splitter [J]. *Appl Opt*, 1996, 35(13): 2221-2225.
- [8] MOUCHART J, BEGEL J, DUDA E. Modified MacNeille cube polarizer for a wide angular field [J]. *Appl Opt*, 1989, 28(14): 2847-2853.
- [9] KONG W J, WU F Q, WANG J M. Investigation on thin film polarizing beam splitter [J]. *Journal of Applied Optics*, 2003, 24(4): 17-19 (in Chinese).
- [10] YAO L Y, YI K, YANG J, *et al.* Design and fabrication of polarizing beam splitter for projection display system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, 22(9): 1116-1118 (in Chinese).
- [11] ZHANG Y G, SHENG Y J, AI M L, *et al.* Wide band and wide angle polarizing beam splitter [J]. *Optical Instruments*, 2001, 23(5/6): 198-201 (in Chinese).
- [12] GU P F, LIU X, TANG J F. Design of broadband and wide-angle polarizing beam splitter [J]. *Optical Instruments*, 1999, 21(4/5): 17-21 (in Chinese).
- [13] SUN X L, SHAO J D. Effect of Cr interlayer on the optical properties and adhesion of Ag films [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2006, 33(12): 1680-1683 (in Chinese).
- [14] ZHAO P, WU F Q, HAO D Zh, *et al.* Development of the Wollaston prism antireflection film [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2005, 32(12): 1703-1705 (in Chinese).
- [15] ZHENG W T. *Thin film materials and technology* [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004: 243-246 (in Chinese).