

文章编号: 1001-3806(2006)04-0377-04

一种用于 DWDM 系统的薄膜型微小偏振分束器

李晓平^{1,2}, 易新建^{1*}, 史铁林²

(1. 华中科技大学 光电子工程系, 武汉 430074; 2. 华中科技大学 微系统研究中心, 武汉 430074)

摘要: 讨论了一种用于 DWDM 系统中的光开关、偏振无关隔离器等单元器件中的微小薄膜型偏振分束器制造的关键技术。光学膜层采用数学多重优化设计方法; 采用 Monte Carlo 允差分析原理分析膜层的容差, 以便选择更易制备的膜系; 计算膜层的 Macleod 极值灵敏度, 得到所选膜系各个膜层的误差要求; 模拟光学监控过程, 以制定相应的膜厚监控策略。设计了实用的棱镜胶合装置, 得到了较高技术指标的 PBS 棱镜。结果表明, 棱镜的光学冷加工, 是器件制造的基础; 光学薄膜的设计与制备是器件制造的关键, 也是难点; 棱镜的胶合是器件不可忽视的环节。

关键词: 光学; 薄膜型偏振分束器; 设计与制造; 密集波分复用

中图分类号: O484.4⁺1 文献标识码: A

A micro polarized beam splitter for DWDM

LIXiao-ping^{1,2}, YIXin-jian¹, SHITie-lin²

(1. Department of Optoelectronics Engineering HUST, Wuhan 430074 China; 2. Institute of Microsystems HUST, Wuhan 430074 China)

Abstract The key technology to make a micro polarized beam splitter (PBS) used as optical switcher and polarization-free isolator in the DWDM system is discussed. The optical film is designed with optimum method. The tolerance of the layer is modeled through Monte Carlo method in order to obtain simple manufacture process. The film thickness error of the each layer is obtained by calculating the Macleod maximum sensitivity. The film thickness is controlled by modeling the optical monitoring processes. A practical cemented prism is designed, and a PBS prism with advanced technique parameters is obtained. The results show that the optical cold machining for the prism is the base to make the PBS, the key issue and difficulty are optical film design and coating, and it is also important to cement the prism.

Key words optics; thin-film polarized beam splitter; design and fabrication; dense wavelength division multiplexing (DWDM)

引 言

微小偏振分束器 (polarized beam splitter 简称 PBS 棱镜) 广泛用于密集波分复用 (dense wavelength division multiplexing DWDM) 系统中的光开关、偏振无关隔离器等单元器件。这些单元器件中使用的 PBS 棱镜有两类, 一类是晶体型, 虽然该类 PBS 棱镜具有隔离度高等优点, 但由于封装的器件尺寸小, 从 PBS 中出来的 p 光和 s 光之间的角度不能分得很开, 器件调试、封装异常困难。很多厂商有意选择薄膜型 PBS 棱镜, 它可以将 p 光和 s 光分得很开, 利于调试、封装。要制造尺寸 $2\text{mm} \times 2\text{mm}$ 左右微小薄膜型偏振分束棱镜, 对制造者来说, 高隔离度微小棱镜的膜系设计与制

备, 棱镜的胶合与光路的调试, 光学冷加工, 都是件困难的事情。PBS 棱镜在其它光学仪器中也有广泛应用。

1 器件的结构与主要技术指标

传统的 PBS 棱镜^[1-5] 大都是立方棱镜, 尺寸在十多毫米至几十毫米, 它由两块立方三棱镜胶合而成, 入射面、出射面镀增透膜 (AR), 胶合面的其中一个面镀 PBS 膜层。应通信系统要求 (隔离度大于 35 dB, 插入损耗 0.2 dB), 本文中的 PBS 棱镜由 1 块立方三棱镜和 1 块菱形棱镜胶合而成, 尺寸在 5 mm 以下 (见图 1),

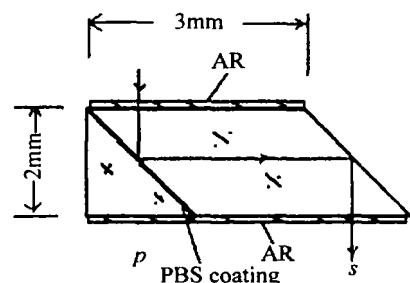


Fig 1 Schematic diagram of tiny PBS

基金项目: 国家“八六三”计划资助项目 (2004AA404043)

作者简介: 李晓平 (1962), 男, 博士研究生, 现从事薄膜技术方面的研究工作。

* 通讯联系人。E-mail: yi_jian_ken@yahoo.com

收稿日期: 2005-03-06 收到修改稿日期: 2005-11-10

入射面、出射面镀增透膜,胶合面的其中一个面镀 PBS膜层。主要技术指标见表 1。

Table 1 Specification of PBS prism

parameter	extinction ratio	transmission %	reflectivity %	range of spectrum /nm	make an angle of swith p	tolerance for dimension /mm
specification	$T_p/T_s > 1000$	$T_p > 97$	$R_p < 0.2$	1525~ 1565	$\leq 30''$	± 0.1
	$R_s/R_p > 400$	$T_s < 0.1$	$R_s > 97$			

通信领域的一些技术指标与物理中表示不同,物理习惯用透过率或反射率表示,在光通信中,各个波长的透射比用损耗 (dB)给出,它和透射比 T 的关系是:
 $\tau = -10\lg(T)$, 式中, τ 为通带内峰值插入损耗。

2 PBS膜系的设计与制备

2.1 膜系的设计

PBS膜层横断面结构如图 2 所示,从使用的角度考虑,入射媒质和出射媒质选牌号为 BK7 的玻璃,从薄膜制备和材料的稳定性考虑,介质膜材料选低折射率 SiO_2 和高折射率 Ta_2O_5 ,入射 PBS膜层角度 $\theta = 45^\circ$ 。

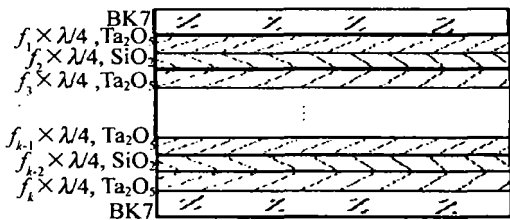


Fig 2 Schematic diagram of thin-film for PBS

每层膜的特征矩阵可以表示为:

$$\begin{bmatrix} \cos\delta_j & i\sin\delta_j \eta_j \\ i\sin\delta_j \eta_j & \cos\delta_j \end{bmatrix} \quad (1)$$

它包含了薄膜的全部有用的参数。对 s 光和 p 光,膜层的位相厚度都是:

$$\delta_j = \frac{2\pi}{\lambda} n_j d_j \cos\theta_j \quad (2)$$

折射角 θ_j 由折射定律所确定。导纳 η_j 由下式给出:

$$\eta_j = n_j - K_j \quad (3)$$

对 p 光, $n_p = n_j / \cos\theta_j$, 而对 s 光, $n_s = n_j \cos\theta_j$, n_j 是第 j 层的折射率, K 是吸收常数。

对每一层膜重复运用边界条件,经过连续的线性变换,最后可得到整个膜系的特征矩阵:

$$\begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix} = \left\{ \prod_{j=1}^k \begin{bmatrix} \cos\delta_j & \frac{i}{\eta_j} \sin\delta_j \\ \eta_j \sin\delta_j & \cos\delta_j \end{bmatrix} \right\} \begin{bmatrix} 1 \\ \eta_{k+1} \end{bmatrix} \quad (4)$$

这样,膜层的反射率为:

$$R = \left[\frac{\eta_0 B - C}{\eta_0 B + C} \right] \left[\frac{\eta_0 B - C}{\eta_0 B + C} \right]^* \quad (5)$$

式中, η_0 为入射媒质的等效导纳。用 (5) 式可分别计算出 s 光, p 光所对应的 R_s, R_p 值。需要得到在较宽波长范围内,透射光有较高的透射消光比, p 光有较高的透射隔离度,反射光有较高的反射消光比, s 光有较高

的反射隔离度。在靠近出射和入射媒质的几层薄膜,每层的光学厚度一定都是非 $\lambda/4$ 波长的,中间的数层膜层,每层的光学厚度一定都是 $\lambda/4$ 波长。膜系是借助最优化方法自动设计出来的。选择第 j 层的光学厚度为 $f_j \lambda_0 / 4$ 其中 $f_j \in (0, 1.5)$, λ_0 是中心波长,则设计问题就是找一组 $\{f_j\}$, 使在光谱范围 1525nm ~ 1565nm 内满足前面提到的技术指标。为此,构造了如下的评价函数:

$$\Psi = \frac{1}{K} \sum_{j=1}^k \left[w_{K_j} \frac{\ln(R_{s_j}, R_{p_j})}{\ln(\max(R_{s_j}, R_{p_j}))} + w_{K_y} \frac{1}{1 - \ln(R_{s_j}, R_{p_j})} \right] \quad (6)$$

约束条件: $R_p < 0.2\%$, $R_s > 97\%$, $\frac{1-R_{p_j}}{1-R_{s_j}} \geq 1000$

$\frac{R_p}{R_s} \geq 400$, 式中, R_s, R_p 分别为 λ_j 处 s 光, p 光的反射率, K_{s_j}, K_{p_j} 分别为 λ_j 处反射消光比和透射消光比, w_{K_s}, w_{K_p} 分别为 λ_j 处反射消光比、透射消光比的权重因子。 $w_{K_s} = 0.5, w_{K_p} = 0.5$ 。要找到一组 $\{f_j\}$ 使 Ψ 取极小值,将一种统计实验求总极值的方法和 power 共轭方向法相结合,用第 1 种方法求得中间结果,作为第 2 种方法的初始结构进一步寻优,得到需要的参数。计算表明,得到的膜系有很大的容许误差范围,因此具备很好的镀制性能。

通过设计的多组膜系计算得知,膜层具有对称结构,其膜系结构为 K9 玻璃 / 非规整膜层 / 规整膜层 / 非规整膜层; 规整膜层的作用在于提高膜系的反射隔离度; 膜系外层非规整膜层主要是增加 p 光的透过率。

图 3 中的粗实线是计算出 PBS 棱镜的 31 层膜系结构 {K9/1.2833H 1.3031L0.8817H (1H)¹²L0.8817H 1.3031L1.2833H} 的透过率与波长关系曲线。计算的中心波长是 1782nm。

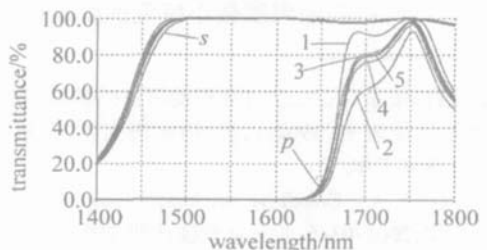


Fig 3 Monte Carlo simulation

2.2 膜系的误差分析^[5-7]

为了了解所设计膜系的工艺特性, 采取哪种工艺能够满足设计指标, 需要知道它膜厚容许的误差范围; 也需要了解膜层误差的灵敏度, 即在有误差的前提下, 哪几层膜要求苛刻, 以便制定膜层镀制的监控策略。根据光学膜层 Monte Carlo 允差分析原理^[8], 对设计的膜系分别作了容差分析。因采用光学极值法监控, 它监控的是探测器上接受的光强, 容差定义为最大容许的光学透过率的误差。计算容差值时, 将光学厚度折合成极值数计算, 取随机分布, 偏差为 2×10^{-3} , 均值为 0, 膜系做 100 次模拟, 对膜系每次的模拟结果, 在需要分析的波段上计算透过率, 各个波长处比较每次模拟的透过率, 记下透过率的最大值和最小值, 输出到文件中; 用数学工具软件调用得到的文件, 绘出图形得到直观的包络线, 实际产品的透过率曲线应落在两条包络线中间, 即曲线 1 和曲线 2 之间。图中统计了全部模拟中, 数据结果比较好的 75% 的模拟结果, 它们落在的曲线 3 和曲线 4 的包络线中, 在设计光谱范围内, 它们基本和原始设计曲线 5 重合。

膜系的灵敏度有动态和静态两种计算方法。静态的灵敏度^[9]就是求总的反射率或透过率对每层膜的一阶偏导数, 对某层膜求导时, 假设其它层没有误差。这里采取了膜层在误差随机分布条件下, 动态 Macleod 的灵敏度算法^[10], 求得膜系对各个膜层监控要求的苛刻程度(见图 4), 图横坐标是层数, 从纵坐标的数值

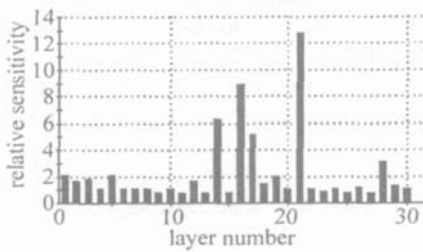


Fig 4 Macleod turning point sensitivity

可以看出: 纵坐标数值大小的表示各膜层对膜厚监控要求苛刻的不同程度, 数值大, 对膜厚监控要求苛刻, 数值小, 对膜厚监控要求小。从图中看出: 第 14、16、17、21 层数值大, 灵敏度高, 膜层监控需特别考虑。

2.3 薄膜制备中的膜层的监控策略

薄膜制备在德国 Leybold 公司的 APS1104 镀膜机上完成的。主要解决的问题是膜厚的光学监控, 膜厚的控制以极值法为主, 石英晶振主要控制蒸发速率。若按传统的规整膜层极值点停镀监控, 由于膜系含规整膜层较多, 仅用一块监控片不可能一次完成整个膜层薄膜制备。为此, 采用极值法监控, 需选用一个合适的监控波长, 整个膜层薄膜制备都采用非规整膜层处理来完成整个制备过程。因在极值点及周围信号变化

不明显而使膜系实际制备与理论设计误差增大, 选取的监控波长, 应尽可能使停镀点远离极值点, 一般选择在两停镀点选在变化大的两相邻极值点之间, 距极值点 30% ~ 70% 的地方。这里所选监控波长是 1524nm, 将膜系也随之换算为: K9/1.0975H 1.1144L 0.754H / (1.1693L 1.1693H)¹² 1.1693L / 0.754H 1.1144L 1.0975H。图 5 是换算后理论计算的膜系第 13 层到

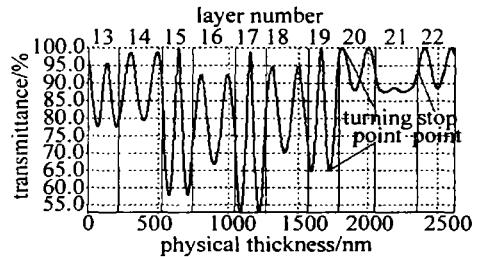


Fig 5 7 layers ~ 22 layers optical monitoring curve for thin film

第 22 层的光学监控曲线, 图中的竖直实线与曲线交叉点就是停镀点, 每层膜的停镀点都不在极值点, 都尽可能选在监控信号变化比较大, 且对膜系误差影响不大的地方。对成品率影响比较敏感的第 14、16、17、21 层的停镀点应特别选择。另外, 制备过程应严格控制离子源参数和基底加热的稳定, 以保证膜材料折射率稳定。

3 棱镜的胶合与 s 光与 p 光的平行度调试

器件要求出射的 s 光与 p 光的平行度小于 $30''$, 这就要求冷加工棱镜的角度误差小于 $2''$, 棱镜胶合必须在线监控下进行, 才可能达到出射的 s 光与 p 光的平行度小于 $30''$ 这一指标。为此, 设计了如图 6 所示的胶合装置。

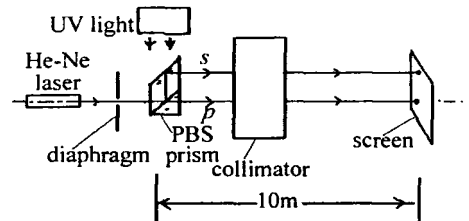


Fig 6 The principle diagram of a cemented device

一束发散角很小的激光, 通过直径 1mm ~ 2mm 的光阑, 入射棱镜后, 分成 s 光和 p 光, 再通过减小发散角的准直器, 理想情况下能在成像屏形成中心相距 3mm 两个光点。调试已涂紫外胶的直角棱镜和菱形棱镜, 使成像屏两个光点中心位置满足要求, 再打开紫外灯使胶固化, 即可完成胶合。

4 测试结果

4.1 光谱测试曲线

美国 PE 公司 Lambda 900 分光光度计测得: PBS 的 p 光透过率 T_p 曲线见图 7, 从图中可以看出: 在光谱

范围 1520nm ~ 1600nm 内透过率均大于 97%。

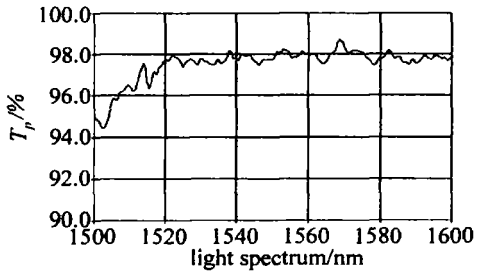


Fig 7 Transmission spectrum T_p of PBS

s 光透过率 T_s 曲线见图 8 在光谱范围 1500nm ~ 1665nm 内, 透过率均小于 0.1%。

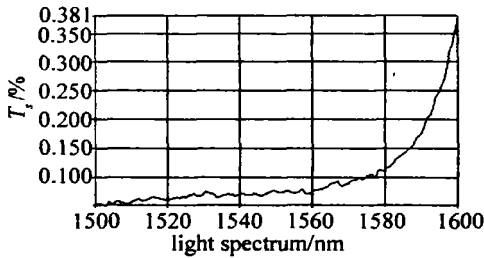


Fig 8 Transmission spectrum T_s of PBS

s 光反射率曲线见图 9 在光谱范围 1520nm ~ 1600nm 内, 反射率 R_s 均大于 97%。

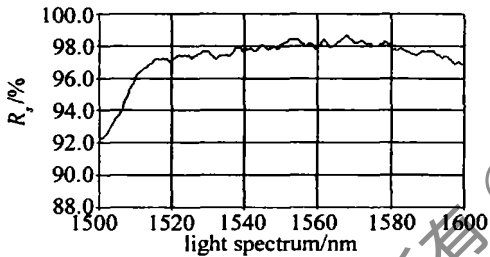


Fig 9 Reflection spectrum R_s of PBS

p 光反射率曲线见图 10 在光谱范围 1520nm ~ 1600nm 内, 反射率均小于 0.2%。

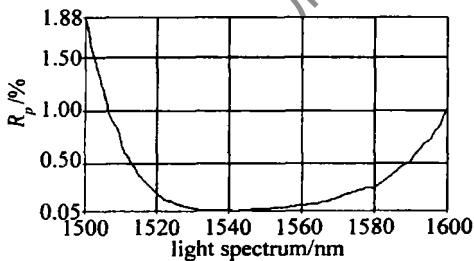


Fig 10 Reflection spectrum R_p of PBS

4 2 结果

由于在光谱范围 1525nm ~ 1565nm 内, $T_p > 97\%$, $T_s < 0.07\%$, $R_s > 97\%$, $R_p < 0.1\%$, 所以可得: $T_p / T_s > 1000$, $R_s / R_p > 400$ 。另外, 来自使用者的测试表明, 反射隔离度大于 35dB。

5 结 论

从整个制造过程看, 棱镜的光学冷加工, 特别是棱镜的角度误差控制, 是器件制造成功与否的基础; 光学薄膜的设计与制备是器件制造的关键, 也是难点, 膜系设计与膜系误差分析, 能够选择易制造的膜系, 使薄膜制备过程尽可能简单; 棱镜的胶合是器件不可忽视的环节。

参 考 文 献

- [1] LI L, DOBROWOLSKI J A. High performance thin film polarizing beam splitter operating at angles greater than the critical angle [J]. Appl Opt 2000, 39(16): 2754~2771
- [2] BAUMEISTER P. Fundamentals of the design of an immersed polarizing beam divider with a narrow spectral bandwidth and enhanced angular acceptance [J]. Appl Opt 1997, 36(16): 3610~3613
- [3] LI L, DOBROWOLSKI J A. New developments in thin film polarizing beamsplitters [A]. Optical Interference Coatings OSA Technical Digest Series [C]. Washington DC: Optical Society of America 1998: 158~160.
- [4] YAO L Y, YIK, YANG J. Design and fabrication of polarizing beam splitter for projection display system [J]. Acta Optica Sinica 2002, 22(9): 1116~1118 (in Chinese).
- [5] BAUMEISTER P. Bandpass filters for wavelength division multiplexing: modification of the spectral bandwidth [J]. Appl Opt 1998, 37(7): 6609~6614
- [6] BAUMEISTER P. Application of microwave technology to design an optical multilayer bandpass filter [J]. Appl Opt 2003, 42(13): 2407~2414
- [7] PAN J J, ZHOU F Q, ZHOU M. Thin films improve 50GHz DWDM devices [J]. Laser Focus World 2002, 38(5): 111~116
- [8] MACLEOD H A. Thin-film optical filters [M]. 3rd ed. Philadelphia: Institute of Physics Publishing Bristol 2001: 235~236.
- [9] LIN Y CH, LU W Q. Optical thin film [M]. Beijing: National Defense Industry Press 1990: 336~341 (in Chinese).
- [10] TANG J F, ZHENG Q. Applied optics thin-film [M]. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers 1984: 297~300 (in Chinese).