

# 低误差灵敏度的高性能激光偏振分光膜的 稳健设计

吴素勇 杨开勇 谭中奇

(国防科学技术大学光电科学与工程学院激光陀螺研究所, 湖南 长沙 410073)

**摘要** 基于膜系误差灵敏度主动控制的稳健设计思想,对比研究了一种新型正交偏振双频激光器中高性能偏振分光膜(PBS)不同应用方案的误差响应特性。发现了决定其膜层参数误差灵敏度的本质因素,找到了一种低误差灵敏度的高性能激光 PBS 方案,其膜系结构简单,易于低成本高成品率的批量生产,对该双频激光器的研制、工程化及应用将起到积极作用。

**关键词** 薄膜;激光偏振分光膜;稳健设计;误差灵敏度

**中图分类号** O484.4 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0231004

## Robust Design of a High-Performance Laser Thin-Film Polarizing Beam Splitter with Low Layer Errors Sensitivity

Wu Suyong Yang Kaiyong Tan Zhongqi

(Institute of Laser Gyro, College of Optoelectronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

**Abstract** According to the robust design method of multilayer optical coatings based on layer errors sensitivity control concept, the spectral characteristics responding to layer parameters errors are researched comparatively within three different application solutions of a high-performance thin-film polarizing beam splitter (PBS) in a novel orthogonal polarized dual-frequency laser. The inherent factor of film errors sensitivity of laser PBS is found by elaborately arranged numerical robust design experiments. A low layer errors sensitivity thin-film structure is robust designed for the high-performance laser PBS with moderate layer number and easy-manufacturable layer thicknesses. This PBS design solution is very suitable for mass production at low cost and high yield, which will play a positive role in the development, engineering and application of the orthogonal polarized dual-frequency laser.

**Key words** thin films; laser thin-film polarizing beam splitter; robust design; errors sensitivity

**OCIS codes** 310.5956; 310.1210; 310.6805; 310.4165; 310.6860; 310.6188

## 1 引 言

偏振分光膜(PBS)作为一种关键光学薄膜元件,在激光器、光电显示和光学存储等领域有广泛的应用。实现偏振光的光谱分离有多种方案,如双折射晶体、二向色性材料吸收、布儒斯特窗、平板和棱镜干涉 PBS 等。为了克服光学胶水在高功率激光中会发生软化的缺陷,Dobrowolski<sup>[1]</sup>于 1981 年提出了折射率匹配液体 MacNeille 棱镜干涉偏振片。

但其消光比因在匹配液中的吸收难以达到  $10^4$ , Li 等<sup>[2]</sup>于 2000 年提出了一种工作在内全反射状态下的棱镜型干涉 PBS,其性能如带宽、角宽和消光比都比传统的薄膜型 PBS 有大幅提高,其不足是膜层数过多和 s 偏振光反射率对膜厚误差非常敏感。近年来,一种新型正交偏振双频激光器要求其中的激光 PBS 消光比达到  $10^4$ ,并要求其具有低的膜层参数误差灵敏度以保证镀膜成品率<sup>[3,4]</sup>。出于结构简单

收稿日期: 2012-09-21; 收到修改稿日期: 2012-10-15

基金项目: 国家自然科学基金(61205157)资助课题。

作者简介: 吴素勇(1984—),男,博士,讲师,主要从事光学薄膜方面的研究。E-mail: sywu2001@163.com

的考虑,本课题组最初采用了平板型结构的干涉 PBS 方案,采用针法进行膜系设计,并在离子镀膜机上进行了样品试镀,镀制的 PBS 的消光比高于  $5 \times 10^4$ <sup>[5]</sup>。但是,在试镀实验中,发现样品的光学性能,特别是 p 偏振光的透射率,对镀膜中的膜层参数误差比较敏感,实际的成品率不高。这不利于该新型双频激光器的工程化和应用。

为了解决该问题,根据在整个膜系设计阶段对膜系的误差灵敏度进行最优化控制的思路,本课题组提出了一种基于膜系误差灵敏度主动控制的稳健设计方法<sup>[6]</sup>,并建立了快速算法<sup>[7]</sup>,验证了其在多种光学薄膜误差控制上的有效性<sup>[8,9]</sup>。本文根据上述稳健设计方法,针对平板型和棱镜型干涉偏振分光膜,探讨了这两种方案在膜层参数误差灵敏度控制方面的性能。

## 2 膜系稳健设计实验

在本单位研制的 Y 型腔正交偏振双频激光器中<sup>[3,4]</sup>,设计 632.8 nm 波长附近的高精度偏振分光膜,要求对 s 偏振光高反,对 p 偏振光高透,设计精度为 0.01%,实际使用精度不低于 0.1%。基片折射率为 1.457,可用材料折射率分别为 2.125(H)和 1.46(L),入射介质折射率可以为 1 或 1.457,入射角不限定。要求波长具有一定宽度(627.8~637.8 nm),且入射角也有一定宽度(左右各展宽 2°)。要求所设计的膜系对镀膜中的膜层参数误差不敏感。

在进行具体的膜系设计之前,为了便于理解,先给出偏振分光膜应用中的几种典型光路方案示意图,如图 1 所示,其中图 1(a)为典型的平板型方案,图 1(b)为平板型和棱镜型的混合方案,图 1(c)为典型的棱镜型方案。上述 3 种方案中偏振分光膜主要区别有两点:1)入射和出射介质的区别,2)基片中的传播角能否大于石英基片与空气界面的内全反射角。图 1(a)所示方案中的 PBS 从空气入射至石英基片,图 1(b)和(c)所示方案是从石英入射到石英。

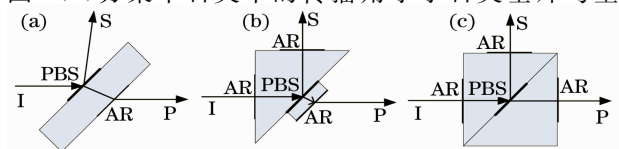


图 1 几种典型的偏振分光膜应用光路方案示意图

Fig. 1 Optical path sketches of typical application solutions of polarizing beam splitter

气界面的内全反射角,而图 1(c)方案则无此约束,通过改变棱镜的倾角可在  $0^\circ \sim 90^\circ$  间选择传播角。

事实上,根据偏振分光膜的传统设计经验,如果不考虑镀膜中的误差影响,通过选择特定的入射角,要使 S 光的剩余透射率和 P 光的剩余反射率达到精度为 0.01% 的设计指标并不是难事。通过本课题组自研的遗传算法<sup>[10]</sup>和针法<sup>[11]</sup>膜系设计软件,上述 3 种方案都能较快地找到满足设计精度的多层膜结构。问题的难点和关键是设计膜系对膜层参数误差的灵敏度好坏,换句话说亦即设计膜系的容差大小。

为了更准确地模拟偏振分光膜的实际镀膜环境,本课题组对本单位的离子镀膜机造成的膜层几何厚度误差和折射率误差进行了多次采样和反向模拟。根据镀膜工程师的经验和反向模拟的结果,本课题组认为实际镀膜中,膜层折射率相对误差和几何厚度相对误差的最大限(或三倍标准差)分别不超过 0.5% 和 2%。

同时,由于采用石英晶振监控方式控制膜层的几何厚度,可以认为折射率误差和几何厚度误差彼此互不相关,不同层的误差也相互独立,且都服从均值为零的标准正态分布<sup>[12]</sup>,可以用零期望的正态分布型随机数来模拟。在这种分布的膜层参数误差下,本课题组之前提出的基于膜系误差灵敏度主动控制的稳健设计方法的评价函数  $E(\bar{n}, \bar{d})$  具有了极简单的分析表达式,表示为

$$E(\bar{n}, \bar{d}) = |F(\bar{n}, \bar{d}) + S(\bar{n}, \bar{d})|, \\ F(\bar{n}, \bar{d}) = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L \left[ \frac{T(\bar{n}, \bar{d}, \lambda_l) - \tilde{T}(\lambda_l)}{\Delta T_l} \right]^2, \\ S(\bar{n}, \bar{d}) = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^m \left( \frac{\partial^2 F}{\partial n_j^2} \sigma_{n,j}^2 + \frac{\partial^2 F}{\partial d_j^2} \sigma_{d,j}^2 \right), \quad (1)$$

式中  $\bar{n}, \bar{d}$  为膜系的复折射率和几何厚度向量,  $l$  为选取的波点划分,  $L$  为总波点数,  $T(\bar{n}, \bar{d}, \lambda_l), \tilde{T}(\lambda_l)$  分别为波长  $\lambda_l$  处的理论和目标透射率,  $\Delta T_l$  为其设计精度,都设为 0.01%,  $S(\bar{n}, \bar{d})$  为设计膜系的误差灵敏度因子,其值越小代表膜系对膜层参数误差越不敏感,镀膜容差越大,相应的成品率越高。值得指出的是,  $\sqrt{F(\bar{n}, \bar{d})}$  的物理意义是无误差扰动时膜系的光谱系数较目标设计值的偏差,  $\sqrt{E(\bar{n}, \bar{d})}$  的物理意义是在给定误差限和分布方式下的膜层参数随机误差扰动下,膜系的光谱系数较目标设计值偏差的数学期望,其单位都是所选光谱系数的设计精度。

为了直观对比不同膜系的光谱特性对膜层参数误差的响应程度,本文采用文献<sup>[12]</sup>提出的概率估

计方法描述膜层参数误差扰动下的光谱特性曲线分布。具体地,在零均值的正态分布型膜层参数误差

下,膜系的光谱特性  $Q$  与无误差时的理论设计值偏差的数学期望  $M_{\Delta Q}$  及方差  $S_{\Delta Q}^2$  的计算表达式分别为

$$M_{\Delta Q} = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^m \left( \frac{\partial^2 Q}{\partial d_j^2} \sigma_{d,j}^2 + \frac{\partial^2 Q}{\partial n_j^2} \sigma_{n,j}^2 \right),$$

$$S_{\Delta Q}^2 = \sum_{j=1}^m \left[ \left( \frac{\partial Q}{\partial d_j} \right)^2 \sigma_{d,j}^2 + \left( \frac{\partial Q}{\partial n_j} \right)^2 \sigma_{n,j}^2 \right] + \frac{1}{4} \sum_{i,j=1}^m \left[ \left( \frac{\partial^2 Q}{\partial d_i \partial d_j} \right)^2 \sigma_{d,i}^2 \sigma_{d,j}^2 + \left( \frac{\partial^2 Q}{\partial n_i \partial n_j} \right)^2 \sigma_{n,i}^2 \sigma_{n,j}^2 + 4 \left( \frac{\partial^2 Q}{\partial d_i \partial n_j} \right)^2 \sigma_{d,i}^2 \sigma_{n,j}^2 \right]. \quad (2)$$

式中  $m$  为膜层数,  $\sigma_{d,j}$ 、 $\sigma_{n,j}$  分别为第  $j$  层膜几何厚度绝对误差和折射率绝对误差的标准差,  $Q$  为透射率或反射率等光谱特性, 式中的一阶和二阶偏导数可由相应的解析模型进行准确计算<sup>[12~14]</sup>。通过计算各个波长处的上述数学期望和方差, 并对波长作图, 就能直观地得到给定膜层参数误差扰动下膜系的期望光谱及其三倍标准差通道, 直观地考量最恶劣的光谱退化程度。在模拟的膜层参数误差准确的前提下, 根据概率统计原理, 实际膜系的光谱曲线将以 99.74% 的概率落在其三倍标准差通道内。

稳健设计实验中, 使用的优化算法是一混合遗传算法, 其主体是先用基于精英保留策略的遗传算法进行全局寻优, 找到全局极小或准极小的附近区域, 再用基于 Levenberg-Marquardt 算法的非线性最小二乘法对遗传设计膜系进行局部精细优化, 以克服遗传算法一定程度上的随机性和局部收敛慢的不足, 稳定地收敛于全局极小或准极小值。该混合遗传算法的寻优能力已通过膜系设计<sup>[6~10]</sup>、膜材料光学参数表征<sup>[15,16]</sup> 和多层膜反向工程<sup>[17]</sup> 等得到验证, 目前已经将该算法集成到自研的薄膜软件中。

### 3 结果与讨论

考虑图 1(a) 方案中的平行平板型 PBS, 激光从空气中入射到 PBS 再进入平行平板石英基片。为了使 PBS 具有高的消光比, 入射角越大, s 和 p 偏振光的等效折射率差别越大, 因此大的入射角更有利。同时, 为了使 PBS 设计结果更易于膜厚监控, 以布儒斯特角入射时的膜系结构近似  $\lambda/4$  波堆, 其中同种材料的膜厚离散度较小, 这样可以减少采样单层数目。根据两种介质界面布儒斯特角的定义  $\theta_B = \arctan(n_2/n_1)$ , 基于上述两点考虑, 最理想的入射角应该为  $\theta_{in} = \arctan(n_H/n_{air}) = 64.8^\circ$ 。由于以布儒斯特角入射的  $\lambda/4$  波堆 PBS 的角谱很窄, 中心入射角容易因膜层参数误差偏离设计入射角, 导致消光比急速下降, 因此设计中需要进行多入射角设计。同

时考虑到 PBS 在激光器中固定入射角(可微调)的应用环境, 设计角度左右展宽  $2^\circ$  已经足够了。具体地, 图 1(a) 方案中稳健设计评价函数的波点划分为在 627.8~637.8 nm 均匀取 11 个波点,  $62.8^\circ \sim 66.8^\circ$  均匀取 5 个角度。经过设计, 得到了一个 34 层的偏振分光膜, 膜系结构数据列于表 1 中, 相应的理论光谱和误差扰动下的期望光谱及三倍标准差通道如图 2 和图 3 所示。可以看出, 在 627.8~637.8 nm 的波长范围和  $62.8^\circ \sim 66.8^\circ$  的入射角范围内, 理论计算的 s 偏振光的透射率控制在 0.06% 以内, p 偏振光的反射率控制在 0.02% 以内, 性能足够好。但是, 在给定的相对误差限分别为 2% 的几何厚度和 0.5% 的折射率正态分布型随机误差扰动下, s 偏振光的透射率受到的影响较小, 有了约 0.01% 的上升, 但都能保证 0.1% 的实际精度要求, 而 p 偏振光的反射率受到的影响很大, 期望反射谱上升到 0.2%, 最恶劣反射谱上升至 0.7%, 已不能满足 0.1% 的实际精度要求。这解释了试镀实验中样品成品率不高的现象。

最开始本课题组怀疑图 1(a) 方案 PBS 对误差特别敏感的原因是由于灵敏度控制算法在设计中没

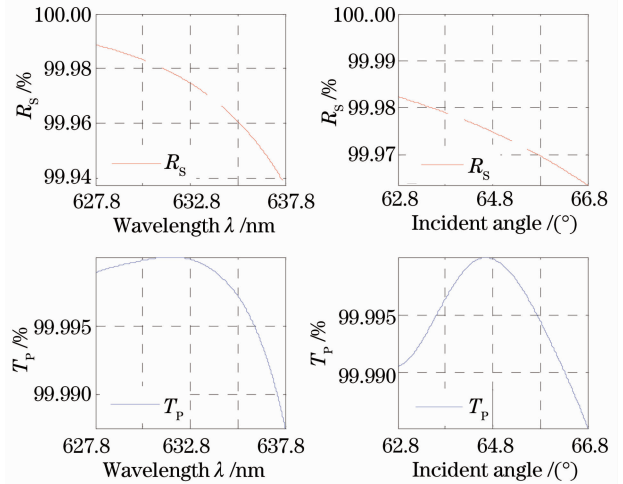


图 2 方案(a)偏振分光膜的理论波长谱和角谱  
Fig. 2 Theoretical wavelength spectra and angular spectra of the PBS in solution (a)

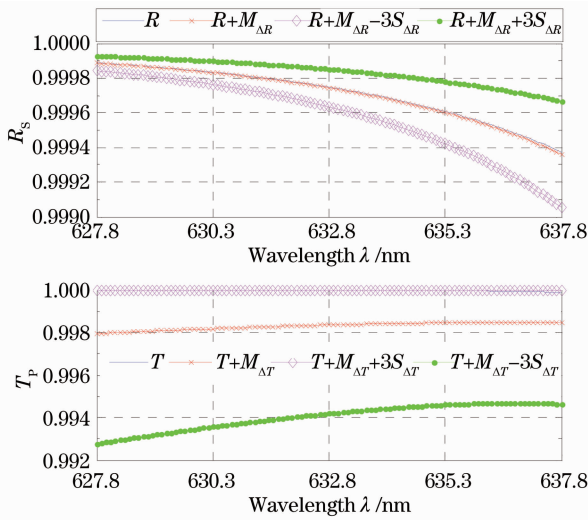


图 3 方案(a)偏振分光膜在  $64.8^\circ$  入射时 s 和 p 偏振光的理论光谱及在 2% 的几何厚度和 0.5% 折射率相对误差限下的期望光谱及 3 倍标准差通道

Fig. 3 Theoretical spectral characteristic, its mathematical expectation and triple standard deviation corridor of s- and p-polarization light of the PBS in solution (a) at incident angle of  $64.8^\circ$  with the given 2% layer thicknesses and 0.5% refractive indices relative errors limit

有发挥作用,但经过反复地设计,在相近的层数附近没有发现更不敏感的膜系结构,考虑到灵敏度控制思想在其他膜系如斜入射增透膜、半透半反分光膜和线性斜坡透射滤光片等的稳健设计中的成功应用<sup>[6~9]</sup>,排除了该可能性。于是又开始考虑偏振分光膜的结构设计方面的原因,从而出现了图 1(b)和图 1(c)的应用结构,两方案相比方案(a)多了一些单点增透膜。由于单偏振光斜入射单点增透膜和正入射单点增透膜一样,本课题组的镀膜水平能保证 0.01% 以内的剩余反射率水平,因此下面的讨论中不再考虑其影响。起初猜想是入射介质与出射介质界面的折射率突变导致了 PBS 的高误差灵敏度特性,因此本实验对方案(b)与方案(a)进行了对比。本质上方案(b)比方案(a)只多了一个棱镜,因此以方案(a)中石英基片中的传播角  $38.4^\circ$  作为方案(b)中棱镜内入射到 PBS 的入射角。由于方案(a)中  $62.8^\circ \sim 66.8^\circ$  的入射角范围对应的石英基片中的传播角范围为  $37.6^\circ \sim 39.1^\circ$ ,因此方案(b)中确定的入射角范围为  $37.4^\circ \sim 39.4^\circ$ 。这样方案(b)与方案(a)除了入射与出射介质上的区别,其他应用情况都一样。如果方案(b)稳健设计所得膜系对误差 insensitive,那么就可以证明本文猜想的正确性,反之则说明

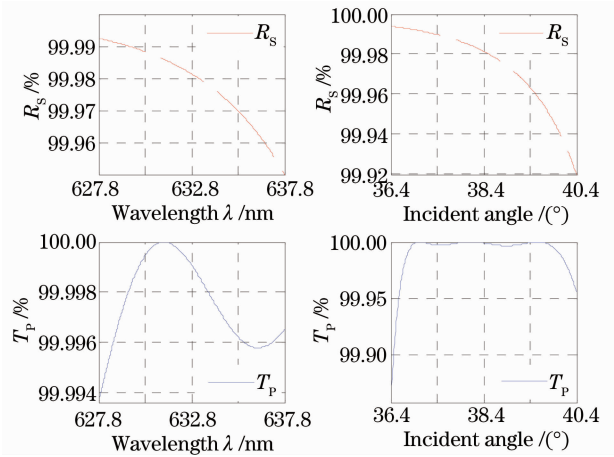


图 4 方案(b)偏振分光膜的理论波长谱和角谱  
Fig. 4 Theoretical wavelength spectra and angular spectra of the PBS in solution (b)

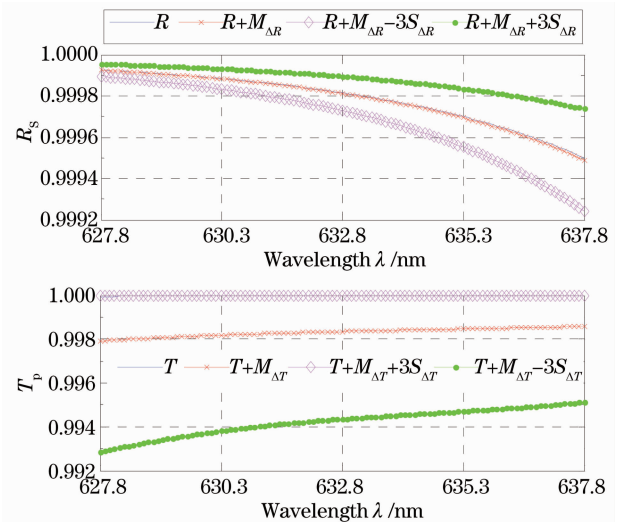


图 5 图 1(b)方案偏振分光膜在  $38.4^\circ$  入射时 s 和 p 偏振光的理论光谱及在 2% 的几何厚度和 0.5% 折射率相对误差限下的期望光谱及 3 倍标准差通道

Fig. 5 Theoretical spectral characteristic, its mathematical expectation and triple standard deviation corridor of s- and p-polarization light of the PBS in solution (b) at incident angle of  $38.4^\circ$  angle of incidence with the given 2% layer thicknesses and 0.5% refractive indices relative errors limit

猜想错误。具体地,方案(b)中稳健设计评价函数在  $627.8 \sim 637.8$  nm 内均匀取 11 个波点,在  $37.4^\circ \sim 39.4^\circ$  内均匀取 3 个角度。经过设计,得到了一个 35 层的偏振分光膜,膜系结构数据列于表 1 中,相应的理论光谱和误差扰动下的期望光谱及三倍标准差通道如图 4 和图 5 所示。可以发现,方案(b)中的 PBS 的模型结构具有很好的对称性,这是由于入射与出射介质一样造成的。比较图 4 与图 2 以及图 5 与



图 3,发现方案(b)中的 PBS 的误差灵敏度特性与方案(a)相当,仍没能得到明显改善。值得一提的是,表 1 中方案(b)的设计性能参数比方案(a)中的

对应参数好的主要原因是 s 偏振的性能有所提高,p 偏振基本相当。而实际应用中往往是 p 偏振光由于损耗过大无法工作,因此方案(b)不是理想方案。

表 1 方案(a)~(c)中偏振分光膜的膜系结构和性能参数

Table 1 Structure and property parameters of PBS for solutions (a)~(c)

$d / \text{nm}$	Solution (a)				Solution (b)				Solution (c)	
	$\theta_{\text{in}} = 64.8 \pm 2^\circ$				$\theta_{\text{in}} = 38.4 \pm 1^\circ$				$\theta_{\text{in}} = 60 \pm 2^\circ$	
	Layer	—	Layer	—	Layer	—	Layer	—	Layer	
Substrate	—									
H	1	66.8160	19	49.6744	1	67.7517	19	73.1249	1	64.6432
L	2	103.2839	20	155.0155	2	97.0284	20	123.4817	2	137.9934
H	3	64.5666	21	50.4159	3	62.4851	21	71.9298	3	69.0891
L	4	99.6334	22	150.6808	4	103.2649	22	117.8767	4	176.2171
H	5	85.8227	23	57.1910	5	73.7523	23	71.6783	5	85.9978
L	6	82.7035	24	139.4242	6	112.4925	24	114.2186	6	179.7293
H	7	101.7070	25	72.5487	7	78.3648	25	74.2645	7	85.2075
L	8	64.3386	26	116.9105	8	115.5926	26	114.8111	8	161.8825
H	9	105.4844	27	93.6363	9	77.7001	27	77.7153	9	79.7809
L	10	73.6349	28	73.1037	10	114.8394	28	115.6068	10	161.8773
H	11	96.2432	29	114.8187	11	74.2576	29	78.4038	11	85.2077
L	12	107.0640	30	17.2145	12	114.2751	30	112.4970	12	179.7332
H	13	78.8909	31	113.7845	13	71.6578	31	73.6775	13	85.9975
L	14	131.4336	32	59.0310	14	117.9129	32	103.2871	14	176.2156
H	15	63.1361	33	98.9601	15	71.9089	33	62.5177	15	69.0896
L	16	145.9714	34	61.5352	16	123.4960	34	97.0458	16	137.9911
H	17	53.2865			17	73.0857	35	67.7107	17	64.6445
L	18	153.4959			18	125.9972				
Air	—									
$\sqrt{F}$	2.7233				2.5588				0.9887	
S	28.2711				9.5040				0.6258	
$\sqrt{E}$	5.9739				4.0064				1.2663	

正是方案(a)和(b)在 PBS 误差灵敏度改善上的失效,让本课题组重新思考其高误差灵敏度的本质原因。正如前面提及,平行前后表面的基片结构使得方案(a)和(b)中石英基片中的传播角必须小于石英与空气界面的内全反射角 $[(\theta_c = \arcsin(n_{\text{air}}/n_s) = 43.34^\circ)]$ 。偿试改变基片的平行前后表面结构,如采用方案(c),进而改善 PBS 的误差灵敏度呢。起初以  $45^\circ$  入射进行了稳健性实验,发现 PBS 的误差灵敏度有了较显著的改善。于是,在实验中继续增大石英中的入射角,观察 PBS 的误差灵敏度是否会更低,膜系结构和层数能否更简单。这一实验有助于最终确定实际加工中棱镜的倾角大小,并且选择最简单(层数少)且对镀膜误差最不敏感的膜系来实现低成本高成品率的偏振分光膜的生产。经过实验研究,发现并不是入射角越大越好,PBS 的误差灵敏度特性存在一个最佳的入射角范围,在该范围内其

膜系结构也较简单。限于篇幅,直接给出最终确定的最佳入射角为  $60^\circ$ ,其膜系结构列于表 1,对应的理论光谱和和误差扰动下的期望光谱及三倍标准差通道如图 6 和图 7 所示。可以发现,方案(c)稳健设计所得膜系的层数减少至 17 层,膜系结构也具有很好的对称性,膜层厚度中不存在极薄极厚层,便于镀制。同时,方案(c)的理论光谱较方案(a)、(b)相当或略好,其误差扰动谱质量则比方案(a)、(b)有了显著改善。在  $627.8 \sim 637.8 \text{ nm}$  的波长范围和  $58^\circ \sim 62^\circ$  的入射角范围内,在给定的相对误差限分别为 2% 的几何厚度和 0.5% 的折射率正态分布型随机误差扰动下,s 偏振光的期望透射谱为 0.015%,最恶劣透射谱能保证在 0.02% 以内,而 p 偏振光的期望反射谱为 0.02%,最恶劣反射谱在 0.08% 以内,能满足 0.1% 的实际精度要求。

至此,本课题组找到了高性能激光偏振分光膜

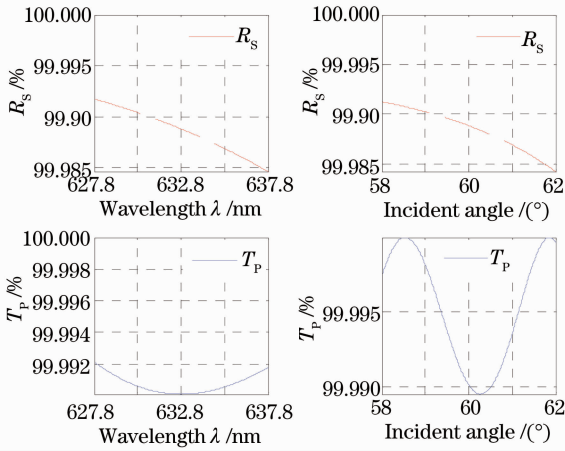


图 6 方案(c)偏振分光膜的理论波长谱和角谱  
Fig. 6 Theoretical wavelength spectra and angular spectra of the PBS in solution (c)

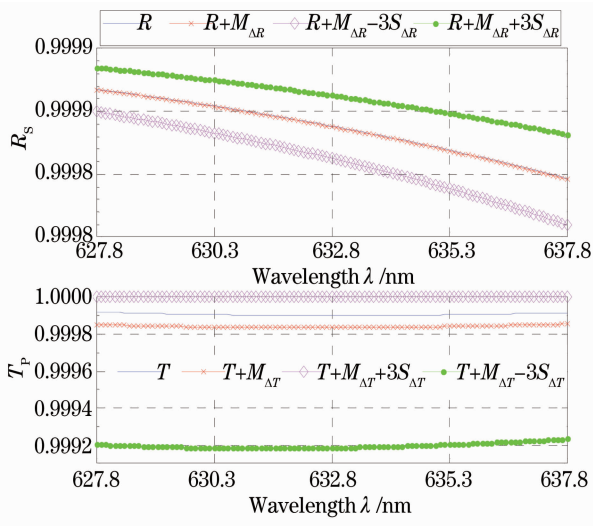


图 7 方案(c)偏振分光膜在 60°入射时 s 和 p 偏振光的理论光谱及在 2%的几何厚度和 0.5%折射率相对误差限下的期望光谱及 3 倍标准差通道  
Fig. 7 Theoretical spectral characteristic, its mathematical expectation and triple standard deviation corridor of s- and p-polarization light of the PBS in solution (c) at incident angle of 60° angle of incidence with the given 2% layer thicknesses and 0.5% refractive indices relative errors limit

的一种低误差灵敏度的结构方案,该膜系膜层数和膜厚离散度都较小,易于实际镀制。通过稳健设计实验研究,发现了偏振分光膜的误差灵敏度的本质决定因素为基片中的传播角大小。为了实现低误差灵敏度,必须使其大于基片与入射介质的内全反射角,否则,激光偏振分光膜的误差灵敏度只能得到有限的控制,而不可能对膜层参数误差变得真正的不敏感。

## 4 结 论

针对一种新型正交偏振双频激光器及应用中高性能偏振分光膜研制过程中遇到的低成品率现象,基于膜系误差灵敏度主动控制的稳健设计思想,理论上对比研究了该激光偏振分光膜不同应用方案的误差响应特性。通过稳健设计实验研究,发现了激光偏振分光膜的误差灵敏度的本质决定因素为基片中的传播角大小。为了实现低误差灵敏度,必须使基片中的传播角大于基片与入射介质的内全反射角。在满足该物理要求的前提下,通过对不同入射角的反复稳健设计确定了偏振分光膜基片中的最佳传播角,最终找到了一种低膜层参数误差灵敏度的高性能激光偏振分光膜方案,其膜系结构简单,易于低成本高成品率的批量生产,对该双频激光器的研制、工程化及应用将起到积极作用。

## 参 考 文 献

- 1 J. A. Dobrowolski, A. Waldorf. High-performance thin film polarizer for the UV and visible spectral regions [J]. *Appl. Opt.*, 1981, **20**(1): 111~116
- 2 Li Ji, J. A. Dobrowolski. High-performance thin-film polarizing beam splitter operating at angles greater than the critical angle [J]. *Appl. Opt.*, 2000, **39**(16): 2754~2771
- 3 Long Xingwu, Xiao Guangzong, Zhang Bin. A novel high-precision laser accelerometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(11): 3227~3232  
龙兴武,肖光宗,张斌.一种新型的高精度激光加速度计[J]. *光学学报*, 2010, **30**(11): 3227~3232
- 4 Xiao Guangzong, Long Xingwu, Zhang Bin *et al.*. Mode competition and laser power tuning property of orthogonal polarized laser with Y-shaped cavity [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(3): 0302016  
肖光宗,龙兴武,张斌等. Y型腔正交偏振激光器的模竞争和光强调谐特性[J]. *中国激光*, 2011, **38**(3): 0302016
- 5 Kaiyong Yang, Xingwu Long, Yun Huang *et al.*. Design and fabrication of ultra-high precision thin-film polarizing beam splitter [J]. *Opt. Commun.*, 2011, **284**(19): 4650~4653
- 6 Huang Yun, Wu Suyong, Yang Kaiyong. Active design of multilayer optical coatings based on sensitivity control [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(4): 0431002  
黄云,吴素勇,杨开勇.基于灵敏度控制的光学薄膜膜系主动设计方法[J]. *光学学报*, 2011, **31**(4): 0431002
- 7 Wu Suyong, Long Xingwu, Huang Yun *et al.*. Fast realization algorithms of sensitivity control concept in the active design of multilayer optical coatings [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, **23**(6): 1471~1478  
吴素武,龙兴武,黄云等.灵敏度控制思想车主动膜系设计中的快速实现算法[J]. *强激光与粒子束*, 2011, **23**(6): 1471~1478
- 8 Wu Suyong, Long Xingwu, Yang Kaiyong. Novel robust design method of multilayer optical coating [J]. *ISRN Optics*, 2012, **2012**: 659642
- 9 Wu Suyong, Long Xingwu, Yang Kaiyong. Application of thin film errors sensitivity control concept in robust design of multilayer optical coatings [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2012, **24**(10): 2391~2399  
吴素勇,龙兴武,杨开勇.光学薄膜稳健设计中膜系误差灵敏度

- 控制 [J]. 强激光与粒子束, 2012, **24**(10): 2391~2399
- 10 Wu Suyong. Application of Genetic Algorithm in the Design of Optical Coatings [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2007  
吴素勇. 遗传算法在膜系设计中的应用[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2007
- 11 Yang Kaiyong. Research of Automatic Optical Coating Software [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2003  
杨开勇. 全自动光学薄膜软件的研制[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2003
- 12 Sh. Furman, A. V. Tikhonravov. Basics of Optics of Multilayer Systems [M]. France: Editions Frontieres, 1992. 58~68
- 13 Wu Suyong, Long Xingwu, Huang Yun *et al.*. Calculation model for spectral coefficient's first and second order partial derivatives of multilayer optical coatings with respect to layer parameters [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, **22**(1): 83~90  
吴素勇, 龙兴武, 黄云等. 膜系光谱系数对膜层参数的一阶和二阶偏导数的计算模型[J]. 强激光与粒子束, 2010, **22**(1): 83~90
- 14 Wu Suyong, Long Xingwu, Yang Kaiyong. Accurate calculation and Matlab based fast realization of merit function's Hesse matrix for the design of multilayer optical coating [J]. *Optoelectronics Letters*, 2009, **5**(5): 359~363
- 15 Wu Suyong, Long Xingwu, Yang Kaiyong *et al.*. A novel determination method of thin film optical parameters with least dependence on photometric measurement systematic errors [J]. *Optics and Laser Technology*, 2012, **44**(4): 771~775
- 16 Wu Suyong, Long Xingwu, Yang Kaiyong. Technique to minimize the characterization deviations of optical parameters of thin films caused by ellipsometric measurement systematic errors [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(6): 0631001  
吴素勇, 龙兴武, 杨开勇. 一种最小化薄膜光学参数表征偏差的椭圆测量系统误差处理技术[J]. 光学学报, 2012, **32**(6): 0631001
- 17 Wu Suyong, Long Xingwu, Yang Kaiyong *et al.*. Performance analysis of local optimization algorithm in reverse engineering of multilayer optical coatings [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(6): 0631001  
吴素勇, 龙兴武, 杨开勇等. 光学多层薄膜反向工程中局部优化算法的性能分析[J]. 光学学报, 2011, **31**(6): 0631001

栏目编辑: 韩峰