

文章编号: 1001—4322(2000)01—061—04

# 光学平板偏振分光镜对称膜系的优化设计\*

孔明东, 李瑞洁

(成都精密光学工程研究中心, 610041)

**摘 要:** 提出一种用于优化设计对称膜系光学偏振膜的新算法。所设计膜系能保证在较宽的工作带宽内有高的消光比(> 1000); 而且膜系结构简单, 设计灵活, 镀制该偏振膜容易实现。

**关键词:** 平板偏振分光镜; 优化设计

**中图分类号:** TN 247 **文献标识码:** A

光学平板偏振分光镜依靠偏振膜将入射光束中的 S 光和 P 光分开, 在强激光系统中应用的平板偏振分光镜, 为保证偏振膜有高的损伤阈值, 一般选用高折射率材料(HfO<sub>2</sub>, ZrO<sub>2</sub>, Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 等)和低折射率材料(SiO<sub>2</sub>)交替沉积来实现<sup>[1, 2]</sup>。对这种偏振膜的设计, 由于材料选择有限和实际镀膜过程中的监控误差, 以及膜层暴露于空气中折射率变化可能导致的波长漂移, 应使偏振膜具有一定的工作带宽, 因此必须消除透射 P 光在工作波段中的通带波纹。同时, P 光场强分布贯穿在整个膜层, 可能导致 P 光的大量损耗, 降低 P 光的透射率。为保证高的消光比, 必须使所设计膜系的 P 光通带尽量靠近 S 光反射带中间部分。以前优化设计<sup>[3]</sup>的膜系, 能达到宽带高消光比, 但实际工艺难以实现。加匹配层或自动平衡法<sup>[4]</sup>设计的膜系, P 光透射带位于 S 光反射带边缘, 难以达到很高的消光比(> 1000)。

对于强激光系统应用的偏振膜, 薄膜的损伤取决于 P 光在薄膜中电场强度分布的最大值。设计高阈值、高消光比的平板偏振膜, 还必须考虑电场强度在薄膜中的分布情况。因此, 要求设计偏振膜的方法必须十分灵活, 才能设计出同时兼顾电场分布情况和光学性能的高阈值、高消光比的平板偏振膜。基于滤光片和失谐滤光片<sup>[5, 6]</sup>所设计的膜系, 属于解析设计, 没有选择合适电场强度分布的余地。我们基于对称膜系, 建立了光学评价函数, 自动搜索优化其中几层膜的光学厚度, 以消除 P 光通带波纹, 来保证一定的工作带宽内有高消光比(> 1000)。该算法简便, 设计灵活, 能得到各种电场强度分布的膜系, 而且所设计膜系容易实现。

## 1 理论分析

单层光学薄膜的特征矩阵

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

其中  $\delta_j = 2\pi\lambda^{-1}n_j d_j \cos \theta_j$ ;  $\eta_j = n_j \cos \theta_j$  (S 光),  $\eta_j = n_j / \cos \theta_j$  (P 光),  $n_j$  是第  $j$  层膜折射率;  $\theta_j$  是第  $j$  层膜内折射角;  $d_j$  是第  $j$  层膜物理厚度;  $\lambda$  是波长。因为 L 层对称膜系的特征矩阵和单层膜的特征矩阵具有相同的性质, 在数学上可以等效为单层膜<sup>[6]</sup>

$$M = \prod_{j=1}^l M_j = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \Gamma & i n_e^{-1} \sin \Gamma \\ i n_e \sin \Gamma & \cos \Gamma \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中  $n_e$  为等效折射率;  $\Gamma$  为等效位相厚度。从(2)式可得

$$\Gamma = \arccos m_{11} \quad (3)$$

$$n_e = + \sqrt{m_{21}/m_{12}} \quad (4)$$

\* 国家 863 惯性约束聚变领域资助课题

1999 年 3 月 19 日收到原稿, 1999 年 9 月 24 日收到修改稿。

孔明东, 男, 1973 年 11 月出生, 大学, 助工

由(3)、(4)式及薄膜特征矩阵知识可知,当  $|m_{11}| > 1$  时,  $n_e$  和  $\Gamma$  均为虚数,等效折射率概念不存在,这些波数对应于对称膜系的反射带;当  $|m_{11}| < 1$  时,对应于透射带,只要求出  $n_e$  和  $\Gamma$  就可得到它的全部光学特性。由(2)式L层对称膜系的反射率为

$$R = |r|^2 = \left| \frac{(m_{11} + m_{12}\eta)\eta_0 - (m_{21} + m_{22}\eta)}{(m_{11} + m_{12}\eta)\eta_0 + m_{21} + m_{22}\eta} \right|^2 \tag{5}$$

对于  $n_e$  和  $\Gamma$  为实数的波数,反射率可以简化为

$$R = \frac{(\eta_0 - \eta)^2 \cos^2 \Gamma + (\eta_0 \eta / n_e - n_e)^2 \sin^2 \Gamma}{(\eta_0 + \eta)^2 \cos^2 \Gamma + (\eta_0 \eta / n_e + n_e)^2 \sin^2 \Gamma} \tag{6}$$

其中,  $\eta_0$ 、 $\eta$  分别为入射介质和基底的修正导纳。

## 2 优化算法及实例

根据偏振分光膜的要求,建立评价函数

$$F = K_S \cdot \int_{\lambda} [R_S(\lambda) - R_{S0}(\lambda)] + K_P \cdot \int_{\lambda} [R_P(\lambda) - R_{P0}(\lambda)] \tag{7}$$

其中,  $K_S$ 、 $K_P$  为权重因子;  $R_S(\lambda)$  为 S 光的反射率;  $R_{S0}(\lambda)$  为 S 光的反射率目标函数;  $R_P(\lambda)$  为 P 光的反射率;  $R_{P0}(\lambda)$  为 P 光的反射率目标函数。评价函数  $F$  表示待优化膜系中 S 光和 P 光的实际反射率与目标函数在要求的工作波段范围内的偏差分别乘权重因子。评价函数最小值对应的膜系即是所求结果。

选择一初始对称膜系,选定需优化的对称膜层,规定膜层厚度的一个变化范围,在膜层厚度变化范围内,再选择一个控制波长范围,决定其它膜层的厚度。对要求的工作波段范围,计算评价函数,求出评价函数的最小值,该最小值对应的优化层厚度和控制波长就能得到,该算法用计算机很容易实现。然后根据求出的优化膜系,计算实际的光谱曲线,若不符合要求,则可稍微更改初始结构和权重因子,直到达到设计要求。

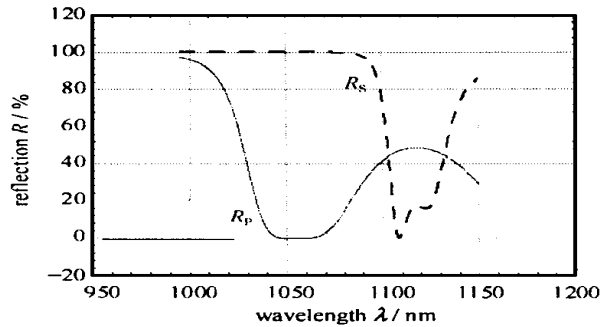


Fig 1 Reflection curve of film  $G/(HL)^7H1.96LH(LH)^7/A$   
图 1 膜系  $G/(HL)^7H1.96LH(LH)^7/A$  反射率曲线

实例中我们选择初始膜系  $G/(HL)^{15}H/A$ , 镀膜材料选用  $Ta_2O_5$  和  $SiO_2$ , 用莱宝镀膜机 (APS 1504)

镀膜,膜系参数为:  $n_H = 2.1$ ,  $m_L = 1.45$ ,  $n_G = 1.52$ ,  $n_A = 1$ , 入射角度为  $56.7^\circ$ 。要求在  $1045\text{nm} \sim 1065\text{nm}$  范围内,目标函数  $R_{S0} = 1, R_{P0} = 0$ 。若优化最中间层,可得到优化膜系

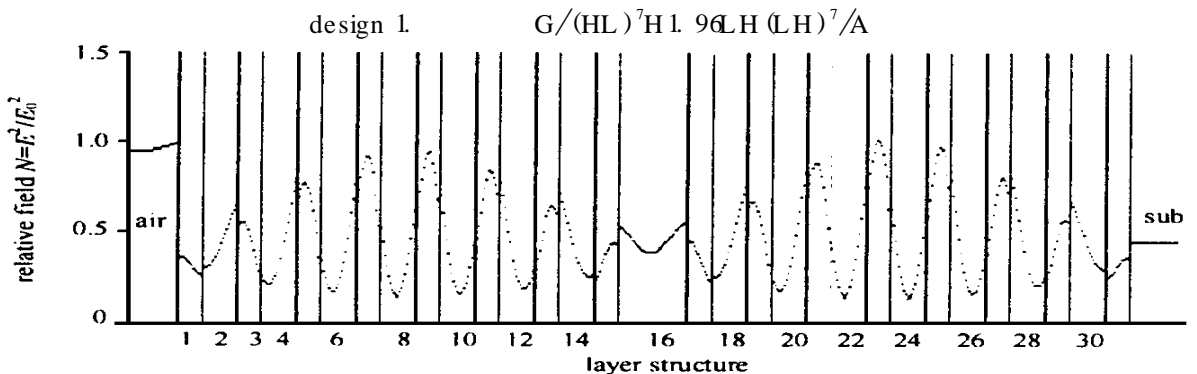


Fig 2 Electric-field relative distribution of P polarization at 1054nm of film  $G/(HL)^7H1.96LH(LH)^7/A$   
图 2 膜系  $G/(HL)^7H1.96LH(LH)^7/A$  中 P 光在 1054nm 处电场强度平方相对值分布曲线

控制波长为  $1040\text{nm}$ , 其光谱曲线如图 1。从 P 光电场强度平方相对值  $N$  ( $N = E^2/E_0^2$ ) 在薄膜中的分布曲线(图 2), 可以看到其损耗较大, 最大电场强度平方相对值  $N = 1.01$ 。我们再选择初始膜系  $G/$

(HL)<sup>7</sup>H1.5L(HL)<sup>7</sup>H/A 优化第 10、22 层, 则得到膜系

design 2  $G/(HL)^4H1.42L(HL)^2H1.5L(HL)^2H1.42L(HL)^4H/A$

控制波长为 1015nm, 其光谱曲线如图 3, 从 P 光电场强度平方相对值 N 在薄膜中的分布曲线(图 4) 可以看到其损耗比 design 1 小, 最大电场强度平方相对值 N = 0.79, 比 design1. 减少了 22%。从光谱曲线数据可以得到优化设计结果 (R<sub>S</sub> > 99.93%, R<sub>P</sub> < 0.45%) 十分接近目标函数; 而且优化膜系结构比较简单, 在 APS1504 镀膜机上镀膜很容易实现。

从光谱曲线和电场强度平方相对值分布曲线可以看出: 本文算法可以灵活设计出满足一定条件电场强度平方相对值分布情况的宽带高消光比的光学平板偏振膜

再由 (3)、(4) 和 (6) 式, 可求出优化后对称膜系部分波长处的等效折射率和等效位相厚度的余弦值

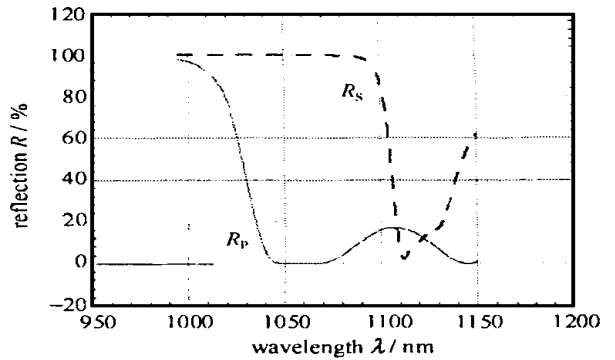


Fig 3 Reflection curve of film

$G/(HL)^4H1.42L(HL)^2H1.5L(HL)^2H1.42L(HL)^4H/A$

图 3 膜系 G/(HL)<sup>4</sup>H1.42L(HL)<sup>2</sup>H1.5L(HL)<sup>2</sup>H1.42L(HL)<sup>4</sup>H/A 反射率曲线

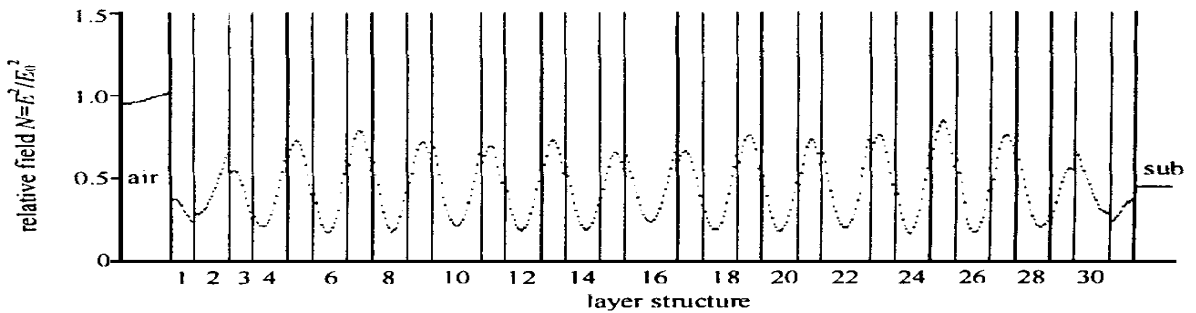


Fig 4 Electric-field relative distribution of P polarization at 1054nm of film

$G/(HL)^4H1.42L(HL)^2H1.5L(HL)^2H1.42L(HL)^4H/A$

图 4 膜系 G/(HL)<sup>4</sup>H1.42L(HL)<sup>2</sup>H1.5L(HL)<sup>2</sup>H1.42L(HL)<sup>4</sup>H/A P 光在 1054nm 处电场强度平方相对值分布曲线

以及相应的反射率见表 1 和表 2, 从表中也可看出在工作波段 1045nm ~ 1065nm 内, P 光通带波纹已被消除 (R<sub>P</sub> < 0.45%)。

表 1 膜系 G/(HL)<sup>7</sup>H1.96LH(LH)<sup>7</sup>/A 部分波长处的参数值

Table 1 The parameters of film G/(HL)<sup>7</sup>H1.96LH(LH)<sup>7</sup>/A

$\lambda/nm$	1045	1050	1055	1060	1065
$n_e$	1.6656	1.8669	2.1005	1.9604	2.2607
$\cos \Gamma$	0.6805	0.8793	0.9817	0.9954	0.9803
$R_P/\%$	0.425	0.014	0.075	0.005	0.185

表 2 膜系 G/(HL)<sup>4</sup>H1.42L(HL)<sup>2</sup>H1.5L(HL)<sup>2</sup>H1.42L(HL)<sup>4</sup>H/A 部分波长处的参数值

Table 2 The parameters of film G/(HL)<sup>4</sup>H1.42L(HL)<sup>2</sup>H1.5L(HL)<sup>2</sup>H1.42L(HL)<sup>4</sup>H/A

$\lambda/nm$	1045	1050	1055	1060	1065
$n_e$	1.6966	5.4384	1.6263	1.8242	1.9586
$\cos \Gamma$	0.9435	0.9998	0.9680	0.8630	0.7008
$R_P/\%$	0.053	0.0703	0.081	0.001	0.271

### 3 结 论

利用本文算法进行优化设计, 可任意选择优化膜层, 如果优化结果未达到设计要求, 可以增加优化层数, 或者恰当修改初始膜系, 来达到设计要求。对于强激光系统中应用的光学偏振膜, 利用本文优化算法和膜层内电场分布的计算相结合, 选择电场分布最优的膜系, 对于得到高阈值的偏振膜将有很大帮助。

### 参考文献

- 1 Fournet C. High damage threshold mirrors and polarizers in the  $ZrO_2/SiO_2$ . *SPIE*, 1991, **1624**: 282
- 2 Pongratz S. Plasma ion- assisted evaporative deposition of surface layers. *Annu Rev Mater Sci*, 1992, **22**: 37
- 3 Schallenberg Uwe B. Thin- film plate polarizer with Fabry- Perot filter design. *SPIE*, 1996, **2776**: 336
- 4 范正修, 范瑞瑛, 陆月妹.  $1.06\mu m$  宽带偏振片的研制. *红外研究*, 1982, **1**(2): 121
- 5 Gu Peifu and Tang Jingfa. Design and preparation of polarizers used in high power laser systems. *SPIE*, 1989, **1158**: 351
- 6 唐晋发, 邓 权. 应用薄膜光学. 上海: 科技出版社, 1984. 318~ 321

## OPTM IZATION DESIGN OF THIN-FILM PLATE POLARIZER W ITH SYMMETRICAL MULTILAYER

KONG M ing-dong, L I R u i - j i e

*Chengdu Fine Optical Engineering Research Central, Chengdu, 610041*

**ABSTRACT:** A new algorithm is presented for the design of thin-film plate polarizer with symmetrical multilayer in this paper. The film designed with this algorithm has broad-band and high polarization ratio. The design is flexible and the film can be prepared easily.

**KEY WORDS:** thin-film plate polarizer; optimization design