

文章编号: 1005-0086(2000)01-0062-03

高反射率光学薄膜的一种新设计方法^{*}

孔明东, 李瑞洁, 周九林¹, 黄 琼²

(成都精密光学工程研究中心, 成都 610041)

¹(西南技术物理研究所, 成都 610041)

²(四川大学光电科学技术系, 成都 610064)

摘要: 设计极高反射率光学薄膜必须考虑薄膜内电场强度分布对光损耗的影响。本文提出一种新设计方法用于既改善膜层内电场分布以减少薄膜的光损耗, 同时又兼顾薄膜的反射率要求。该方法用薄膜的特征矩阵直接计算场强和反射率, 建立综合评价函数来兼顾场强分布和光学反射率的要求, 利用计算机进行优化设计。而且该方法能灵活有效地按任意场强和反射率要求优化设计各种膜系。

关键词: 电场分布; 光损耗; 高反射率薄膜

中图分类号: O 484. 4⁺ 1 **文献标识码:** A

An New Method to Design High Reflectivity Film

KONG Ming-dong, LI Rui-jie, ZHOU Jiu-lin¹, HUANG Qiong²

(Chengdu Fine Optical Engineering Research Central, Chengdu, 610041)

¹(South-west Technical Physics Institute, Chengdu 610041)

²(Department of Optoelectronics, Sichuan University, Chengdu 610064)

Abstract In this paper a new method which improves not only electrical field distribution in film layers to decrease losses but also ensures good optical reflectivity was presented. This method applied character matrix of optical film to calculate electric field distribution and reflectivity. An assessment function is constructed for considering to both electrical field distribution and reflectivity. The method can be used in optimization design for any electric field distribution or reflectivity.

Key words: electric field distribution; optical losses; high reflectivity film

1 引言

激光反射镜对全介质高反膜的反射率要求越来越高($> 99.9\%$)^[1~3], 然而薄膜中不可避免地存在吸收和散射损耗, 从而限制了反射膜的极限反射率。要使反射率进一步提高, 只能靠减少膜层中的光学损耗来实现。由于吸收和散射损耗是电场强度的函数, 改善场强分布来减少膜层中的光学损耗是十分有效的途径^[2]。

光学薄膜的吸收和散射主要由膜层性质和场强分布决定, 根据膜层性质使光学损耗较大的膜层中场强分布减少, 就能相应减少损耗^[4]。以前改善高反膜层内电场强度分布的计算方法^[4~7]是确定加在普通

$\lambda/4$ 堆外面的附加堆厚度, 首先假定两个条件: 1) 反射率为最大; 2) 两种材料的第1个分界面上的电场强度等于下一个相似界面上的电场强度, 然后推导出两相邻界面的场强比公式(该公式中有原膜堆振幅反射系数, 并假设入射介质折射率与附加膜层有相同折射率)。由假定条件2得一等式解出低折射率材料膜厚, 再由假定条件1和上面的解, 应用圆图理论和平面几何解出高折射率材料膜厚。由此可见, 这种方法只能用于高反膜系的设计, 而且其推导和解的过程比较复杂, 不能灵活按照设计者要求设计任意电场分布膜系。本文则从薄膜的特征矩阵直接计算场强和反射率, 建立综合评价函数, 兼顾场强分布和光学反射率的要求, 利用计算机进行优化设计。该方法还能按任

^{*} 收稿日期: 1999-06-05 修订日期: 1999-09-15

意场强和反射率要求优化设计各种膜系。

2 理论分析

光学薄膜的特征矩阵为

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

其中, $\delta_j = 2\pi n_j d_j \cos \theta_j$, 是相位厚度; $\eta_j = n_j \cos \theta_j$ (TE), 是修正导纳; $\eta_j = n_j / \cos \theta_j$ (TM), θ_j 是折射角, j 表示第 j 层膜。

L 层膜的膜系特征矩阵为

$$M = \prod_{j=1}^L M_j = \begin{bmatrix} m_{11} & im_{12} \\ im_{21} & m_{22} \end{bmatrix} \quad (2)$$

由光学薄膜知识可得

$$E_0^+ + E_0^- = (m_{11} + im_{12}\eta)E_s^+ \quad (3)$$

$$E_0^+ - E_0^- = [(im_{21}/\eta + m_{22}\eta/\eta)]E_s^+ \quad (4)$$

其中, E_0^+ 和 E_0^- 分别代表入射界面的入射光和反射光的电场强度; E_s^+ 代表基底内入射光的电场强度; η , η 分别是基底和入射介质的修正导纳。

由(3)、(4)两式可得

$$|E_0^+|^2 = 0.25 \{ [m_{11} + (m_{22}\eta/\eta)]^2 + [(m_{21}/\eta) + m_{12}\eta]^2 \} |E_s^+|^2 \quad (5)$$

$$|E_0^-|^2 = 0.25 \{ [m_{11} - (m_{22}\eta/\eta)]^2 + [(m_{21}/\eta) - m_{12}\eta]^2 \} |E_s^+|^2 \quad (6)$$

第1层膜中距离薄膜入射介面下 Δz 处逆矩阵^[5]:

$$\begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \Delta\beta & -i\eta^{-1} \sin \Delta\beta \\ -i\eta \sin \Delta\beta & \cos \Delta\beta \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中 $\Delta\beta = 2\pi n_1 \Delta z \cos \theta / \lambda$

该点电场的平方:

$$|E|^2 = [(m_{11}')^2 + (\eta m_{12}')^2] |E_s^+|^2 \quad (8)$$

其中, $\begin{bmatrix} m_{11}' & m_{12}' \\ m_{21}' & m_{22}' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix}$

依次类推可得膜内任一点处电场强度的平方。

由(5)、(8)式可得电场强度平方相对值的分布:

$$N = |E(z)|^2 / |E_0^+|^2 \quad (9)$$

由(5)、(6)式可得薄膜的反射率:

$$R = |E_0^-|^2 / |E_0^+|^2 \quad (10)$$

通过(9)、(10)式可以计算实际薄膜的电场强度平方相对值的分布情况和薄膜的反射率。

3 评价函数的建立

建立薄膜反射率的评价函数:

$$F_R = \sum_{\lambda} [R(\lambda) - R_c(\lambda)]^2 \quad (11)$$

建立电场强度分布评价函数:

$$F_E = \sum_z [N(z) - N_c(z)]^2 \quad (12)$$

综合以上两种评价函数, 建立综合评价函数:

$$F = K_r \times F_R + K_e \times F_E \quad (13)$$

其中, K_r 和 K_e 是权重因子; $R_c(\lambda)$ 和 $N_c(z)$ 为设定值。

对已知折射率的膜系结构, 膜层厚度给定一个搜索范围, 对厚度进行搜索, 得出综合评价函数(13)式的极小值, 其对应膜层厚度即是所求值。

4 高反射率光学薄膜膜系设计

光学高反膜内场强分布是驻波场结构, 已有不少报道对驻波场进行优化, 用于减少光损耗。对于 $G/12(HL)H/\Lambda$ 高反膜系, 优化最外界面几层膜的光学厚度, 目的是减少高折射率材料膜层内或膜层界面的电场强度。

用以上算法优化最外两层, 设 $R_c(\lambda) = 1$; 高折射率 $N_h = 2.1$; 低折射率 $N_l = 1.45$; 基片折射率 $N_g = 1.52$ 。高折射率材料膜层内最大电场强度平方相对值的设定值与计算出最外两层光学厚度结果见表1。

表1 相对电场强度平方设定最大值与计算出最外两层光学厚度($\times \lambda/4$)结果

Table 1 Assume maximum number of the relative electric field intensity and the count thickness($\times \lambda/4$) of two layer nearby inject medium

Relative electric field N	0.4	0.5	0.6	0.7
Thickness of first layer H	0.463	0.539	0.609	0.687
Thickness of second layer L	1.649	1.578	1.507	1.421

从表1可以看到, 利用本文算法可以任意设定需要值, 灵活进行优化设计。对于高反膜设定 $R_c(\lambda) = 1$, 高折射率材料内电场强度小于0.5。选定合适的权重因子, 用以上算法优化最外4层, 结果得到膜系为: $G/10(HL)H1.502L0.606H1.611L0.498H/\Lambda$ 。

比较未优化高反膜膜系 $G/12(HL)H/\Lambda$ 电场强度平方相对值的分布曲线(图1)和上面优化最外4层高反膜膜系 $G/10(HL)H1.502L0.606H1.611L0.498H/\Lambda$ 电场强度平方相对值的分布曲线(图2), 高折射率材料膜层内最大电场强度平方相对值从0.91减少到0.47, 减少了48%; 但相应增加了低折射率材料内的电场分布。对于损耗差别比较大的两种材料, 这种设计结果十分有利于减少损耗。

再比较优化前膜系 $G/12(HL)H/\Lambda$ 反射率曲线(图3)和优化后膜系 $G/10(HL)H1.502L0.606H1.611L0.498H/\Lambda$ 反射率曲线(图4), 可以看出优化前后反射率曲线整体在中心波长(1064 nm)附近变化很小, 从99.98%减少到99.96%, 可以通过在

优化层后增加两层补偿减少的反射率而不会影响电场分布。

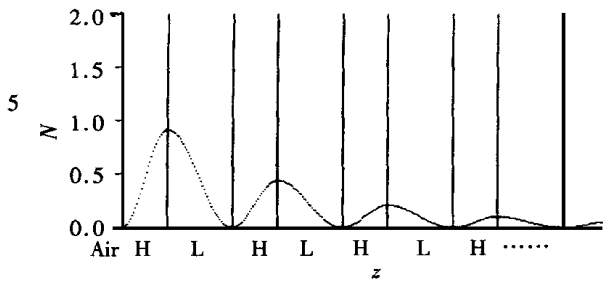


图1 膜系 G/12(HL)H/A 电场分布

Fig 1 Electric field distribution of film G/12(HL)H/A

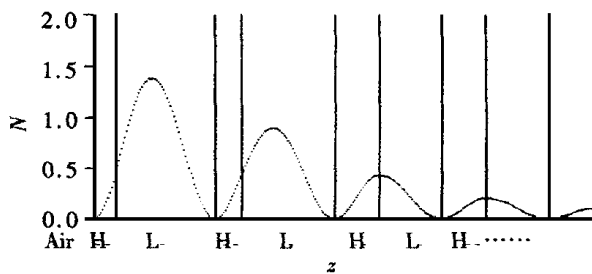


图2 膜系 G/10(HL)H 1.502 L 0.606 H 1.611 L 0.498 H/A 电场分布

Fig 2 Electric field distribution of film

G/10(HL)H 1.502 L 0.606 H 1.611 L 0.498 H/A

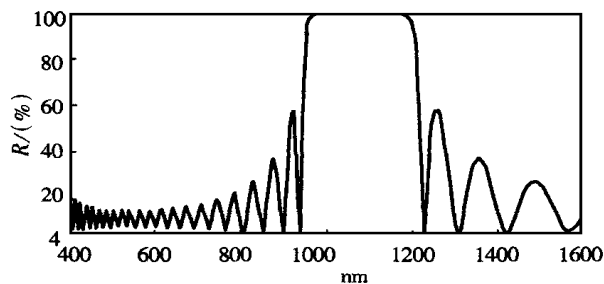


图3 膜系 G/12(HL)H/A 反射率曲线

Fig 3 Reflectivity curve of film G/12(HL)H/A

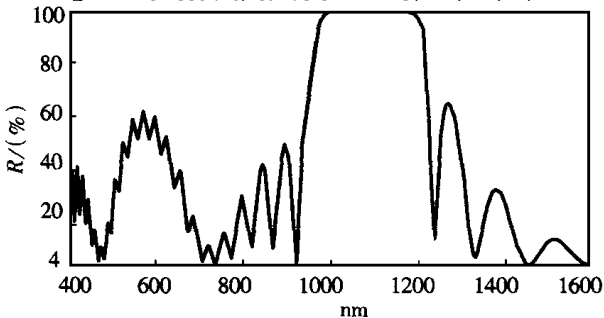


图4 膜系 G/10(HL)H 1.502 L 0.606 H 1.611 L 0.498 H/A 反射率曲线

Fig 4 Reflectivity curve of film G/10(HL)H

1.502 L 0.606 H 1.611 L 0.498 H/A

从电场分布曲线和反射率曲线以及计算机数据可以看出这种设计方法对减少损耗, 提高反射率是有效的。

4 结 论

改善膜层内电场分布, 同时考虑反射率的要求, 建立综合评价函数, 进行优化设计, 用这种设计方法能灵活有效地设计各种对电场分布有一定要求的光学膜系。对于设计各种高要求的光学薄膜, 如极高反射率薄膜、强激光薄膜, 都能极大提高其性能。

以上过程可以看出本文提出设计方法计算结果和其它方法计算结果^[4]是一致的。该设计方法不需要假设反射率为最大和两种材料的第1个分界面上的电场强度等于下一个相似界面上的电场强度, 因而能按任意场强和反射率要求优化设计各种膜系。这种方法物理概念清晰, 理论推导和算法编程实现简单。

参 考 文 献:

- [1] Dirk-Roger Schmitt High reflectance low scatter laser mirrors *SPIE*, 1989, 1125: 94-106
- [2] G DeBell, L Mott, M von Gunten Thin film coating for laser cavity Optics *SPIE*, 1988, 895: 254-270
- [3] 李 健, 刘 杰 高反膜镜片参数的精确测量 光电子·激光, 1997, 8(3): 209-212
- [4] 唐晋发, 郑 权 应用薄膜光学, 上海: 上海科学技术出版社, 1984: 205-208
- [5] O Arnon, P Baumeister Electric field distribution and the reduction of laser damage in multilayer *Appl Opt*, 1980, 19: 1853-1860
- [6] Joseph H Apfel Optical coating design with reduced electric field intensity. *Appl Opt*, 1997, 16: 1880-1889
- [7] Jagdish C Monga Multilayer thin-film polarizer with reduced electric-field intensity. *Journal of Modern Optics*, 1989, 36: 769-784

作者简介:

孔明东 (1973-), 男, 四川人, 成都精密光学工程研究中心助工, 1996年毕业于四川大学光电科学技术系, 分配到“成都精密光学工程研究中心。”一直从事激光薄膜的研究