

倾斜入射薄膜滤光片偏振控制的优化算法*

聂明局, 刘德明

(华中科技大学 光电子科学与工程学院 武汉光电国家实验室, 武汉 430074)

摘要:利用多层膜的特征矩阵关系式和有效界面法, 推导出间隔层的厚度和有效折射率与两个偏振分量的中心波长差值和通带半宽差值之间的三个隐函数表达式. 通过调整薄膜滤光片间隔层的厚度和有效折射率, 控制两个偏振分量中心波长的相对位置. 模拟计算表明: 改变间隔层的有效折射率和厚度, 可以调整中心波长差值和通带半宽差值, 实现两个偏振分量截止偏振不分离或中心波长偏振不分离. 优化算法可以实现对倾斜入射薄膜滤光片的偏振控制.

关键词:薄膜光学; 滤光片; 消偏振; 间隔层调节; 折射率

中图分类号: O484. 4

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2009)08-2015-4

0 引言

光线倾斜入射时, 薄膜的有效光学厚度和有效折射率均发生变化, S 偏振光与 P 偏振光的中心波长不再重合^[1-3]. 在角度调谐或倾斜使用滤光片的情况下, 均需要减小或消除偏振分离现象^[4-5].

消除薄膜的偏振效应, 尤其是消除滤光片的偏振效应, 是一个棘手的难题, 许多学者均有相关的报道. Thelen 提出多周期对称型滤光片, 通过矩阵计算, 获得消偏振截止滤光片^[6-8]; 顾培夫采用高低折射率混合间隔层的滤光片结构, 调整间隔层的干涉级次和反射膜的反射率, 调出消偏振滤光片^[9-10]; 江绍基通过调节间隔层的厚度, 获得消偏振截止滤光片^[11]; 王翀通过调整间隔层的有效折射率, 实现了两个偏振分量中心波长的重合^[12].

本文提出综合调整带通滤光片间隔层的有效折射率和厚度, 设计出固定角度消偏振的带通滤光片或长/短波通截止滤光片. 从相位关系分析入手, 在倾斜入射条件下, 推导出两偏振光的中心波长差值、通带半宽差值与间隔层的有效折射率和厚度之间的三个隐函数表达式. 同时优化间隔层的有效折射率和厚度, 两偏振光的中心波长和通带半宽均发生变化. 这种算法可以很好地抑制或消除倾斜使用滤光片的偏振效应.

1 理论分析与算法

1.1 干涉滤光片的中心波长

设滤光片膜系结构为单腔四分之一膜系: A/X₁MX₂/G, 两侧膜堆分别等效为 X₁、X₂, 中间膜层

为 M, A 为空气, G 为基底. 多腔带通滤光片可类似计算. 单腔滤光片的结构如图 1.

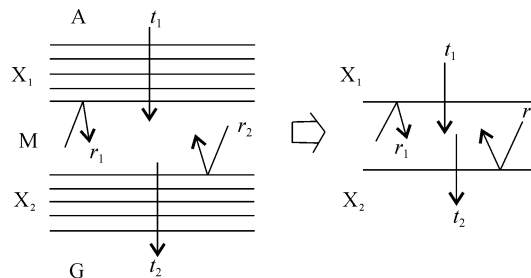


图 1 单腔滤光片模型

Fig. 1 Model of one-cavity filter

滤光片透射率极大值的位置, 即中心波长由下式确定

$$\lambda_0 = \frac{2N_M d_M \cos \theta_M}{k + [(\phi_{x_1} + \phi_{x_2})/2\pi]} = \frac{2N_M d_M \cos \theta_M}{m}$$

(其中 $m = k + (\phi_{x_1} + \phi_{x_2})/2\pi$) (1)

ϕ_{x_1} 和 ϕ_{x_2} 为反射膜堆 X₁、X₂ 的反射相位, N_M、d_M 和 θ_M 分别为间隔层的折射率、厚度和折射角, λ_0 为入射光波长.

1.2 干涉滤光片反射膜堆的反射相位

X₁、X₂ 膜堆的导纳矩阵分别为

$$\begin{bmatrix} B_{x_1} \\ C_{x_1} \end{bmatrix} = \left\{ \prod_{j=1}^k \begin{bmatrix} \cos \delta_{x_{1j}} & \frac{i}{\eta_{x_{1j}}} \sin \delta_{x_{1j}} \\ i\eta_{x_{1j}} \sin \delta_{x_{1j}} & \cos \delta_{x_{1j}} \end{bmatrix} \right\}$$
$$\begin{bmatrix} B_{x_2} \\ C_{x_2} \end{bmatrix} = \left\{ \prod_{j=1}^k \begin{bmatrix} \cos \delta_{x_{2j}} & \frac{i}{\eta_{x_{2j}}} \sin \delta_{x_{2j}} \\ i\eta_{x_{2j}} \sin \delta_{x_{2j}} & \cos \delta_{x_{2j}} \end{bmatrix} \right\} \begin{bmatrix} 1 \\ \eta_g \end{bmatrix}$$

膜层的相位厚度为 $\delta_j = \frac{2\pi}{\lambda} N_j d_j \cos \theta_j$;

对于 P 偏振光, X₁、X₂ 膜堆的等效导纳分别为 $Y_{X_1P} = C_{X_1P}/B_{X_1P}$, $Y_{X_2P} = C_{X_2P}/B_{X_2P}$;

它是一个复数. 在多腔的情况下, Y_{X_1P} 、 Y_{X_2P} 的实部和虚部均为 λ 、N_M 和 d_M 的函数, 化为标准的复数形式

* 国家自然科学基金(60807017)资助

Tel: 027-87543355-3151 Email: mjnie@mail.hust.edu.cn

收稿日期: 2009-03-18

修回日期: 2008-05-05

$$Y_{X_1P} = n_{X_1P} + iq_{X_1P}, Y_{X_2P} = n_{X_2P} + iq_{X_2P}$$

间隔层的等效导纳为 $n_M = N_M / \cos \theta_M = N_M (N_M^2 / N_M^2 - \sin^2 \theta_0)^{1/2}$. 它是 N_M 的函数, 表示为 $n_{MP} = n_{MP}(N_M)$. X_1 、 X_2 膜堆的反射相位 ϕ_{X_1P} 、 ϕ_{X_2P} 分别为

$$\phi_{X_1P} = \text{Arg}(r_{X_1P}) = \arctan \frac{2q_{X_1P}}{n_{MP}^2 - q_{X_1P}^2 - n_{X_1P}^2},$$

$$\phi_{X_2P} = \text{Arg}(r_{X_2P}) = \arctan \frac{2q_{X_2P}}{n_{MP}^2 - q_{X_2P}^2 - n_{X_2P}^2};$$

对于 S 偏振光, 有

$$n_{MS} = N_M \cos \theta_M = N_M \sqrt{1 - \sin^2 \theta_0 / N_M^2};$$

它是 N_M 的函数, 表示为 $n_{MS} = n_{MS}(N_M)$. X_1 、 X_2 膜堆的反射相位 ϕ_{X_1S} 、 ϕ_{X_2S} 分别为

$$\phi_{X_1S} = \text{Arg}(r_{X_1S}) = \arctan \frac{2q_{X_1S}}{n_{MS}^2 - q_{X_1S}^2 - n_{X_1S}^2},$$

$$\phi_{X_2S} = \text{Arg}(r_{X_2S}) = \arctan \frac{2q_{X_2S}}{n_{MS}^2 - q_{X_2S}^2 - n_{X_2S}^2}.$$

1.3 数值分析函数组

间隔层的相位为 $\delta = \frac{2\pi}{\lambda} N_M d_M \cos \theta_M = \frac{2\pi}{\lambda} d_M \cdot \sqrt{N_M^2 - \sin^2 \theta_0}$, 它是 N_M 和 d_M 的函数, 记为 $\delta(N_M, d_M)$.

根据透射带中心波长需满足的相位关系式 $\phi_{X_1} + \phi_{X_2} = 2\delta$, 可得

$$\arctan \frac{2q_{X_1P}}{n_{MP}^2 - q_{X_1P}^2 - n_{X_1P}^2} + \arctan \frac{2q_{X_2P}}{n_{MP}^2 - q_{X_2P}^2 - n_{X_2P}^2} = \frac{4\pi}{\lambda} d_M \sqrt{N_M^2 - \sin^2 \theta_0} \quad (2)$$

$$\arctan \frac{2q_{X_1S}}{n_{MS}^2 - q_{X_1S}^2 - n_{X_1S}^2} + \arctan \frac{2q_{X_2S}}{n_{MS}^2 - q_{X_2S}^2 - n_{X_2S}^2} = \frac{4\pi}{\lambda} d_M \sqrt{N_M^2 - \sin^2 \theta_0} \quad (3)$$

式(2)和式(3)是关于 λ 、 N_M 和 d_M 的隐函数. 对于某一 d_M , 可以获得 λ 与 N_M 的关系曲线: $\lambda \sim N_M$ 、 $\lambda_S \sim N_M$. 记 $\delta\lambda = \lambda_P - \lambda_S$, 可以得到关于 $\delta\lambda \sim (N, d_M)$ 的隐函数.

倾斜入射时, 由于 P 偏振光和 S 偏振光的等效导纳不同, 导致 X_1 、 X_2 膜堆的反射率不同: $R_{X_1P} \neq R_{X_1S}$ 、 $R_{X_2P} \neq R_{X_2S}$. 两偏振光的通带半宽差值 $\Delta\lambda$ 表示为

$$\Delta\lambda = \Delta\lambda_P - \Delta\lambda_S = \frac{\lambda_0}{m\pi} \left[\arcsin \left[\frac{1 - \sqrt{R_{X_1P} R_{X_2P}}}{2 \sqrt{R_{X_1P} R_{X_2P}}} \right] - \arcsin \left[\frac{1 - \sqrt{R_{X_1P} R_{X_2P}}}{2 \sqrt{R_{X_1P} R_{X_2P}}} \right] \right] \quad (4)$$

式(4)是关于 $\Delta\lambda$ 、 N_M 和 d_M 的隐函数.

取 $N_M d_M = \rho m \frac{\lambda_0}{2}$, 其中 ρ 称为失调因子. (2)、

(3)、(4)三式是 $\Delta\lambda$ 和 $\delta\lambda$ 关于 N_M 和 ρ 的隐函数组.

2 数值模拟

对于一组 ρ 和 N_M , 均存在对应的中心波长差值 $\delta\lambda$ 以及通带半宽差值 $\Delta\lambda$. 选取滤光片的初始结构为: $G/[(HL)^2 H(2m\rho M)(HL)^2 HL]^4 / A$, 入射角 $\theta_0 = 45^\circ$ 、 $n_H = 2.15$ 、 $n_L = 1.45$ 、 $2m = 2$, 参考波长 $\lambda_0 = 1550$ nm. 改变间隔层的折射率和失调因子的值, 计算出中心波长差值和通带半宽差值, 模拟结果如图 2.

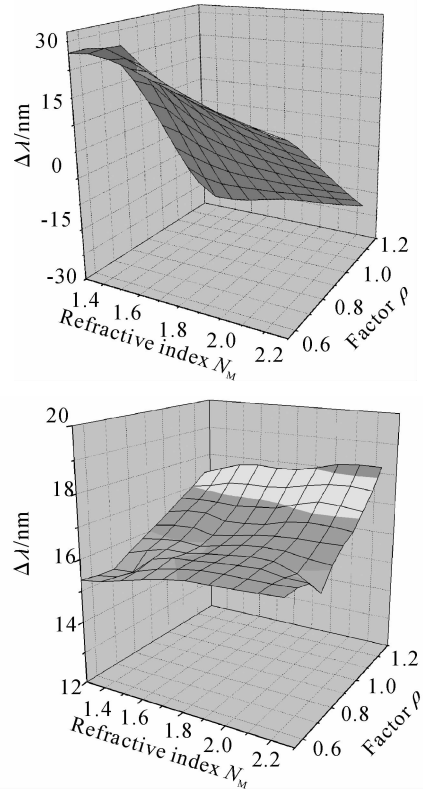


图 2 中心波长差值 $\delta\lambda$ 和通带半宽差值 $\Delta\lambda$ 与间隔层的折射率 N_M 和失调因子 ρ 之间的关系

Fig. 2 Relationship between $\delta\lambda$, $\Delta\lambda$ and N_M, ρ

当 $\delta\lambda = \delta\lambda$ 、或 $\delta\lambda = 0$ 、或 $\delta\lambda = -\Delta\lambda$ 时, 分别实现了短波通截止消偏振、中心波长消偏振和长波通截止消偏振, 模拟结果如图 3.

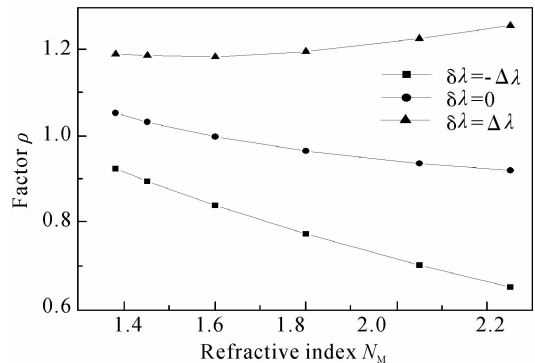


图 3 消偏振时, 失调因子 ρ 与有效折射率 N_M 的关系曲线
Fig. 3 Curves of ρ vs N_M meet depolarization

当间隔层的折射率取 $N_M = 1.6$ 时, 满足消偏振条件的失调因子 ρ 的值分别为 0.839、0.998、

1. 183. 对应膜系 $G/[(HL)^2 H(2m\rho M)(HL)^2 HL]^4/A$ 的光谱曲线如图 4.

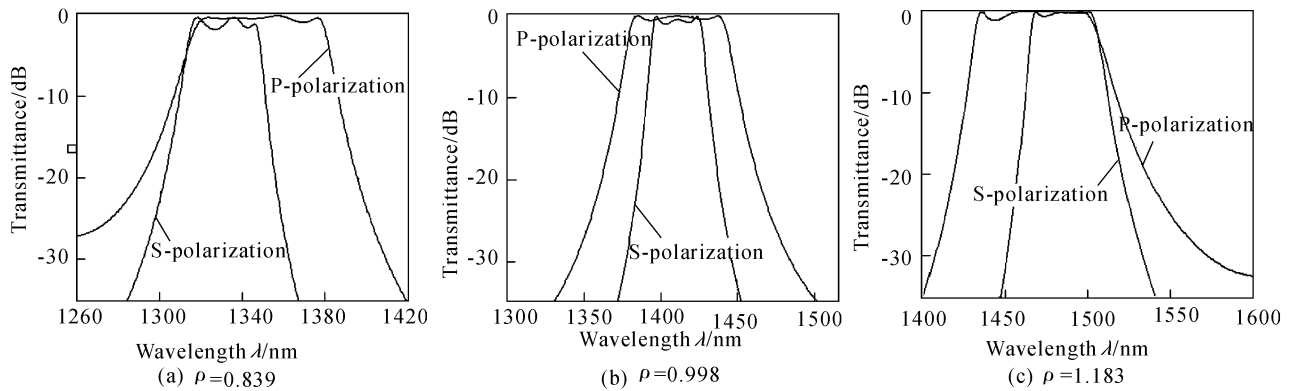


图 4 消偏振滤光片的模拟光谱曲线

Fig. 4 Simulated curve of depolarization filter

3 讨论

在入射角、膜系确定的情况下,滤光片的中心波长差值、通带半宽差值均与间隔层的有效折射率和失调因子有关,它们之间存在 $\delta\lambda \sim (N_M, \rho)$ 和 $\Delta\lambda \sim (N_M, \rho)$ 的三维曲面,中心波长差值与通带半宽差值之间的相对位置连续可调,而且存在以下三种满足消偏振的特例:

1) $\delta\lambda = \Delta\lambda$, 实现偏振不分离的短波通截止滤光片. 曲面 $\delta\lambda \sim (N_M, \rho)$ 与曲面 $\Delta\lambda \sim (N_M, \rho)$ 相交, 相交线所对应的曲线 $N_M \sim \rho$ 为满足要求的数值解;

2) $\delta\lambda = 0$, P 偏振光与 S 偏振光的中心波长重合, 中心波长实现偏振不分离. 曲面 $\delta\lambda \sim (N_M, \rho)$ 与平面 $\delta\lambda = 0$ 相割, 相交线对应的曲线为满足要求的数值解;

3) $\delta\lambda = -\Delta\lambda$, 实现偏振不分离的长波通截止滤光片. 曲面 $\delta\lambda \sim (N_M, \rho)$ 与曲面 $-\Delta\lambda \sim (N_M, \rho)$ 相交, 相交线所对应的曲线 $N_M \sim \rho$ 为满足要求的数值解.

4 结论

本文阐述的优化算法能够有效地控制倾斜入射薄膜滤光片的偏振特性. 对于倾斜入射的薄膜滤光片, 改变间隔层的有效折射率和厚度的数值, 可以实现两偏振光的中心波长差值与通带半宽差值之间相对位置的连续调节. 分析两偏振光的中心波长差值与通带半宽差值的相对关系, 实现了偏振不分离的长/短波通截止滤光片、中心波长偏振不分离带通滤光片.

参考文献

[1] MACLEOD H A. Tilted films [C]. Tang Jinfa transl. Optical coatings. Beijing: Thin Film Optics Committee, Optical Society of Beijing, 1983. 9-19
 麦克劳德 H A. 斜入射薄膜 [C]. 唐晋发译. 光学薄膜论文集. 北京: 薄膜光学学会, 北京光学学会, 1983. 9~19.

[2] TOMONI Y, HITOSHI O, JAMSHID N, *et al.* High-performance and highly stable 0.3nm-full-width-at-half-maximum interference optical filters [J]. *Appl Opt*, 1994, **33** (16): 3513-3517.
 [3] LI Ming-Yu, GU Pei-fu. Design of near ultraviolet band and wide-angle non-polarization beam-splitting plate [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(10): 1231-1233.
 李明宇, 顾培夫. 近紫外区宽角度消偏振平板分光镜 [J]. 光子学报, 2003, **32**(10): 1231-1233
 [4] YU Kan, LIU Wen, HUANG De-xiu. Characteristics analysis and stack design of angle-tuned filter [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(6): 1175-1179.
 俞侃, 刘文, 黄德修. 角度调谐滤光片特性分析及膜系设计 [J]. 光子学报, 2008, **37**(6): 1175-1179
 [5] XUXiao-feng, XING Huai-zhong, Du Xi-liang, *et al.* Study of anti-polarization and antireflection coatings of broad angle ranges by inhomogeneous coatings [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(9): 1691-1693.
 徐晓峰, 邢怀中, 杜西亮, 等. 利用非规整膜系实现宽角度入射减偏振/减反射薄膜的研究 [J]. 光子学报, 2007, **36**(9): 1691-1693.
 [6] THELEN A. Non-polarizing edge filters [J]. *Opt Soc Am*, 1981, **71**(3): 309-314.
 [7] THELEN A. Non-polarizing edge filters: Part 2 [J]. *Appl Opt*, 1984, **23**(20): 3541-3543.
 [8] THELEN A. Avoidance or enhancement of polarization in multilayer [J]. *J Opt Soc Am*, 1980, **70**(1): 118-121.
 [9] GU Pei-fu, CHEN Wei-bin, LIU Xu. Design of depolarization thin film cutoff filters. [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(2): 274-278.
 顾培夫, 陈卫斌, 刘旭. 薄膜截止滤光片的消偏振设计 [J]. 光学学报, 2005, **25**(2): 274-278.
 [10] GU Pei-fu, LI Hai-feng, ZHANG Y. G., *et al.* Characteristics and improvement of dense wavelength division multiplexing (DWDM) thin film filters used in tilted incidence [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(3): 377-379.
 顾培夫, 李海峰, 章岳光, 等. 用于倾斜入射波分复用薄膜滤光片的特性与改进 [J]. 光学学报, 2003, **23**(3): 377-379.
 [11] JIANG Shao-Ji, ZHANG Fu-guang, LIU Yan, *et al.* Manufacture of depolarization cut-off filter for passive optical

network triplex play [J]. *Optical Tech*, 2005, 31(4): 548-550.

江绍基,张甫光,刘艳等. 无源光接入网单纤三向消偏振截止滤光片的研制[J]. *光学技术*, 2005, 31(4): 548-550.

[12] WANG Chong, LUO Bin, PAN Wei. Algorithm of seeking

precise refractive index value of spacer for controlling angle-tuned filter's polarization characteristics [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, 25(5): 707-711.

王翀,罗斌,潘炜. 角度调谐滤光片偏振控制的间隔层折射率寻优算法[J]. *光学学报*, 2005, 25(5): 707-711.

Optimized Algorithm of Polarization Controlling for Thin-film Filters at Oblique Incidence

NIE Ming-ju, LIU De-ming

(*Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, School of Optoelectronic Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China*)

Abstract: Beginning with the analysis of phase relationship and by use of the characteristic matrix expression of multilayer films, three implicit function expressions of the refractive index and thickness of spacer and central wavelength or half pass-band of two polarization components are deduced. Therefore the values of middle layer's refractive index and thickness and corresponding wavelength difference can be quickly and accurately obtained. Simulation calculations of concrete filter designs for four cavities prove that the method is feasible. It is obtained that short or long pass-band depolarization cutoff filter and central wavelength depolarization filter by adjusting effective refractive index and thickness of spacer. The optimized algorithm is effective for polarization controlling of thin film filter at oblique incidence.

Key words: Thin film optics; Filters; Depolarization; Adjusting of spacer; Refractive index



NIE Ming-ju gained the Ph. D. degree from HUST in 2007. Now, his research interests focus on fiber optical communication system.