

文章编号: 0253-2239(2005)05-707-5

角度调谐滤光片偏振控制的间隔层折射率寻优算法*

王 翀 罗 斌 潘 炜

(西南交通大学计算机与通信工程学院光通信实验室, 成都 610031)

摘要: 斜入射滤光片的 S 偏振和 P 偏振的中心波长会发生分离, 而通过调整间隔层的有效折射率, 可使有角度入射滤光片两个偏振分量的中心波长相重合。由相位关系分析着手, 利用多层膜的特征矩阵关系式, 推导出间隔层中间折射率和 P 偏振及 S 偏振的中心波长的两个隐函数表达式, 由此可快速解出所寻找的中间折射率及对应的中心波长数值。单腔和三腔的两个具体实例的模拟计算表明: 采用此算法, 对于调谐到一特定角度入射的滤光片能很快地求出准确的中间折射率数值, 应用此中间折射率即可使 P 偏振和 S 偏振的中心波长很好地重合。入射角从 0° 到 30° 的实例偏差分析表明此算法的精确度高, 这对于减少偏振分量特性之间的分离以及滤光片的宽角度调谐有着良好的意义。

关键词: 薄膜光学; 滤光片; 倾斜入射; 中间层折射率; 中心波长; 偏振

中图分类号: O484.4 文献标识码: A

Algorithm of Seeking Precise Refractive Index Value of Spacer for Controlling Angle-Tuned Filter's Polarization Characteristics

Wang Chong Luo Bin Pan Wei

(The Laboratory of Optical Communications, School of Computer and Communications Engineering, South West Jiaotong University, Chengdu 610031)

Abstract: Central wavelength of S-polarization and P-polarization will separate when the filter is tilted. But the central wavelength of two polarization components in angle-tuned filter can be coincided by adjusting effective refractive index of spacer. Beginning with the analysis of phase relationship and by use of the characteristic matrix expression of multilayer films, two implicit function expressions of middle layer's refractive index of spacer and central wavelength of P-polarization and S-polarization are deduced. Therefore the value of middle layer's refractive index and corresponding central wavelength can be quickly and accurately obtained. Simulation calculations of two concrete filter designs for single cavity and three cavities prove that the method is feasible. Based on the samples data analysis of difference curves with incidence angle from 0° to 30° , it is proven that the algorithm is highly accurate.

Key words: thin film optics; filters; tilted incidence; moderate refractive index; central wavelength; polarization

1 引 言

利用有角度入射条件下、由于膜层有效光学厚度的减小, 使其中心波长向短波侧移动的特性来达到波长可调谐目的的滤光片称为角度调谐滤光片。但在入射角大于一定值时, 其 S 偏振和 P 偏振的中心波长不再重合。特别当镀膜层数增多、带宽变窄时, 这种特性分离现象将更加明显^[1~3]。因此, 在角度调谐、倾斜使用窄带滤光片的场合, 如何减小或消除这种现象十分重要。

Macleod^[1]主要借助导纳图解技术对倾斜入射滤光片的偏振特性进行了直观的分析; Gushing 等^[4]采用高、低折射率两种材料组成间隔层, 顾培夫等^[5]利用一适当中间折射率的膜层作为间隔层, 其实质都是要调整间隔层的有效折射率, 从而使两个偏振分量的中心波长相重合; 而 Thelen^[6]也采用了折射率位于高、低折射率之间的中间折射率, 通过在其中心波长处, 等效导纳为满足一关系式的单一界面, 使对于两偏振平面给出相近的等效导纳的表示

* 国家自然科学基金(10174057)和高等学校博士学科点专项科研基金(20030613007)资助课题。

作者简介: 王 翀(1972~), 男, 河南鹿邑县人, 西南交通大学硕士生, 主要从事光通信器件及光学薄膜、光纤传输研究。

E-mail: wched55@hotmail.com

收稿日期: 2004-05-31; 收到修改稿日期: 2004-09-21

式来减小中心波长偏振分离现象。这样虽然都比较好地解决了问题,但他们只是借助于试探法来获得中间折射率的值,却没能提出一种直接确定中间折射率的方法。

本文从相位关系分析入手,对于特定膜系结构,在一定角度入射条件下,通过计算分别推导出 P 偏振和 S 偏振的中心波长和间隔层中间折射率的隐函数表达式。由这两个表达式计算确定两条图线的交点,即可快速、准确确定中间折射率及其对应的中心波长的数值。相对于上述参考文献中多次试探中间折射率的方法来说,此算法效率高,一次计算就可获得所求数值。这对于膜系的优化设计提供了一种好的数值计算方法。最后的实例模拟验证和偏差分析结果都表明,此高精度度的算法可很好地应用于角度调谐滤光片。

2 理论基础及推导计算

以下分析基于假定薄膜为均匀、各向同性且不考虑吸收等损耗的基础之上,并且假定平行于界面的电磁场连续的边界条件也是成立的。

2.1 有效界面法

单层膜的两个界面可以用一个等效界面来表示。对于多层膜系来说,如图 1 所示,可从膜系中选定一层分离出来,一般选定膜系最中间一层,这样整个膜系组合可以用两个有效界面来表示。以下的算法即是基于此理论上的。

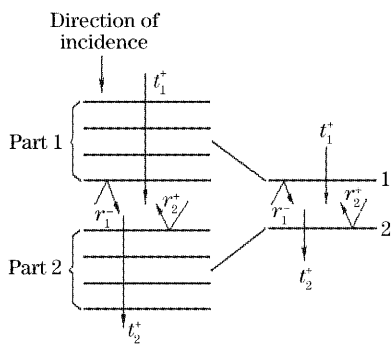


图 1 有效界面法

Fig. 1 The method of effective interface

已知以下关系式

$$T = \frac{T_1 T_2}{(1 - \sqrt{R_1 R_2})^2} \times 1 / \left\{ 1 + \frac{4 \sqrt{R_1 R_2}}{(1 - \sqrt{R_1 R_2})^2} \sin^2 \left[\frac{1}{2} (\varphi_1 + \varphi_2 - 2\delta) \right] \right\}, \quad (1)$$

式中 φ_1, φ_2 分别为选定层两侧膜系的反射相移;

$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} N d \cos \theta$ 为选定层的有效相位厚度。

由(1)式可知,当满足下式

$$(\varphi_1 + \varphi_2 - 2\delta) / 2 \approx m\pi, \quad (m = 0, 1, 2, \dots) \quad (2)$$

时,整个膜系在此波长处的透射率最大,此波长即为中心波长。

2.2 数值计算分析

2.2.1 理论分析

对于一特定膜系,选定一适当的中间层,两侧分膜系可分别等效为一膜堆,用一矩阵关系式来表示。对于要满足的(2)式,可设 $m = 0$,即要求 $\varphi_1 + \varphi_2 - 2\delta \approx 0$ 。在倾斜入射情况下,P 偏振和 S 偏振分别计算,可得出选定层折射率 N_M 和中心波长 λ 的两个函数关系式。联立求解即可解出两偏振中心波长一致的 N_M 值,而对应的两偏振方向重合的中心波长也可解出。下面给出具体解法。

2.2.2 具体解法

设膜系结构^[7]为单腔四分之一膜系:A/XMY/G,多腔也可类似计算。两侧膜系分别等效为 X、Y,中间层为 M,A 为空气,G 为基底。设定中心波长为 λ_0 ,入射光波长为 λ ;入射角为 θ_0 。则

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} N_M d_M \cos \theta_M,$$

而

$$N_M d_M = \frac{\lambda_0}{4}, \cos \theta_M = \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \theta_0}{N_M^2}},$$

设 $\pi\lambda_0/2 = a$,则 M 层的有效相位厚度

$$\delta = \frac{a}{\lambda} \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \theta_0}{N_M^2}}.$$

X 膜系一侧的特征矩阵为

$$\begin{bmatrix} B_X \\ C_X \end{bmatrix} = \left\{ \prod_{j=1}^K \begin{bmatrix} \cos \delta_{Xj} & i(1/\eta_{Xj}) \sin \delta_{Xj} \\ i\eta_{Xj} \sin \delta_{Xj} & \cos \delta_{Xj} \end{bmatrix} \right\} \begin{bmatrix} 1 \\ \eta_0 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

同样,Y 膜系一侧的特征矩阵为

$$\begin{bmatrix} B_Y \\ C_Y \end{bmatrix} = \left\{ \prod_{j=1}^K \begin{bmatrix} \cos \delta_{Yj} & i(1/\eta_{Yj}) \sin \delta_{Yj} \\ i\eta_{Yj} \sin \delta_{Yj} & \cos \delta_{Yj} \end{bmatrix} \right\} \begin{bmatrix} 1 \\ \eta_g \end{bmatrix}. \quad (4)$$

对 P 偏振和 S 偏振,膜层的相位厚度都是

$$\delta_j = \frac{2\pi}{\lambda} N_j d_j \cos \theta_j.$$

导纳修正为

$$\eta_j = \begin{cases} N_j / \cos \theta_j, & \text{P-polarization} \\ N_j \cos \theta_j, & \text{S-polarization} \end{cases} \quad (5)$$

对于 P 偏振

$$\begin{cases} Y_{XP} = C_{XP}/B_{XP}, \\ Y_{YP} = C_{YP}/B_{YP}, \end{cases} \quad (6)$$

将 Y_{XP} 和 Y_{YP} 化为标准的复数形式, 由于其实部和虚部都是 λ 的函数(多腔情况下, 为 λ 和 N_M 的函数), 因此可将其表示为

$$\begin{cases} Y_{XP} = n_{XP}(\lambda) + iq_{XP}(\lambda), \\ Y_{YP} = n_{YP}(\lambda) + iq_{YP}(\lambda), \end{cases} \quad (7)$$

而 $n_M = \frac{N_M}{\cos \theta_M} = N_M \sqrt{\frac{N_M^2}{N_M^2 - \sin^2 \theta_0}}$, 为 N_M 的函数, 可表示为 $n_M = n_{MP}(N_M)$, 则

$$r_{XP} = \frac{n_M - Y_{XP}}{n_M + Y_{XP}} = \frac{n_{MP}(N_M) - n_{XP}(\lambda) - iq_{XP}(\lambda)}{n_{MP}(N_M) + n_{XP}(\lambda) + iq_{XP}(\lambda)} = \frac{[n_{MP}(N_M) - iq_{XP}(\lambda)]^2 - n_{XP}^2(\lambda)}{[n_{MP}(N_M) + n_{XP}(\lambda)]^2 + q_{XP}^2(\lambda)} = \frac{n_{MP}^2(N_M) - [n_{XP}^2(\lambda) + q_{XP}^2(\lambda)] - i2n_{MP}(N_M)q_{XP}(\lambda)}{[n_{MP}(N_M) + n_{XP}(\lambda)]^2 + q_{XP}^2(\lambda)}, \quad (8)$$

$$\varphi_{XP} = \text{Arg}(r_{XP}) = \arctan \frac{2n_{MP}(N_M)q_{XP}(\lambda)}{n_{XP}^2(\lambda) + q_{XP}^2(\lambda) - n_{MP}^2(N_M)}. \quad (9)$$

同样可解出

$$\varphi_{YP} = \text{Arg}(r_{YP}) = \arctan \frac{2n_{MP}(N_M)q_{YP}(\lambda)}{n_{YP}^2(\lambda) + q_{YP}^2(\lambda) - n_{MP}^2(N_M)}. \quad (10)$$

由关系式 $\varphi_{XP} + \varphi_{YP} = \frac{2a}{\lambda} \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \theta_0}{N_M^2}} = 2\delta$, 即可得到

$$\arctan \frac{2n_{MP}(N_M)q_{XP}(\lambda)}{n_{XP}^2(\lambda) + q_{XP}^2(\lambda) - n_{MP}^2(N_M)} + \arctan \frac{2n_{MP}(N_M)q_{YP}(\lambda)}{n_{YP}^2(\lambda) + q_{YP}^2(\lambda) - n_{MP}^2(N_M)} = \frac{2a}{\lambda} \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \theta_0}{N_M^2}}, \quad (11)$$

(11) 式只有 λ 和 N_M 为变量, 是一个 λ 和 N_M 的隐函数表达式。

对于 S 偏振, $n_M = N_M \cos \theta_M = N_M \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \theta_0}{N_M^2}}$, 为 N_M 的函数, 可表示为 $n_M = n_{MS}(N_M)$ 。

同样可解出另一个 λ 和 N_M 的隐函数表达式如下:

$$\arctan \frac{2n_{MS}(N_M)q_{XS}(\lambda)}{n_{XS}^2(\lambda) + q_{XS}^2(\lambda) - n_{MS}^2(N_M)} + \arctan \frac{2n_{MS}(N_M)q_{YS}(\lambda)}{n_{YS}^2(\lambda) + q_{YS}^2(\lambda) - n_{MS}^2(N_M)} = \frac{2a}{\lambda} \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \theta_0}{N_M^2}}. \quad (12)$$

(11)式和(12)式即为所求的两个隐函数表达式。

3.1 单腔 45 层膜系结构

参照文献[5]中膜系设计, $G/(HL)^8H10LH(LH)^8L/A$ 。它的模拟透射曲线如图 2(a)所示。

现将膜系中间层 L 改为 M, 并取最中间一 M 层为分离层, 即 $G/(HL)^8H4M(M)5MH(LH)^8L/A$ 。

3 计算机模拟验证

设基板折射率为 $n_G = 1.5$, $n_H = 2.05$, $n_L = 1.458$, $\lambda_0 = 1550 \text{ nm}$ 在空气中以 30° 入射。

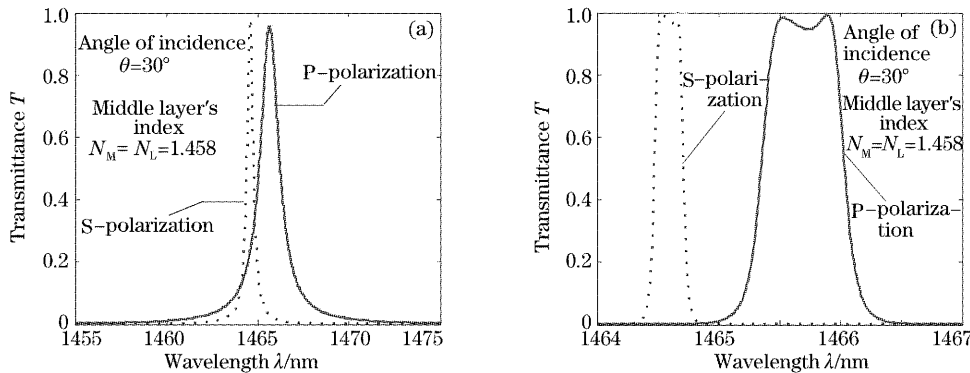


图 2 中间层折射率为 1.458 时的透射率曲线。(a)单腔 45 层薄膜设计, (b)三腔 135 层薄膜设计

Fig. 2 The transmittance curves of middle layer's index 1.458. (a) Design of one-cavity 45 layers films, (b) design of three-cavity 135 layers films

用(11)式和(12)式计算结果曲线如图 3(a)所示。可容易求出交点处中间层折射率 $N_M = 1.6605$, P 偏振

和 S 偏振所重合中心波长为 $\lambda = 1480.04$ nm。模拟透射曲线如图 4(a), 可看出与计算所得结果完全一致。

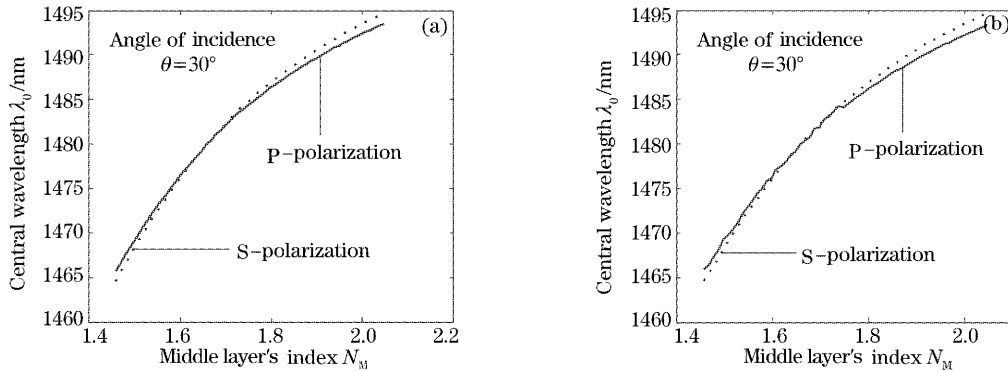


图 3 P 偏振和 S 偏振的中间折射率与中心波长的关系曲线。(a)单腔 45 层薄膜设计, (b)三腔 135 层薄膜设计

Fig. 3 The curve of two polarization components' central wavelength changed by middle layer's index.

(a) Design of one-cavity 45 layers films, (b) design of three-cavity 135 layers films

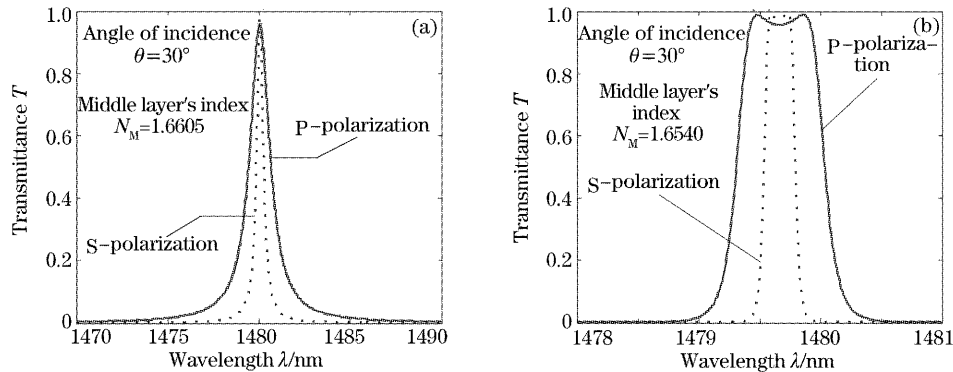


图 4 透射率曲线。(a)单腔 45 层薄膜在中间层折射率为 1.6605 时, (b)三腔 135 层薄膜在中间层折射率为 1.6540 时

Fig. 4 The transmittance curves. (a) Design of one-cavity 45 layers films with middle layer's index 1.6605,

(b) design of three-cavity 135 layers films with middle layer's 1.6540

3.2 三腔 135 层膜系结构

同样参照文献 [5] 中膜系设计, $G/[(HL)^8 H10LH(LH)^8 L]^3/A$ 。它的模拟透射曲线如图 2(b)所示。

类似将膜系中间层 L 改为 M, 并取最中间一 M 层为分离层, $G/(HL)^8 H10MH(HL)^{17} 4M(M)5M(HL)^{17} H10M(HL)^9/A$ 。用(11)式和(12)式计算结果曲线如图 3(b)所示。类似可容易求出交点处中间折射率 $N_M = 1.6540$, P 偏振和 S 偏振所重合中心波长为 $\lambda = 1479.7$ nm。模拟透射曲线如图 4(b), 与计算所得结果完全一致。

因此, 无论是单腔还是多腔, 对于调谐到一特定角度入射的例证都能很快地求出准确的中间折射率数值, 应用此中间折射率即可使 P 偏振和 S 偏振的中心波长很好地相重合。

应该指出的是, 本文的中间折射率值的理论计算结果精确到小数点后四位, 实际应用中可取与此折射率值最接近的材料来使用。

4 偏差分析

应用所求得中间层折射率, 图 5(a)和图 5(b)分别为上面实例中 45 层和 135 层膜系用此算法理论上算得的两偏振方向中心波长差值随入射角的变化情况。取入射角由 0° 到 30° 变化, 各取 11 个点进行研究。我们可容易看出, 其值均很小、接近于 0。在此计算精度条件下, 图中有 0 点产生, 但并不等于就真正为 0。当计算精度进一步提高后, 会算得很小量的偏差值。由此可知此计算方法的精确度是比较高的。

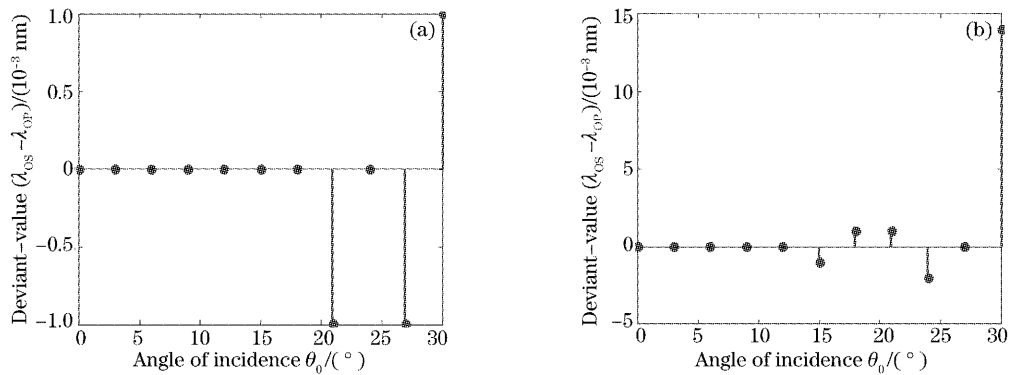


图5 P偏振和S偏振的中心波长差值随入射角的变化。(a)单腔45层薄膜设计,(b)三腔135层薄膜设计
Fig. 5 The difference between the central wavelength of S-polarization and that of P-polarization changed by angle of incidence. (a) Design of one-cavity 45 layers films, (b) design of three-cavity 135 layers films

5 结 论

薄膜滤光片在倾斜入射时,其偏振特性产生分离,特别是中心波长不再重合的现象影响了正常使用。通过调节间隔层有效折射率可以很好地解决这个问题。本文一开始设立有效界面,通过选定适当的中间分离层,运用满足相位关系的条件,建立起对应偏振中间折射率与中心波长的两个关系式,就可准确地求出中间折射率及对应中心波长的值。实例的模拟验证和偏差分析表明这种计算方法是切实可行的。

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 (in Chinese)
麦克劳德. 斜入射薄膜[C]. 唐晋发译. 光学镀膜论文集. 北京: 薄膜光学学会, 北京光学学会, 1983. 9~19
- 2 Tomoni Yanagimachi, Hitoshi Oguri, Jamshid Nayyer *et al.*. High-performance and highly stable 0.3 nm-full-width-at-half-maximum interference optical filters[J]. *Appl. Opt.*, 1994, **33** (16): 3513~3517
- 3 Anatoly Frenkel, Chinlon Lin. Angle-tuned etalon filters for optical channel selection in high density wavelength division multiplexed systems[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1989, **7**(4): 615~624
- 4 Cushing D. Bandpass filter for 45 angle with low polarization properties. OSA Technical Digest, series Vol. 19, Optical Interference Coatings, Tucson, 1998. 226~228
- 5 Gu Peifu, Li Haifeng, Zhang Yueguang *et al.*. Characteristics and improvement of DWDM thin film filters used in tilted incidence [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(3): 377~380 (in Chinese)
顾培夫,李海峰,章岳光等. 用于倾斜入射的波分复用薄膜滤光片的特性及改进[J]. 光学学报, 2003, **23**(3): 377~380
- 6 Alfred Thelen. Non-polarizing interference films inside a Glasscube[J]. *Appl. Opt.*, 1976, **15**(12): 2983~2985
- 7 Gu Peifu, Bai Shengyuan, Li Haifeng *et al.*. Design of DWDM thin-film interference filters[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(7): 794~797 (in Chinese)
顾培夫,白胜元,李海峰等. 密集型波分复用薄膜干涉滤光片的设计[J]. 光学学报, 2002, **22**(7): 794~797