

文章编号: 1001-3806(2005)06-0601-03

光波在具有柱状结构的双折射薄膜中的传输特性

王建国, 贺洪波, 邵建达*, 范正修

(中国科学院上海光学精密机械研究所 光学薄膜技术研发中心, 上海 201800)

摘要: 根据电磁场理论的矩阵分析方法推导了光波在具有柱状结构的双轴薄膜中的反射系数、透射系数和相位关系等光学特性。这些关系包含了界面处的多点反射, 可以推广到一般的各向异性的多层膜系统。给出了各向同性入射媒质-双轴各向异性膜层-各向同性基底薄膜系统的计算结果, 验证了该计算方法的可行性, 为双折射多层膜结构及其器件的理论分析和设计提供了理论参考。

关键词: 薄膜; 双折射; 菲涅耳系数; 相位关系

中图分类号: O484.4⁺1 **文献标识码:** A

Transmission characters of birefringent thin films with columnar microstructures

WANG Jian-guo, HE Hong-bo, SHAO Jian-da, FAN Zheng-xiu

(Optical Coating Technology R&D Center Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, the Chinese Academy of Sciences Shanghai 201800, China)

Abstract The transmission, reflection and phase properties of anisotropic thin films with columnar microstructures are derived from EM theory. Standard boundary conditions are imposed on resultant electric field and magnetic field vectors at interfaces. These matrixial relations include multiple reflections while dealing with total fields. Calculation example is presented for a special case of isotropic-biaxial-isotropic system, which should be the foundation of further research and the design of birefringent thin film device.

Key words thin film; birefringent; Fresnel coefficients; phase relations

引 言

柱状结构的薄膜具有各向异性的光学性质, 此类薄膜的制备及其应用研究已经引起了广泛重视^[1~3]。对于这些器件的理论分析和设计, 其光谱性质的计算是非常重要的。随着光学薄膜沉积手段的发展, 已经制备出了双折射薄膜^[2,3]。为了充分利用薄膜的双折射特性, 首先必须深入了解光线在双折射分层介质界面及内部的传播特性。张伟等^[4]计算了具有柱状结构的光学薄膜在不同填充密度下的各向异性折射率分布规律。利用 Maxwell 方程组电磁场的边界连续条件, HOLMES 等人^[5]理论分析了双折射薄膜的一个主轴垂直于入射面情况下光波在双折射多层薄膜内的传播。BERREMAN^[6]和 HODGKINSON 等^[7]采用 4×4 矩阵方法分析光波在各向异性媒质中的传播过程。BERREMAN 等人给出的计算方法是严格的, 考虑了电磁场与媒质的相互作用, 并且考虑了界面处的多点反

射, 但是该方法对于矩阵元及矩阵的本征值的计算相当复杂。

具有柱状结构的双轴各向异性薄膜是一类重要的双折射薄膜, 它可以用来设计许多新型的薄膜器件^[8]。作者在 HODGKINSON 等人^[7]的基础上, 采用电磁场的矩阵分析方法对其反射系数、透射系数和相位关系进行了理论分析, 并给出了数值计算实例。该方法比传统的计算方法更简洁有效, 为此类双折射薄膜器件的设计提供理论依据。

1 理论分析

双轴光学薄膜的 3 个相互垂直的材料折射率主轴用 1, 2, 3 来表示, 对应的物理参量用下标 1, 2, 3 表示, 正(负)号分别表示光波沿正(反)方向传播, 下标 c 和 s 分别表示入射媒质和基底。坐标系 $x-y-z$ 为实验坐标系, 即光线传播的坐标系。两者的转换关系表述为: 首先将 1 平行于 x 轴, 将 2 平行于 y 轴, 将 3 平行于 z 轴, 然后将主坐标系绕 x 轴旋转 η 角, 再绕 z 轴旋转 ϕ 角, 最后将主坐标系绕 x 轴旋转 ξ 角。单色平面波在双折射薄膜的入射面为 $x-y$ 平面, $y-z$ 平面为薄膜与入射和出射媒质的界面, 在薄膜内部有 4 个偏振光平面波。

作者简介: 王建国 (1978-), 男, 博士研究生, 现从事光学薄膜的设计与制备工艺的研究。

* 通讯联系人。E-mail: jidsha@opfilm.com

收稿日期: 2004-09-02 收到修改稿日期: 2004-10-19

对于波矢面来说,都遵守斯涅尔定律,即 $\beta = n \sin \theta$ 对于各个波是一样的,而波的传播方向角 θ 一般是不同的,同样,有效折射率 n 也是不尽相同的。定义 $\alpha = n \cos \theta$ 则 $n = (\alpha^2 + \beta^2)^{1/2}$ 以及 $\theta = \sin^{-1}(\beta/n)$ 。

根据麦克斯韦电磁波方程得:

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & \beta \\ 0 & 0 & -\alpha \\ -\beta & \alpha & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{bmatrix} = z_0 \begin{bmatrix} H_x \\ H_y \\ H_z \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$-z_0 \begin{bmatrix} 0 & 0 & \beta \\ 0 & 0 & -\alpha \\ -\beta & \alpha & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_x \\ H_y \\ H_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \epsilon_{xx} & \epsilon_{xy} & \epsilon_{xz} \\ \epsilon_{yx} & \epsilon_{yy} & \epsilon_{yz} \\ \epsilon_{zx} & \epsilon_{zy} & \epsilon_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{bmatrix} \quad (2)$$

由(1)式和(2)式可以得到6个方程,其中两个为:
 $E_x = -(\epsilon_{xy}E_y + \epsilon_{xz}E_z + z_0H_z)/\epsilon_{xx}$ 以及 $H_x = (\beta/z_0)E_{z0}$
 式中, $z_0 = (\mu_0/\epsilon_0)^{1/2}$ 表示真空中的电磁波阻抗, E_x, E_y, E_z 分别为 x, y, z 方向的电场分量。由于 E_x 和 H_x 是垂直于界面,一般在计算能流的时候才用到,由其它几个电磁场分量可得到下面的本征方程:

$$\begin{bmatrix} -\frac{\beta\epsilon_{xy}}{\epsilon_{xx}} & z_0 - \frac{z_0\beta^2}{\epsilon_{xx}} & -\frac{\beta\epsilon_{xz}}{\epsilon_{xx}} & 0 \\ \frac{\epsilon_{yy}}{z_0} - \frac{\epsilon_{xy}^2}{z_0\epsilon_{xx}} & -\frac{\beta\epsilon_{xy}}{\epsilon_{xx}} & \frac{\epsilon_{yz}}{z_0} - \frac{\epsilon_{xy}\epsilon_{xz}}{z_0\epsilon_{xx}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -z_0 \\ -\frac{\epsilon_{yz}}{z_0} + \frac{\epsilon_{xy}\epsilon_{xz}}{z_0\epsilon_{xx}} & \frac{\beta\epsilon_{xz}}{\epsilon_{xx}} & \frac{\beta^2}{z_0} + \frac{\epsilon_{xz}^2}{z_0\epsilon_{xx}} - \frac{\epsilon_{zz}}{z_0} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_y \\ H_z \\ E_z \\ H_y \end{bmatrix} = \alpha \begin{bmatrix} E_y \\ H_z \\ E_z \\ H_y \end{bmatrix} \quad (3)$$

定义(3)式的系数矩阵为辅助矩阵 L , 基本场的向量形式为 $F = [E_y \ H_z \ E_z \ H_y]^T$, 则(3)式简化为: $LF = \alpha F$ 。通过求解 L 的本征值可得到场矩阵 F 和关于本征值的 α 矩阵:

$$F = \begin{bmatrix} E_{y1}^+ & E_{y1}^- & E_{y2}^+ & E_{y2}^- \\ H_{z1}^+ & H_{z1}^- & H_{z2}^+ & H_{z2}^- \\ E_{z1}^+ & E_{z1}^- & E_{z2}^+ & E_{z2}^- \\ H_{y1}^+ & H_{y1}^- & H_{y2}^+ & H_{y2}^- \end{bmatrix}, \alpha = \begin{bmatrix} \alpha_1^+ & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \alpha_1^- & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \alpha_2^+ & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \alpha_2^- \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$R = \begin{bmatrix} |r_{11}|^2 |p_1^- p_1^+| & |r_{12}|^2 |p_1^- p_2^+| & |t_{13}|^2 |p_1^- p_3^-| & |t_{14}|^2 |p_1^- p_4^-| \\ |r_{21}|^2 |p_2^- p_1^+| & |r_{22}|^2 |p_2^- p_2^+| & |t_{23}|^2 |p_2^- p_3^-| & |t_{24}|^2 |p_2^- p_4^-| \\ |r_{31}|^2 |p_3^+ p_1^+| & |r_{32}|^2 |p_3^+ p_2^+| & |r_{33}|^2 |p_3^+ p_3^-| & |r_{34}|^2 |p_3^+ p_4^-| \\ |r_{41}|^2 |p_4^+ p_1^+| & |r_{42}|^2 |p_4^+ p_2^+| & |r_{43}|^2 |p_4^+ p_3^-| & |r_{44}|^2 |p_4^+ p_4^-| \end{bmatrix} \quad (9)$$

上述参量是基于实验坐标系, x 方向的能流密度表达式为: $p_i^j = \text{Re}(E_{yi}^j H_{zi}^j - E_{zi}^j H_{yi}^j) / 2$ 式中, j 表示土

双轴薄膜中的4个平面波是薄膜内部多次反射和透射的结果,每一个波可以用基波和复系数的乘积表示。将这些场系数表示为 $a = [a_1^+ \ a_1^- \ a_2^+ \ a_2^-]^T$, 则经过界面的总场的场向量可以表示为:

$$m = \begin{bmatrix} E_y \\ H_z \\ E_z \\ H_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1^+ E_{y1}^+ + a_1^- E_{y1}^- + a_2^+ E_{y2}^+ + a_2^- E_{y2}^- \\ a_1^+ H_{z1}^+ + a_1^- H_{z1}^- + a_2^+ H_{z2}^+ + a_2^- H_{z2}^- \\ a_1^+ E_{z1}^+ + a_1^- E_{z1}^- + a_2^+ E_{z2}^+ + a_2^- E_{z2}^- \\ a_1^+ H_{y1}^+ + a_1^- H_{y1}^- + a_2^+ H_{y2}^+ + a_2^- H_{y2}^- \end{bmatrix} \quad (5)$$

在薄膜中的某一点的总场由场矩阵 F 和场矢量 a 决定,有 $Fa = m$, 即场矩阵是将薄膜中某一点的场系数矩阵转化为该点的总场的场向量。

定义相位矩阵 A_d 来联系不同位置的场系数之间的相位关系:

$$A_d = \begin{bmatrix} e^{-i\phi_1^+} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & e^{-i\phi_1^-} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & e^{-i\phi_2^+} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e^{-i\phi_2^-} \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中, $\phi_{1,2}^\pm = k\alpha_{1,2}^\pm d$, k 为波数, d 为薄膜厚度。场矩阵 F 和相位矩阵 A_d 的物理含义可以得到双折射薄膜的特征矩阵 $M = FA_d F^{-1}$ 。定义系统矩阵 A 来表示整个薄膜体系: $A = F_c^{-1} M F_s$ 。式中, F_c 为入射媒质的场矩阵, F_s 为基底的场矩阵, 则 $a_c = Aa_s$ 。因而有:

$$\begin{bmatrix} E_{cy}^+ \\ E_{cy}^- \\ E_{cz}^+ \\ E_{cz}^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} & A_{14} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} & A_{24} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} & A_{34} \\ A_{41} & A_{42} & A_{43} & A_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{sy}^+ \\ E_{sy}^- \\ E_{sz}^+ \\ E_{sz}^- \end{bmatrix} \quad (7)$$

将上述矩阵方程进行整理,改写成:

$$\begin{bmatrix} E_{cy}^- \\ E_{cz}^- \\ E_{sy}^+ \\ E_{sz}^+ \end{bmatrix} \equiv r \begin{bmatrix} E_{cy}^+ \\ E_{cz}^+ \\ E_{sy}^- \\ E_{sz}^- \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中,矩阵 r 称为中间矩阵,则包含反射率和透射率的矩阵 R 可写为:

$i = 1, 2, 3, 4$

从麦克斯韦方程和物质方程,可以得到具有柱状

结构的双折射薄膜的菲涅耳方程:

$$[n_1^2 \cos^2 \phi + n_2^2 \sin^2 \phi] n^2 + 2\beta \cos \phi \sin \phi (n_1^2 - n_2^2) n + \beta^2 (n_1^2 \sin^2 \phi + n_2^2 \cos^2 \phi) - n_1^2 n_2^2 (n^2 + \beta^2 - n_3^2) = 0 \quad (10)$$

式中, ϕ 是柱状角, n_1, n_2, n_3 是主折射率, 则 TM 波和 TE 波的有效折射率分别为:

$$n_p = - \left[\left(1 - \frac{n_{p0}^2}{n_1^2} \left(\frac{n_{p0}^2}{n_2^2} - 1 \right) \right)^{1/2} \beta + n_{p0}^2 \left(\frac{1}{n_{p0}^2} - \frac{\beta^2}{n_1 n_2^2} \right)^{1/2} \right]^{-1/2}$$

$$n_s = (n_{s0} - \beta^2)^{1/2} \quad (11)$$

式中, $n_{p0} = \left(\frac{\sin^2 \phi}{n_1^2} + \frac{\cos^2 \phi}{n_2^2} \right)^{-1/2}$, $n_{s0} = n_3$ 为正入射时

TM 波和 TE 波的折射率。因而光波通过薄膜后的位相变化为:

$$\delta = 2\pi (n_p - n_s) d / \lambda \quad (12)$$

这样, 光波在具有柱状结构的双折射薄膜中的传输特性的分析就实现了。

2 计算结果和分析

当蒸发束流倾斜沉积到基底时, 形成柱状结构的双轴各向异性薄膜^[9]。其折射率主轴系的定义为: 折射率主轴 1 沿着薄膜柱状结构的径向方向, 折射率主轴 2 在沉积平面内, 垂直于折射率主轴 1, 折射率主轴 3 则垂直于沉积平面, 见图 1。图中, θ 为入射面, ϕ 为柱状面, 1~3 为折射率主轴, x, y, z 为坐标轴。蒸发沉积的斜入射角与薄膜的柱状角以及主折射率有如下的经验关系^[8]: $\phi = \tan^{-1}(E_1 \tan \theta_v)$, $n_1 = A_0 + A_2 \theta_v^2$, $n_2 = B_0 + B_2 \theta_v^2$, $n_3 = C_0 + C_2 \theta_v^2$ 。式中, $E_1, A_0, A_2, B_0, B_2, C_0, C_2$ 为经验常量 (与膜料的选择有关), θ_v 为薄膜沉积的斜入射角。

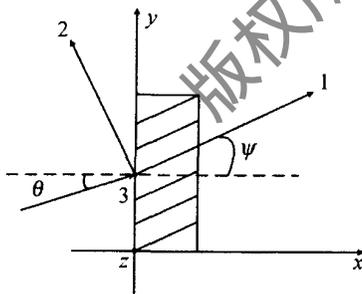


Fig 1 Schematic of the principal dielectric axes and the laboratory systems

选取氧化钽膜料, 沉积的斜入射角为 $\theta_v = 50^\circ$, 则氧化钽薄膜的主折射率 $n_1 = 1.8195$, $n_2 = 1.7297$, $n_3 = 1.7782$ 坐标变换的 3 个方位角为 $\eta = 0$, $\phi = 21.6^\circ$, $\xi = 0$ 其它参量设置如下: $\lambda_0 = 550\text{nm}$, 膜厚 $d = 600\text{nm}$, 入射媒质 (空气) 的折射率 $n_c = 1$, 基片的折射率为 $n_g = 1.52$ 。图 2 中给出了 T_{pp} 和 T_{ss} 随入射角 θ 变化的情况, 可以看到, 随着 θ 的增加, s 分量的透射率 T_{ss} 单调下降, 而 p 分量的透射率 T_{pp} 先上升到 100%,

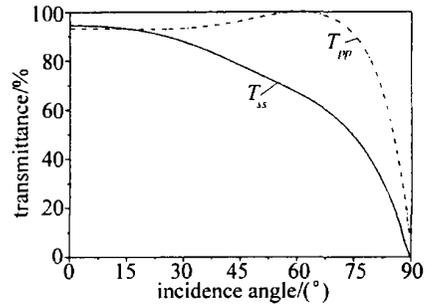


Fig 2 Transmittance of the birefringent thin film under different incidence angles

然后又迅速下降。在 $\theta = \theta_B$ (θ_B 为布儒斯特角) 时, $T_{pp} = 100\%$ 。在这个例子中, 由于薄膜的沉积面和光线的入射平面是重合的 ($\xi = 0$), 电磁场的本征矢量是解耦合的, 因而 TM 波和 TE 波也是解耦合的, 即 $T_{ps} = T_{sp} = 0$, $R_p = R_s = 0$ 。图 3 中给出了入射角 $\theta = 30^\circ$ 时, s

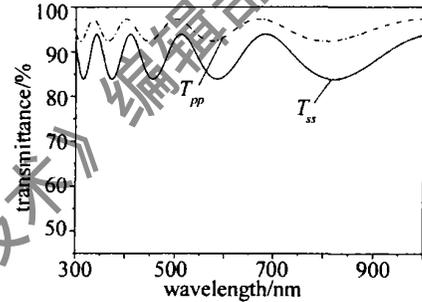


Fig 3 Transmittance of the birefringent thin film with different wavelength

分量透射曲线, 明显看到薄膜的干涉现象, 且 $T_{pp} > T_{ss}$ 。图 4 中则给出了双折射薄膜在入射波长为 550nm 时, 不同入射角下的 TM 波和 TE 波相位差曲线。可以看到, 随着入射角的增大, 相位差也逐渐变大。但是入射角存在一个拐点 ($\theta = 63^\circ$), 当入射角大于该角度时, 相位差反而减小。这些计算方法对于研究斜入射角沉积的各向异性薄膜是非常有用的。

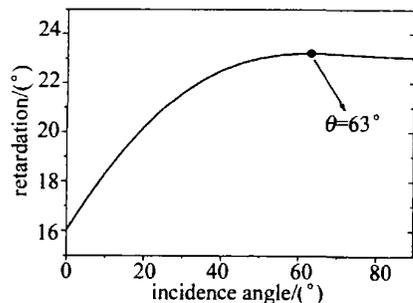


Fig 4 Phase difference between TM-mode and TE-mode of the birefringent thin film under different incidence angles

3 结论

研究了光波在具有柱状结构的双轴各向异性薄膜中的反射系数、透射系数和相位关系等光学性质, 这些关系可以推广到一般的各向异性的多层膜系统。给出

(下转第 607 页)

面,由于光放大器的平均增益受输入光的平均功率、偏振态等影响,当一个光脉冲在光纤环内循环并多次经过放大器而其偏置等状态可能发生改变时,它每次经历的增益可能不同,从而使脉冲在环内经历的净增益(或损耗)发生变化,造成输出脉冲间的幅度存在差异。由于光脉冲在光纤中传输时偏振态等的变化具有的随机性,这种脉冲幅度的变化不像无源循环式复制器的输出那样具有明显的规律性。另一方面光放大器内部的非线性光学过程可能造成复制脉冲的波形失真^[6]。在放大器工作于饱和状态下时,其瞬时增益受增益介质增益饱和作用的影响会随着脉冲的输入发生快速变化,从而使脉冲的不同部位经历不同增益,从而引起脉冲产生较大的非线性畸变。对超短脉冲来说,光放大器内的其它非线性光学效应^[7],如载流子加热(CH)、谱烧孔(SHB)、双光子吸收(TPA)以及非线性折射率(NR)等,亦会引起脉冲波形失真。此外,放大器引入的光噪声逐渐积累也会引起输出信号信噪比的降低,这一效应对于长序列产生的影响更加显著^[3]。

以上问题,可采用多种技术加以控制和解决。例如,采用保偏光纤,可大大减小由于偏振态变化造成的输出信号的幅度波动。使放大器工作在小信号区域或用外加信号使其处于深度饱和状态^[8],可有效减小放大器瞬时增益变化引起的脉冲失真。以上不同方法往往会复制器的其它性能产生影响,因此,需要根据具体应用的要求综合加以考虑以实现最优化的设计。

4 结 论

综合考虑上述 3 种结构脉冲复制器的优缺点,作者认为:对于需要产生任意脉冲间隔或脉冲幅度分布的应用或对复制后脉冲的均匀性有很高要求的应用来说,树形光纤延迟脉冲复制器结构是最佳选择。由

于此结构在延时或功率分配上各路误差相互独立不会积累,因此,其输出的延迟误差将与每路的精度一致,其代价是相对较大的信号能量损耗。

若要利用无源器件产生幅度均匀的周期脉冲序列,则前馈式光纤延迟复制器结构可产生较大功率的脉冲序列,但耦合器的均匀性不为 0 会使得它们不严格等幅;同时由于各级光纤延迟的误差积累,使得这种级联结构延迟精确调整十分困难。相比之下,有源循环式光纤延迟脉冲复制器,在放大器引入的增益漂移、非线性失真与光噪声得到较好控制的情况下,可以产生重复周期严格准确、输出功率较大的光脉冲序列。

参 考 文 献

- [1] DENG K L, KANG K I, GLESK I *et al* Optical packet compressor for ultra-fast packet switched optical networks [J]. *Electron Lett* 1997, 33(14): 1237~1239.
- [2] 鄞 达, 李 铮, 陈宇晓. 光纤光脉冲分路——延迟器及其优化研究 [J]. *中国激光*, 2005, 32(2): 216~220.
- [3] PIEPER W, ESSELT M, GROSSKOPF G *et al* Investigation of crosstalk interference in a fiber loop optical buffer [J]. *Electron Lett* 1994, 30(5): 435~436.
- [4] HOLZLOHNER R, EREIFEJ H N, GRIGORYAN V S *et al* Experimental and theoretical characterization of a 40Gbit/s long-haul single-channel transmission system [J]. *IEEE J Lightwave Technol* 2002, 20(7): 1124~1131.
- [5] BUTTLER W T, HUGHES R J, KWAT P G *et al* Free space quantum-key distribution [J]. *Phys Rev*, 1998, A 57(4): 2379~2382.
- [6] AGRAWAL G P, OLSSON N A. Self phase modulation and spectral broadening of optical pulses in semiconductor laser amplifiers [J]. *IEEE J Q E*, 1989, 25(11): 2297~2306.
- [7] TANG J M, SHORE K A. Optical pulse propagation in semiconductor optical amplifiers at transparency [J]. *IEEE J Q E*, 1998, 34(7): 1263~1268.
- [8] SUN Y, SRIVASTAVA A K, BANERJEE S *et al* Error-free transmission of 32×2.5 Gbit/s DWDM channels over 125km using cascaded inline semiconductor optical amplifiers [J]. *Electron Lett* 1999, 35(10): 1863~1865.
- [4] 张 伟, 范剑英. 光学薄膜的各向异性折射率 [J]. *激光技术*, 1989, 13(3): 35~39.
- [5] HOLMES D A, FEUCHT D L. Electromagnetic wave propagation in birefringent multilayers [J]. *JO S A*, 1966, 56(12): 1763~1769.
- [6] BERREMAN D W. Optics in stratified and anisotropic media: 4 × 4 matrix formulation [J]. *JO S A*, 1972, A62(4): 502~510.
- [7] HODGKINSON I J, KASSAM S, WU Q H. Eigen-equations and compact algorithms for bulk and layered anisotropic optical media reflection and refraction at a crystal-crystal interface [J]. *J Comput Phys* 1997, 133(1): 75~83.
- [8] HODGKINSON I J, WU Q H. Birefringent thin films and polarizing elements [M]. Singapore: World Scientific Publishing, 1998. 255~323.
- [9] HODGKINSON I J, WU Q H, HAZEL J C. Empirical equations for the principal refractive indices and column angle of obliquely deposited films of tantalum oxide, titanium oxide, and zirconium oxide [J]. *Appl Opt* 1998, 37(13): 2653~2659.

(上接第 603 页)

了各向同性入射媒质-双轴各向异性膜层-各向同性基底薄膜系统的计算结果,证明该方法是一种高效可行的计算方法。利用双折射薄膜可以实现一些以前无法实现的光学功能,为薄膜器件设计和应用开拓了新的领域。

参 考 文 献

- [1] MOTOHRO T, TAGA Y. Thin film retardation plate by oblique deposition [J]. *Appl Opt* 1989, 28(13): 2466~2482.
- [2] HODGKINSON I J, WU Q H. Serial bilayer deposition of anisotropic thin films with enhanced linear birefringence [J]. *Appl Opt* 1999, 38(16): 3621~3625.
- [3] HODGKINSON I J, WU Q H. Birefringent thin-film polarizers for use at normal incidence and with planar technologies [J]. *A P L*, 1999, 74(13): 1794~1796.