

doi:10.3788/gzxb20144308.0831002

多层光变防伪膜的非均匀垂直偏振光反射特性

王安玲¹, 刘福平^{1,2}, 朱晓峰¹, 杨长春²

(1 北京印刷学院, 北京 102600)

(2 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029)

摘 要: 基于非均匀光波在导电介质中传播时其相移传播方向和振幅衰减方向的不一致性, 利用光波动方程的解由电磁场边界条件导出非均匀垂直偏振光在多层超薄金属膜与透明介质膜组合膜系中光波的传输递推公式. 为验证方法的可靠性, 给出了不同厚度金属膜防伪光变膜系的能量反射率算例, 并与现有算法进行对比, 结果表明: 两种算法得到的能量反射曲线的分布特征具有很好的相似性, 但本文算法表现出金属膜具有强的吸收特性和窄带反射效应.

关键词: 多层防伪光变膜; 非均匀波; 超薄金属膜; 垂直偏振波; 反射特性

中图分类号: O484.41; O441.4

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2014)08-0831002-6

The Reflection Properties of Multilayer Anti-counterfeiting Optical films for Vertical-polarized Wave

WANG An-ling¹, LIU Fu-ping^{1,2}, ZHU Xiao-feng¹, YANG Chang-chun²

(1 Beijing Institute of Graphic Communication, Beijing 102600, China)

(2 Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract: Based on the difference of phase-shift direction and amplitude attenuation direction when the optical wave propagates in conductive medium, with the solution of the wave equation and the boundary conditions of optical wave at the interface of the media, the recurrence formula of the vertical-polarized inhomogeneous optical wave in the multilayer film were derived. In order to examine the reliability of this method, the light energy reflectivity for an 11-layer combinational film was computed, and the compare of calculating results with the existing calculating method was given. The result shows that the reflection properties of light energy reflectivity get good consistency, but the calculated result with this method displays that metal film has stronger absorbing properties and reflection effective of narrow band.

Key words: Multilayer anti-counterfeiting optical film; Inhomogeneous wave; Razor-thin metal film; Vertical polarized wave; Reflection property

OCIS Codes: 310.0310; 310.6860; 310.4165; 260.3910; 260.2110

0 引言

变色防伪油墨印刷已逐渐成为现代社会防伪领域的重要组成部分和手段^[1-6], 由于变色油墨印刷品具有动态变色效果, 有很好的隐蔽性, 当视角改变时可以很明显地看到原来图案的颜色发生了变化, 具有用眼就能识别的直观性^[7-13], 彩色复印机及电子扫描仪等不能对其进行复制. 又因油墨制作工艺复杂, 投资大, 很难

仿造, 具有很强的防伪效果^[7-13], 因此变色油墨防伪印刷技术在钞票、支票、债券、股票等要求高的有价证券的防伪上得到重要应用. 为提高光学薄膜的窄带高反作用, 目前多采用超薄金属膜与介质膜组成多层组合膜系^[1-2, 6-9], 在这种膜系中含有高导电性的金属薄膜. 由于光波在导电介质中传播时, 其波矢量变为复波矢量^[14-20], 在大多数情况下振幅衰减方向与相移传播方向是不一致的. 近年来人们开始关注非均匀波的传

基金项目: 北京印刷学院校级重点资助项目 (No. E-a-2013-19, E-a-2012-31) 和北京市属市管高等学校人才强教计划资助项目 (No. PHR201107145) 资助

第一作者: 王安玲 (1963-), 女, 副教授, 硕士, 主要研究方向为电磁波传播理论、量子光学与场的数值模拟计算. Email: wanganling@bigc.edu.cn

收稿日期: 2013-11-05; **录用日期:** 2014-02-20

<http://www.photon.ac.cn>

播特性,不仅给出了光波在导电界面反射与折射时振幅衰减方向与相移传播方向不一致的图示,还给出了相移常量和衰减常量方向之间的定量关系^[17-20],文献^[17]利用等效相移常量和衰减常量的方法给出了等效施耐尔公式;而文献^[18,20]等直接利用复波矢给出了施耐尔公式,在波的传播路径图示方法上也有差别,通过对非均匀光波在导电介质中传播的研究,确立了相移常量和衰减常量方向的定量关系.尽管目前所使用的防伪膜系的金属膜很薄(2~8 nm),但由于金属电导率在 10^6-10^9 s/m的量级范围,而介质膜如二氧化硅的电导率约为 2.8×10^{-2} s/m,二者差异巨大,因此金属膜对光在膜系中的传播有很大影响.目前对这种超薄金属膜与介质膜系反射特性的研究,大多是对金属膜作了简化处理,在光垂直入射条件下给出了光在金属膜中的传播矩阵,实际计算时忽略金属膜的相位厚度,通过改变介质膜厚度的办法补偿金属膜的相位厚度影响^[1,8],但光在非垂直入射条件下,这种处理办法给计算准确度带来较大误差.另一方面由于目前对非均匀波传播特性的研究有限致使有关导电介质中光波反射特征的研究几乎都是基于均匀波的,认为反射与折射光波的相移常量和振幅衰减常量方向是相同的,并没有考虑非均匀波的问题,在计算反射系数方面并不能考察金属膜的吸收作用.

本文考虑一般非均匀波的传播特性,导出了金属膜与介质膜混合膜系光波传播方程,给出实际算例,对光波在超薄金属膜中的传播既考虑了波衰减及衰减方向又考虑了其传播特性,该方法不仅可用于含金属膜系反射特征研究还可用于考察金属膜(厚度、光的入射角度等)对膜系反射特征影响的研究.

1 非均匀波的施耐尔公式

当光在两导电介质中传播时,由于导电介质相移常量向量 α 和振幅衰减常量向量 β 的方向不一致,所以在导电层中传播的光波一般为非均匀波,存在相移传播和振幅衰减两个方向,光波束的传播在相移传播的方向上.而振幅衰减与介质有关,其方向仅表示光波的衰减方向,不是光波的传播方向.在光波射线图示中,波的衰减方向伴随光波波束的传播而存在,所以采用图1的方法表示空间传播光波在A、B、C、D点 α 、 β

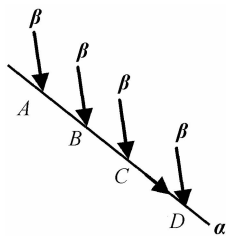


图1 相移常量与振幅衰减常量方向的关系

Fig. 1 The direction relationship of phase constant and amplitude attenuation constant

的方向关系.

设入射波为非均匀平面波^[17],相移常量向量是 α_1 ,其方向与界面法线夹角为 ψ_1 ,衰减常量向量为 β_1 ,其方向与界面法线夹角为 φ_1 , $\epsilon_1, \mu_1, \sigma_1$ 分别为介质1的介电常量、磁导率和电导率, $\epsilon_2, \mu_2, \sigma_2$ 为介质2的介电常量、磁导率和电导率.反射非均匀平面光波相移常量为 α_r ,与界面法线夹角为 ψ_r ,衰减常量为 β_r ,与界面法线夹角为 φ_r .折射波相移常量为 α_2 ,与法线夹角为 ψ_2 ,衰减常量为 β_2 ,与法线夹角为 φ_2 .则入射波复波矢为 $k_1 = \alpha_1 - i\beta_1$,反射波复波矢为 $k_r = \alpha_r - i\beta_r$,折射波波矢为 $k_2 = \alpha_2 - i\beta_2$;i为虚数单位, n 为反射界面的单位法向量,其中相移常量、衰减常量向量的大小为

$$\alpha_1 = \omega \left\{ \frac{\mu_1 \epsilon_1}{2} \left[\left(1 + \frac{\sigma_1^2}{\omega^2 \epsilon_1^2} \right)^{1/2} + 1 \right] \right\}^{1/2} \quad (1)$$

$$\beta_1 = \omega \left\{ \frac{\mu_1 \epsilon_1}{2} \left[\left(1 + \frac{\sigma_1^2}{\omega^2 \epsilon_1^2} \right)^{1/2} - 1 \right] \right\}^{1/2} \quad (2)$$

$$\alpha_2 = \omega \left\{ \frac{\mu_2 \epsilon_2}{2} \left[\left(1 + \frac{\sigma_2^2}{\omega^2 \epsilon_2^2} \right)^{1/2} + 1 \right] \right\}^{1/2} \quad (3)$$

$$\beta_2 = \omega \left\{ \frac{\mu_2 \epsilon_2}{2} \left[\left(1 + \frac{\sigma_2^2}{\omega^2 \epsilon_2^2} \right)^{1/2} - 1 \right] \right\}^{1/2} \quad (4)$$

ω 为光波的角频率.

由在 $z=0$ 处电磁场切向分量连续可得

$$\alpha_1 \sin \psi_1 = \alpha_2 \sin \psi_2, \beta_1 \sin \varphi_1 = \beta_2 \sin \varphi_2 \quad (5)$$

式(5)为非均匀光波的施耐尔公式,与理想光导介质中施耐尔公式的不同之处是增加了第二式.

2 多层光变防伪膜的非均匀垂直偏振波场分布

在介质中传播光波的亥姆赫兹方程为

$$\nabla^2 \mathbf{E} + k^2 \mathbf{E} = 0, \nabla^2 \mathbf{H} + k^2 \mathbf{H} = 0 \quad (6)$$

式中 $k^2 = \omega^2 \epsilon \mu - i\omega \mu \sigma$, \mathbf{E}, \mathbf{H} 分别为光波的电磁场分布.设介质为均匀层状介质,则在第 j 层介质层的电磁场分布为(不考虑时间因子)

$$\mathbf{E}_j = \mathbf{E}_j^+ e^{-i\mathbf{k}_j^+ \cdot \mathbf{r}} + \mathbf{E}_j^- e^{-i\mathbf{k}_j^- \cdot \mathbf{r}} \quad (7)$$

$$\mathbf{H}_j = \mathbf{H}_j^+ e^{-i\mathbf{k}_j^+ \cdot \mathbf{r}} + \mathbf{H}_j^- e^{-i\mathbf{k}_j^- \cdot \mathbf{r}} \quad (8)$$

式中 \mathbf{k}_j 表示光波在第 j 层导电介质的光波的复波矢向量, \mathbf{r} 为空间任意一点的位矢,上标正号表示波矢与 z 轴正向夹角小于 90° 方向传播的波;上标的负号表示波矢与 z 轴正向夹角大于 90° 方向传播的波(第 j 介质层中坐标方向与波传播方向关系见图2).

$$\mathbf{H}_j^+ = \frac{1}{k_j} \sqrt{\frac{\epsilon_j}{\mu_j}} \mathbf{k}_j^+ \times \mathbf{E}_j^+ \quad (9)$$

$$\mathbf{H}_j^- = \frac{1}{k_j} \sqrt{\frac{\epsilon_j}{\mu_j}} \mathbf{k}_j^- \times \mathbf{E}_j^- \quad (10)$$

光波在第 j 层与第 $j+1$ 层导电界面电磁场切向分量连续条件可写为

$$\mathbf{n} \times \mathbf{E}_j = \mathbf{n} \times \mathbf{E}_{j+1}, \mathbf{n} \times \mathbf{H}_j = \mathbf{n} \times \mathbf{H}_{j+1} \quad (11)$$

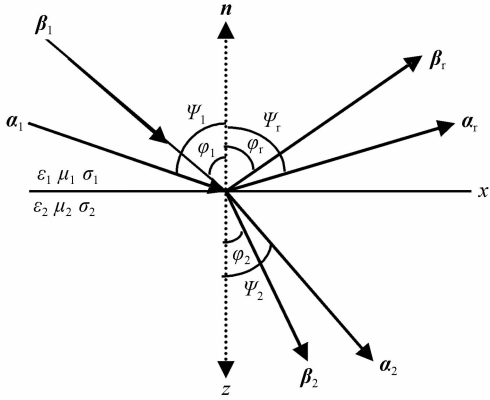


图2 非均匀光波在导电界面的反射与折射

Fig. 2 The reflection and refraction of inhomogeneous optical wave at an interface between two conductive media

为便于研究在直角坐标系中复波矢向量的方向表示为

$$\mathbf{k}_j = \alpha_j \mathbf{e}_x - i\beta_j \mathbf{e}_z = (\alpha_j \sin \psi_j - i\beta_j \sin \varphi_j) \mathbf{e}_x + (\alpha_j \cos \psi_j - i\beta_j \cos \varphi_j) \mathbf{e}_z \quad (12)$$

式中 \mathbf{e}_x 、 \mathbf{e}_z 分别为 x 和 z 方向的单位矢量. 在 $z=z_j$ 界面处, 由电磁场边界条件方程式(11)得

$$E_j^+ e^{-ik_{jx}x - ik_{jz}z} + E_j^- e^{-ik_{jx}x + ik_{jz}z} = E_{j+1}^+ e^{-ik_{j+1,x}x - ik_{j+1,z}z} + E_{j+1}^- e^{-ik_{j+1,x}x + ik_{j+1,z}z} \quad (13)$$

$$\xi_j^+ E_j^+ e^{-ik_{jx}x - ik_{jz}z} + \xi_j^- E_j^- e^{-ik_{jx}x + ik_{jz}z} = \xi_{j+1}^+ E_{j+1}^+ e^{-ik_{j+1,x}x - ik_{j+1,z}z} + \xi_{j+1}^- E_{j+1}^- e^{-ik_{j+1,x}x + ik_{j+1,z}z} \quad (14)$$

$$\text{式中 } \xi_j^+ = \xi_j^+ = \frac{1}{\sqrt{\alpha_j - i\beta_j}} \sqrt{\frac{\epsilon_j}{\mu_j}} (\mathbf{k}_j^+ \cdot \mathbf{n}),$$

$$\xi_j^- = \frac{1}{\sqrt{\alpha_j - i\beta_j}} \sqrt{\frac{\epsilon_j}{\mu_j}} (\mathbf{k}_j^- \cdot \mathbf{n}) = -\xi_j^+.$$

又因为 $k_{jx} = k_{j+1,x}$, 所以上边界条件可以写为

$$\mathbf{M}_j \begin{pmatrix} E_j^+ \\ E_j^- \end{pmatrix} = \mathbf{N}_j \begin{pmatrix} E_{j+1}^+ \\ E_{j+1}^- \end{pmatrix} \quad (15)$$

$$\mathbf{M}_j = \begin{bmatrix} e^{-ik_{jz}z} & e^{ik_{jz}z} \\ \eta_j e^{-ik_{jz}z} & -\eta_j e^{ik_{jz}z} \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$\mathbf{N}_j = \begin{bmatrix} e^{-ik_{j+1,z}z} & e^{ik_{j+1,z}z} \\ \eta_{j+1} e^{-ik_{j+1,z}z} & -\eta_{j+1} e^{ik_{j+1,z}z} \end{bmatrix} \quad (17)$$

式方程(15)~(17)构成了介质膜中各层中场的递推关系.

设光导薄膜共有 $J+1$ 层组成, 考虑 $J+1$ 层导光介质, 由于在 $J+1$ 层中 z 可以取无限远, 无反射场, 则 $E_{J+1}^- = 0$, 有

$$\begin{pmatrix} E_1^+ \\ E_1^- \end{pmatrix} = \mathbf{Q} \begin{pmatrix} E_{J+1}^+ \\ E_{J+1}^- \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Q_{11} E_{J+1}^+ \\ Q_{21} E_{J+1}^+ \end{pmatrix} \quad (18)$$

式中

$$\mathbf{Q} = \mathbf{M}_1^{-1} \mathbf{N}_1 \mathbf{M}_2^{-1} \mathbf{N}_2 \cdots \mathbf{M}_j^{-1} \mathbf{N}_j \cdots \mathbf{M}_J^{-1} \mathbf{N}_J = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} \\ Q_{21} & Q_{22} \end{bmatrix} \quad (19)$$

由此可得则 $E_{J+1}^+ = E_1^+ / Q_{11}$, $E_1^- = Q_{21} E_1^+ / Q_{11}$, 则在第 j 层的场分布为

$$\begin{pmatrix} E_j^+ \\ E_j^- \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_1^+ Q_{j,11} / Q_{11} \\ E_1^+ Q_{j,21} / Q_{11} \end{pmatrix} \quad (20)$$

式中 $\mathbf{Q}_j = \mathbf{M}_j^{-1} \mathbf{N}_j \cdots \mathbf{M}_1^{-1} \mathbf{N}_1$, 每层中的场均可用第 1 层中的入射场 E_1^+ 表示.

3 多层防伪光变膜能量反射率

利用式(20)可以计算各层的反射透射系数及多层膜总的反射透射系数, 其中多层膜的总的振幅反射系数为

$$C_r = \frac{E_1^-}{E_1^+} = \frac{Q_{21}}{Q_{11}} \quad (21)$$

多层膜总的振幅透射系数为

$$t = \frac{E_{J+1}^+}{E_1^+} = \frac{1}{Q_{11}} \quad (22)$$

多层膜总的光能反射率为

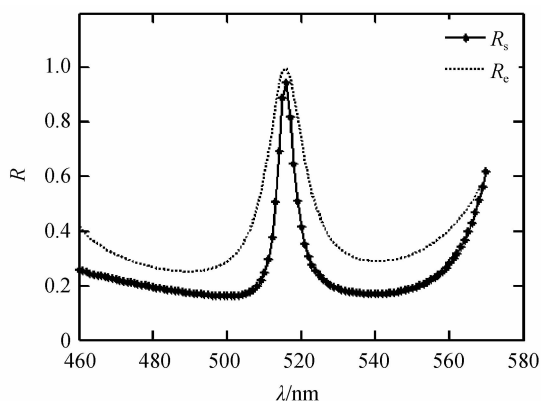
$$R = r \cdot r^* = \frac{Q_{21}}{Q_{11}} \cdot \left(\frac{Q_{21}}{Q_{11}} \right)^* \quad (23)$$

4 算例分析

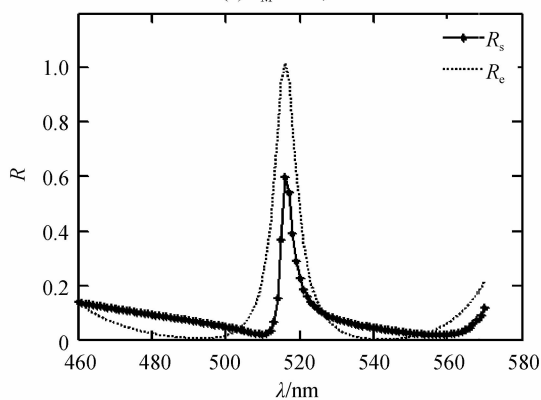
一般情况下关于介质参量多以折射率形式给出^[21-22], 对一般非磁性光导介质有 $\mu \approx \mu_0$, 则光的折射率定义为 $n = \sqrt{\epsilon_r} = \sqrt{\epsilon/\epsilon_0}$, 因复介电常量 $\epsilon^* = \epsilon - i\sigma/\omega$, 则复折射率为 $n = \sqrt{\epsilon^*/\epsilon_0} = \sqrt{\epsilon/\epsilon_0 - i\sigma/\omega\epsilon_0} = \xi - i\tau$, 由复折射率可计算介质的介电常量与折射率.

通过一个 11 层对称膜系算例对该计算方法进行考察, 膜系为: $A/d_M M_x L(LH)^p(LH)^p y L d_N N/G$, 其中 A、M、L、H、N、G 依次分别表示最上层介质膜、铬膜、低折射率介质膜、高折射率介质膜、银膜、最下层介质膜; d_M 、 d_N 为铬膜、银膜的厚度; 中心波长 $\lambda_0 = 520$ nm, 高低折射率介质膜的厚度为中心波长 λ_0 的倍数(均取 $\lambda_0/4$); x 、 y 为对 L 层引入的相位补偿因子; 膜系中指数因子 $P=2$. 介质膜 A、L、H、G 的折射率分别为 $n_A = 1.52$, $n_L = 1.32$, $n_H = 2.35$, $n_G = 1.52$; 铬膜复折射率^[21-22] $n_M = 2.91 - 3.33i$, 电导率 $\sigma_M = 7.752 \times 10^6$ s/m; 银膜的复折射率 $n_N = 0.13 - 3.07i$, 电导率 $\sigma_N = 6.06 \times 10^7$ s/m; 在图 3 中, 对 L 层引入相位补偿因子为 $x=0.93$, $y=0.76$ ^[1,8], 膜系取值为: $A/d_M M0.93L(LH)^2(LH)^2 0.76L d_N N/G$, 光波垂直入射, 铬膜取 3 个厚度值 $d_M = 2, 4, 7$ nm, 银膜厚度 $d_N = 100$ nm. 图 3 中曲线 R_e 为文献[1,8]计算方法的计算结果, R_s 为本文计算结果, 可以发现: 随着金属铬膜厚度的增加其总能量反射率 R_s 是逐渐减小的, 这是由于铬膜厚度增加膜系吸收能力的增强造成的, 是符合实际的, 本文算法已考虑了金属膜的吸收问题. 而利用现有算法^[1,8] 计算的 R_e 几乎不变, 这可能是由于原方法金属膜的近似处理造成, 并且算法并没有考虑金属膜对光的吸收作用. 从图 3 曲线可以发现 R_s 反射峰的频带宽度比 R_e 窄,

这说明该计算方法比现有计算方法具有更强的窄带反射效应. 这对设计防伪光变窄带高反膜有实际意义.



(a) $d_M=2\text{nm}, \psi=0^\circ$



(b) $d_M=7\text{nm}, \psi=0^\circ$

图3 不同方法中金属膜厚对能量反射率的影响
Fig. 3 The effects of the thickness of metallic film on energy reflectivity in different methods

图4为该11层膜系能量反射率峰值点随金属膜厚度的变化曲线,光波垂直入射.图5中整个膜系的透光率(为零)随入射角的变化,说明没有光透过厚的银膜,同时也说明金属膜对光具有强的吸收能力.图4中曲线 R_s 与 R_c 特征存在很大差别, R_s 明显反应出铬膜对光的吸收作用随铬膜厚度的增加而加强,当厚度达

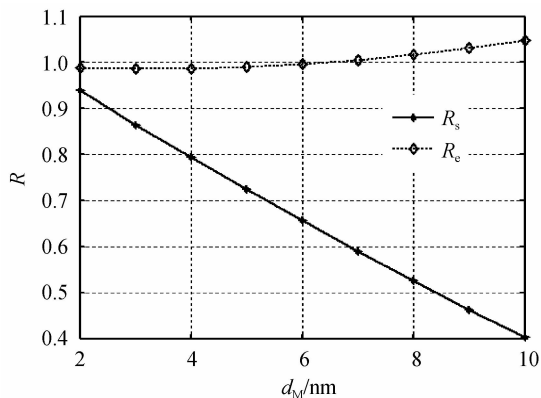


图4 膜系能量反射率随峰值点铬膜厚度的变化
Fig. 4 The energy reflectivity peak of combinational film varying with the thickness of metal film

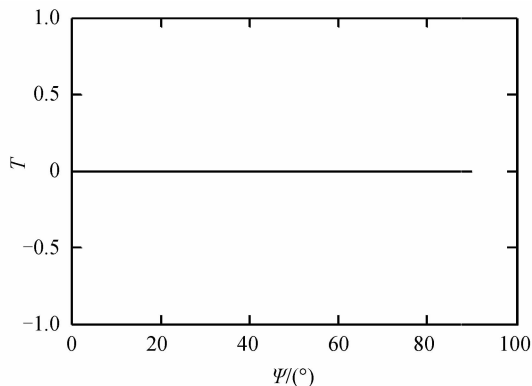
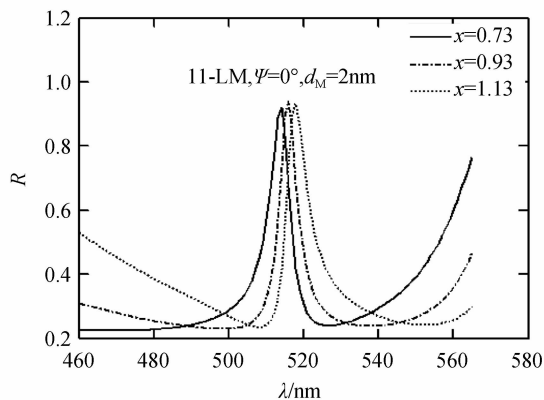


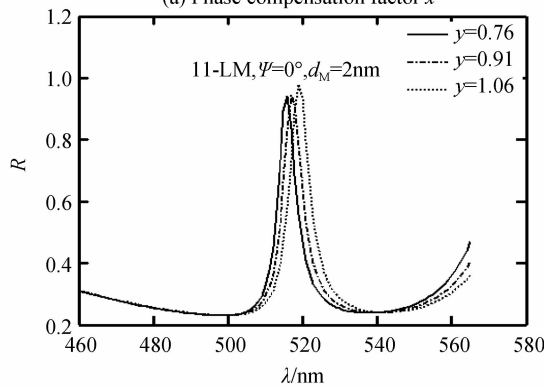
图5 膜系能量透射率($d_M=2\text{nm}$)
Fig. 5 Energy transmissivity of combinational film ($d_M=2\text{nm}$)

到 $d_M=10\text{nm}$ 时能量反射系数只有40%;而 R_c 曲线随铬膜厚度的增加有增大的趋势(这可能是由近似计算造成,且带来了计算误差)是不合理的.这个算例反映了铬膜厚度对膜系总能量反射率有重要影响,对光的吸收是不可忽视的.

图6为用本文方法计算的膜系相位厚度补偿因子对能量反射率的影响曲线,11层膜系中铬膜厚度



(a) Phase compensation factor x



(b) Phase compensation factor y

图6 本文算法中膜系相位厚度补偿因子对能量反射率的影响

Fig. 6 The effects of phase compensative factor on the energy reflectivity of combinational film with proposed method

$d_M=2\text{ nm}$,主波长 $\lambda=520\text{ nm}$.无论当上层L膜或下层L膜相位厚度补偿因子($x=0.73, 0.93, 1.13, y=0.76, 0.91, 1.06$)增加时,曲线峰值都右移,且峰值点大小有微小变化.图7的计算条件与图6完全相同,用文献[1,8]的简化计算方法得到,图中曲线右移幅度较大,且峰值几乎不变.这说明在设计反射膜时相位厚度补偿因子的选择对反射效果会有重要影响,只有选择恰当才会得到好的预期设计效果.

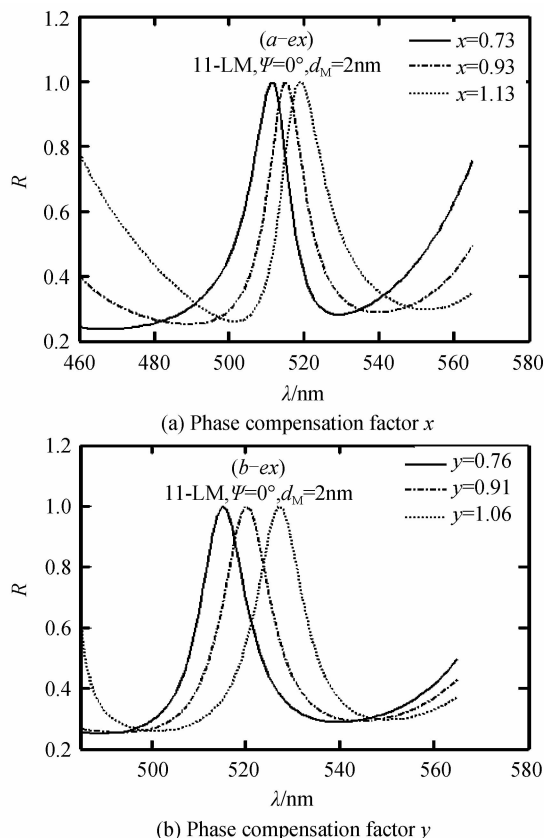


图7 文献[1,8]中膜系相位厚度补偿因子对能量反射率的影响

Fig.7 The effects of phase compensative factor on the energy reflectivity of combinational film with the method in Ref. [1,8]

图8表示了主波长 $\lambda=520\text{ nm}$ 时11层膜系中铬膜不同厚度下的能量反射率随入射角的变化曲线.铬膜变厚,能量反射率变小,曲线存在6个峰值,且峰值大小在 $\psi=53^\circ, 58^\circ$ 处变小,峰值点分别对应于入射角等于 $0^\circ, 37.6^\circ, 42.5^\circ, 53^\circ, 58^\circ, 90^\circ$ 的能量反射率,这说明在这几个反射角度可以看到同一色彩的反射光,即存在对主波长光的强反射.

图9表示了 $\psi=42.5^\circ$,当铬膜取不同厚度时11层膜系能量反射率随波长的变化曲线,波长在 $\lambda=480, 520, 575, 646\text{ nm}$ 出现了4个峰值,说明对于这种11层膜系在 $\psi=42.5^\circ$ 处尽管可以得到窄带高反现象,但仍

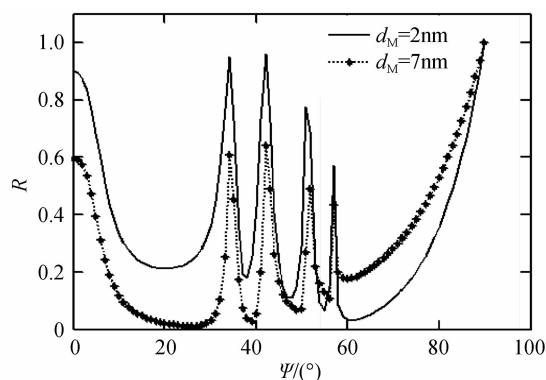


图8 膜系能量反射率随入射角的变化
Fig.8 The energy reflectivity curves of combinational film varying with incidence angle

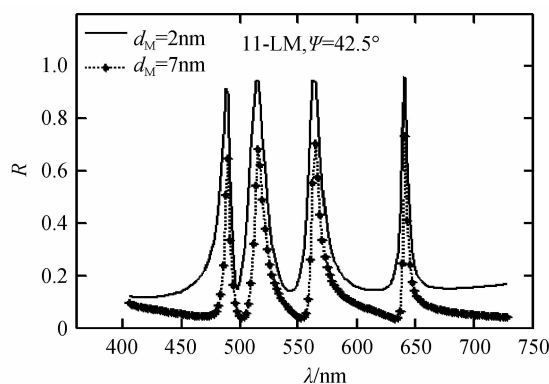


图9 膜系能量反射率随波长变化曲线
Fig.9 The energy reflectivity curves of 11-layer combinational film varying with wavelength of light 为四种波长的一种混合叠加色,该算例还显示随铬膜厚度的增加能量反射率变小,但反射光波带宽变窄.

4 结论

考虑非均匀光波相移传播方向和振幅衰减方向的不一致性,利用光波的电磁场边界条件导出了非均匀垂直偏振光波在多层超薄金属膜与介质膜组合防伪光变膜系中光波传递关系方程.推导过程没有作任何近似与假设,更接近光在导电介质中的实际传播,因此具有更高的准确度,并适应于高吸收率金属膜的情况.通过实际算例实现了对算法的考察,其计算结果与现有算法计算的能量反射曲线分布特征具有很好的一致性,验证了方法的可靠性,但也反映出了一些差异,该方法显示出金属膜厚度对计算结果有较大影响,随金属铬膜厚度的增加其总能量反射率逐渐减小(这是由金属膜的吸收特性造成的,计算方法能够反应金属膜的吸收作用),而现有算法的计算结果中变化却很小;对同一膜系,本算法还表现出更强的窄带反射效应.这些特点对指导设计防伪光变窄带高反膜都有重要的参考价值.

参考文献

- [1] ZHANG Jing-fang, LIU Li-min, Yong-dong, *et al.* Optical anti-counterfeiting technology and its application[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2011: 175-216.
张静芳, 刘立民, 叶永东, 等. 光学防伪技术及其应用[M]. 国防工业出版社, 2011: 175-216.
- [2] ZHANG Yi-xin, CHEN Jie, SHI Gong-cheng. Color prediction model of optically variable anti-forgery ink [J]. *Packaging Engineering*, 2011, **32**(5): 94-96.
张逸新, 陈杰, 史公程. 光学变色防伪油墨的颜色预测模型 [J]. 包装工程, 2011, **32**(5): 94-96.
- [3] WANG San. Theoretic designing and its optical characteristics of multilayer high reflectivity film [J]. *Science & Technology Information*, 2008, **32**: 148.
王珊. 多层高反膜的理论设计与光学特性研究 [J]. 科技资讯, 2008, **32**: 148.
- [4] YU Hua, SHONG Li-min. A designing method of X-ray for multilayered reflection film [J]. *Laboratory Science*, 2010, **13**(2): 42-44.
喻华, 宋利民. 一种 X 光多层膜的设计方法 [J]. 实验室科学, 2010, **13**(2): 42-44.
- [5] YIN Zhong-wen, XU Ai-hua. Calculation of the reflection index in optics film [J]. *Journal of Nanyang Normal University*, 2007, **3**(6): 24-27.
尹中文, 轩爱华. 光学薄膜反射率的计算 [J]. 南阳师范学院学报, 2007, **3**(6): 24-27.
- [6] PHILIPS R W, BLEIKOLM A F. Optical coatings for document security [J]. *Applied Optics*, 1996, **35**(28): 5529-5534.
- [7] BLEIKOLM A F. New design opportunities with OVI [J]. *SPIE Digital Library*, 1998, **3314**(2): 223-230.
- [8] TAN Man-qing, LIN Yong-chang, ZHAO Da-zun. The properties of periodic symmetrical coatings and the design of high reflectivity coatings of narrow band for containing the ultra-thin metallic film ($n=k$) [J]. *Acta Photonica Sinica*, 1996, **25**(1): 1011-1017.
谭满清, 林永昌, 赵达尊. 含 $n=k$ 超薄金属膜的周期对称膜系的性质及窄带高反膜设计 [J]. 光子学报, 1996, **25**(1): 1011-1017.
- [9] TANG Jin-fa, GU Pei-fu, LIN Xu. Modern optics technology [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2006.
唐晋发, 顾培夫, 刘旭. 现代光学薄膜技术 [M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2006.
- [10] PHILIPS R W. Paired optically variable article with paired optically variable structures and ink, paint and foil incorporating the same and method; US, 5766738 [P] 1998: 06-16.
- [11] TAN Li, XIANG Qian-yong, LIU Yu-lin. Theoretical and experimental studies of color correction in laser digital photofinishing [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(6): 765-767.
- [12] HEBERT M, HERSCH R D. Reflectance and transmittance model for recto-verso halftone prints [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2006, **23**(10): 2415-2432.
- [13] HEBERT M, HERSCH R D. Classical print reflection models: A radiometric approach [J]. *Journal of Imaging Science and Technology*, 2004, **48**(4): 363-373.
- [14] LAKHTAKIA A. On plane wave remittances and Goos-Hänchen shifts of planar slabs with negative real permittivity and permeability [J]. *Electromagnetics*, 2003, **23**(1): 71-75.
- [15] ZIOLKOWSKI R W. Pulsed and CW Gaussian beam interactions with double negative metamaterial [J]. *The International Electronic Journal of Optics*, 2003, **11**(7): 662-681.
- [16] IGNATOVICH V K. Neutron from condensed matter, the Goos-Hänchen effect and coherence [J]. *Physical Letters A*, 2004, **322**(1): 36-46.
- [17] XU Jian-hua. The electromagnetic field and electromagnetic wave in layer media [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1997: 38-59.
徐建华. 层状媒质中的电磁场与电磁波 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1997: 38-59.
- [18] LIU Fu-ping, WANG An-ling, CHEN Qiang, *et al.* The research progress on lateral shift of reflected electromagnetic wave at the interface of two conductive media [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2008, **53**(7): 961-968.
- [19] LIU Fu-ping, ZHANG Hong-mei, YANG Cang-chun, *et al.* The lateral shift of quasi total reflection of inhomogeneous electromagnetic wave when the electric field is perpendicular to the incident plane [J]. *Chinese Journal Geophysics*, 2005, **48**(4): 924-931.
刘福平, 张红梅, 杨长春, 等. 电场垂直入射面的非均匀电磁波在导电媒质界面的类全反射横向偏移 [J]. 地球物理学报, 2005, **48**(4): 924-931.
- [20] LIU Fu-ping, ZHANG Hong-mei, YANG Chang-chun, *et al.* The lateral shift of quasi total reflection of inhomogeneous P-electromagnetic wave on the interface of conductive media [J]. *Chinese Journal Geophysics*, 2007, **50**(2): 556-566.
刘福平, 李瑞忠, 杨长春, 等. 非均匀 P-偏振电磁波在导电界面的类全反射横向偏移 [J]. 地球物理学报, 2007, **50**(2): 556-566.
- [21] ORDAL M A, LONG L L, BELL R J, *et al.* Optical properties of the metals Al, Co, Cu, Au, Fe, Pb, Ni, Pd, Pt, Ag, Ti, and W in the infrared and far infrared [J]. *Applied Optics*, **22**(7): 1099-1121.
- [22] <http://ishare.iask.sina.com.cn/f/14436976.html>. Refractive index and extinction coefficient of materials.