

文章编号: 0258-7025(2008)Supplement2-0331-04

金属/介质多层薄膜结构光极化调控特性

赵 林^{1,2} 赵俊明¹ 徐晓非¹ 冯一军¹

(¹ 南京大学电子科学与工程系, 江苏 南京 210093; ² 海军工程大学通信工程系, 湖北 武汉 430033)

摘要 基于等效介质理论, 描述了金属/介质多层薄膜周期结构的各向异性, 提出了分析这种结构光传输特性的理论方法, 研究了不同取向薄膜结构的光学性能。通过理论分析和基于有限元方法的全波电磁仿真后发现, 在不考虑损耗的情况下, 通过调整金属/介质多层薄膜周期结构中的材料参数、薄膜结构取向, 能使得垂直入射的 TE 波和 TM 波的透射效果有很大差异, 说明该结构具有光极化调控特性。根据这一光极化调控特性, 设计了由碳化硅和二氧化硅薄膜的组合结构, 成功构造了 10.6 μm 红外波段的光极化分离器。金属/介质多层薄膜结构光极化调控特性对于光学器件中极化分离和极化变换的实现提供了一条新的途径。

关键词 薄膜; 极化分离器; 等效介质理论; 金属/介质多层薄膜; 各向异性

中图分类号 O438.4⁺1 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL200835s2.0331

Optical Polarization Manipulation by Multilayered Structure of Metal-Dielectric Films

Zhao Lin^{1,2} Zhao Junming¹ Xu Xiaofei¹ Feng Yijun¹

(¹ Department of Electronic Science and Engineering, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210093, China)
(² Department of Communication Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan, Hubei 430033, China)

Abstract By modeling the multilayered structure of metal-dielectric films as an anisotropic material based on the effective medium theory, we have theoretically analyzed the optical transmission of the structure. Optical polarization property of the proposed structure with different film orientations has been explored. The theoretical analysis and full-wave EM simulations based on the finite element method show that, in the lossless case, transmission for a normal incident TE wave is quite different from the transmission for a TM wave by adjusting the material parameters and the film orientation of the proposed structure. The result shows that the structure has property of optical polarization manipulation. Based on this particular property, we propose a multilayer structure composed of alternating silicon carbide and silicon dioxide films for polarization beam splitter at wavelength of 10.6 μm . We believe that the optical property of this metal-dielectric multilayered structure could provide a new way for the polarization manipulating of the optical devices.

Key words thin films; polarization beam splitter; effective medium theory; multilayered structure of metal-dielectric films; anisotropy

1 引言

目前, 对光学薄膜材料的研究正在向复合化、多种类、高性能、新工艺方向发展。金属性纳米膜由于在光波段具有特殊的电磁参数而被广泛应用于光学各个领域。如用 Ag 膜和不同金属、半导体、绝缘体复合, 可研制和开发具有独特性能的光电功能薄膜^[1~3]。本文基于等效介质理论分析了金属/介质

多层周期薄膜结构的光传输特性, 研究了不同薄膜取向的光学性能。分析表明, 通过调节多层结构的材料参数和薄膜的不同取向, 能够使这种结构具有光极化调控的特性。

2 多层薄膜周期结构等效电磁参数

采用金属性材料和介质材料来构成多层周期薄

基金项目: 国家自然科学基金(60671002)资助课题。

作者简介: 赵 林(1981—), 男, 讲师, 主要从事人工电磁材料、微波器件等方面的研究。E-mail: zlzt1688@sina.com

导师简介: 冯一军(1964—), 男, 博士, 教授, 主要从事人工电磁材料、微波器件等方面的研究。E-mail: yjfeng@nju.edu.cn

膜结构,如图 1 所示。材料 1 的介电常数为 ϵ_1 ,材料 2 的介电常数为 ϵ_2 ,两者磁导率均为 1。根据等效介质理论,如果薄膜的厚度远小于波长,这种周期多层薄膜材料可等效为单轴各向异性介质,等效得介电常数为 $\bar{\epsilon} = [\epsilon_s, \epsilon_s, \epsilon_z]$,等效前后材料总厚度相等^[4]。

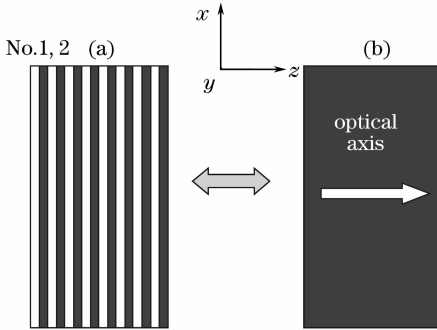


图 1 多层周期薄膜结构等效示意图。(a) 金属/介质多层薄膜结构;(b) 单轴介质

Fig.1 (a) Multi-layered structure of alternating metal (white area) and dielectric films (black area); (b) its equivalent uniaxial anisotropic material slab 其沿薄膜平行方向($s=x, y$)和垂直方向的电磁参数等效公式为

$$\epsilon_s = \frac{\epsilon_1 + \alpha\epsilon_2}{1 + \alpha}, \frac{1}{\epsilon_z} = \frac{1}{\epsilon_1(1 + \alpha)} + \frac{\alpha}{\epsilon_2(1 + \alpha)}, \quad (1)$$

式中 α 为材料 2 与材料 1 的厚度比。

改变多层结构的薄膜取向,使之与 x 轴有一夹角。在 (x, y, z) 系中,其介电常数不再是对角矩阵,

而应改写为 $\bar{\epsilon}_a = \{\epsilon_{ij}\}, i, j = 1, 2, 3$ 。其光轴所在坐标系与 (x, y, z) 系的关系可以用雅可比矩阵 \mathbf{J} 来描述^[5]。于是有如下关系:

$$\bar{\epsilon}_a = \mathbf{J} \bar{\epsilon} \mathbf{J}^T, \quad (2)$$

\mathbf{J}^T 是 \mathbf{J} 的转置。

3 多层薄膜周期结构光波反射和透射系数

考虑光波在多层薄膜结构中的传播情况。如图 2 所示,设总厚度为 d 的多层结构的薄膜取向与 x 轴的夹角为 φ ,光波垂直入射。此时,多层薄膜结构(区域 II)的介电常数可由(1)式和(2)式得到。因此,区域 II 中的本征方程可以被写为^[6,7]:

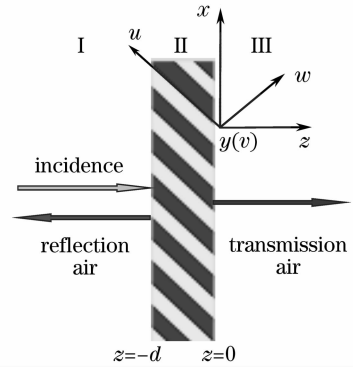


图 2 光波入射示意图

Fig.2 Incident light wave normally on a slab of rotated multi-layered film structure

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ \epsilon_{11} - \epsilon_{13}^2/\epsilon_{33} & \epsilon_{12} - \epsilon_{13}\epsilon_{23}/\epsilon_{33} & 0 & 0 \\ \epsilon_{12} - \epsilon_{13}\epsilon_{23}/\epsilon_{33} & \epsilon_{22} - \epsilon_{23}^2/\epsilon_{33} & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \\ H_y \\ H_x \end{bmatrix} = \gamma \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \\ H_y \\ H_x \end{bmatrix}, \quad (3)$$

设(3)式的特征值和特征矢量分别为 γ^2 和 \mathbf{W}^2 (4×4 的矩阵)其中: $\gamma^2 = [\gamma_1^2, \gamma_2^2, \gamma_3^2, \gamma_4^2]$, 并且有 $\gamma_1^2 = -\gamma_3^2, \gamma_2^2 = -\gamma_4^2$ 。可以写出区域 II 中的场分布

$$\begin{bmatrix} E_x^2 \\ E_y^2 \\ \eta H_y^2 \\ -\eta H_x^2 \end{bmatrix} = \mathbf{W}^2 \mathbf{X}^2 \begin{bmatrix} u_1^2 \\ u_2^2 \\ v_1^2 \\ v_2^2 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中 $\eta = 120\pi, \mathbf{X}^2$ 为一个对角矩阵,它包含的元素为: $\mathbf{X}^2(j, j) = \exp(k_0 \gamma_j^2 z), u_1^2, v_1^2$ 和 u_2^2, v_2^2 分别为

区域 II 中 TE 型波上、下行波和 TM 型波上、下行波的振幅。

自由空间(区域 I、III)中的特征值和特征矢量可以写为

$$\mathbf{W}^1 = \mathbf{W}^3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$$\gamma^1 = \gamma^3 = [1 \quad 1 \quad -1 \quad -1],$$

区域 I、III 中的场分布为

$$\begin{bmatrix} E_x^1 \\ E_y^1 \\ \eta H_y^1 \\ -\eta H_x^1 \end{bmatrix} = W^1 X^1 \begin{bmatrix} u_1^1 \\ u_2^1 \\ v_1^1 \\ v_2^1 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} E_x^3 \\ E_y^3 \\ \eta H_y^3 \\ -\eta H_x^3 \end{bmatrix} = W^3 X^3 \begin{bmatrix} u_1^3 \\ u_2^3 \\ v_1^3 \\ v_2^3 \end{bmatrix},$$

式中对角矩阵 X^1 包含的元素为 $X^1(j, j) = \exp[k_0 \gamma_j^1(z + d)]$, 对角矩阵 X^3 包含的元素为 $X^3(j, j) = \exp(k_0 \gamma_j^3 z)$ 。

定义以下关系

$$\begin{bmatrix} u_1^3 \\ u_2^3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1^1 \\ u_2^1 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} d_1^1 \\ d_2^1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} \\ R_{21} & R_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1^1 \\ u_2^1 \end{bmatrix},$$

则透射矩阵 $\mathbf{T} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix}$ 和反射矩阵 $\mathbf{R} =$

$\begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} \\ R_{21} & R_{22} \end{bmatrix}$ 可以由两边交界处的边界连续性求得。

在无耗条件下, 通过调节多层结构中两种材料的电磁参数和厚度比使得 $\epsilon_s = 1/\epsilon_z$, 并令

$$\varphi = -\frac{1}{2} \arccos\left(\frac{t}{\sqrt{t^2 + 4}}\right), \quad (8)$$

式中 $t = (1 - \epsilon_z)/\sqrt{\epsilon_z}$ 。可以实现 $T_{11} = 1, R_{11} = 0$, 即 TE 波为幅度和相位不变的全透射。

要令 $\epsilon_s = 1/\epsilon_z$, 材料之间的厚度比要满足

$$\alpha = \frac{(\epsilon_1^2 - 1)\epsilon_2}{(1 - \epsilon_2^2)\epsilon_1}. \quad (9)$$

4 电磁仿真结果

对上述理论分析进行了基于有限元方法的全波电磁仿真, 选取 $\epsilon_1 = 0.44, \epsilon_2 = 3.92$, 并根据(8)式和(9)式计算得到 $\varphi = 38.33^\circ, \alpha = 1:2$ 。如图 3、图 4 所示。图 3 为 TE 波的仿真结果, T_{11} 的理论值为 1, 仿真值为 0.9998; 图 4 为 TM 波的仿真结果, T_{22} 的理论值为 0.9301, 仿真值为 0.9117。仿真结果验证了理论分析。另外, 还发现完全透射的 TE 波在该结构中沿着薄膜的取向方向传播, 形成明显的平移; 对于 TM 波则几乎不产生平移。这一现象表明这种结构具有光极化调控特性。根据这一特性, 设计了由碳化硅和二氧化硅薄膜组合成的 $10.6 \mu\text{m}$ 红外波段的光极化分离器。碳化硅在该波段的介电常数

为 $0.44 - 0.086i$; 二氧化硅的介电常数为 3.92; 取 $\varphi = 38.33^\circ, \alpha = 1:2$, 多层结构总厚度为 $20 \mu\text{m}$ 。仿真结果如图 5 所示。TE 波束中的极化消光系数(两种极化的能量密度比)为 50:1; TM 波束中的极化消光系数为 32:1, 符合光极化分离器的指标。

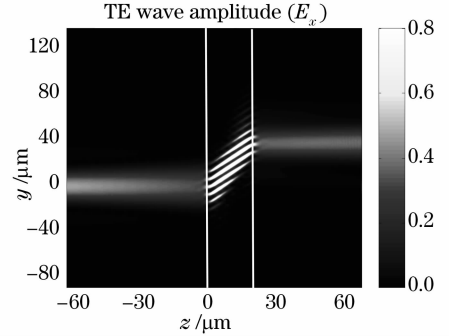


图 3 TE 波仿真结果

Fig. 3 Result of EM simulation (TE wave)

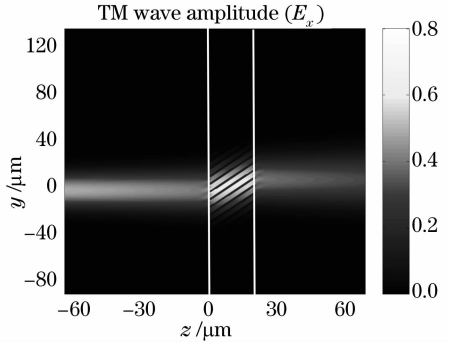


图 4 TM 波仿真结果

Fig. 4 Result of EM simulation (TM wave)

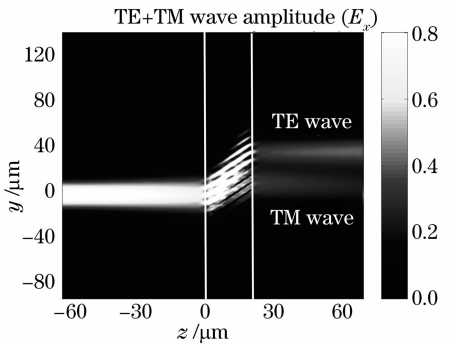


图 5 $10.6 \mu\text{m}$ 红外波段的光极化分离器

Fig. 5 Polarization beam splitter at wavelength of $10.6 \mu\text{m}$

5 结 论

光极化分离器是光通信交换、光信息测量和光耦合等光学系统中的基础器件。通过理论分析并结合电磁仿真研究了金属/介质多层薄膜结构的极化特性, 发现了这种结构具有光极化调控特性。该结构具有良好的极化消光系数且具有结构简单, 容易

实现,便于安装等优点,为光学器件中极化分离和极化变换的实现提供了一条新的途径。

参 考 文 献

- 1 Y. Sarova, M. Nikolaevab, M. Sendova-Vassilevab *et al.*. Optical properties of SiO₂ thin layers with Ag nanoparticles[J]. *Vacuum*, 2003, **69**: 321~325
- 2 Mingzhao Liu, Philippe Guyot-Sionnest. Preparation and optical properties of silver chalcogenide coated gold nanorods[J]. *J. Mater. Chem.*, 2006, **16**: 3942~3945
- 3 Junming Zhao, Yan Chen, Yijun Feng. Polarization beam splitting through an anisotropic metamaterial slab realized by a layered metal-dielectric structure[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, **92**: 071114
- 4 B. Wood, J. B. Pendry. Directed sub wavelength imaging using a layered metal-dielectric system[J]. *Phys. Rev. B*, 2006, **74**: 115~116
- 5 Li Hanru. Introduction to Dielectric Physics [M]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China Press, 1990. 336~340
李翰如. 电介质物理导论[M]. 成都: 成都电子科技大学出版社, 1990. 336~340
- 6 D. W. Berreman. Optics in stratified and anisotropic media; 4×4 matrix formulation[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1972, **62**: 502~510
- 7 Liu Xingye. Light's reflection and transmission on the face of electromagnetic anisotropic medium[J]. *J. Sichuan University*, 2001, **38**(4): 529~530
刘兴业. 光波在电磁各向异性媒质表面上的的反射与透射[J]. 四川大学学报, 2001, **38**(4): 1424~1428