

文章编号: 0253-2239(2008)09-1788-05

基于一维金属-介质周期结构的偏振分束

张锦龙 刘旭 厉以宇 顾培夫

(浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)

摘要 分析了一维金属-介质周期结构的能带特性,根据一定频率范围内 TM 波(磁场方向与界面平行)在结构中的负折射以及 TE 波的正常折射,提出了一种偏振分束器件。利用传输矩阵法(TMM)模拟了该结构对入射高斯光束的偏振分束作用,讨论了不同入射角度下的偏振分束能力,并结合实际金属参量,分析了金属层吸收对结构特性的影响。结果表明该结构在 55°附近入射时有最好的性能;在吸收作用下结构偏振分束能力有一定的减小, TM 波透射比发生了较大变化, TE 波效果较好;随着周期数增加,结构透射比下降,但分光能力显著提高;在工作波段上随着波长增大,金属层吸收对器件的影响减弱。该结构能实现宽波段、宽角度、较高透射比的偏振分束。

关键词 光学材料; 光子晶体; 偏振分束; 负折射; 金属-介质

中图分类号 O734 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS20082809.1788

Polarization Beam Splitters Based on One-Dimensional Metal-Dielectric Structure

Zhang Jinlong Liu Xu Li Yiyu Gu Peifu

(State Key Laboratory for Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China)

Abstract A one-dimensional metal-dielectric structure was designed for the application of polarized beam splitter (PBS). The band structure of the one-dimensional metal-dielectric structure is calculated, and the PBS is based on the negative refraction for TM polarization and positive refraction for TE polarization in a given frequency range. The transfer matrix method is used to simulate the polarized beam splitting effect as the Gaussian beam enters the finite one-dimensional metal-dielectric structure for both polarizations. The influences of different incident angles and the dissipation of the metal layer absorption on beam splitting are discussed. The simulation shows that this structure possesses the best performance with an incident angle around 55°. For the reason of absorption, the beam splitting ability is limited, the transmittance of TM component changes substantially, but that of TE component is favorable. The transmittance will decrease and the beam splitting ability will rise when the period of the structure increases. As the operation wavelength increases, the influence of the dissipation of the metal layer will be smaller. This structure can achieve polarized beam splitting in a wide range of wavelength and incident angle with a high transmittance.

Key words optical materials; photonic crystal; polarized beam splitting; negative refraction; metal-dielectric

1 引言

理想的左手物质可用来制作完美透镜实现超分辨^[1,2]。对左手物质及密切相关的负折射进行深入和广泛的研究发现,由介质材料构成的光子晶体结构也能实现类似的反常折射^[3~6]。与左手物质不

同,光子晶体负折射是基于布拉格散射效应,不需要引入负折射率材料就能实现负折射成像。

基于光子晶体结构的偏振分束器已有很多相关报道,主要都是利用两种不同偏振态的不同能带特性^[7,8]或者各向异性^[9,10],在一定频率区域实现一种偏振光透过结构另一种被反射。事实上这并不是偏

收稿日期: 2007-12-18; 收到修改稿日期: 2008-03-14

基金项目: 国家自然科学基金(60608014)资助课题。

作者简介: 张锦龙(1982-),男,博士研究生,主要从事金属介质薄膜方面的研究。E-mail: jinlong.zju@hotmail.com

导师简介: 刘旭(1963-),男,教授,博士生导师,主要从事光学薄膜、光电显示技术等方面的研究。

E-mail: liuxu@zju.edu.cn

振分束的唯一方式, Ao 等^[11]利用两种偏振光在二维光子晶体中折射方式的不同实现透射式偏振分束。本文提出了一种基于一维金属-介质周期结构负折射特性^[12,13]的偏振器件,对一维金属介质周期(1DMD)结构的能带结构、等频线(EFC)进行了分析,阐明了 1DMD 结构实现透射式偏振分束的可行性,并且利用传输矩阵算法(TMM)模拟了有限周期结构的结果,讨论了不同入射角度以及实际金属层吸收对器件的影响。

2 一维金属介质-结构的能带特性

图 1 为 1DMD 结构,虚线代表一个周期结构,界面垂直于 z 轴。介质层和金属层厚度分别为 $d_1=32$ nm 和 $d_2=40$ nm,即一个周期厚度为 72 nm,介质层的介电常数 $\epsilon_1=5$ 。为了便于分析,首先考虑金属层没有吸收的理想情况,利用德鲁德(Drude)模型来表示金属层的介电常数, $\epsilon_2=1-\omega_p^2/\omega^2$, ω_p 是金属的等离子频率($\lambda_p=2\pi c/\omega_p=226$ nm),磁导率

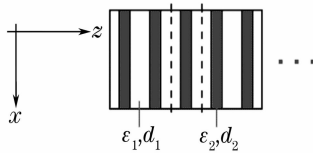


图 1 一维金属介质周期结构

Fig. 1 one-dimensional metal-dielectric structure with a symmetric arrangement

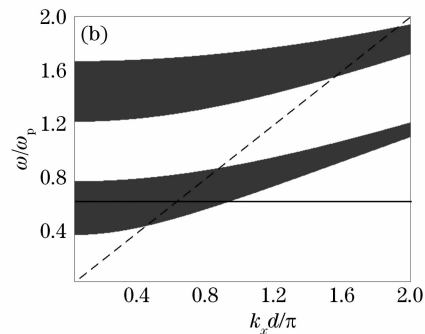
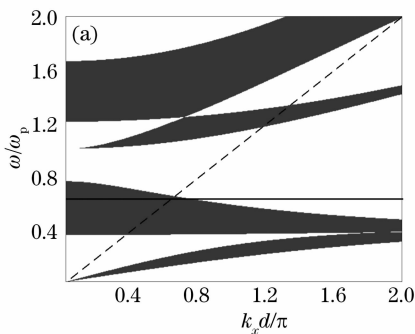


图 2 二维金属介质周期结构能带结构图。(a)TM 波,(b)TE 波

Fig. 2 Energy band structure of 1DMD structure. (a)TM wave, (b)TE wave

取 $\omega=0.66\omega_p$ ($\lambda=342$ nm)附近频率段的情况进行分析,图 3 给出此时两种偏振条件下的等频面(EFC)。图中数字代表归一化频率,以 $2\pi c/d$ 为单位;细实线半圆代表自由空间中等频线($\lambda=342$ nm),直线表明了波矢平行分量连续;细箭头给出了该频率下,光在自由空间和结构中的波矢方向,粗箭头给出了光在自由空间和结构中的群速度方

$\mu_1=\mu_2=1$ 。设计中周期结构的原胞采用 0.5 层介质-金属-0.5 层介质(0.5DM0.5D)对称结构来提高器件的透射比^[13]。

分别考虑 TM、TE 偏振,1DMD 结构的色散关系可表示为如下形式^[13]:

TM:

$$\cos(K_z d) = \cos(\alpha_1 d_1) \cos(\alpha_2 d_2) - \frac{\alpha_1^2 \epsilon_2^2 + \alpha_2^2 \epsilon_1^2}{2\alpha_1 \alpha_2 \epsilon_1 \epsilon_2} \sin(\alpha_1 d_1) \sin(\alpha_2 d_2), \quad (1)$$

TE:

$$\cos(K_z d) = \cos(\alpha_1 d_1) \cos(\alpha_2 d_2) - \frac{\alpha_1^2 \mu_2^2 + \alpha_2^2 \mu_1^2}{2\alpha_1 \alpha_2 \mu_1 \mu_2} \sin(\alpha_1 d_1) \sin(\alpha_2 d_2), \quad (2)$$

式中 K_z 是布洛赫(Bloch)波矢 z 方向上的分量, k_x 是 x 方向上的分量, $d=d_1+d_2$, $\alpha_i = \sqrt{k_0^2 \epsilon_i \mu_i - k_x^2}$, ($i=1,2$), $k_0 = \omega/c = 2\pi/\lambda$ 是自由空间中的波数。Bloch 波的存在要求 $|\cos(K_z d)| \leq 1$ 。

由(1)式、(2)式分别计算得到 1DMD 结构的能带图,图 2 给出了 x 方向上的投影能带图。图中深色的区域代表存在 Bloch 波,为通带;虚线为自由空间中的色散曲线,实线标出了 $\omega=0.66\omega_p$ ($\lambda=342$ nm)时的情况。可以看到在 TM 波的情况下,第二条能带的部分频率区域 ($0.5-0.8$) ω_p 形成了 $v_{gx} = \text{grad}_{k_x}(\omega) < 0$, 而 TE 波 $v_{gx} = \text{grad}_{k_x}(\omega) > 0$ 。因此在此波段范围里 TM 波群速度的平行分量为负,而 TE 波为正,可以形成基于负折射的偏振分束。

向。在 TM 波情况下,各个频率下 EFC 都近似为圆,该结构可以被认为各向同性材料。EFC 并不是完美的圆,因为该结构从本质上来说是各向异性的。等频线以 $(k_x=0, K_z=\pi/d)$ 为中心,随着频率增大 EFCs 半径减小、 K_z 增大,证明结构中群速度平行分量($v_{gx} = \text{grad}_{k_x}(\omega)$)为负,与自由空间中群速度平行分量方向相反,而垂直分量方向不变,形成了

负折射^[12], 结构中波矢 k 的两个分量方向和自由空间中保持一致。根据切向分量守恒, 图中画出了光以 45° 角入射时自由空间和结构中的波矢、群速度方向, 群速度方向代表了入射、折射角的方向, 利用斯涅耳(Snell)折射定理, 得到此频率下结构等效折射率约为 -1.1 ; 由于此时结构 EFC 比自由空间的

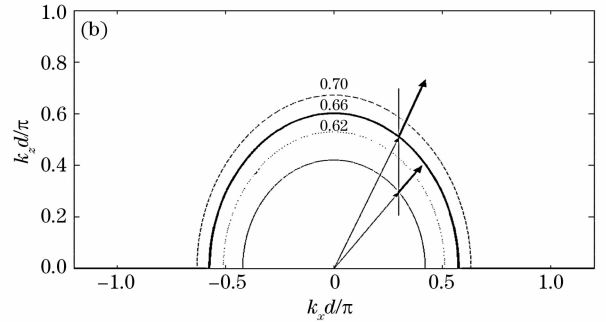
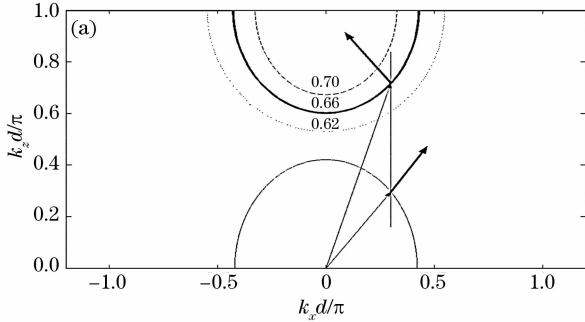


图 3 (a) TM 波, (b) TE 波等频面

Fig. 3 Frequency contours. (a) TM wave, (b) TE wave

3 高斯光束入射模拟

为了分析 1DMD 结构的偏振分束特性, 利用 TMM 方法模拟了高斯光束入射到有限周期结构中的情况。计算时取 4 层的 1DMD 结构, 总厚度为 288 nm, 膜堆两侧都是自由空间, 高斯光束从左侧入射, 空间高斯光束的表达式如下^[14,15]:

$$H_{iy} = \int_{-\infty}^{\infty} dk_x \exp[i(k_x x + k_{iz} z)] \phi(k_x), \quad (3)$$

其中

$$\phi(k_x) = \frac{g}{2\sqrt{\pi}} \exp[-g^2(k_x - k_{ix})^2/4], \quad (4)$$

入射波矢为 $\mathbf{k}_i = \mathbf{x}k_{ix} + \mathbf{z}k_{iz} = \mathbf{x}k_0 \sin \theta_i + \mathbf{z}k_0 \cos \theta_i$, θ_i 是中心平面波的入射角, 高斯光束腰宽度 $g = 2\lambda$ 。图 4 给出了此情况下的光强分布, 光强由时间平均能流密度表示, 强度与灰度值一一对应, 入射角均为

EFC 半径大, 可以实现全角度的负折射。对于 TE 波, 1DMD 结构和全介质结构相似, 形成正常折射, 等效折射率约为 1.4。上述得到的结论是基于光子晶体周期无限排布的计算结果, 不能准确说明实际应用中的有限周期情况, 下面我们利用 TMM 方法来模拟有限周期结构的情况。

45° 。图中箭头为各截面最强能量值的连线。图 4(a) 为 TM 波入射, 可以看到光在结构中发生了负折射, 并且在界面上遵循 Snell 定理, 此时该结构可以认为是一个等效折射率接近 -1.1 的均匀介质; 在 TE 波情况下, 发生正常折射, 如图 4(b) 所示。由于没有考虑吸收, 而且该结构反射较小, 在宽角度情况下, 可以得到接近 1 的透射比, 见图 5。其中实线和虚线分别为 TM 和 TE 波无吸收时透射比, 点线和点划线为有吸收时的情况。

从场图上分析得到, TM 波的折射角为 -42.4° , TE 波折射角为 33.2° , 和等频线上得出的角度有一些差别(对应为 -40.6° 和 29.4° , 见图 3), 这是由于模拟中采用有限周期结构以及高斯光束的影响。

经过 4 层 1DMD 结构后, 两偏振光出射光线方向相同, 但是发生了 350 nm 位移。随着入射角度

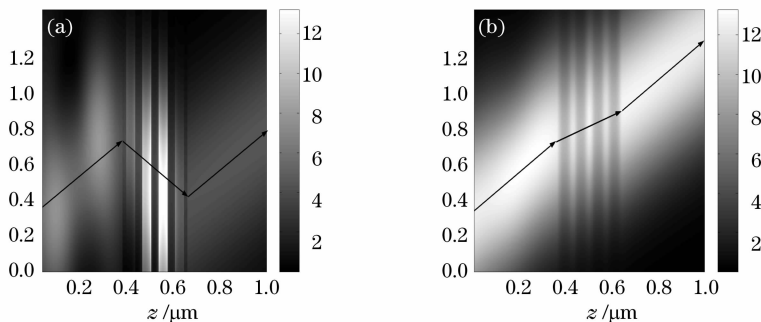


图 4 高斯光束 45° 角入射 4 层 1DMD 结构时的时间平均能流密度图。(a) TM 波, (b) TE 波

Fig. 4 Time-averaged power density distribution for a Gaussian beam entering to a 4-periods stack with an incident angle 45° . (a) TM wave, (b) TE wave

不同,出射位移会发生相应的变化,图 6 给出了本结构在 $15^\circ \sim 75^\circ$ 入射时的位移情况,可以看到,在这些角度范围内,利用该 4 层结构都能得到较大的位移,在 55° 附近入射时结果是最好的。

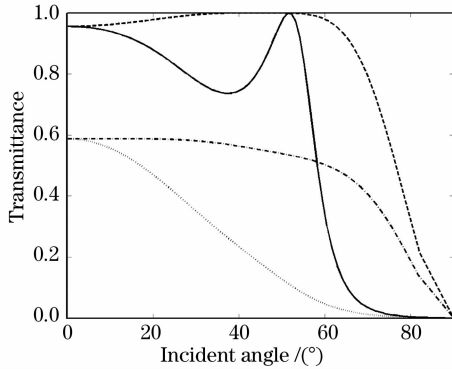


图 5 TM 波和 TE 波的透射比

Fig. 5 Transmittance for TM and TE waves respectively

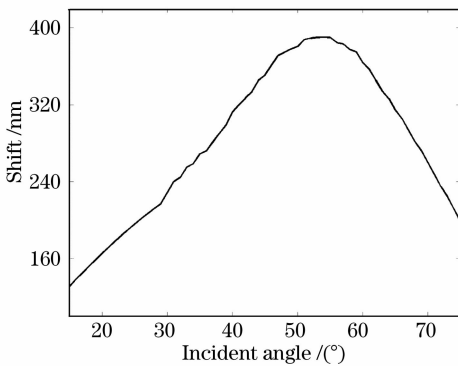


图 6 不同入射角度下 4 周期 1DMD 结构的偏振分束位移

Fig. 6 polarized beam splitting shifts of a 4-periods stack for different incident angles

由于采用了金属层,不可避免要考虑到金属层吸收对结构特性的影响。采用 Ag 作为金属层材料,在 342 nm 波长下, $\epsilon_2 = -1.28 - 0.3i$ ^[16]。吸收对金属介质结构的色散曲线和透射比都有影响^[17],对 1DMD 结构来说,就是能改变折射角以及降低透射比,考虑吸收后,计算得到 TM 波折射角为 34.7° ,发生了较大的变化,TE 波折射角基本不变,出射光线位移减小为 306 nm ;透射比如图 5 所示,可以看到吸收对透射比产生了很大影响, 45° 度入射下 TM、TE 波透射比分别为 20% 和 55% ,不过在很大的角度范围里 TM 波透射比还是大于 10% ,而 TE 波都在 30% 以上。再考虑 10 周期的 1DMD 结构,计算得到 45° 度入射时出射光线位移为 674 nm ,但透射比整体下降, TM、TE 波透射比分别为 4% 和 24% 。因此应用中要根据器件的要求来选择合适的周期数,得到分光能力和透射比的最佳组合。

分析更宽波长范围器件的应用情况,从能带图上分析,本器件可以工作在 $300 \sim 450 \text{ nm}$, Ag 在 $330 \sim 500 \text{ nm}$ 的范围里介电常数的损耗项基本维持在 0.3 以下,而且随着波长增大,介电常数实部和虚部绝对值之比增大,损耗项对结构特性的影响会减小^[11]。因此可以认为在大部分工作波长下损耗项的影响会比我们前面所采用的参量组合更小。

另外可以考虑采用光学增益的材料作为介质层来补偿吸收的影响^[18],在相应工作波段,可以选择 GaN 或者一些染料作为增益材料。但目前这些材料的制备以及和金属层的匹配还存在一定的问题,光学抽运也会使结构复杂,因此这方面的工作还有待进一步展开。

4 结 论

提出了一种基于 1DMD 结构的偏振分束器件,利用两种偏振态在结构中的不同传输特性,可以在较宽的频率范围以及较宽的角度范围实现偏振分束,采用对称单元结构得到了较高的透射比,分析了吸收对结构特性的影响。这种器件可以用传统的薄膜技术制作,它的优点就在于所有光路前向传播,可以降低光子集成器件的结构复杂度。

参 考 文 献

- 1 V G Veselago. Electrodynamics of substances with simultaneously negative electrical and magnetic permeabilities[J]. *Sov. Phys. Usp.*, 1968, **10**(4): 509~517
- 2 J B Pendry. Negative refraction makes a perfect lens[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2000, **85**(18): 3966~3969
- 3 M Notomi. Theory of light propagation in strongly modulated photonic crystals: refractionlike behavior in the vicinity of the photonic band gap[J]. *Phys. Rev. B*, 2000, **62**(16): 10696~10699
- 4 B Gralak, S Enoch, G Tayeb. Anomalous refractive properties of photonic crystals[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2000, **17**(6): 1012~1020
- 5 Li Yiyu, Gu Peifu, Li Mingyu *et al.*. Near field subwavelength imaging in wave like two dimensional photonic crystal[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(9): 1409~1413
厉以宇,顾培夫,李明宇等. 波状结构二维光子晶体近场亚波长成像的研究[J]. *光学学报*, 2006, **26**(9): 1409~1413
- 6 Yuntuan Fang, Yuzhen Liu, Tinggen Shen. Negative refraction and reflection of Gaussian beam on two-dimensional photonic crystal slab[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2006, **4**(4): 230~233
- 7 D R Solli, J M Hickmann. Photonic crystal based polarization control devices[J]. *J. Phys. D*, 2004, **37**: R263~R268
- 8 X Y Chen, P J Yao, B Chen *et al.*. Design of polarization beam splitter in two-dimensional triangular photonic crystals[J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2004, **21**(7): 1285~1288
- 9 L J Wu, M Mazilu, J F Gallet *et al.*. Planar photonic crystal polarization splitter[J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(14): 141620~141623
- 10 Li Jianfeng, Luo Hailu, Guo Yongkang *et al.*. Splitting effect in

- anisotropic metamaterial[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(11): 2027~2033
- 李剑峰,罗海陆,郭永康等. 各向异性超常材料的偏振分离特性[J]. *光学学报*, 2007, **27**(11): 2027~2033
- 11 X Ao, S He. Polarization beam splitters based on a two-dimensional photonic crystal of negative refraction[J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(16):162152~162155
- 12 H Shin, S H Fan. All-angle negative refraction and evanescent wave amplification using one-dimensional metallodielectric photonic crystals[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, **89**(15):151102-1~151102-3
- 13 Zhang J L, Jiang H T, B Gralak *et al.*. Towards -1 effective index with one-dimensional metal-dielectric metamaterial: a quantitative analysis of the role of absorption losses[J]. *Opt. Exp.*, 2007, **15**(12):7720~7725
- 14 Kong J A, Wu B L, Zhang Y. A unique lateral displacement of a Gaussian beam transmitted through a slab with negative permittivity and permeability [J]. *Microwave Opt. Technol. Lett.*, 2002, **33**(2): 136~139
- 15 Zhang Jinglong, Liu Xu, Li Yiyu *et al.*. Analysis for the self-collimation and subwavelength imaging in one-dimensional metal-dielectric structure [J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, **56**(10): 6075~6079
- 张锦龙,刘旭,厉以宇等. 一维金属-介质周期结构的自准直特性和亚波长成像[J]. *物理学报*, 2007, **56**(10): 6075~6079
- 16 P B Johnson, R W Christy. Optical constants of noble metals[J]. *Phys. Rev. B*, 1972, **6**(12): 4370~4379
- 17 V Kuzmiak, A A Maradudin. Photonic band structures of one- and two-dimensional periodic systems with metallic components in the presence of dissipation[J]. *Phys. Rev. B*, 1996, **55**(12): 7427~7444
- 18 S A Ramakrishna, J B Pendry. Removal of absorption and increase in resolution in a near-field lens via optical gain [J]. *Phys. Rev. B*, 2003, **67**: 201101-1~201101-4