

一维金属-介质周期结构的宽波段自准直效应*

张锦龙, 刘旭, 沈伟东, 顾培夫

(浙江大学 现代光学仪器国家重点实验室, 杭州 310027)

摘要: 计算了一维金属-介质(1DMD)周期结构的投影能带图, 发现该结构在一定条件下能得到宽波段的平坦色散曲线, 因此能在宽波段实现自准直效应; 讨论了金属层吸收的影响, 利用实际的金属和介质参数对该结构在不同波长下的色散曲线进行了计算; 利用传输矩阵法模拟了不同波长下该结构对入射高斯光束的自准直作用; 并且选择不同的金属、介质材料及合适的厚度参数, 该结构还能在不同的波段实现自准直, 可以在整个光频波段得到较好的结果. 双狭缝的成像模拟验证了1DMD结构在一定波长附近有近场亚波长成像能力, 分辨率达到 $\lambda/3$.

关键词: 金属-介质薄膜; 自准直; 亚波长成像

中图分类号: 0734

文献标识码: A

0 引言

自准直效应是光子晶体中的一个特殊现象, 假定一高斯光束入射到光子晶体, 自准直效应使原先在空间发散的光束到了光子晶体内部成为平行光, 抑制了光束发散角. Chigrin^[1], Chen^[2]等人首先对光子晶体的自准直效应进行了研究. Li^[3], Li^[4-5]等人利用不同结构光子晶体的自准直特性和近场散射效应实现了亚波长的近场成像. Belov^[6]首先在实验上对其进行了探索, 并在微波波段取得了进展.

一维金属-介质(1DMD)周期结构的自准直效应已经有不少相关报道, 并被用来实现亚波长成像^[7-8]. 本文利用1DMD结构实现了宽波段的自准直, 讨论了考虑金属层吸收下的自准直能力; 利用传输矩阵法(TMM)模拟了该结构在不同波长下的自准直特性, 并分析了其亚波长成像能力. 选择不同的金属、介质材料及合适的厚度参数, 该结构还能在不同的波段实现自准直, 可以在整个光频波段得到较好的结果.

1 1DMD结构的能带图及色散曲线

图1表示1DMD结构, 界面垂直于z轴. 介质层和金属层厚度分别为 $d_1 = 60 \text{ nm}$ 和 $d_2 = 30 \text{ nm}$, 即一个周期厚度为 90 nm , 为了便于分析, 首先假设介质层

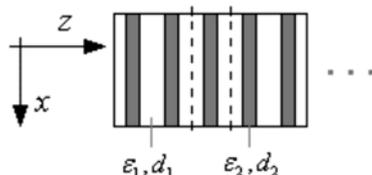


图1 一维金属-介质周期结构

Fig.1 1DMD structure with a symmetric arrangement, the dashed line shows the unit cell

介电常数 $\epsilon_1 = 6$ 、金属层没有吸收的理想情况, 利用Drude模型表示金属层的介电常数, $\epsilon_2 = 1 - \omega_p^2 / \omega^2$, $\omega_p = 1 \text{ fs}^{-1}$, 是金属的等离子频率, 磁导率 $\mu_1 = \mu_2 = 1$. 设计中周期结构的原胞采用0.5DM0.5D对称结构来提高器件的透射率^[9-10].

1DMD结构的色散关系可表示为如下形式^[9-11]:

$$\cos(K_B d) = \left[(\alpha_1^2 \epsilon_2^2 + \alpha_2^2 \epsilon_1^2) / 2\alpha_1 \alpha_2 \epsilon_1 \epsilon_2 \right] \sinh(\alpha_1 d_1) \cdot \sinh(\alpha_2 d_2) + \cosh(\alpha_1 d_1) \cosh(\alpha_2 d_2) \quad (1)$$

K_B 为 Bloch 波矢, $d = d_1 + d_2$, $\alpha_i = \sqrt{k_x^2 - k_0^2 \epsilon_i \mu_i}$, $k_0 = 2\pi / \lambda$, 是自由空间中的波数. Bloch波的存在要求 $|\cos(K_B d)| \leq 1$.

根据式(1)计算得到1DMD结构z方向上的投影能带图, 见图2, 其中, 灰色区域代表通带, 白色直线代表自由空间中光线. 可以看到此结构在 $(0.13 \sim 0.21) 2\pi c / d$ 在频率范围内, 对于传输波分量的等频线基本为一条平滑的曲线, 可以实现宽波段自准直效应.

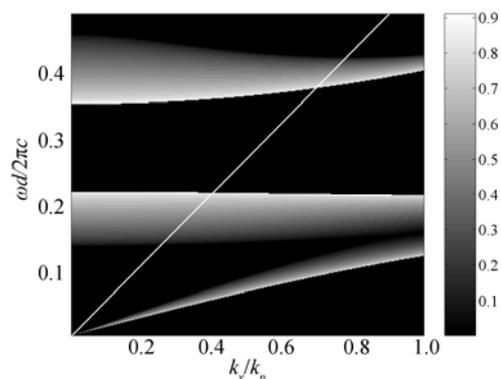


图2 1DMD结构的投影能带

Fig.2 Projected band diagram of 1DMD structure

利用文献中的实际金属参数^[12], 介质层采用实验测得的ZnS参数, 计算了1DMD结构的色散曲线, Bloch波矢的实部代表了结构中能流方向, 虚部代表

*国家自然科学基金(60608014)、中国博士后基金(20070421168)资助
Tel: 0571-87953875 Email: williomso_2005@hotmail.com
收稿日期: 2008-11-04

结构的吸收^[13]. 在图 3 中给出了 4 个波长下的 Bloch 波矢的实部, 曲线上的短直线代表 $k_x = k_0$ 的位置, 可以看到当 $k_x < k_0$ 时曲线基本上是平的, 表明在考虑吸收下该结构能在宽波段实现自准直效应.

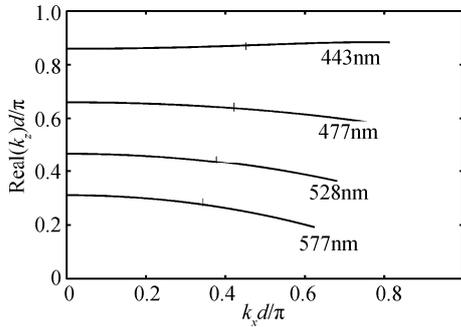


图 3 实际材料参数下的 Bloch 波实部

Fig.3 Real component of the Bloch vector of 1DMD structure

2 自准直现象模拟

利用 TMM 方法对 1DMD 结构的自准直现象进行了模拟. 图 3 中色散曲线为无限周期 1DMD 结构的计算结果, 为了便于计算以及实际应用, 采用 6 个周期结构, 总厚度 $D=540\text{nm}$, 入射和出射区域均为自由空间. 采用高斯光束入射, 高斯光束可表示为^[14]

$$E_y = \int_{-\infty}^{\infty} dk_x \exp[i(k_x x + k_z z)] \phi(k_x) \quad (2)$$

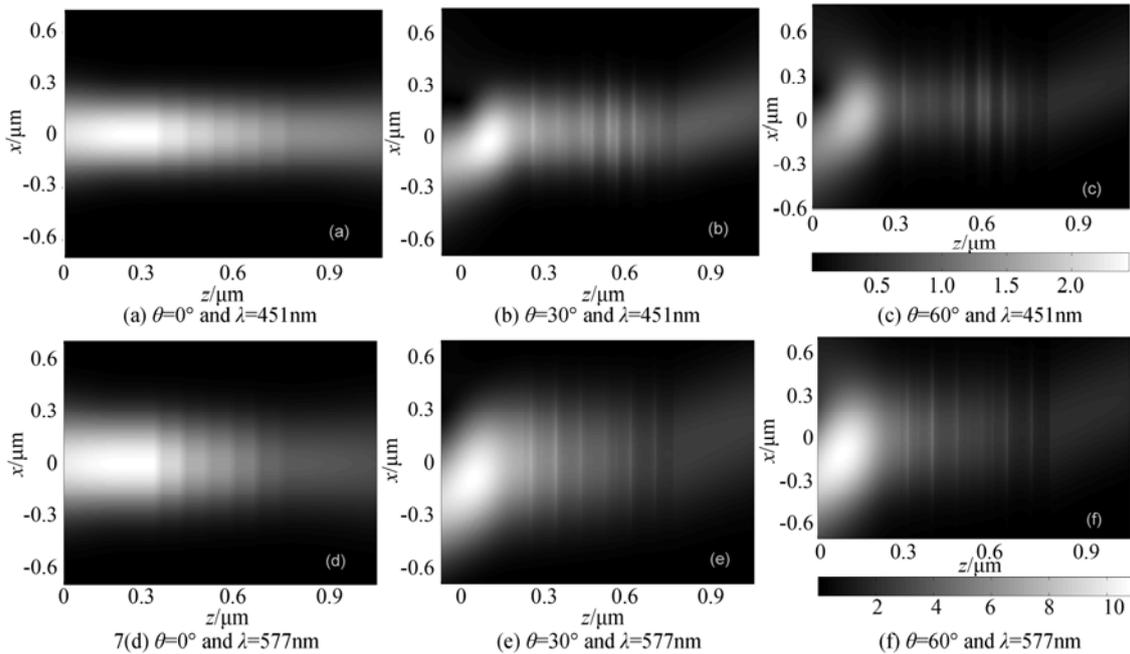


图 4 TMM 方法模拟的光强分布情况

Fig.4 Time-averaged power density distribution for a Gaussian beam incident to a 6-periods stack

以上讨论得到的宽波段自准直特性并不是唯一的, 选择合适的介质材料、调整相应的厚度, 计算表明可以在不同的波段实现宽波段自准直, 例如, 采用 $\text{Ag}/\text{Al}_2\text{O}_3$ (30 nm/70 nm) 和 Ag/GaP (36 nm/60 nm) 的周期结构可以在 350~480 nm、610~760 nm 波段实现. 因此可以根据不同的要求设计出相应的结构.

$$\phi(k_x) = \left(g / 2\sqrt{\pi} \right) \exp[-g^2 (k_x - k_0)^2 / 4] \quad (3)$$

入射光以 $k_i = \hat{x}k_{ix} + \hat{z}k_{iz}$ 为中心, 高斯光束腰 $g=0.6\lambda$.

图 3 是用 TMM 方法模拟的光强分布, 计算时仍然采用实际的光学常数. 模拟实验证明高斯光在自由空间中传播一定距离时, 都会产生严重发散; 自准直效应可以抑制光束的发散, 使出射光保持和入射光近似的光强分布^[4]. 图 3(a)~(c) 给出了波长 451nm 下高斯光束 0° 、 30° 和 60° 入射到 1DMD 结构中的光强分布情况, 光强由时间平均能流密度表示, 强度与灰度值一一对应, 高斯光束束腰位于 $x=0$ 处. 模拟结果显示, 对于 6 个周期, 1DMD 结构有明显的自准直效应, 各个角度下出射面光束的中心还是保持在 $x=0$ 的位置. 根据图 2 和 3 的能带理论分析表明对于该结构, 在 440~600 nm 的波长范围内, 都能实现较好的自准直效果, 图(d)~(f) 给出了波长 577 nm 下光以 0° 、 30° 和 60° 入射的情况, 在这个波长下, 光束倾斜入射时出射光束在 x 方向上产生了一定偏移, 但位移相对结构的厚度来说很小 (折射角接近 0°), 基本还是实现了自准直效应. 从图中可以看到, 由于考虑了金属层吸收, 出射面强度减少, 但仍在入射光强度的 40% 以上, 反射光强很小.

3 近场亚波长成像

Belov^[7] 首先提出利用 1DMD 结构实现亚波长成像, 认为 1DMD 结构的自准直效应, 能将入射光中所有的传播模和部分倏逝模分量转变为结构内部准直的传播模, 因而能在近场实现亚波长成像. 之后又有

人对这一现象进行了进一步的分析研究^[8]. 基于上文得到的宽波段自准直效应, 下面讨论 1DMD 结构的宽波段亚波长成像能力.

利用 TMM 方法计算了不同波长光经过 5 周期 1DMD 结构的透射率曲线, 从图 5 中可以看到在 440~600 nm 波段范围都能实现倏逝波放大, 有可能形成亚波长成像.

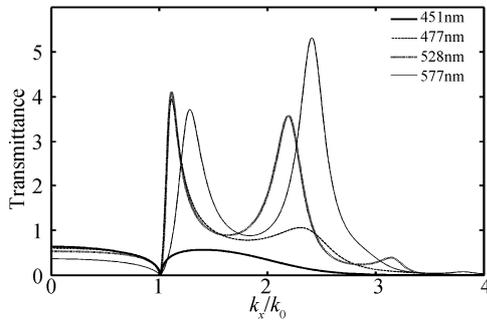


图 5 不同波长光通过 5 周期 Ag/ZnS 结构的透射率
Fig.5 Calculated transmittance of a 5-period Ag/ ZnS (30 nm/60 nm) stack in different wavelengths.

为分析 1DMD 结构的近场成像能力, 用 FDTD 方法模拟了利用该结构实现双狭缝成像的情况^[15]. 金属层采用 Drude 模型 $\epsilon(\omega) = 1 - \omega_p^2 / [\omega(\omega + i\Gamma)]$, 式中 ω_p 和 r 根据文献的介电常数算出, $\omega = 2\pi c / \lambda$, $\lambda = 452$ nm. 所选物体为两个相距 160 nm 的狭缝, 狭缝宽度均为 48 nm, 为亚波长结构; 物面距离 1DMD 结构前表面 10 nm. 图 6 为 5 周期 Ag/ZnS(30nm/60nm) 结构的成像模拟结果, 出射面后的光强分布保持了与物相似的形状, 因此在此条件下可以实现亚波长成像, 并且达到了 $\lambda/3$ 的分辨率. 从图 3 看到, 虽然对自准直波段内任意波长都有倏逝波分量能传过结构, 但只在一定波长附近色散曲线对于一定的倏逝波分量保持较平, 能实现基于自准直效应的亚波长成像; 模拟实验也表明对于所讨论结构, 只有在 440~470nm 范围能实现双狭缝成像, 接近 $\lambda/3$ 的分辨率.

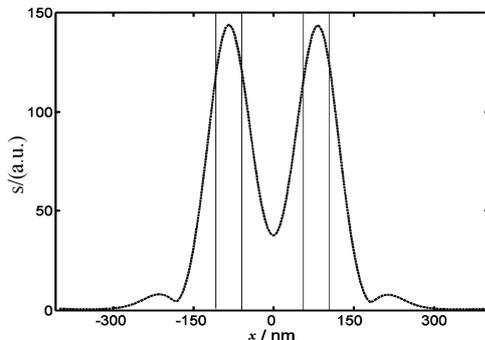


图 6 双狭缝结构的自准直成像, 纵坐标单位为任意单位
Fig.6 Image formed by 1DMD stack for a two-slits object.

4 结论

本文研究了一维金属-介质的周期结构的自准直现象, 利用传输矩阵法对不同波长下有限层 1DMD

结构的自准直特性进行了研究, 显示该结构在考虑实际金属、介质参数下可以在较宽的波段范围实现自准直; 进一步分析了该结构近场成像的能力, 表明在相应波段都能达到倏逝波放大, 但双狭缝结构成像的 FDTD 模拟结果证明只能在一定波长附近实现基于自准直效应的亚波长成像.

参考文献

- [1] CHIGRIN D N, ENOCH S, TAYEB G. Self-guiding in two-dimensional photonic crystals[J]. *Opt Express*, 2003, **11**: 1203-1211.
- [2] CHEN C H, SHARKAWY A, PUSTAI D M. Optimizing bending efficiency of self-collimated beams in non-channel planar photonic crystal waveguides[J]. *Opt Express*, 2003, **11**: 3153-3159.
- [3] LI Z Y, LIN L L. Evaluation of lensing in photonic crystal slabs exhibiting negative refraction[J]. *Phys Rev B*, 2003, **68**: 245110-245116.
- [4] LI Yi-yu, GU Pei-fu, LI Ming-yu, et al. Self-collimation and subwavelength lensing in wavy two-dimensional photonic crystals[J]. *Acta Phys. Sin.* 2006, **55**: 2596-2599.
厉以宇, 顾培夫, 李明宇, 等. 波状结构二维光子晶体的自准直特性及亚波长成像的研究[J]. *物理学报*, 2006, **55**: 2596-2599.
- [5] LI Yi-yu, GU Pei-fu, ZHANG Jin-long, et al. Self-collimation and superlensing in wavy-structured two-dimensional photonic crystals[J]. *Appl Phys Lett*, 2006, **68**: 151911.
- [6] BELOV P A, SIMOVSKI C R, IKONEN P. Canalization of subwavelength images by electromagnetic crystals[J]. *Phys Rev B*, 2005, **71**: 193105-193108.
- [7] BELOV P A, HAO Yang. Subwavelength imaging at optical frequencies using a transmission device formed by a periodic layered metal-dielectric structure operating in the canalization regime[J]. *Phys Rev B*, 2006 **73**: 113110-113113.
- [8] LI Xuan, HE Sai-lin, JIN Yi. Subwavelength focusing with a multilayered Fabry-Perot structure at optical frequencies[J]. *Phys Rev B*, 2007, **75**: 045103-045109.
- [9] ZHANG Jin-long, LIU Xu, LI Yi-yu, et al. *Acta Phys Sin*, 2007, **56**(10): 6075-6079.
张锦龙、刘旭、厉以宇, 等. 基于一维金属-介质周期结构的偏振分束[J]. *光学学报*, 2008, **56**(10): 6075-6079.
- [10] LIU Jia-yu, WANG Yong-chang. Transmission Properties of One-dimensional Au/MgF₂ Metallo-dielectric Photonic Crystals[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(1):74-78.
刘佳誉, 王永昌. 一维 Au/MgF₂ 光子晶体的透射性质[J]. *光子学报*, 2006, **35**(1):74-78.
- [11] WANG Rui, ZHANG Cun-xi, NIE Yi-hang. Band Structure and Propagation Properties of One-dimension Anisotropy Photonic Crystals[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(1):89-93.
王瑞, 张存喜, 聂一行. 一维各向异性光子晶体的带隙结构和传输特性[J]. *光子学报*, 2007, **36**(1):89-93.
- [12] PALIK E D, Handbook of optical constants of solids[M]. New York, Academic Press, 1985.
- [13] ZHANG J L, JIANG H T, Gralak B et al.. Towards -1 effective index with one-dimensional metal-dielectric metamaterial: a quantitative analysis of the role of absorption losses[J]. *Opt Express*, 2007, **15**: 7720.
- [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 Tech Lett*, 2002, **33**(2): 136-139.
- [15] LI Ming-yu, GU Pei-fu, ZHANG Jin-long, et al. Analysis of transmitted spectrum of two-dimensional photonic crystal polarization splitters used in infrared region[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(1):110-114.
李明宇, 顾培夫, 张锦龙, 等. 红外区二维光子晶体偏振分光镜透射谱分析[J]. *光子学报*, 2008, **37**(1): 110-114.

Broadband Self-collimation Effect in One-dimensional Metal-dielectric Structure

ZHANG Jin-long, LIU Xu, SHEN Wei-dong, GU Pei-fu

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

Received date: 2008-11-04

Abstract: The projected band diagram of one-dimensional metal-dielectric structure was calculated. It shows that, a dispersionless band occurs in such a structure with proper parameters; and dispersion curves for the different wavelength were also shown considering realistic optical constants. A Gaussian beam incident in the one-dimensional metal-dielectric structure at different angles was simulated by verifying the self-collimation effect in the wavelength region of 440~600nm. Such a broadband self-collimation can be realized in different wavelength region with different material. Subwavelength imaging with the one-dimensional metal-dielectric structure was also analyzed. The resolution of $\lambda/3$ is achieved for the imaging with double slits source around a special wavelength.

Key words: Metal-dielectric films; Self-collimation; Subwavelength imaging



ZHANG Jin-long born in 1982. He received his B. S. degree in optical engineering from Zhejiang University in 2004. Now he is a doctoral student in the department of optical engineering, Zhejiang University. His research focused on optical thin films and photonics.