

doi: 10.3788/lop47.043101

金属狭缝阵列在电介质覆层下的 TE 波异常透射性

王亚伟² 邓晓斌^{1*} 王立峰¹ 刘明礼¹ 韩广才²⁽¹江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013; ²江苏大学理学院, 江苏 镇江 212013)

摘要 亚波长周期性结构具有不同于传统微结构的许多特异性, 利用这些性质可以设计新型纳米光子学器件。应用时域有限差分(FDTD)数值模拟方法, 通过在亚波长周期性结构的金属上添加电介质覆层, 发现了横电波(TE)偏振光激励下周期性调制金属狭缝的异常透射现象, 并对金属薄膜左右表面和狭缝内添加电介质覆层对异常透射的作用和影响进行了分析讨论, 得到金属的左右表面能激发一表面波, 通过狭缝内的电介质波导的传输, 产生异常透射增大的现象。

关键词 纳米光子学; 异常透射; 数值模拟; 亚波长狭缝

中图分类号 O436 OCIS 310.6628 350.4238 文献标识码 A

Extraordinary Transmission of TE-Polarization through Periodic Arrays of Metallic Slits Covered with Dielectric Medium

Wang Yawei² Deng Xiaobin¹ Wang Lifeng¹ Liu Mingli¹ Hang Guangcai²

⁽¹*School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China*)
²*Faculty of Science, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China*

Abstract Subwavelength periodic structures have many specific properties different from the traditional structures. Based on these properties, new nano-photonics devices can be designed. Using finite difference time domain (FDTD) numerical simulation methods, abnormal transmission phenomenon under TE polarized light excitation is realized by adding dielectric coating in the subwavelength periodic metallic slits. By comparing effects of adding dielectric in different locations such as left or right surface of metal films and metallic slits for extraordinary transmission phenomenon, it is proved that dielectric coatings on the metal films can excite a surface wave which transmits in dielectric waveguides in the metal slits, and results in extraordinary transmission phenomenon.

Key words nano-photonics; abnormal transmission; numerical simulation; subwavelength slit

1 引言

当一束平行光照射到具有二维周期性亚波长小孔阵列的光学厚度的金属薄膜上时, 在某些特定的波长产生异常光透射性现象^[1]。由于这种异常透射效应在纳米波导、可调谐光滤波器、微腔量子、电动力学、高密度光存储、近场光学等领域具有巨大的应用潜力, 从而引起了探索这种异常透射物理起源的热潮^[2~7]。分析其物理机理, 主要是由于金属表面产生的表面等离子体的共振耦合和孔径的法布里-珀罗腔共振引起的^[2,4]。相对于二维的周期性孔阵列, 人们研究了一维亚波长狭缝阵列模型产生的异常透射现象^[5~9], 这是一个更

收稿日期: 2009-08-02; 收到修改稿日期: 2009-10-02

基金项目: 江苏省六大人才高峰基金(06-E-059), 和江苏省自然科学基金(BK2008230)和江苏省先进光学制造重点实验室开放课题(KJS0905)资助课题。

作者简介: 王亚伟(1957—), 男, 博士, 教授, 主要从事光散射理论及其在生物细胞检测技术中的应用等方面的研究。

E-mail: jszjwyw@yahoo.com.cn

*通信联系人。E-mail: xiaobin202@163.com

简单的系统,应用该系统横电波(TE)和横磁波(TM)可以很容易分别研究。但是,在 TM 偏振光波照射下,狭缝所支持的模型和孔阵列所支持的模型不同,前者没有截止波长^[9]。虽然存在这些差异,但是大量的模拟实验清楚显示,异常透射仅对 TM 偏振光(磁场平行于狭缝)发生,表面等离子体仅对 TM 偏振光起作用。对金属材料采用理想导体(PEC)模型模拟,也可实现异常透射现象。由于平坦的 PEC 不支持表面等离子体,通过 TM 偏振光激励,在有凹槽的 PEC 金属产生了类等离子体行为的表面电磁模式(假等离子体),通过对此表面波的调制可以产生异常透射现象^[10]。

对于一维周期性结构, TE 偏振光和 TM 偏振光的激励完全不同。由于不同的边界条件,真实金属上的等离子体和 TE 偏振光不相关,PEC 金属的表面结构也不能产生 TE 偏振光的假等离子体。因此 TE 偏振光不能激发金属的表面波,异常透射现象似乎被限制在 TM 偏振光中。但最近通过在金属薄膜上添加电介质覆层实现了 TE 波的异常透射现象^[11-13]。本文应用时域有限差分(FDTD)数值模拟方法,通过在金属薄膜的不同界面添加额外电介质覆层对 TE 波异常透射现象的作用和影响展开了的研究,并对这一异常透射现象的产生机理进行了初步的探讨。

2 模拟方法

一个高斯调制的脉冲光束,在束腰处(位于 $z = 100 \text{ nm}$)半峰全宽为 $0.4 \text{ }\mu\text{m}$,沿着 +Z 方向传输,如图 1 所示。为了在 $300\sim 1100 \text{ nm}$ 波长范围内能够产生很强的光场能量,脉冲的时域调制为

$$T_{\text{pulse}}(t) = \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{t-t_{\text{off}}}{t_0}\right)^2\right],$$

时间偏移为 $t_{\text{off}} = 10^{-14} \text{ s}$,脉冲宽度为 $t_0 = 2 \times 10^{-15} \text{ s}$ 。脉冲光束在真空中的

中心波长为 $\lambda_0 = 0.55 \text{ }\mu\text{m}$,处于可见光波段(频率 $\nu = 5.45 \times 10^{14} \text{ Hz}$)。金属狭缝阵列结构模型为一层处于空气中的银薄膜,上面被刻蚀了周期为 $p = 400 \text{ nm}$ 的狭缝阵列,薄膜厚度为 $t = 100 \text{ nm}$,狭缝宽度为 $\omega = 40 \text{ nm}$ (如没有特殊的说明,本文中狭缝的结构尺寸不变)。

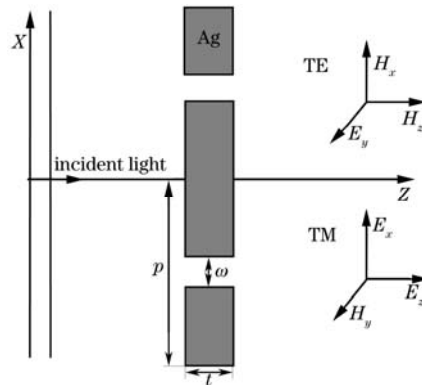


图 1 TE 偏振的平面波垂直入射到金属狭缝阵列的结构模型(两个周期)

Fig.1 Structure model of metallic slit arrays for the TE polarized plane wave at normal incidence (two periods)

由于在 Y 方向的照射是均匀的,模拟计算不依赖于 Y,仅在 XZ 二维平面进行。麦克斯韦方程被分离成 TE 和 TM 模式,如图 1(显示了两个周期)所示。TE 模式由 H_x , E_y 和 H_z 组成(E_y 沿着狭缝长度的方向),TM 模式由 E_x , H_y 和 E_z 组成(E_x 沿着狭缝宽度方向)。为了研究 TE 和 TM 波照射下金属狭缝阵列透射效率 η 的变化,使用坡印亭矢量 $\mathbf{S} = \frac{1}{2} \text{Re}(\mathbf{E} \times \mathbf{H}^*)$ 的 Z 分量 S_z ,透射效率 η 被定义为沿着输出孔径积分的 S_z 和沿着输入孔径积分的 S_z 的比值。

为研究随频率变化的金属介电常数和考虑金属的吸收作用,引入了更加真实的金属薄膜材料模型——Lorenz-Drude 模型^[14],其数学表达式为

$$\varepsilon_r(\omega) = \varepsilon_{r,\infty} + \sum_{m=0}^M \frac{G_m \Omega_m^2}{\omega_m^2 - \omega^2 + j\omega\Gamma_m}, \quad (1)$$

式中 $\varepsilon_{r,\infty}$ 为在无限大频率时的相对电介质常数, Ω_m 为等离子体频率, ω_m 为共振频率, Γ_m 为阻尼因素或者碰撞频率。

对于可见光和近红外波段的银, 采用了 6 个洛伦兹极子模型^[14]。为了将介电常数的频域函数转化为时域函数开展计算, 采用了辅助差分方程方法^[15]。在 X 方向应用周期性边界条件, 而在 Z 方向应用完美匹配层(PML)吸收边界条件^[15]。在 XZ 平面数值模拟的网格尺寸为 5 nm。

3 结果与分析

3.1 金属薄膜的不同界面添加电介质覆层对透射谱的影响

文献[11]与[13]通过在金属左表面添加电介质覆层激发类表面波, 得到 TE 波的异常透射现象; 文献[12]通过把金属置于包裹的电介质中, 激发左右类表面波, 也出现了 TE 波异常透射现象。我们研究在金属薄膜狭缝阵列的不同位置添加电介质覆层对 TE 波异常透射的影响。

基于图 1 的模型, 分别在金属左表面、右表面和左右表面添加厚度为 100 nm 的电介质(折射率 $n_d = 2.5$) 薄膜, 如图 2 所示。如果没有特殊说明, 添加电介质的折射率不变。图 3 给出了金属无电介质覆层、金属左表面有电介质覆层、右表面有电介质覆层和左右表面都有电介质覆层 4 种情况下, 波长和透射率的关系。在亚波长波段, 无电介质覆层时透射率几乎为零。左表面和右表面单独有电介质覆层时, 透射率和波长的关系几乎一致, 比无电介质覆层时增大一点点, 达 1.5%。而左右表面都存在覆层时, 透射增大也不明显, 最大的峰值透过率为 7%。更为惊奇的现象是左右表面单独有覆层和都有覆层时的峰值位置相同。这是由于我们选取的模型中金属薄膜和左右表面电介质覆层的厚度一样($t = 100$ nm)产生的。虽然这 3 种情况下, 透射有所增大, 但是透射增大均不明显。

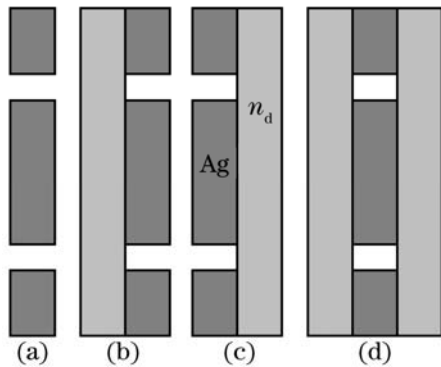


图2 金属薄膜(深色)(a), 金属左表面(b)、右表面(c)和左右表面(d)添加电介质覆层的模型图

Fig.2 Model of metallic film (a), adding dielectric in the left (b), right (c), and both sides (d)

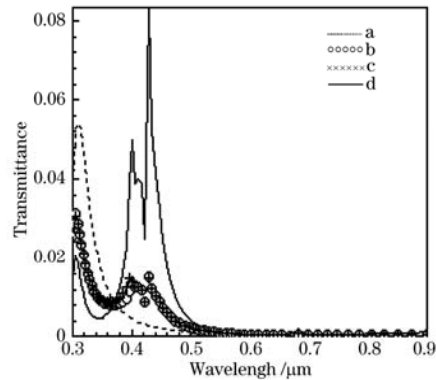


图3 金属无电介质覆层a、金属左表面b、右表面c、左右表面d有电介质覆层时, 波长和透射率的关系

Fig.3 Relation between the transmittance and incident wavelength for metallic film of no dielectric layer a, adding dielectric in the left b, right c, and both sides d

分析在金属狭缝的左右表面和狭缝内添加电介质对透射的影响, 如图 4 所示, 所产生的透射谱如图 5 所示。从图中可知, 金属薄膜处于对称电介质包围中时, 透射异常增大相当明显, 达到峰值 69%, 而仅左右表面有电介质覆层时, 最大峰值仅为 7%。对称电介质包裹金属比左右表面覆层产生更大的透射, 几乎达到 10 倍。仅狭缝内有电介质薄膜时透射率也达到 45%。可见, 狭缝内的电介质对透射的贡献要比表面电介质的贡献大得多。比较曲线可知, 对称电介质包裹金属产生了 3 个峰值, 峰值 1, 峰值 2 与狭缝内有电介质时产生的峰值基本相同。认为峰值 1 和峰值 2 主要由狭缝内的电介质作用引起, 是狭缝波导的两个传输模式; 峰值 3 主要由左右表面和狭缝内的电介质共同作用引起, 左右电介质覆层激发的表面波通过狭

缝内的电介质波导传输得到了加强。

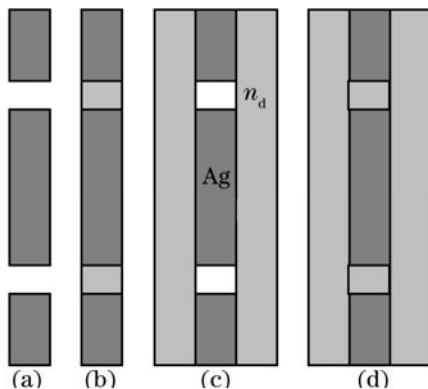


图4 金属薄膜(深色)(a)、金属狭缝内 (b)、左右表面 (c)、左右表面和狭缝内 (d)、添加电介质包裹覆层的模型图

Fig.4 Model of metal film (a), adding dielectric in the slit inside (b), adding dielectric in the left and right (c), and metal film surrounded dielectric layer (d)

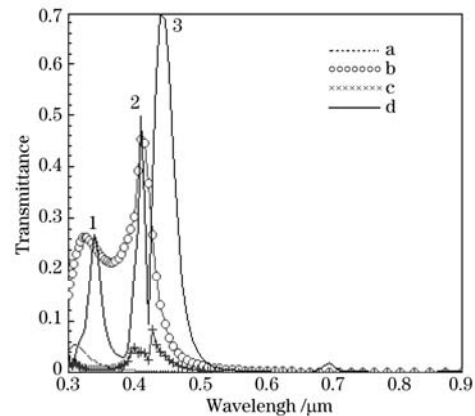


图5 金属薄膜无电介质覆层 a、金属狭缝内 b、左右表面 c、左右表面和狭缝内(d)、有电介质包裹时, 波长和透射率的关系

Fig.5 Relation between transmittance and incident wavelength for metallic film of no dielectric layer a, adding dielectric in the slit inside b, adding dielectric in the left and right surface c, and metallic film surrounded dielectric layer d

3.2 金属狭缝阵列的光场分布

为了进一步了解电介质覆层对透射增强作用的物理机理, 模拟了光通过金属狭缝阵列的光场分布。图6给出, 在峰值3($\lambda = 440 \text{ nm}$)的单波长 TE 波激励下, 光通过电介质包裹覆层的金属银膜的光场分布。从电场强度 E_y 的振幅分布图和等高线分布图可以看出, 电场在薄膜两边和狭缝两边成对称分布。图7给出了银膜左右表面的光场。从左右表面的电场强度分布对比可见, 左右表面所产生的表面波具有相同的振幅和波长, 通过狭缝内波导的传输透射现象得到极大的加强。

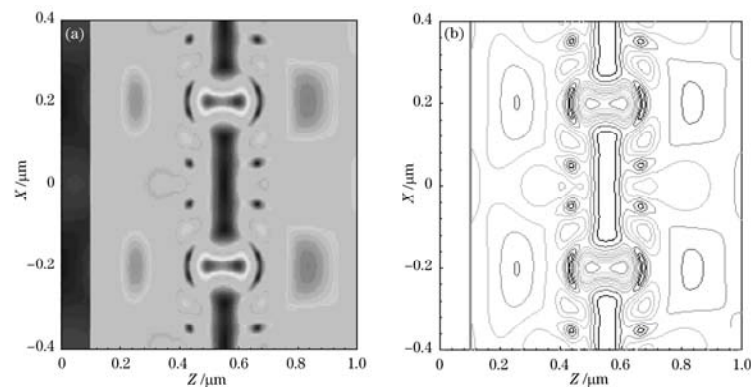


图6 $\lambda=440 \text{ nm}$ 的TE波激励下, 有电介质包裹覆层的金属银膜的电场分布。(a) 电场强度 E_y 的振幅值分布; (b) 电场强度 E_y 的等高线图

Fig.6 Field distribution of the silver film surrounded by dielectric layer at $\lambda=440 \text{ nm}$ for single wavelength TE wave.

(a) amplitude distribution of electric field intensity E_y ; (b) contour maps of electric field intensity E_y

图8给出了在峰值2($\lambda = 412 \text{ nm}$)的单波长 TE 波激励下, 光通过电介质包裹覆层的银膜和仅狭缝内有添加电介质的银膜的光场和能量分布。可知,电介质包裹覆层银膜的左右表面的光场并不对称, 光场被反射回来, 银膜左右表面产生的表面波不一致, 只沿着电介质薄膜传输, 这一现象在左表面更显著, 透射由表面波和狭缝内的波导共同作用产生。仅狭缝内有电介质时, 银膜表面没有能量聚集, 没有表面波的存在, 狭缝内的波导对透射起着决定性的作用, 比表面波的作用更大。

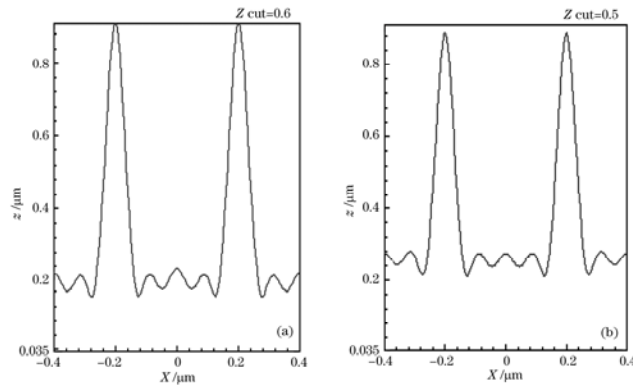
图7 银膜左(a)、右(b)表面 E_y 的振幅值分布。

Fig.7 Amplitude distribution of electric field intensity E_y on the left and right (a) and right (b) surfaces of silver film.

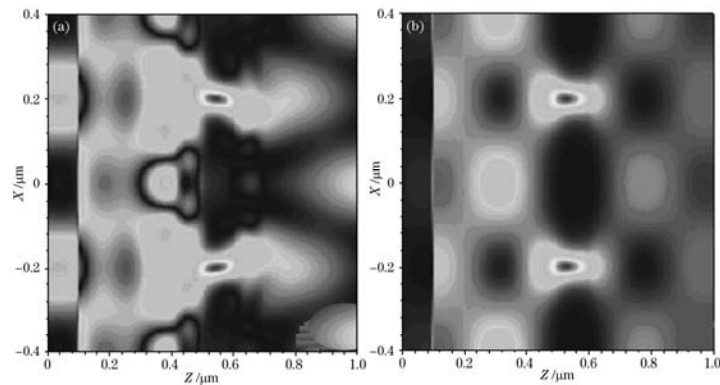


图8 $\lambda=412$ nm 的 TE 波激励下, 有电介质包裹覆层的银膜(a)和仅狭缝内有添加电介质的银膜(b)的坡印亭矢量 S 振幅分布
Fig.8 Amplitude distribution of the Poynting vector of slits at $\lambda=412$ nm for TE wave for the dielectric layer coated silver film (a) and adding dielectric only in the slit inside (b)

4 结 论

针对 TE 波激励下, 金属狭缝阵列电介质覆层对产生的异常透射作用的问题进行了模拟实验研究。结果表明, 金属左右表面单独有电介质薄膜和左右表面都有电介质薄膜时, 透射非常微弱, 电介质薄膜的作用很不明显; 金属有包裹的电介质覆层时, 异常透射要比仅左右表面有电介质时大得多, 这是由于左右表面电介质覆层激发的表面波相一致, 通过狭缝内电介质的波导传输得到加强。通过选择不同几何参数的金属狭缝, 添加不同电介质可以产生不同类型的异常透射效果, 可应用于偏振光子元件制造业中。

参 考 文 献

- 1 T. W. Ebbesen, H. J. Lezec, H. F. Ghaemi *et al.*. Extraordinary optical transmission through sub-wavelength hole arrays[J]. *Nature*, 1998, **391**(6668): 667~669
- 2 Yi Yongxiang, Wang Guoping, Long Yongbing *et al.*. Optical transmission enhancement of two-dimensional subwavelength hole arrays in metallic films[J]. *Acta Physica Sinica*, 2003, **52**(3): 604~608
易永祥, 汪国平, 龙佣兵 等. 二维亚波长金属小孔阵列的透射光增强效应[J]. *物理学报*, 2003, **52**(3): 604~608
- 3 Zhang Liang, Li Chengfang, Zhang Fei. Diffractive characteristics of 1D metal gratings with subwavelength periodic structure[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(6): 805~808
张 亮, 李承芳, 张 飞. 一维金属亚波长周期光栅的衍射特性[J]. *中国激光*, 2006, **33**(6): 805~808
- 4 D. Qu, D. Grischkowsky. Observation of a new type of THz resonance of surface plasmons propagating on metal-film hole arrays[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2004, **93**(19): 196804
- 5 Yang Sha, Geng Jianxin, Ye Qing *et al.*. Application of fiber Bragg gratings in monitoring metal corrosion[J]. *Chinese J. Lasers*,

- 2006, **33**(5): 641~645
阳 莎, 耿健新, 叶 青等. 光纤光栅在金属锈蚀传感中的应用[J]. 中国激光, 2006, **33**(5): 641~645
- 6 L. Martín-Moreno, F. J. García-Vidal, H. J. Lezec *et al.*. Theory of extraordinary optical transmission through subwavelength hole arrays[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2001, **86**(6): 1114~1117
- 7 F. Yang, J. R. Sambles. Resonant transmission of microwave through a narrow metallic slit[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2002, **89**(6): 63901~63903
- 8 Q. Cao, P. H. Lalanne. Negative role of surface plasmons in the transmission of metallic gratings with very narrow slits[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2002, **88**(5): 057403
- 9 E. Popov, M. Nevi'ere, S. Enoch *et al.*. Theory of light transmission through subwavelength periodic hole arrays[J]. *Phys. Rev. B*, 2000, **62**(23): 16100~16108
- 10 J. B. Pendry, L. Martín-Moreno, F. J. García-Vidal. Mimicking surface plasmons with structured surfaces[J]. *Science*, 2004, **305**(5685): 847~848
- 11 E. Moreno, L. Martín-Moreno, F. J. García-Vidal. Extraordinary optical transmission without plasmons: the s-polarization case[J]. *J. Opt. A*, 2006, **8**(4): S94~98
- 12 Guanghui Yuan, Pei Wang, Douguo Zhang. Extraordinary transmission through elliptical gold nanowire grating under s-polarization excitation[J]. *IEEE*, 2006. 370
- 13 Guanghui Yuan, Pei Wang, Douguo Zhang. Extraordinary transmission through metallic grating with subwavelength slits for S-polarization illumination[J]. *China Phys. Lett.*, 2007, **24**(6): 1600~1603
- 14 Aleksandar D. Rakic, Aleksandra B. Djuricic, Jovan M. Elazar *et al.*. Optical properties of metallic films for V vertical-cavity optoelectronic devices[J]. *Appl. Opt.*, 1998, **37**(22): 5271~5283
- 15 A. Taflove, S. C. Hagness. Computational Electrodynamics: the Finite-Difference Time-Domain Method[M]. Massachusetts: Artech House, 2005. 236