

介质覆层下金属周期结构变化对 TE 波异常透射特性的影响

王亚伟 孟增辉* 冯 伟 田相龙

(江苏大学理学院, 江苏 镇江 212013)

摘要 根据金属光栅结构变化对 TE 波异常透射特性影响的研究需要,建立了相应的模型。应用时域有限差分(FDTD)方法分别计算了单缝结构、多缝结构、不同宽度和不同周期等结构下的透射分布特征。研究发现添加凹槽会对金属表面能量的传递起阻碍作用。透射频域宽度随薄膜宽度增加而增加。随着狭缝宽度的增加,透射率分布曲线包络线趋于平坦,主透射峰短波长侧透射曲线分布基本不变,而主透射峰及其长波长侧的透射曲线分布变宽。这说明宽度的变化影响了表面共振模式,从而影响透射的分布。单个狭缝的透射与多周期结构相比,透射率曲线几乎重合,表明狭缝对表面模式没有调制作用,各狭缝的透射相对独立。

关键词 光栅;TE 波异常透射;时域有限差分;介质覆层

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201232.0231002

Effect on Extraordinary Transmission of TE Wave from Different Metallic Periodic Structures Covered with Dielectric Layer

Wang Yawei Meng Zenghui Feng Wei Tian Xianglong

(School of Science, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China)

Abstract Metal grating models are designed to correspond the extraordinary transmission, structures with single slit and periodic slits and structures with different widths and different periods are calculated by finite difference time domain (FDTD) method. It is found that grooves on a metal grating play a negative role to energy transfer on the metal surface. Frequency domain of transmission becomes wider in pace with the width of the film; with the increasing of the width of the slit, the distribution envelope tends to flat, the side of shorter wavelength of the main transmission peak is essentially the same, while the distribution curve of the main transmission peaks and the side of longer wavelength of it become wider. It indicates that the width of the slits impacts the resonance modes of surface and the distribution of transmission. The transmission of single slit compared to the periodic structure's, we found that transmittance curves almost coincide. It shows that the surface modes do not depend on the slits and there is no interaction between them.

Key words grating; TE wave extraordinary transmission; finite difference time domain; dielectric layer

OCIS codes 310.6628; 050.6624; 050.1940

1 引 言

亚波长金属光栅的异常透射现象引起人们越来越多的关注和研究兴趣^[1,2]。Ebbesen 等^[3]在 1998 年发现,当光通过金属薄膜上的亚波长小孔阵列时,会在某些特定波长下产生异常透射现象,透射率比

经典光阑理论值高 2~3 个数量级。随着现代计算机技术和微纳加工技术的飞速发展,光学异常透射在亚波长光刻、纳米波导以及新型纳米光电子器件等方面的重要潜在应用越来越多地被人们认识到^[4~6],因此近年来一直是国际上的一个研究热点,

收稿日期: 2011-07-14; **收到修改稿日期:** 2011-09-06

基金项目: 国家自然科学基金(21146004)、江苏省高校自然科学重大项目(09KJA14001)和江苏大学高级人才启动项目(11JDG037)资助课题。

作者简介: 王亚伟(1957—),男,博士,教授,主要从事光信息科学与技术等方面的研究。

E-mail: jszjwyw@yahoo.com.cn

* **通信联系人.** E-mail: groupofywwang@sina.com

国内的一些课题组也对亚波长光栅的光学特性进行了一系列有意义的实验研究和理论分析^[7,8]。

在理论和实验研究中,最初认为只有 TM 偏振光可以发生异常透射现象。表面等离子共振耦合是解释这种现象的被广泛接受的理论,该理论认为异常透射的产生是由于入射光与金属薄膜前后表面激发的表面等离子激元(SPP)的共振耦合。然而表面等离子体并不能解释所有异常透射现象,随即出现了衍射消逝波及准柱面波^[9,10]等理论来进一步研究异常透射。近几年的理论和实验^[11~15]通过在金属光栅上添加电介质覆层实现了 TE 波的异常透射现象。然而目前对 TE 波激励下的异常透射认识还不够深刻,并且产生许多不同的看法。

本课题组之前对一维金属光栅结构进行研究,从理论上解释了透射峰的物理机制^[12,15]。在此基础上,为了进一步研究 TE 波激励下的异常透射现象,建立了单缝结构、多缝结构、不同宽度和不同周期等变化结构下的模型,应用时域有限差分(FDTD)方法分别计算了诸模型下不同的透射分布特征及其所受到的影响。

2 理论与数值计算模型

金属薄膜结构如图 1 所示,单缝结构和周期性结构的狭缝宽度为 w ,单缝结构金属薄膜的宽度为 L ,周期性结构中的周期为 p ,金属银(Ag)膜的厚度为 t ,介质薄膜厚度为 h ,电介质的折射率 $n_d = 2.5$ 。金属薄膜上的凹槽宽度为 w' ,深度为 d ,距离狭缝为 l 。平行平面光波垂直照射到金属薄膜上,波长范围为 300~900 nm。

利用 FDTD 法模拟 TE 波通过亚波长一维金属薄膜狭缝结构时,结构的各个边界采用完全匹配层截断电磁场,在 y 方向光源采用周期性边界条件设

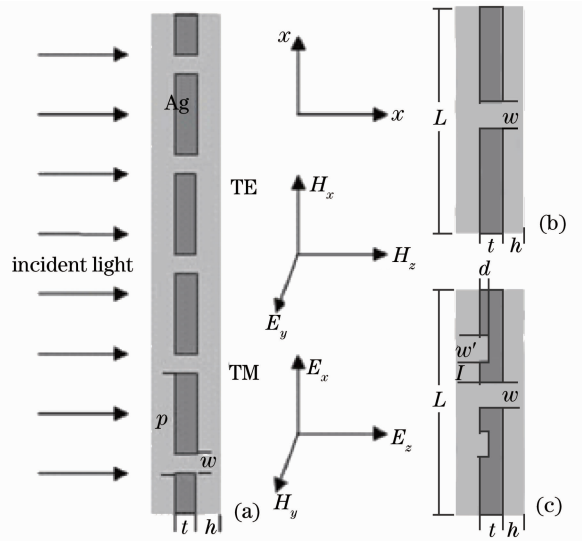


图 1 金属薄膜结构。(a)周期性金属狭缝阵列结构; (b)单缝结构;(c)带凹槽的单缝结构

Fig. 1 Structure model metallic film of (a) periodical metallic slit arrays; (b) single slit (c) single slit with grooves

置平面波源。用下列洛伦茨-德鲁德模型^[15]来表示金属的相对介电常数 ϵ_r 与频率 ω 的关系:

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

式中 $\epsilon_{r,\infty}$ 是无限大频率时的相对介电常数 Ω_m 是等离子频率, ω_m 是共振频率, Γ_m 是阻尼系数, G_m 为振子强度。对于可见光和近红外波段激励下的 Ag, 采用 6 个洛伦茨极子模型。计算采用辅助微分方程(ADE)^[16,17], 将介电常数的频域函数转化为时域函数, 设置观察面距薄膜右表面 1000 nm, TE 模式由 H_x , E_y 和 H_z 组成(E_y 沿着狭缝长度的方向), 用数值差商代替麦克斯韦方程组中的导数, 得到迭代方程如下:

$$E_y^n(i, k) = E_y^{n-1}(i, k) + \frac{\Delta t}{\epsilon \Delta z} [H_x^{n-1/2}(i, k + 1/2) - H_x^{n-1/2}(i, k - 1/2)] - \frac{\Delta t}{\epsilon \Delta x} [H_z^{n-1/2}(i + 1/2, k) - H_z^{n-1/2}(i - 1/2, k)], \quad (2)$$

$$H_x^{n+1/2}(i, k + 1/2) = H_x^{n-1/2}(i, k + 1/2) + \frac{\Delta t}{\mu_0 \Delta z} [E_y^n(i, k + 1) - E_y^n(i, k)], \quad (3)$$

$$H_z^{n+1/2}(i + 1/2, k) = H_x^{n-1/2}(i + 1/2, k) - \frac{\Delta t}{\mu_0 \Delta x} [E_y^n(i + 1, k) - E_y^n(i, k)]. \quad (4)$$

为了保证模拟结果的准确性和稳定性,在 x - z 面两个方向,数值模拟的网格尺寸均设定为 5 nm, 时间步长选择为 10^{-17} s。本文透射效率 η 定义为沿

着观察面单位时间内通过的能量和单位时间内垂直照射到狭缝上能量的比值,公式为

$$\eta = U_{2z} S_2 / (U_{1z} S_1),$$

式中 U_{1z}, U_{2z} 分别为照射面和观察面坡印亭矢量 $\mathbf{U} = \text{Re}(\mathbf{E} \times \mathbf{H}^*)/2$ 的 Z 分量, S_1, S_2 分别为狭缝处面积和观察面面积。

3 数值计算与分析

3.1 单缝结构下的透射特性

如图 1(b) 所示, 选择薄膜宽度 $L=2000$ nm, 狭缝宽度 $w=40$ nm, 金属膜厚 $t=100$ nm, 介质层厚 $h=100$ nm。模拟计算得到波长与透射率的分布如图 2 所示。

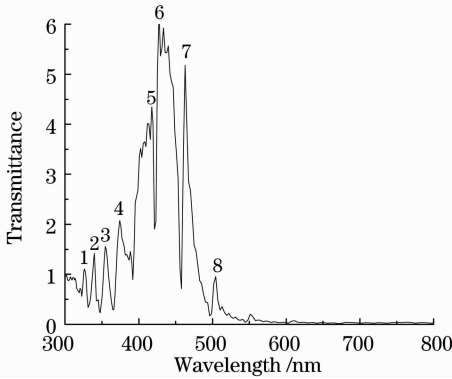


图 2 透射率与波长的关系

Fig. 2 Relation between the transmittance and incident wavelength

由图 2 可以看出, 在研究波长范围内, 透射率随波长变化, 出现许多较明显的透射峰, 分别标号 1~8, 极大值点位置分别为 326, 339, 355, 374, 412, 434, 462 和 503 nm。这些峰值的透射率都大于 1, 其中最大透射率的波长为 434 nm, 称为主透射。由此显示了在 TE 波激励下, 添加电介质覆层的单缝金属薄膜结构存在异常透射现象。

3.2 凹槽对单缝结构透射特性的影响

为了进一步研究金属表面结构对 TE 波激励下异常透射的影响, 探究其物理机制, 对单缝结构添加凹槽以改变其结构。如图 1(c) 所示, 在薄膜正对入射光一面距离狭缝 $l=40$ nm 处添加宽度为 $w'=40$ nm、深度为 $d=40$ nm 的凹槽。基于此结构进行数值模拟计算, 选择薄膜宽度 $L=2000$ nm, 狭缝宽度仍然为 $w=40$ nm, 计算得到透射率与波长的关系如图 3 所示。

比较图 2 与图 3 发现, 在狭缝附近 Ag 膜表面一边增加凹槽, 主透射率峰值明显下降, 其他透射率峰值也是如此。虽然透射率下降, 但是透射峰位置几乎没变。两边同时加凹槽时比只在一边加凹槽时, 主透射率峰值下降得更多, 其他透射峰值也是如

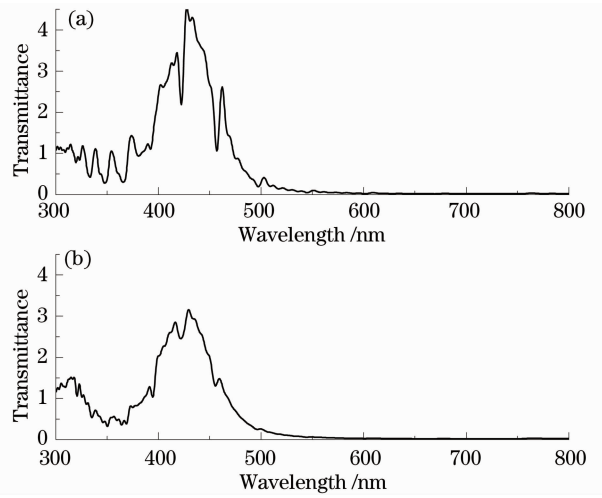


图 3 凹槽对透射率的影响。(a)在狭缝一边有凹槽时的透射率;(b)在狭缝两边同时有凹槽时的透射率

Fig. 3 Effects of grooves on transmittance. (a) A groove on one side of the slit; (b) two grooves on both sides of the slit

此, 除主透射外其他透射峰消失或者明显下降。由此可发现 434 nm 处的主透射峰位置与金属薄膜表面模式基本无关。为了进一步分析凹槽对表面能量的聚集作用, 计算出波长为 434 nm 的光波入射时, 狭缝及凹槽处的电场强度分布如图 4 所示。

图 4 表明在狭缝和凹槽处的电场强度明显加强。电场强度的平方表示了光场能量, 根据对右侧光场能量比较, 可以发现没有加凹槽的狭缝透过的能量明显大于有凹槽的, 这说明凹槽对金属表面能量向狭缝的传递起阻碍作用, 降低了光能的透射。同理可说明两边同时加凹槽比只在一边加凹槽时, 能量下降更明显。

3.3 不同宽度结构变化对透射特性的影响

针对不同薄膜宽度和狭缝宽度的周期结构进行数值模拟计算得到透射率与波长的关系分别如图 5 和图 6 所示。

从图 5 可以看出当狭缝两边薄膜宽度改变时, 主透射峰波长位置基本不变化, 但是透射频域宽度随薄膜宽度增加而增加; 随薄膜宽度增加, 其透射峰数量增加。这说明薄膜宽度的变化影响了表面共振模式, 从而产生了不同的异常透射效果。

由图 6 可以看出随狭缝宽度的增加, 其透射峰数目增加, 分布曲线振荡加剧, 分布曲线包络线趋于平坦, 主透射峰左边透射曲线分布基本不变, 而主透射峰以及右边的透射曲线分布变宽, 说明透射的频宽拓展, 并且发生透射的波长增大。

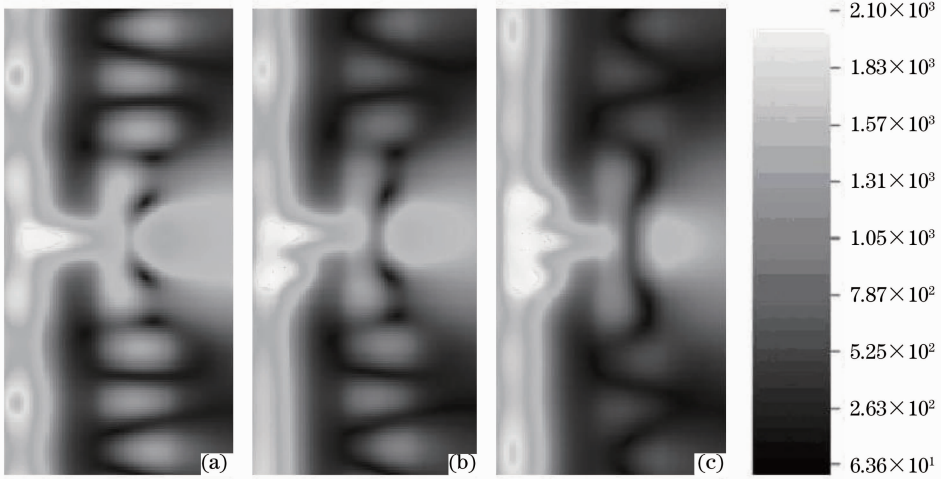


图 4 单缝结构在 434 nm 光入射下的电强度分布。(a)没有凹槽;(b)一边带凹槽;(c)两边带凹槽
Fig. 4 Electric field intensity distributions of single slit with incident light at 434 nm. (a) No groove;
(b) a groove on one side; (c) two grooves on both sides

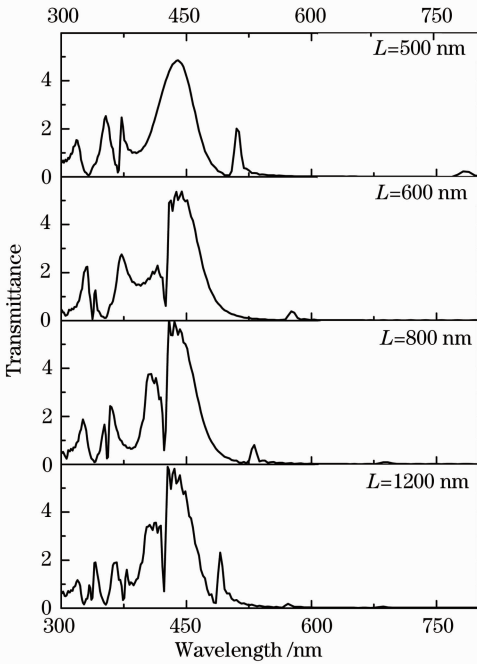


图 5 狭缝宽度 40 nm,薄膜宽度分别为 500,600, 800 和 1200 nm 时,透射率随波长变化关系
Fig. 5 Relation between the transmittance and incident wavelength for slit width $w=40$ nm, film width $L=500,600,800,1200$ nm

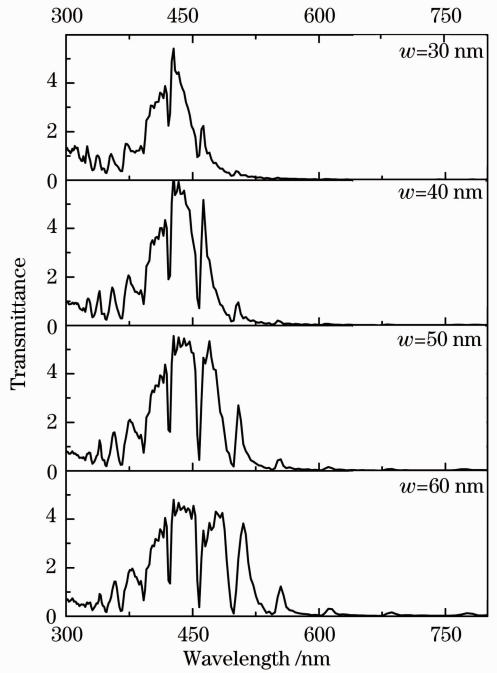


图 6 不同狭缝宽度时的透射率随波长的变化关系
Fig. 6 Relation between the transmittance and incident wavelength for different slit width w

3.4 不同周期对透射特性的影响

针对两种不同周期的结构(周期 p 分别为 400 nm 与 500 nm),数值模拟计算得到了不同狭缝周期个数 n 的透射率与波长之间的关系如图 7 所示。

通过图 7 可以看出不改变占空比的情况下,单个狭缝与多周期结构的透射率曲线几乎重合,可知

周期个数对异常透射没有影响。这是由于 TE 偏振下,没有表面等离子体的产生,不会产生 TM 模式下周期结构对波矢匹配的影响。TE 激励下只有表面介质覆层提供了对入射光波和表面模式的波矢匹配,并且 TE 激励下的异常透射现象只在添加介质覆层时才产生。可以认为能量是透过由各个狭缝传输,透射中狭缝对表面模式没有调制作用,透射谱曲

线与周期没有直接的关系,这与国外专家对 TE 波激励下异常透射所得到的最新结论^[14]相似,各个狭

缝能量在局域内相互影响很小,而远场透射为各个狭缝线性叠加的结果。

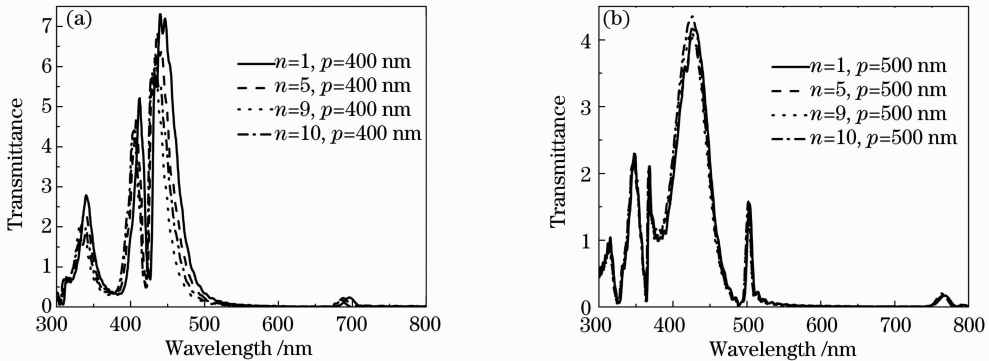


图 7 不同周期个数下,透射率与波长的关系(n 为周期数目, $n=1$ 代表单缝结构)

Fig. 7 Relation between the transmittance and incident wavelength for different periods (n denotes period number, $n=1$ denotes single slit)

4 结 论

以一维亚波长金属狭缝结构为研究对象,运用 FDTD 法模拟并进行理论分析,发现在 TE 波激励下,加电介质覆层的亚波长金属薄膜狭缝结构有明显的异常透射现象。通过对比有无凹槽、不同金属薄膜宽度、不同狭缝宽度的单缝结构和占空比相同的周期性结构的透射率以及光场能量分布,发现凹槽对金属表面能量向狭缝的传递起阻碍作用。周期性金属光栅结构中各个狭缝相对独立透射,可以认为能量是透过各个狭缝传输,透射中狭缝对表面模式没有调制作用。改变狭缝和薄膜宽度,主透射峰波长位置基本不变化,但是透射频域宽度随薄膜宽度增加而增加,其透射峰数目随狭缝宽度的增加而增加,并且主透射峰及其长波长侧的透射曲线分布变宽,发生透射的波长增大。这说明宽度的变化影响了表面共振模式,从而影响透射的分布。关于发生这些透射分布特征的物理机理有待于进一步的研究。

参 考 文 献

- 1 V. I. Belotelov, L. L. Doskolovich, V. A. Kotov *et al.*. Magneto-optical effects in the metal-dielectric gratings[J]. *Opt. Commun.*, 2007, **278**(1): 104~109
- 2 Sun Zhijun, Kim Hong-Koo. Anomalous reflection and transmission characteristics of a type of continuous film metal gratings[J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 2008, **19**(6): 839~842
- 3 孙志军, Kim Hong-Koo. 一种连续膜金属光栅的异常反射和透射特性[J]. *光电子·激光*, 2008, **19**(6): 839~842
- 4 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
- 5 Yang Yisu, Huang Yongqing, Huang Hui *et al.*. Design of

photodetector with subwavelength grating structure[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(9): 2352~2357

杨一粟, 黄永清, 黄辉等. 一种具有亚波长光栅结构的光探测器的设计[J]. *中国激光*, 2009, **36**(9): 2352~2357

- 6 Wang Fang, Su Jingqin, Wang Fang *et al.*. Optimization of sub-wavelength grating for separating harmonic waves in ICF driver [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(2): 508~512

王方, 粟敬钦, 王芳等. 用于 ICF 驱动器谐波分离的亚波长光栅优化设计[J]. *光学学报*, 2010, **30**(2): 508~512

- 7 Zhou Yun, Shen Su, Ye Yan *et al.*. Research on the characteristics of subwavelength metal grating polarizers with a high refractive-index dielectric layer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(4): 1158~1161

周云, 申溯, 叶燕等. 带有高折射率介质层的金属光栅偏振器特性的研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(4): 1158~1161

- 8 Zhang Dawei, Yuan Limeng, Huang Yuanshen *et al.*. Influence of film on the characteristics of sub-wavelength grating [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(11): 3060~3063

张大伟, 袁丽萌, 黄元申等. 导模共振滤光片表面镀膜对其物理特性的影响 [J]. *中国激光*, 2009, **36**(11): 3060~3063

- 9 Guo Chucai, Ye Weimin, Yuan Xiaodong *et al.*. Research on reflection characteristics of sub-wavelength gratings [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(12): 3272~3276

郭楚才, 叶卫民, 袁晓东等. 亚波长光栅反射特性研究[J]. *光学学报*, 2009, **29**(12): 3272~3276

- 10 Henri J. Lezec, Tineke Thio. Diffracted evanescent wave model for enhanced and suppressed optical transmission through subwavelength hole arrays [J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(16): 3629~3651

- 11 Haitao Liu, Philippe Lalanne. Microscopic theory of the extraordinary optical transmission [J]. *Nature*, 2008, **452**(7162): 728~731

- 12 E. Moreno, L. Martín-Moreno, F. J. García-Vidal. Extraordinary optical transmission without plasmons: the s-polarization case [J]. *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.*, 2006, **8**(4): S94~S97

- 13 Wang Yawei, Liu Mingli, Liu Renjie *et al.*. Extraordinary transmission through one-dimensional metallic gratings with sub-wavelength slits under transverse electric wave excitation [J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, **59**(6): 4030~4035

王亚伟, 刘明礼, 刘仁杰等. 横电波激励下亚波长一维金属光栅的异常透射性[J]. *物理学报*, 2010, **59**(6): 4030~4035

- 13 S. A. Kuznetsov, M. Navarro-Cia, V. V. Kubarev *et al.*. Regular and anomalous extraordinary optical transmission at the THz-gap [J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(14): 11730~11738
- 14 M. Guillaumée, A. Y. Nikitin, M. J. K. Klein *et al.*. Observation of enhanced transmission for spolarized light through a subwavelength slit [J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(9): 9722~9727
- 15 Wang Yawei, Liu Mingli, Liu Renjie *et al.*. Fabry-Perot resonance on extraordinary transmission through one-dimensional metallic gratings with sub-wavelength under transverse electric wave excitation[J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, **60**(2): 1~5
- 王亚伟, 刘明礼, 刘仁杰 等. Fabry-Perot 腔谐振对横电波激励下亚波长一维金属光栅的异常透射性的作用[J]. *物理学报*, 2011, **60**(2): 1~5
- 16 J. L. Young, R. O. Nelson. A summary and systematic analysis of FDTD algorithms for linearly dispersive media [J]. *IEEE Antennas Propagation Magazine*, 2001, **43**(1): 61~126
- 17 M. H. Han, R. W. Dutton. Model dispersive media in finite-difference time-domain method with complex-conjugate pole-residue pairs[J]. *IEEE Microw. Wireless Compon. Lett.*, 2006, **16**(3): 119~121

栏目编辑:李文喆