

双层金属纳米光栅的TE偏振光异常透射特性

褚金奎 王倩怡 王志文 王立鼎

Extraordinary optical transmission through bilayer metallic nano-grating for s-polarization light

Chu Jin-Kui Wang Qian-Yi Wang Zhi-Wen Wang Li-Ding

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 164206 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.164206

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.164206>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I16>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

**Bragg** 反射齿型平面凹面衍射光栅性能研究

[Study on planar concave diffraction grating with Bragg reflector facets](#)

物理学报.2015, 64(15): 154211 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.154211>

准随机矩形孔阵列透射光栅

[Qusia-random rectangular holes self-supporting transmission grating](#)

物理学报.2015, 64(7): 074201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.074201>

基于 **Bragg** 反射面结构的衍射光栅设计与研究

[Study of the diffraction grating designed based on the Bragg reflection structure](#)

物理学报.2014, 63(19): 194209 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.194209>

二维光栅与周期性缝隙阵列组合薄膜结构的杂散光抑制

[Suppression of the stray light of 2-dimensional gratings combined with an array of periodic slit](#)

物理学报.2013, 62(20): 204208 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.204208>

基于 **Talbot** 效应的掺镁铌酸锂二维六角位相阵列光栅的研究

[A study of two-dimensional hexagonal phase array grating in MgO:LN based on the Talbot effect](#)

物理学报.2013, 62(9): 094216 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.094216>

# 双层金属纳米光栅的TE偏振光异常透射特性\*

褚金奎<sup>†</sup> 王倩怡 王志文 王立鼎

(大连理工大学机械工程学院, 大连 116024)

(2015年1月23日收到; 2015年3月16日收到修改稿)

根据在亚波长金属光栅表面添加电介质会引起TE偏振光的透射异常性, 应用严格耦合波理论和时域有限差分方法, 研究了双层金属纳米光栅在TE偏振光入射时产生的异常透射现象. 利用等效折射率方法建立了双层金属光栅的等效模型, 得到了TE偏振光透射率与聚合物的折射率、厚度以及金属层厚度的变化关系. 确认了结构中聚合物是透射异常出现的必要条件, TE偏振光以波导电磁模式在其中传播, 并认为类Fabry-Perot腔谐振是透射峰值产生的主要原因.

**关键词:** 双层金属纳米光栅, TE偏振光异常透射, 类Fabry-Perot腔谐振

**PACS:** 42.79.Dj, 42.25.Bs, 78.66.Bz, 78.20.Bh

**DOI:** 10.7498/aps.64.164206

## 1 引言

1998年Ebbesen等<sup>[1]</sup>提出, 特定波长的入射光经过拥有亚波长孔隙结构的金属薄膜后会出现透射异常现象. 与孔隙结构相似, 一维亚波长金属光栅结构同样具有透射异常现象<sup>[2-17]</sup>. 目前, 针对亚波长金属光栅透射现象的研究主要集中在TM偏振光方面<sup>[3-11]</sup>. 一种观点认为, TM光可以激发金属层的表面等离子体激元(surface plasmon polaritons, SPP), 与入射光耦合后在狭缝中传播时形成表面等离子共振(surface plasmon resonance, SPR)<sup>[3-5]</sup>, 从而引起透射增强. 然而随着研究不断深入, SPR理论不能很好地解释TM光异常透射现象<sup>[6]</sup>, 于是一些学者提出运用Fabry-Perot (F-P)腔谐振<sup>[7-9]</sup>来解释透射异常的出现. 与TM光相比, 由于边界条件的不同, TE偏振光无法激发SPP从而产生异常透射, 因此早期一直忽略了亚波长金属光栅的TE光透射情况. 然而近期研究和实验发现<sup>[12-18]</sup>, 通过在单层金属光栅表面添加电介质或是在狭缝中填充电介质, 同样可以实现TE偏振光

的异常透射. 对于TE光异常透射现象, 一方面可以用电介质波导模式<sup>[12,13]</sup>和类导模共振、类F-P腔谐振<sup>[15,16]</sup>来解释; 另一方面通过对金属和介质的接触面的分析发现高折射率的金属-介质表面可以使TE光形成类似SPP的表面波<sup>[17]</sup>, 引起异常透射.

双层金属纳米光栅作为亚波长金属光栅的一种, 其制作方法<sup>[19-21]</sup>较单层金属光栅简单, 成本低, 偏振性能良好. 与单层金属光栅相比, 双层金属纳米光栅的偏振光透射模式更加复杂<sup>[19]</sup>, 本文发现该结构在TE偏振光入射时也会产生透射异常现象. 双层金属光栅的TE光透射性能与单层金属光栅相比, 会在蓝紫光波段出现一个透射峰值. 本文利用等效折射率法、严格耦合波(rigorous coupled-wave analysis, RCWA)<sup>[22]</sup>和时域有限差分方法(finite-difference time-domain, FDTD)<sup>[23]</sup>讨论了峰值出现的机理, 依据单层金属光栅TE偏振光的异常透射现象, 提出在聚合物层中产生的类F-P腔是双层金属光栅TE光透射异常的原因, 分析了聚合物折射率、厚度和金属层厚度对双层金属光栅TE透射峰值的影响.

\* 国家重点基础研究发展计划(批准号: 2011CB302101, 2011CB302105)资助的课题.

<sup>†</sup> 通信作者. E-mail: [chujk@dlut.edu.cn](mailto:chujk@dlut.edu.cn)

## 2 双层金属纳米光栅的 TE 偏振光透射模式

双层金属纳米光栅模型如图 1 所示. 模型参数如下: 光栅周期  $p = 200 \text{ nm}$ , 占空比 0.5, 金属层材料选择铝材料, 其厚度  $d = 90 \text{ nm}$ , 聚合物高度  $h = 200 \text{ nm}$ , 折射率  $n = 1.6$ , 不考虑基底的折射率影响.

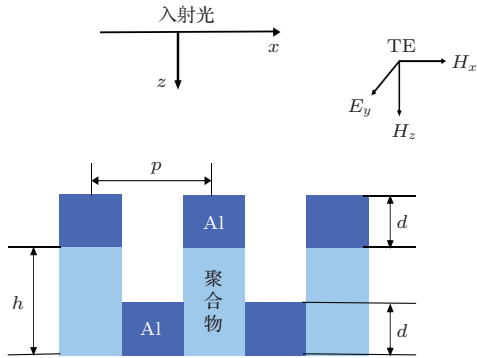


图 1 (网刊彩色) 双层金属纳米光栅模型

Fig. 1. (color online) Model of bilayer metallic nano-grating.

由图 1 所示, 可以将双层金属光栅视为由三层光栅结构组成: 上层为金属-空气介质形成的单层金属光栅, 厚度为  $d$ ; 中间层为聚合物-空气两相介质形成的周期结构, 厚度  $t = h - d = 110 \text{ nm}$ ; 而下层为金属-聚合物形成的单层光栅结构, 其厚度亦为  $d$ . 本文采用 RCWA 计算不同参数对双层金属光栅 TE 偏振光透射率的影响, 利用 FDTD 对 TE 偏振光透射峰值进行数值模拟. 与 FDTD 相比, RCWA 可以精确地分析周期性结构的电磁场衍射, 直接得到光栅结构的 Maxwell 方程的稳定解 [23], 从而获得精确的一维周期性金属光栅的 TE 透射率. 而 FDTD 方法通过对电场与磁场的交替有限差分计算可以求解任意情况下的电磁场问题, 通过一次计算就能得到光栅整体结构中各点的电场和磁场强度, 易于对周期性金属光栅结构电磁场分布情况进行研究.

图 2 分别显示了入射光波长  $\lambda$  范围在 300—800 nm 时, 双层金属光栅的 TE 光透射率和拥有相同结构参数的单层金属光栅 (金属厚度  $d = 90 \text{ nm}$ , 周期  $p = 200 \text{ nm}$ , 占空比 0.5) 的 TE 光透射率. 通过两条曲线的对比可以看出, 在入射光波长  $\lambda = 460 \text{ nm}$  处, 双层金属光栅的 TE 光透射率

曲线出现了一个峰值, 而单层金属光栅的曲线继续平缓衰减. 文献 [12] 中指出, 在单层金属光栅表面添加一层电介质层, 可以使透过的 TE 偏振光产生透射异常. 而双层金属光栅可以视为聚合物层和两层交错的单层金属光栅的组合结构, 正是聚合物的引入使得双层金属光栅的 TE 偏振光透射率出现透射异常现象.

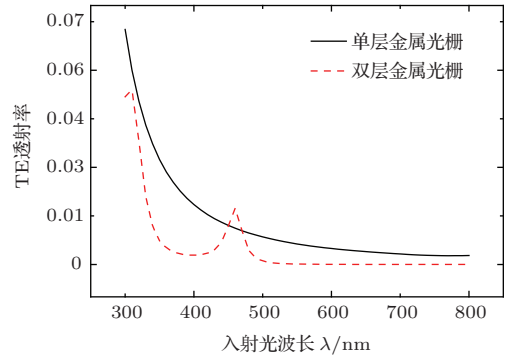


图 2 (网刊彩色) 双层金属光栅与对应结构的单层金属光栅的 TE 透射率对比

Fig. 2. (color online) Comparison of s-polarization transmittance between bilayer and single layer metallic gratings.

## 3 结果与分析

### 3.1 聚合物对双层金属光栅的 TE 透射率的影响

如图 3 所示, 可以将双层金属光栅的中间层——聚合物和空气组成的两相介质周期结构运用模系统方法 [24] 等效成一层均匀电介质层 (图 3(b)). “模系统”(module system) 是将特定范围内拥有相同比例关系的两个物理变量, 由一种变量来表示另一种变量的模拟方法. 用于计算两相介质的等效折射率  $n_{\text{eff}}$  的表达式为

$$n_{\text{eff}} = \sqrt{n_0^2 \frac{n_1^2 + 2n_0^2 + 2g_1(n_1^2 - n_0^2)}{n_1^2 + 2n_0^2 - g_1(n_1^2 - n_0^2)}}, \quad (1)$$

$n_0$  是模相 (系统中构成一个连续基体的相, 亦称主相) 的折射率,  $n_1$  是嵌入相 (少数相) 的折射率,  $g_1$  是嵌入相的体积百分比.

图 3(a) 中聚合物的折射率  $n = 1.6$ , 将聚合物视为嵌入相, 空气视为模相, 根据 (1) 式可以得到等效模型 (图 3(b)) 中间电介质层的折射率为  $n_{\text{eff}} = 1.27$ , 保持下层的聚合物折射率不变. 为了验证聚合物对透射率的影响, 图 3(c) 给出了忽略了聚合物、由两层单层金属光栅错位组成的“双层

金属光栅”模型. 三种模型的TE光透射率曲线如图4所示, 三种模型的TE偏振光透射率曲线均会随着入射光波长的增加而降低. 与图3(c)模型相比, 图3(a)和图3(b)模型分别在 $\lambda = 460 \text{ nm}$ 处和 $\lambda = 430 \text{ nm}$ 处出现一个透射峰值, 证明了提出的等效模型与原有的双层金属光栅结构有相同的TE透射异常现象. 同时, 两个峰值的出现表明聚合物的存在影响了TE偏振光的透射方式, 导致了异常透射现象. 这与在单层金属光栅表面添加电介质层使TE偏振光产生异常透射相似: 由于金属表面电介质层的添加, 使TE光激发了类表面波, 出现异常透射现象<sup>[13]</sup>. 图3(a)和图3(b)模型的TE透射率峰值位置的偏离是因为由(1)式得到的等效折射率是一个近似值. 光栅结构的周期与入射光波长的比值越小, 计算得到的等效折射率越精确<sup>[25]</sup>. 入射光波长 $\lambda$ 在300—600 nm范围内, 光栅周期为200 nm时, 得到的等效折射率会与实际结果存在一定的偏差. 虽然两者存在一定的误差, 但并不影响定性地分析聚合物的添加对双层金属光栅TE偏振光透射的影响.

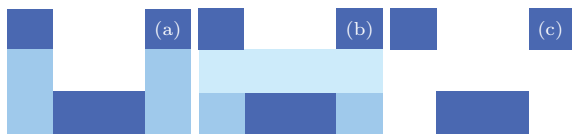


图3 (网刊彩色) 三种双层金属光栅模型 (a) 双层金属光栅原型; (b) 双层金属光栅等效模型; (c) 无聚合物的双层金属光栅模型

Fig. 3. (color online) Three kinds of models for bilayer metallic grating: (a) the original model; (b) the equivalent model; (c) the model without polymer.

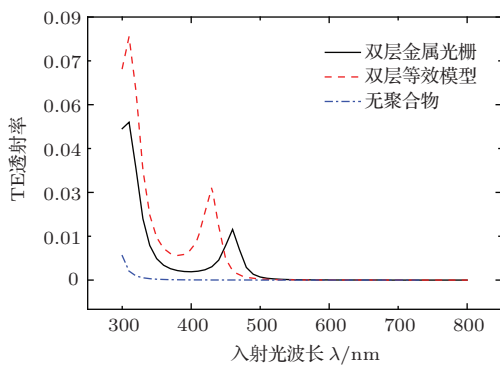


图4 (网刊彩色) 三种双层金属光栅模型的TE透射率曲线  
Fig. 4. (color online) The s-polarization transmittance of the three bilayer metallic grating models.

运用FDTD方法模拟了TE偏振光通过双层金属光栅的光场分布. 图5给出了在峰值 $\lambda = 460 \text{ nm}$ 时, TE光通过有聚合物(图3(a))和没有聚合物(图3(c))的两种双层金属光栅模型的光场能量分布, 图中黑框为聚合物所在位置. 通过图5(a)和5(b)的能量分布图可以发现, 聚合物使能量传递到了中间层, 并在其中传播形成共振, 光场能量增强. 根据文献<sup>[14]</sup>, 可以将中间的介质层视为一层波导, 金属狭缝可以将TE光耦合成中间层支持的表面电磁波模式, 当入射光以特定的波长入射时, 会在中间层形成共振. 增强后的光场能量经过下层金属的吸收后, 透射出的光场强度仍比没有聚合物时有所增加, 聚合物的存在使得TE偏振光出现透射异常.

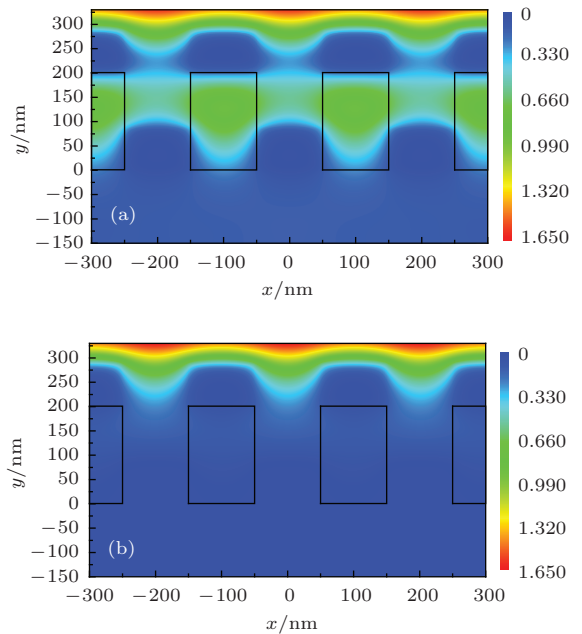


图5 (网刊彩色) TE透射峰值出现时( $\lambda = 460 \text{ nm}$ )聚合物对光场分布的影响 (a) 有聚合物; (b) 无聚合物

Fig. 5. (color online) The influence of the polymer on the optical field distribution at the peak position of s-polarization transmittance ( $\lambda = 460 \text{ nm}$ ): (a) the polymer exists; (b) without the polymer.

### 3.2 聚合物折射率对TE透射率的影响

由于表面电磁波在中间电介质层产生共振, 引发TE光的透射异常, 而这种波导电磁模式的色散关系受到电介质层的折射率 $n$ 和厚度 $t$ 的影响, 因此这两个参数也会影响TE偏振光透射率峰值出现的位置. 图6分别给出了折射率的变化对双层金属光栅及其等效模型TE透射率的影响. 聚合物的折射率从1.3变化到1.8, 其等效模型的中间介质层折射率按照(1)式随之变化. 由图6可知, 两种模型的TE透射峰值均会随着入射波长的增加出现红移, 并且两者呈线性增长, 这种红移现象可以用类F-P腔谐振来解释.

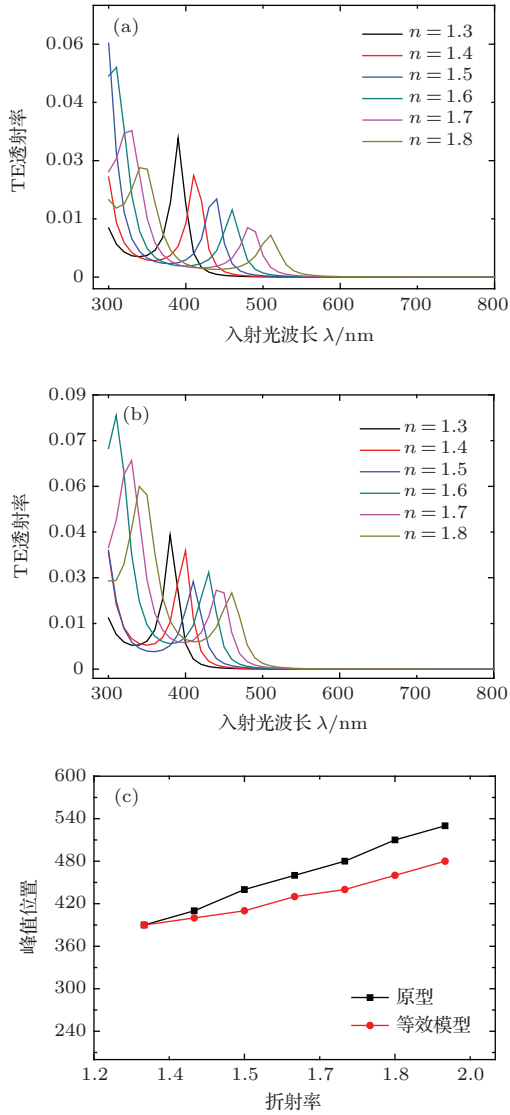


图6 (网刊彩色) 聚合物折射率变化对TE透射率峰值位置的影响 (a) 双层金属光栅原型; (b) 等效模型; (c) 两模型峰值位置随折射率变化趋势

Fig. 6. (color online) Effect of the polymer refractive index on the peak position of s-polarization transmittance: (a) the original bilayer model; (b) the equivalent model; (c) the comparison of the transmittance peak position between two models.

当TE偏振光通过上层金属光栅在中间层传播时, 相当于通过一个类F-P腔的结构. 当中间层厚度  $t$  一定时, 只有特定波长的入射光才能满足类F-P腔的谐振条件, 因此只有在以特定波长入射时, TE偏振光才会出现透射异常现象. 当入射光垂直入射时, F-P腔谐振的简化公式为

$$\frac{m\lambda}{n_{\text{eff}}} = 2l_{\text{F-P}}, \quad (2)$$

式中  $l_{\text{F-P}}$  为腔体的长度 (本文为中间聚合物-空气层的厚度  $t$ ),  $\lambda$  为峰值出现处的入射光波长,  $m$

为整数. 由于F-P腔体一般为一层均匀介质, 考虑双层金属光栅的等效模型 (图3(b)): 当  $m = 1$  时, 将  $n_{\text{eff}} = 1.27$ ,  $\lambda = 430 \text{ nm}$  代入 (2) 式可得  $l_{\text{F-P}} = 169 \text{ nm}$ , 计算得到的类F-P腔体长度大于实际中间层厚度  $t = 110 \text{ nm}$ , 这是由于类F-P腔长度受到了下层金属-聚合物层的影响. 下层结构亦可以通过有效折射率方法等效为一层均匀的电介质材料, 而这层电介质材料的存在会使类F-P腔的长度变长 [8]. 根据文献 [8, 16], 可以将 (2) 式修正为

$$\frac{m\lambda}{n_{\text{eff}}} = 2(l_{\text{F-P}} + \Delta), \quad (3)$$

式中  $\Delta$  值不仅与下层的等效介电常数有关, 与入射波长也有关系, 反映了基底对类F-P腔体长度的影响.

从 (3) 式可以看出, 保持双层金属光栅中间层厚度不变, 随着聚合物折射率的增加, 双层金属光栅中间层的等效折射率  $n_{\text{eff}}$  也会随着增加, 与之对应的类F-P腔匹配的入射光波长  $\lambda$  也随之增加. 因此, TE偏振光的透射峰值位置随聚合物折射率增长产生的红移现象是由类F-P共振条件的改变引起的.

### 3.3 聚合物厚度对TE透射率的影响

中间层的波导电磁模式不仅与聚合物的折射率  $n$  有关, 也会受到中间层聚合物的厚度  $t$  的影响. 由 (3) 式可知, 随着聚合物厚度的增加, 与之匹配的类F-P腔谐振模数也会增加. 同时通过计算可以得到TE偏振光透射率随聚合物高度变化出现极值的周期, 该周期为类F-P腔产生的驻波波长, 即  $m = 1$  时类F-P谐振腔长度. 分别计算了双层金属光栅等效模型与原型在各自TE透射峰值处的入射波长 ( $\lambda = 430, 460 \text{ nm}$ ) 下, TE偏振光透射率随中间层聚合物厚度变化的趋势, 如图7所示. 图7(a) 显示了等效模型的TE透射率变化曲线, 透射峰值分别出现在中间层聚合物厚度  $t = 110, 279$  和  $446 \text{ nm}$  处, 峰值出现的周期约为  $168 \text{ nm}$ , 与前文根据类F-P腔谐振公式计算得到的腔体长度基本符合. 图7(b) 为双层金属光栅原型的TE透射率曲线, 当中间层聚合物厚度为  $t = 110, 277$  和  $445 \text{ nm}$  时TE透射率出现峰值, 此时峰值出现周期约为  $167 \text{ nm}$ , 与根据等效模型计算得到的F-P腔体长度接近.

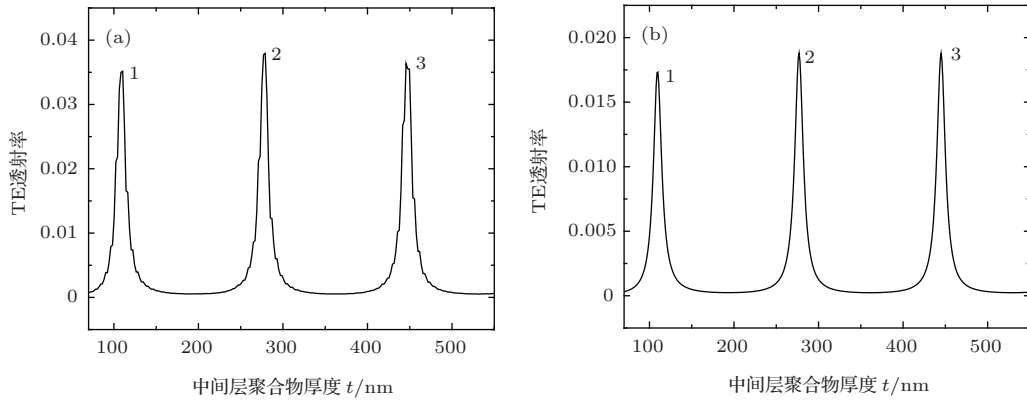


图7 (网刊彩色) 中间层聚合物厚度对TE光透射率的影响 (a) 双层金属光栅等效模型; (b) 双层金属光栅原型  
 Fig. 7. (color online) Effect of the polymer thickness in middle layer on the s-polarization transmittance: (a) the equivalent model; (b) the original bilayer model.

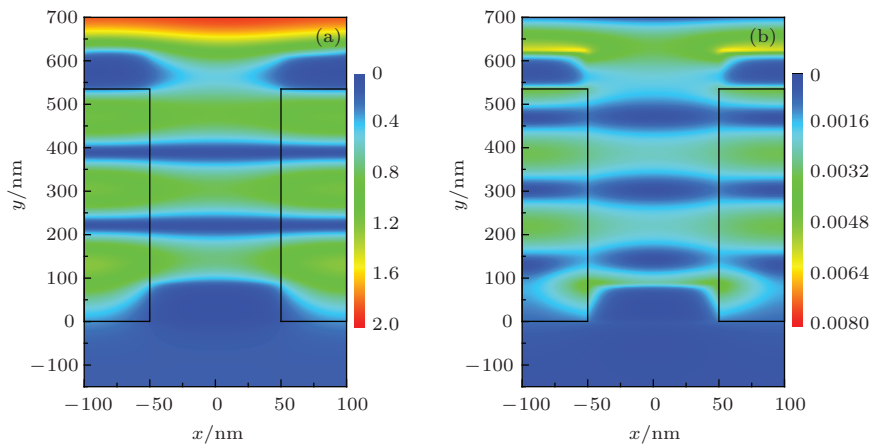


图8 (网刊彩色) 峰值3处的TE偏振光的电场能量分布(a)和磁场能量分布(b)  
 Fig. 8. (color online) The optical field distribution of the peak No. 3 of s-polarization transmittance: (a) energy of electric field; (b) energy of magnetic field.

选择图7(b)的峰值3观察TE光透射峰值的光场分布, 因为较大的聚合物厚度可以观察到中间层的驻波场分布. 图8(a)为峰值3出现时的电场分布情况, 显示了峰值3代表的 $m = 3$ 时的驻波模式, 可以清晰地看到三个透射增强峰值. 中间层与下层的分界面处, 由于下层金属光栅的存在, 电场能量被迅速吸收, 只有在聚合物区域传播的光场能量传递到了底部. 这说明下层金属光栅结构改变了传播在中间层的TE偏振光的波导电磁模式, 这种波导电磁模式主要存在于中间聚合物层. 下层金属光栅对TE光的吸收也可以从图8(b)中看出, 图8(b)是峰值3出现时的磁场强度分布, 由于下层金属光栅的存在, 使得应在 $y = 90 \text{ nm}$ 处出现一个磁场峰值迅速被金属吸收, TE透射率经过下层的金属光栅后进一步衰减.

### 3.4 金属层高度对TE透射率的影响

TE偏振光在中间介质层中产生的波导电磁模式, 其TE透射峰值位置主要受到聚合物折射率 $n$

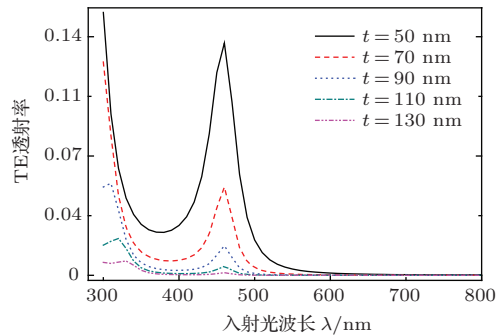


图9 (网刊彩色) 金属层厚度对TE透射率峰值的影响  
 Fig. 9. (color online) Effect of the thickness of the metal layer on the peak of s-polarization transmittance.

和厚度  $t$  的影响, 而金属层的参数, 如金属层高度  $d$ , 不会影响共振的峰值位置. 如图 9 所示, 保证中间层聚合物厚度  $t$  不变, 改变上下两层金属层厚度  $d$ , 计算结果表明 TE 偏振光透射峰值所在位置基本没有变化, 证明了 TE 偏振光以波导电磁模式存在于中间层. 同时, 随着金属层厚度的增加, 对 TE 偏振光的吸收逐渐增加, TE 透射率随之降低, 并且峰值会逐渐削弱.

## 4 结 论

本文利用等效介质理论、严格耦合波和 FDTD 数值模拟方法, 验证了在 TE 偏振光入射下, 双层金属纳米光栅结构中的聚合物是其产生透射异常的原因. 根据类 F-P 腔谐振理论, 提出了聚合物-空气组成的中间层是波导模式存在的主要区域, 分析了聚合物折射率和厚度以及金属层厚度对 TE 偏振光透射峰值的影响. 为进一步研究双层金属光栅的透射现象提供了一种可行的方法, 同时也为双层金属纳米光栅的制作提供了理论基础.

## 参考文献

- [1] Ebbesen T W, Lezec H J, Ghaemi H F, Thio T, Wolff P A 1998 *Nature* **391** 667
- [2] Porto J A, Garcia-Vidal F J, Pendry J B 1999 *Phys. Rev. Lett.* **83** 2845
- [3] Treacy M M J 2002 *Phys. Rev. B: Condens. Matter* **66** 195105
- [4] Lee K G, Park Q H 2005 *Phys. Rev. Lett.* **95** 103902
- [5] Liu H, Lalanne P 2008 *Nature* **452** 728
- [6] Xie Y, Zakharian A, Moloney J, Mansuripur M 2005 *Opt. Express* **13** 4485
- [7] Takakura Y 2001 *Phys. Rev. Lett.* **86** 5601
- [8] Tan C L, Yi Y X, Wang G P 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 1063 (in Chinese) [谈春雷, 易永祥, 汪国平 2002 物理学报 **51** 1063]
- [9] García-Vidal F J, Martín-Moreno L, Ebbesen T W, Kuipers L 2010 *Rev. Mod. Phys.* **82** 729
- [10] Lochbihler H, Depine R A 2012 *Appl. Opt.* **51** 1729
- [11] Wei F F, Wang H Y, Zhou Y S 2013 *Chin. Phys. B* **22** 024201
- [12] Moreno E, Martín-Moreno L, García-Vidal F J 2006 *J Opt A: Pure Appl. Opt.* **8** S94
- [13] Yuan G H, Wang P, Zhang D G, Jiao X J, Min C J, Ming H 2007 *Chin. Phys. Lett.* **24** 1600
- [14] Guillaumée M, Nikitin A Y, Klein M J K, et al. 2010 *Opt. Express* **18** 9722
- [15] Wang Y W, Liu M L, Liu R J, Lei H N, Deng X B 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 4030 (in Chinese) [王亚伟, 刘明礼, 刘仁杰, 雷海娜, 邓晓斌 2010 物理学报 **59** 4030]
- [16] Wang Y W, Liu M L, Liu R J, Lei H N, Tian X L 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 024217 (in Chinese) [王亚伟, 刘明礼, 刘仁杰, 雷海娜, 田相龙 2011 物理学报 **60** 024217]
- [17] Sun Z J, Zuo X L, Guan T P, Chen W 2014 *Opt. Express* **22** 4714
- [18] Gao H, Zheng Z Y, Dong A G, Fan Z J 2014 *Optik* **125** 6687
- [19] Ekinici Y, Solak H H, David C, Sigg H 2006 *Opt. Express* **14** 2323
- [20] Meng F T, Luo G, Maximov I, Montelius L, Chu J K, Xu H 2011 *Microelectron. Eng.* **88** 3108
- [21] Chu J K, Wang Z W, Guan L, Liu Z, Wang Y L, Zhang R 2014 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **26** 469
- [22] Moharam M G, Gaylord T K 1981 *JOSA* **71** 811
- [23] Yee K S 1966 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **14** 302
- [24] Li H R 1990 *Introduction to Dielectric Physics* (Chengdu: Press of Chengdu University of Science and Technology) pp323-331 (in Chinese) [李翰如 1990 电介质物理学导论 (成都: 成都科技大学出版社) 第 323—331 页]
- [25] Jing X F, Jin Y X 2011 *Appl. Opt.* **50** C11

# Extraordinary optical transmission through bilayer metallic nano-grating for s-polarization light\*

Chu Jin-Kui<sup>†</sup> Wang Qian-Yi Wang Zhi-Wen Wang Li-Ding

(School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

( Received 23 January 2015; revised manuscript received 16 March 2015 )

## Abstract

Based on the phenomenon of the s-polarization extraordinary optical transmission through subwavelength metallic grating on a dielectric film, the same phenomenon in bilayer metallic nano-grating has been found. In order to analyze the s-polarization transmission in this specific structure, the rigorous coupled-wave analysis and finite-different time-domain method is applied: the former is used for analyzing the transmission of the structure exactly and the latter is used for acquiring the optical field distribution of the structure. Using the equivalent refractive method, the equivalent mechanical model of the bilayer metallic grating is founded, which is as much of extraordinary optical transmission as the original model, to discover the relationship between the polymer and the s-polarization transmission. The comparison of distribution of field-intensity for two bilayer structures, with or without the polymer, illustrates that the existence of the polymer is the main reason to the s-polarization transmission peak appearance. Because the existence of the polymer can be treated as a waveguide and the s-polarization is coupled by metal grating and then turns to a surface wave, there is a resonant phenomenon occurred in the polymer area under the incident light with particular wavelength.

In addition, the effect of geometrical parameters of the polymer, such as the refractive index and the thickness of the polymer, the effect of the thickness of the metal film on s-polarization transmittance are discussed. Increasing the refractive index of the polymer leads to the red shift of transmission peak both in the original bilayer model and the equivalent model, which indicates that the two models have the same property. The transmission peak can be explained by the Fabry-Perot-like resonance, and the red shift of transmission peak is result from the change of the resonance condition due to the refractive index increase. The polymer thickness increase results in the addition of the resonance modes and the corresponding transmission peaks. The cycle of the peak is calculated and the result is similar to the length of the Fabry-Perot-like cavity. However, the thickness of metal layer does not impact the position of the s-polarization transmission peak. In conclusion, the polymer which sustains a waveguide electromagnetic mode is necessary for the extraordinary optical transmission, and the existence of Fabry-Perot-like resonance in the polymer film is the main reason of the resonant peak appearing.

**Keywords:** bilayer metallic nano-grating, s-polarization extraordinary transmission, Fabry-Perot-like resonance

**PACS:** 42.79.Dj, 42.25.Bs, 78.66.Bz, 78.20.Bh

**DOI:** 10.7498/aps.64.164206

\* Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant Nos. 2011CB302101, 2011CB302105).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [chujk@dlut.edu.cn](mailto:chujk@dlut.edu.cn)