

孔阵形状对周期孔阵金属薄膜透过率的影响

曹玉蓉, 叶永红

(南京师范大学物理科学与技术学院, 江苏 南京 210097)

[摘要] 采用高频结构仿真软件对中红外波段周期结构金属薄膜的光透射增强现象进行了数值模拟. 通过对圆形、椭圆、正方形以及长方形 4 种不同孔阵金属薄膜的仿真得出, 金属微孔的几何形状对透过率增强有着重要的影响. 当椭圆或长方形金属孔阵长短径比例增加时, 透射峰随着比例的增大红移; 比较 4 种金属薄膜的透射峰移动情况发现, 长方形和椭圆的形状效应较为明显. 上述结果显示局域模式在透射增强现象中起了重要的作用. 此外, 我们还对长方形和椭圆孔阵列在不同偏振光入射下的光透射性质进行了模拟.

[关键词] 周期孔阵金属薄膜, 透过率增强, 数值模拟, 孔阵形状

[中图分类号] O484.4⁺1 [文献标识码] A [文章编号] 1001-4616(2009)03-0037-05

Influence of Aperture Shape on Extraordinary Transmission Through Periodically Perforated Metal Films

Cao Yurong Ye Yonghong

(School of Physical Science and Technology, Nanjing Normal University, Nanjing 210097, China)

Abstract The High Frequency Structure Simulator is used to simulate the enhanced transmission through periodically perforated metal films in the middle-infrared region. We studied the circle, ellipse, square and rectangular hole arrays and demonstrated (with different shapes) that the transmission properties are strongly influenced by the hole shape. For the ellipse and rectangular hole arrays, the position of the transmission peak shifts toward longer wavelength as the aspect ratio increases. By comparing the shift of the transmission peak among the above four arrays, we found that shape resonance of rectangular and ellipse holes is larger than the others. The simulated results indicate that localized modes play an important role in the enhanced transmission. The optical transmission properties of the ellipse and rectangular hole arrays under different polarization of the incident light are also simulated.

Key words periodically perforated metal film, enhanced transmission, simulation, hole shape

近年来周期性金属结构中的透射增强现象受到人们的关注^[1-5]. 由于这种增强效应突破了经典孔径理论的限制, 在光学局域、微腔量子电动力学、高密度数据存储、近场光学等领域具有巨大的应用潜力. 虽然这种透射增强的机理还不是十分清楚, 但人们普遍认为表面等离子激元 (Surface Plasmon Polaritons, SPPs) 在其中起到了相当重要的作用^[6]. 早期人们主要研究圆形孔阵的透射增强现象, 圆形孔阵透射峰的位置取决于孔阵结构的周期. 最近一系列的研究表明, 由于局域模式 (localized modes) 的参与, 金属微孔有序阵列中微孔的几何形状对增强透射有着重要的影响^[7-11]. Klein 等发现长方形微孔阵列金属薄膜透过率除了和微孔周期有关, 同长方形的几何形状也有密切关系, 随着长方形微孔边长的减小, 透射峰红移^[8]. Michael 等还发现柱状微孔阵列的透过率同样受微孔形状的影响^[9]. 很少有研究涉及比较不同类型的孔阵结构对透过率增强的作用. 本文对亚波长圆形、椭圆、正方形以及长方形孔阵金属薄膜的透过率增强同孔阵形状的关系进行了仿真模拟.

收稿日期: 2008-09-10

基金项目: 国家自然科学基金 (60778041)、江苏省普通高校自然科学基金计划 (07KJA51001) 资助项目.

通讯联系人: 叶永红, 教授, 研究方向: 光电功能材料. E-mail: yenyj@ yahoo. ca

1 数值模拟

本文采用基于电磁场有限元分析方法的三维高频电磁仿真软件对二维亚波长周期结构金属薄膜的透过率进行了数值模拟. 计算模型如图 1(a)所示, 选取最小周期结构单元, 厚 2 μm 的 SU-8 膜上、下分别为 50 nm 厚银层, 仿真中所取银根据 Drude 模型得出, 金属的相对介电常数可表达成:

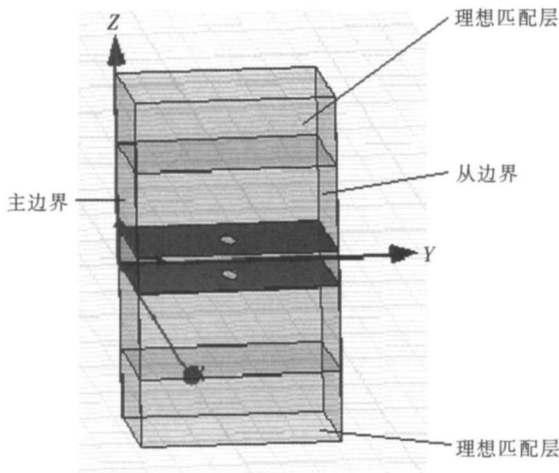


图 1 (a) 仿真模型

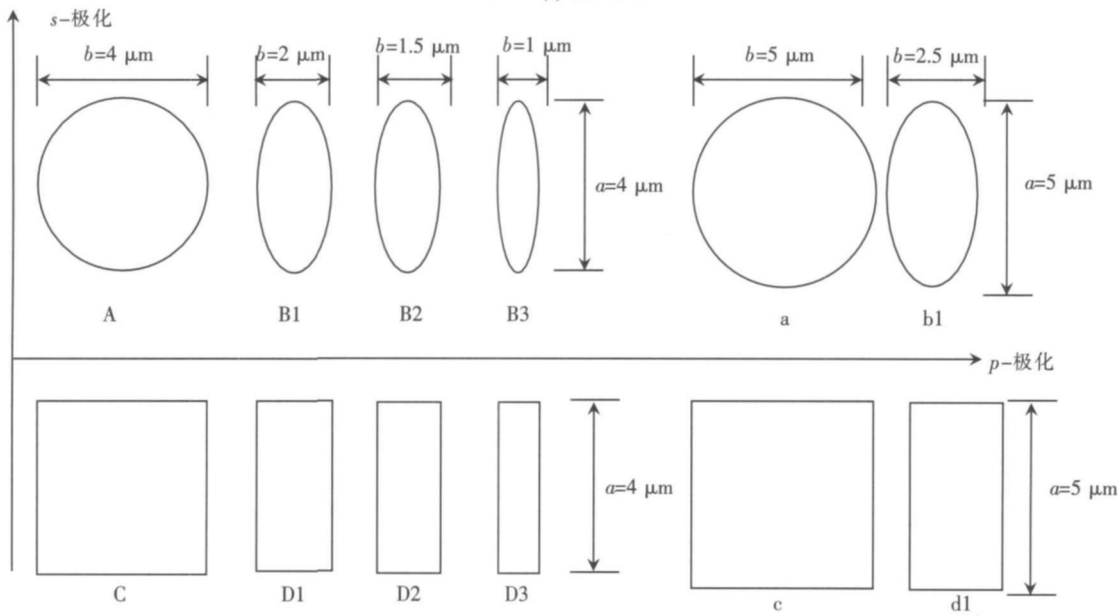


图 1 (b)12 种模拟所用的孔阵结构, p 偏振表示电场方向垂直于长边, s 偏振表示电场方向垂直于短边

Fig.1 (a) Simulation model. (b) Twelve different apertures. The p polarization perpendicular to the long axis of the arrays, s polarization perpendicular to the short axis of the arrays

$$\epsilon_m(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 - i\Gamma\omega}.$$

这里, ω_p 是等离子体振荡频率, Γ 是散射速率. 对于银, $\omega_p = 1.2 \times 10^{16} \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$, $\Gamma = 1.45 \times 10^{13} \text{ s}^{-1}$. 采用平面波激励, 在 z 方向上使用理想匹配层 (PML), 它是在区域截断边界处设置的一种特殊复各向异性介质层, 该层介质的波阻抗与相邻介质波阻抗完全匹配, 因而入射波将无反射地穿过分界面而进入 PML 层, 并且 PML 层为有耗介质, 进入 PML 层的透射波将迅速衰减, 即使 PML 为有限厚度, 它对于入射波仍然有很好的吸收效率. 在 x, y 方向上采用主从边界条件用以模拟无限周期平面, 通过求解 S 参数可以得到透射系数.

2 结果与讨论

图 1(b) 为仿真所用 12 种不同孔阵结构. 孔阵周期均为 $12\text{ }\mu\text{m}$, 样品 A、a 是孔径分别为 $4\text{ }\mu\text{m}$ 和 $5\text{ }\mu\text{m}$ 的圆孔; 样品 B1, B2, B3 b1 是椭圆孔阵, B1, B2, B3 的长径为 $4\text{ }\mu\text{m}$, b1 为 $5\text{ }\mu\text{m}$, 短径分别为 $2\text{ }\mu\text{m}$, $1.5\text{ }\mu\text{m}$, $1.25\text{ }\mu\text{m}$; 样品 C、c 是正方形孔阵, 边长分别为 $4\text{ }\mu\text{m}$ 和 $5\text{ }\mu\text{m}$; 样品 D1, D2, D3 d1 是长方形孔阵, 长边长 D1, D2, D3 为 $4\text{ }\mu\text{m}$, d1 为 $3\text{ }\mu\text{m}$, 短边分别是 $2\text{ }\mu\text{m}$, $1.5\text{ }\mu\text{m}$, $1.25\text{ }\mu\text{m}$. p 偏振表示电场方向垂直于长边, s 偏振表示电场方向垂直于短边.

金属孔阵的透过率同周期结构金属薄膜参数的设定有关, 下面我们研究了 p 偏振条件下金属孔阵的透过率. 图 2(a) 所示 3 条曲线为不同孔径比例下椭圆孔阵的透射光谱, 周期均为 $12\text{ }\mu\text{m}$. 其中虚线、点线、点划线分别是样品 B1, B2, B3 的透过率, 主透射峰位置为 $8.93\text{ }\mu\text{m}$, $9.14\text{ }\mu\text{m}$, $9.32\text{ }\mu\text{m}$, 强度分别是 13.3% , 11.3% 和 10.3% , 可以看出当孔径比例增大时, 透射峰红移. 右上角给出了主透射峰的位置同孔径比例的关系, 当孔径比例由 2 增至 4 时, 主透射峰红移了 $0.29\text{ }\mu\text{m}$. 透射峰位置同孔径比例成线性关系. 图 2(b) 所示 3 条曲线为不同孔径比例条件下长方形孔阵的透射光谱, 周期均为 $12\text{ }\mu\text{m}$, 虚线是样品 D1 的透射谱, 透射峰位于 $9.61\text{ }\mu\text{m}$, 透射强度 12.0% , 样品 D2, D3 的透射谱如图中点线和点划线所示, 透射峰分别位于 $9.80\text{ }\mu\text{m}$, $10.02\text{ }\mu\text{m}$, 透射强度为 11.2% 和 8.7% , 由图中数据同样可以看出当微孔短边 b 减小, 孔径比例增大时, 透射峰红移. 当孔径比例由 2 增至 4 时, 主透射峰位置红移了 $0.41\text{ }\mu\text{m}$, 右上角的关系图同样揭示了主透射峰位置同孔径比例的线性关系.

Reuven Gordon 和 Alexandre G. Brolo 创造性地提出了研究截止波长同长方形边长关系的方法^[12], 他们将一个二维的问题分解为 2 个一维问题来解决. 分别研究平行于长边方向的 TM 模式和垂直于短边的 TE 模式, 从而讨论截止波长同长短边的关系. 在 TE 模式下, 电场穿透入金属 Ag 传播方程可表示为

$$\tan(\sqrt{k_0^2 \epsilon_d - \beta_{TE}^2} a / 2) = \frac{\sqrt{\beta_{TE}^2 - k_0^2 \epsilon_m}}{\sqrt{k_0^2 \epsilon_d - \beta_{TE}^2}}.$$

而在 TM 模式下由于局域模式和长边的耦合作用, 传播特征方程表示为

$$\tanh(\sqrt{\beta_{TM}^2 - k_0^2 \epsilon_d} b / 2) = \frac{-\epsilon_d}{\epsilon_m} \frac{\sqrt{\beta_{TM}^2 - k_0^2 \epsilon_m}}{\sqrt{\beta_{TM}^2 - k_0^2 \epsilon_d}},$$

其中 ϵ_m 是金属介电常数, ϵ_d 是 SU-8 介电常数, k_0 是自由空间波矢, $\beta = \pi \sqrt{\left(\frac{2}{\lambda}\right)^2 - \left(\frac{1}{a}\right)^2}$ 是理想金属中矩形孔的传播常数. 综合上式可得出短边 b 减小时, 长短径比增大, β_{TM} 增大, 从而截止波长增长, 最终导致了透射峰的红移.

为了更好地分析孔阵形状对透过率的影响, 本文对 4 种不同形状的孔阵随孔径尺寸变化的透过率特性进行了比较, 保持长短径比例为 2 图 3(a) 所示为圆孔样品 A(实线)和 a(虚线)的透过率曲线, 主峰位置分别在 $8.76\text{ }\mu\text{m}$, $9.02\text{ }\mu\text{m}$, 主峰位置变化了 $0.26\text{ }\mu\text{m}$; 图 3(b) 为椭圆孔样品 B1(实线)和 b1(虚线)的透过率曲线, 分别在 $8.93\text{ }\mu\text{m}$, $9.56\text{ }\mu\text{m}$ 出现主透射峰, 主峰位置变化 $0.63\text{ }\mu\text{m}$; 图 3(c) 为正方形孔样品 C(实线)和 c(虚线)的透过率曲线, 主峰位置从 $9.25\text{ }\mu\text{m}$ 红移至 $9.69\text{ }\mu\text{m}$, 红移了 $0.44\text{ }\mu\text{m}$; 图 3(d) 是长方形孔样

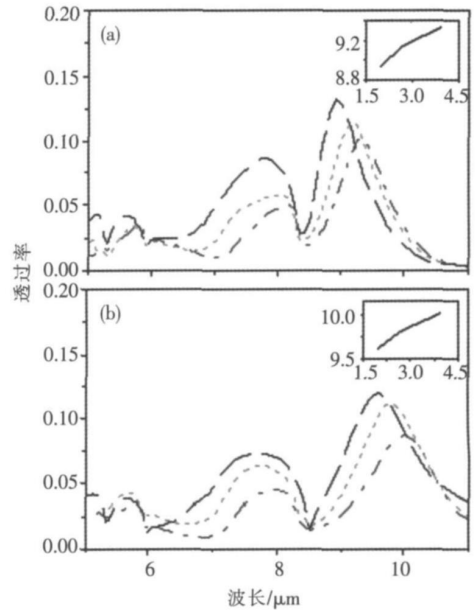


图 2 椭圆、长方形孔阵样品的透过率曲线
Fig.2 Transmission spectra of ellipse and rectangular hole arrays

品 D1(实线)和 d1(虚线)的透过率曲线, 主峰从 $9.61\text{ }\mu\text{m}$ 红移至 $10.7\text{ }\mu\text{m}$, 红移了 $1.09\text{ }\mu\text{m}$. 图 3 可以看出圆形和正方形孔阵透过率受孔阵形状影响比较小. 而长方形和椭圆红移比较明显, 分别红移了 $0.63\text{ }\mu\text{m}$, $1.09\text{ }\mu\text{m}$. 这主要是由于不同形状孔阵的局域耦合的共振特性与长短径比有关, 圆孔和方孔的长短径比例较小, 长方形和椭圆长短径比较大, 从而耦合共振现象比较明显.

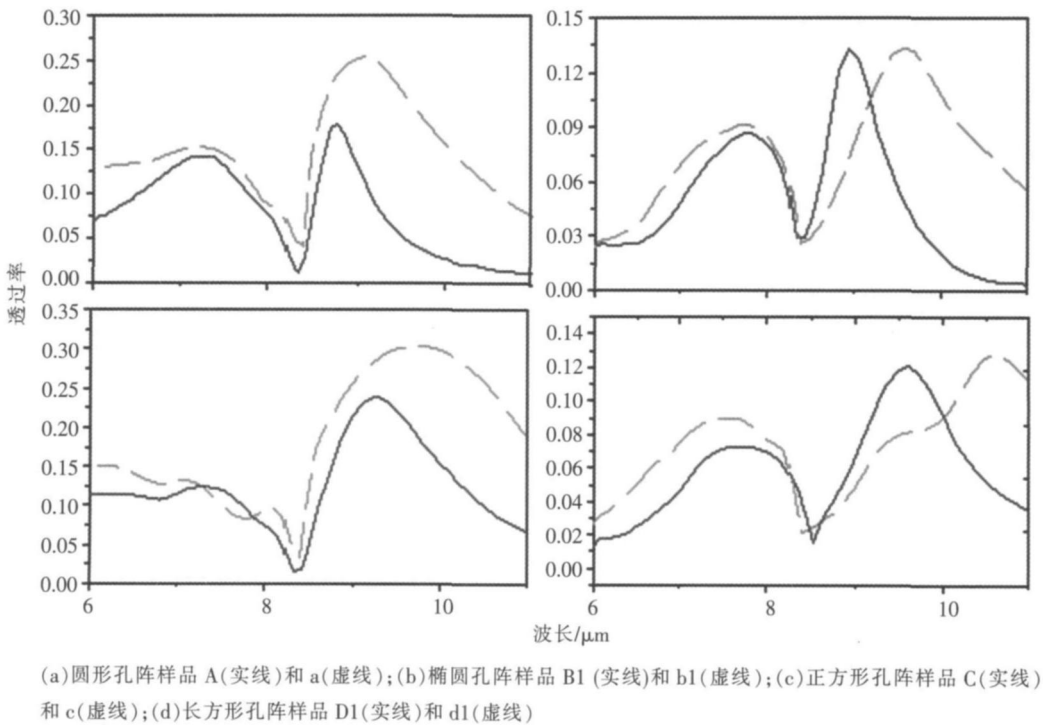


图 3 不同微孔尺寸的透过率曲线

Fig.3 The transmission spectra of samples with different hole size

我们还对样品的偏振特性进行了研究. 图 4 所示为长方形孔阵样品 D1, D3 在 p 偏振和 s 偏振态下的透射光谱, p 偏振条件下 D1 的透射峰位置在 $9.61\text{ }\mu\text{m}$, 透射强度 12.0% , D3 的透射峰位置在 $10.02\text{ }\mu\text{m}$, 透射强度 8.7% , 在 s 偏振条件下样品的透过率很小. 对于椭圆孔阵样品同样存在着这样的极化性.

实验和理论都已经证明了 SPPs 在亚波长周期性微孔阵列金属薄膜透过率增强中的作用. 由于 SPPs 的参与, 主透射峰位置主要取决于样品的周期. 但最近研究表明, 除了 SPPs 微孔中存在局域模式, 局域模式和金属微孔阵列的长边存在耦合作用, 随着短边变短, 孔径比例的增大, 截止波长增长, 最终导致了透射峰的红移. 本文得出孔径的比例对主透射峰位置有重要影响. 随着孔径比例的增大, 透射峰红移, 并且呈线性关系. 本文同时证明了长方形、正方形、圆形以及椭圆孔均存在局域模式, 长方形和椭圆由于长短径比例大于圆形和正方形, 其形状效应较为明显. 图 4 的仿真结果也可用局域模式来解释. 这是由于在两个正交方向的非对称性, 局域模式和金属微孔阵列长边存在强耦合作用, 从而 s 偏振条件下的透过率很低. 而当孔阵为对称图形时, 各边激发的 LSPs 相同, 透过率和极化方向无关.

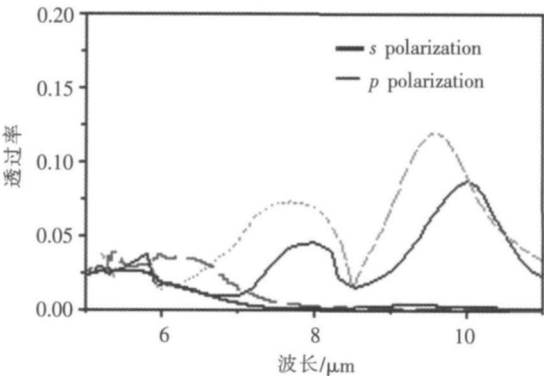


图 4 p, s 偏振条件下长方形孔阵样品 D1(实线)和 D3(虚线)的透过率曲线

Fig.4 Transmission spectrum of samples D1(solid) and D3(dashed) for p and s polarizations

3 结论

本文重点研究了孔阵形状对亚波长周期性微孔阵列金属薄膜光透射增强的影响, 得出谱峰位置和孔

径的比例呈线性关系, 比较圆、椭圆、正方形、长方形微孔阵列金属薄膜的透过率曲线, 发现长方形和椭圆的形状效应比正方形、圆明显, 并进一步确认了局域模式在透射增强中的作用.

致谢: 感谢东南大学毫米波国家重点实验室 崔铁军老师和林先其同学仿真时给予的帮助.

[参考文献]

- [1] Ebbesen T W, Lezec H J, Ghaemi H F, et al. Extraordinary optical transmission through subwavelength hole arrays[J]. *Nature*, 1998, 391: 667-669
- [2] Barnes W L, Dereux A, Ebbesen T W. Surface plasmon subwavelength optics[J]. *Nature*, 2003, 424: 824-830
- [3] Ye Y H, Zhang J Y. Middle-infrared transmission enhancement through periodically perforated metal films [J]. *Appl Phys Lett*, 2004, 84(16): 2 977-2 979.
- [4] Ye Y H, Zhang J Y. Enhanced light transmission through cascaded metal films perforated with periodic hole arrays[J]. *Opt Lett*, 2005, 30(12): 1 521-1 523.
- [5] Ye Y H, Wang Z B, Cao Y R. Enhanced transmission through metal films perforated with circular and cross-dipole apertures [J]. *Appl Phys Lett*, 2007, 91(25): 1-3.
- [6] Martín-Moreno L, García-Vidal F J, Lezec H J, et al. Theory of extraordinary optical transmission through subwavelength hole arrays[J]. *Phys Rev Lett*, 2001, 86(6): 1 114-1 117
- [7] van der Molen K L, Segerink F B, van Hult N F. Influence of hole size on the extraordinary transmission through subwavelength hole arrays[J]. *Appl Phys Lett*, 2004, 85(19): 4 316-4 318
- [8] Klein Koerkamp K J, Enoch S, Segerink F B, et al. Strong influence of hole shape on extraordinary transmission through periodic arrays of subwavelength holes[J]. *Phys Rev Lett*, 2004, 92(18): 183 901-183 904
- [9] Michael I H, Carl S, Girsh B. Role of cylindrical surface plasmons in enhanced transmission[J]. *Appl Phys Lett*, 2006, 88(19): 193 104-1-193 104-3
- [10] Cao H, Nahata A. Influence of aperture shape on the transmission properties of a periodic array of subwavelength apertures [J]. *Opt Express*, 2004, 12(16): 3 664-3 672
- [11] Ye Y H, Wang Z B, Yan D S, et al. Role of shape in middle-infrared transmission enhancement through periodically perforated metal films[J]. *Opt Lett*, 2007, 32(21): 3 140-3 142
- [12] Gordon R, Brob A G. Increased cut-off wavelength for a subwavelength hole in a real metal[J]. *Opt Express*, 2005, 13(6): 1 933-1 938

[责任编辑: 顾晓天]