

doi: 10.3788/gzxb20154411.1131002

周期性亚波长金属孔阵列的单元结构 对称性对其增强光透射特性的影响

袁志¹, 刘辉¹, 陈志勇¹, 朱卫华¹, 郭玮¹, 王新林^{1,2}

(1 南华大学 电气工程学院, 湖南 衡阳 421001)

(2 南华大学 机械工程学院, 湖南 衡阳 421001)

摘 要:采用三维时域有限差分方法,对比研究了石英基底上周期性亚波长圆形、纽扣形、半圆形和太极形四种具有不同对称性的孔阵列微结构金属膜的增强光透射特性,并分别探讨了阵列周期、小孔尺寸对这四种阵列结构透射特性的影响.结果表明增强光透射特性对单元结构对称性具有很强的依赖性:在超短高斯光脉冲激励下,随着单元结构对称性的降低,归一化透过率逐渐增大,红外波段的透射峰发生大量红移,且其与可见光波段的透射峰之间的距离逐渐增大,在对称性破缺的太极形孔阵列中两峰间距最大,可达 1 300 nm 左右.表面等离激元模式与局域表面等离子体共振模式在增强光透射现象中起着重要的作用.在可见光波段,表面等离激元模式是这四种阵列结构的光透射增强的主导性因素;在红外波段,局域表面等离子体共振模式对单元结构对称性较差孔阵列结构的增强光透射特性有着显著影响.

关键词:亚波长金属孔阵列;增强光透射;时域有限差分;单元结构对称性;表面等离激元

中图分类号:O436

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2015)11-1131002-9

The Effect of Unit Structural Symmetry in Periodic Subwavelength Metallic Hole Arrays on Enhanced Optical Transmission

YUAN Zhi¹, LIU Hui¹, CHEN Zhi-yong¹, ZHU Wei-hua¹, GUO Wei¹, WANG Xin-lin^{1,2}

(1 School of Electrical Engineering, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China)

(2 School of Mechanical Engineering, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China)

Abstract: 3D finite-difference time-domain method was employed to comparatively study the enhanced optical transmission of four kinds of periodic subwavelength hole arrays metallic films, such as circular-shaped, button-shaped, semicircular-shaped and Tai-Chi-shaped holes which had different symmetries and were deposited on a quartz substrate. The effect of the hole arrays periodicity and the hole size on the enhanced optical transmission of these four array structures were investigated. The results show that the enhanced optical transmission is strongly dependent on the symmetries of unit cells. Under the excitation of ultrashort Gauss light pulse, the normalized transmission increases gradually with the reduction of unit structural symmetries, the transmission peak in infrared wavelengths range undergoes a large spectral red-shift. The distance between the transmission peak in visible and infrared wavelengths range increases gradually. The largest distance of 1 300 nm is in symmetry breaking Tai-Chi-shaped arrays. The surface plasmon polaritons mode and the localized surface plasmon resonance mode play important roles in the process of the enhanced optical transmission. In visible wavelengths, the surface plasmonic polaritons mode is the dominant factor to the enhanced optical transmission of these four arrays structures. In infrared wavelengths, the localized surface plasmon resonance mode significantly affects the enhanced optical transmission of the hoel arrays in poor unit symmetries.

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 11174119)和南华大学重点学科建设项目(No. NHXK04)资助

第一作者:袁志(1990-),男,硕士研究生,主要研究方向为表面等离子体光学. Email: yuanzhi1119@aliyun.com

导师(通讯作者):王新林(1970-),男,教授,博士,主要研究方向为光电子与激光技术及应用. Email: wxl_ly000@aliyun.com

收稿日期:2015-05-14;录用日期:2015-09-16

<http://www.photon.ac.cn>

Key words: Subwavelength metallic hole arrays; Enhanced optical transmission; Finite-difference Time-domain; Unit structural symmetries; Surface plasmon polaritons

OCIS Codes: 310.6628; 310.6860; 350.4238

0 引言

表面等离子体 (Surface Plasmons, SPs) 是外界光场与金属自由移动电荷相互作用而形成的沿着金属/电介质界面传播的电磁表面波. SPs 包括传输型和局域型, 即表面等离激元 (Surface Plasmon Polaritons, SPPs) 和局域表面等离子体 (Localized Surface Plasmon, LSP). 自周期性亚波长孔阵列结构的增强光透射现象 (Enhanced Optical Transmission, EOT)^[1] 被发现以来, 关于亚波长小孔光学特性的探究一直是研究热点. 近年来, 研究者对基于 EOT 效应的微纳结构在光通信^[2-4]、微纳光子器件^[5-8]、医疗^[9] 及光谱成像^[10-11] 等领域的应用进行了大量研究. 关于 EOT 现象解释的理论模型, 目前普遍认可的有 SPPs 共振模型^[12-13] 和复合衍射倏逝波模型^[14]. 改变金属表面微结构的结构参量与材料参量就可以灵活地裁剪其所表现出的增强透射与滤波特性. 大量研究展示了许多不同形状亚波长金属孔微结构的增强光透射特性, 例如圆形孔^[15]、矩形孔^[16]、方形孔^[17]、椭圆形孔^[18-19]、X 形孔^[20]、十字形孔^[4]、C 形孔^[21]、Y 形孔^[22]、H 形孔^[32] 等结构, 这些小孔都具有一定的对称性. 文献^[22-24] 展示了由于对称性的破坏引起的巨大局域场增强效应.

然而, 这些研究都缺少小孔对称性对 EOT 现象影响的对比研究.

本文选取以圆形、纽扣形、半圆形和太极形孔这四种且具有不同对称性的小孔为单元结构的金属薄膜周期性阵列, 采用三维时域有限差分 (3D Finite-Difference Time-Domain, 3D-FDTD) 方法, 数值模拟单元结构的对称性对 EOT 现象的影响. 通过研究结构参量对金属膜归一化透射谱的影响, 分析了 SPPs 模式与 LSP 共振模式各自在这四种阵列结构的 EOT 现象中的影响.

1 模拟方法

周期性亚波长太极形孔阵列微结构如图 1, 图 1(a) 为中国传统的太极符号; 图 1(b) 是太极形孔阵列结构的二维平面示意图, 图中白色部分为空气, 灰色部分为银 (Ag); 图 1(c) 为太极形孔阵列结构的单元尺寸: 太极形孔外圆的直径为 D , “鱼头”端孔洞的圆弧直径与“鱼尾”端孔洞的圆弧直径相等, 为 $D_h = 0.5D$, “鱼眼”小圆的直径 $D_e = 0.4D_h$, P_x , P_z 分别为沿 x 轴与 z 轴方向上的阵列周期. 周期性亚波长半圆形、纽扣形、圆形孔阵列微结构如图 2(a)~(c), 其中纽扣孔内的小圆直径为外圆直径的 0.1 倍, 与太极形孔设置一样.

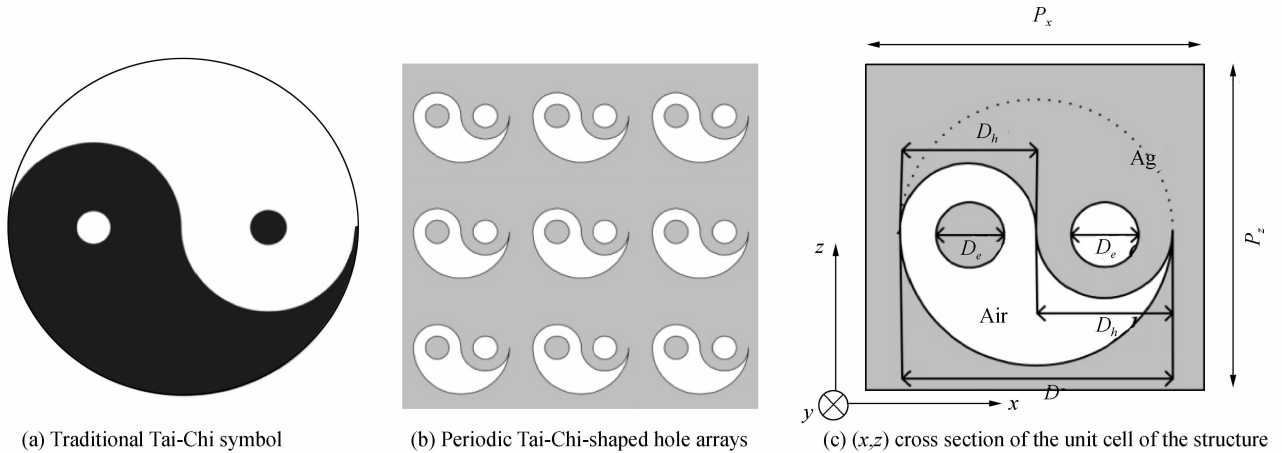


图 1 传统太极符号与太极形孔阵列及其单元结构

Fig. 1 Traditional Tai-Chi symbol and Tai-Chi-shaped hole arrays and cross section of the unit cell of the structure

这四种阵列各自单元结构图形的对称性不同, 如图 2, 从数学角度来看, 在 (x, z) 平面内, 半圆形只具有轴对称性, 关于纵轴 (z 轴) 对称; 纽扣形具有轴对称性、中心对称性和旋转对称性, 其分别关于横轴 (x 轴) 与纵轴 (z 轴) 对称, 且旋转角为 180° ; 而圆形具有完好的对称性, 拥有无数条对称轴和无数个旋转角; 太极形对称性破缺, 没有任何对称性. 因此, 四种几何图形的对称性由好到坏依次为: 圆形、纽扣形、半圆形、太极

形. 四种金属薄膜均为银膜, 厚度均设定为 $T = 50 \text{ nm}$, 分别放置在厚度为 225 nm 的石英基底上, 石英基底的介电常量为 2.25.

采用 3D-FDTD 方法求解光传输过程中的电磁场分布, 数值模拟的网格尺寸为 5 nm , 时间步长为 8.3 as , 利用总场/散射场方法引入沿着 z 轴方向偏振、 y 轴方向传播, 垂直于金属薄膜表面入射的飞秒高斯脉冲光源, 其中心波长为 1550 nm , 脉宽为 5 fs . 金属

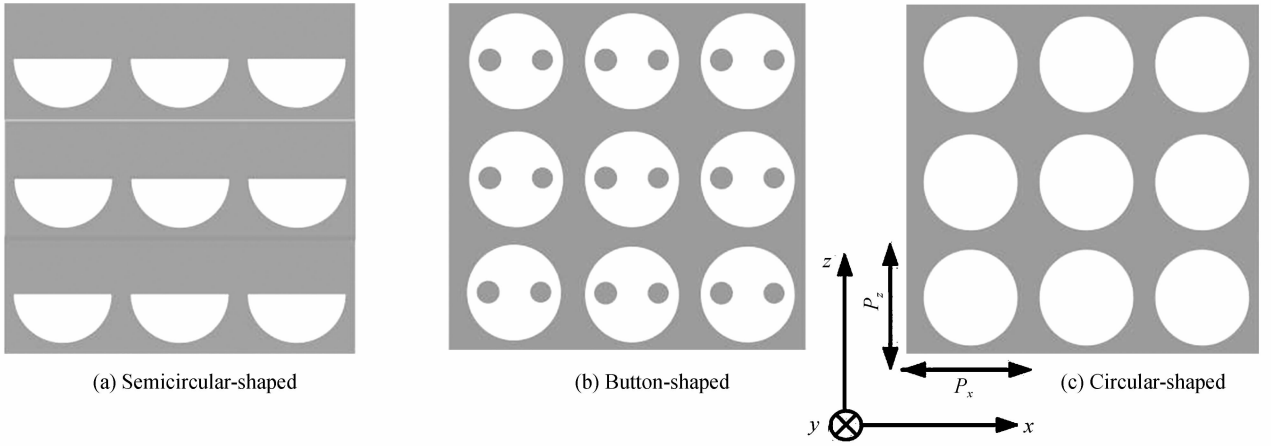


图2 (x, z) 平面的阵列结构截面图
Fig. 2 (x, z) cross section of arrays

色散模型采用修正 Drude 模型^[27]. 单元结构四周边界处用周期性边界条件处理, 平行于 (x, z) 平面的前后金属界面用各向异性完美匹配层 (Uniaxial Perfectly Matched Layer, UPML) 吸收边界条件处理. 沿着银薄膜的 y 轴方向设置一个平行于薄膜表面的观察面, 其与银膜出光面距离为 100 nm. 亚波长金属孔阵列微结构的增强光透射现象一般使用归一化透过率 T_{norm} 来表征^[28], 即

$$T_{\text{norm}}(\lambda) = \frac{T(\lambda)}{S_{\text{hole}}/S_{\text{cell}}} = \frac{P_{\text{out}}(\lambda)}{P_{\text{in}}(\lambda)} \frac{S_{\text{cell}}}{S_{\text{hole}}} \quad (1)$$

式中, $P_{\text{in(out)}}$ 为流入(出)金属薄膜的电磁场功率流, S_{hole} 为周期阵列的一个单元中孔的截面面积, S_{cell} 为周期阵列的一个单元的截面面积.

2 结果与讨论

2.1 四种阵列结构的透射特性比较

为了对比分析小孔的形状对金属薄膜增强光透射

特性的影响, 将四种薄膜结构的阵列周期和孔洞的面积占比均设定为一致, 即它们的孔填充率相同. 考虑两种情形: 1) 正方阵列情形, 四种薄膜结构的阵列周期都设置为 600 nm, 即 $P_x = P_z = 600$ nm, 圆形孔、纽扣形孔、半圆形孔、太极形孔的直径分别设置为 354 nm、368 nm、500 nm、500 nm, 四种薄膜结构的孔填充率都为 0.273. 2) 矩形阵列情形, 将四种薄膜结构的沿着 x 轴方向与 z 轴方向的阵列周期分别设置为 600 nm 和 700 nm, 即 $P_x = 600$ nm, $P_z = 700$ nm. 小孔尺寸的设定与情形 1) 中一致, 这样, 四种薄膜结构的孔填充率都为 0.234.

图 3 为情形 1) 条件下, $P_x = P_z = 600$ nm, 四种银薄膜结构在 17.90 fs 时左右银/石英界面处 (x, z) 平面以及相对应平面 $x=350$ nm 内电场 z 分量 E_z 的空间分布, 其中平面 (y, z) 内虚线标出的部分表示金属银. 从图 3(e)、(f)、(g)、(h) 分别可以看出, 四种孔阵

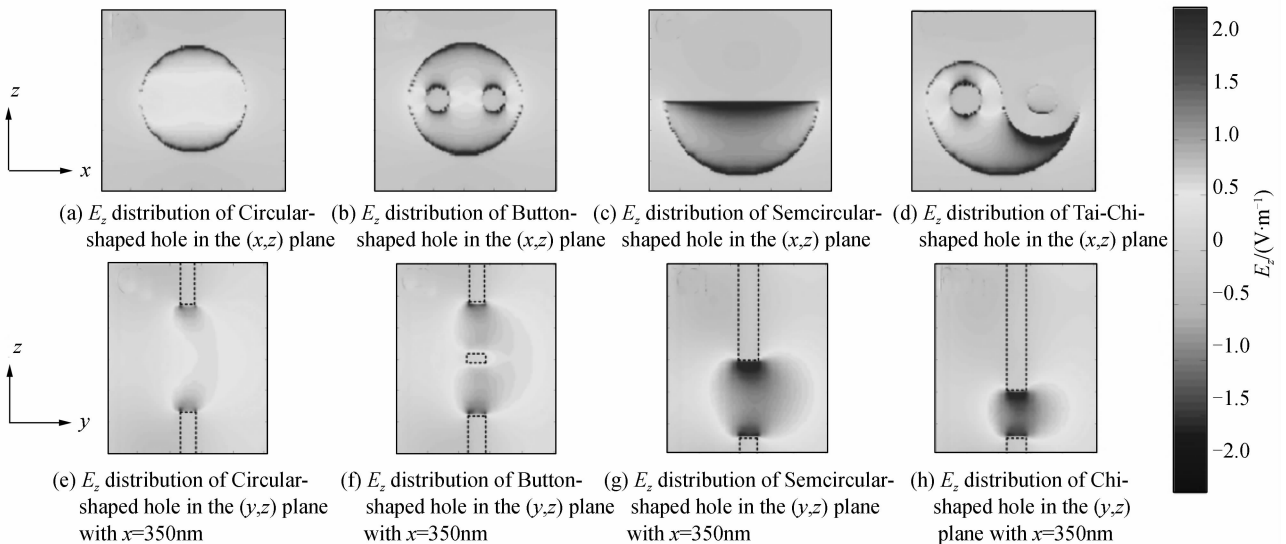


图3 $P_x = P_z = 600$ nm, 银/石英界面 (x, z) 平面和在 $x=350$ nm 时对应的 (y, z) 平面内电场 z 分量 E_z 的空间分布
Fig. 3 Distribution of z -component of electric field E_z in the Ag/Quartz interface (x, z) plane and in the (y, z) plane with $x=350$ nm

列结构的上下表面金属孔边缘处有较强的电荷密度聚集,并且半圆形和太极形孔结构的金属孔内壁形成了强烈的电荷密度耦合,可以归结为 LSP 共振^[20].

图4为经过FDTD方法数值计算的四种正方形阵

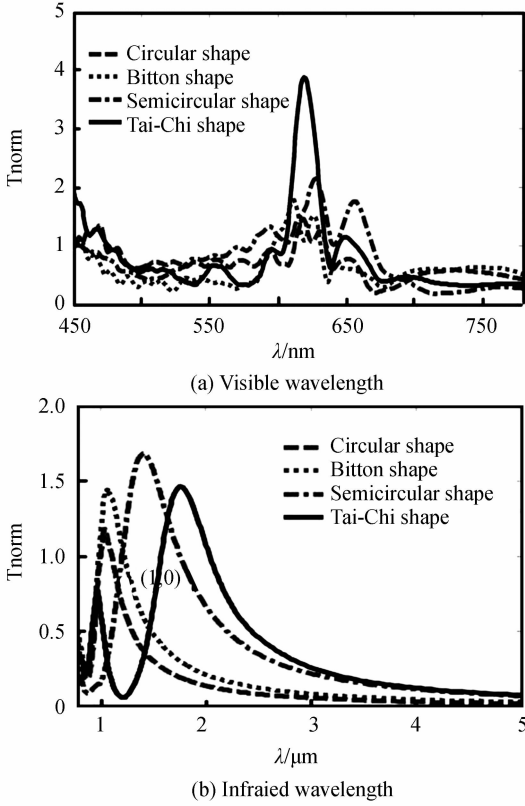


图4 $P_x=P_z=600$ nm 时,圆形孔、纽扣形孔、半圆形孔和太极形孔正方形阵列结构的归一化透过率谱

Fig. 4 Normalized transmission spectra of circular-shaped, button-shaped, semicircular-shaped and Tai-Chi-shaped hole in square arrays $P_x=P_z=600$ nm

列结构($P_x=P_z=600$ nm)的归一化透过率谱.由图4(a)可知,在可见光波段450~780 nm,四种阵列结构都在 $\lambda=620$ nm附近产生一处共振峰,且随着阵列单元结构对称性的降低,归一化峰值逐渐增大,波峰由分而合,其中圆形、纽扣形、半圆形、太极形孔阵列的归一化峰值分别为1.3、1.9、2.2、3.8,太极形孔阵列的归一化峰值约为圆形孔阵列的3倍.对于 $P_x=P_z=P$ 的正方形阵列,当光源垂直入射时,由于SPPs模式激发引起的共振峰的位置 λ_{max} 可由式(2)^[6, 28-29]近似得到,即

$$\lambda_{max} = \frac{P}{\sqrt{i^2 + j^2}} \sqrt{\frac{\epsilon_d \epsilon_m}{\epsilon_d + \epsilon_m}} \quad (2)$$

式中 λ_{max} 为共振波长; i 和 j 分别为沿着 x 轴和 z 轴方向上的散射阶数,二者均取整数; ϵ_d 和 ϵ_m 分别为电介质和金属材料的介电常量.由式(2)可知,正方形阵列在 ϵ_d 和 ϵ_m 取值一定时,透射峰的位置主要由阵列周期 P 决定.较短光波段的透射峰归结于SPPs共振^[27],可以得知在可见光波段的透射峰主要是由SPPs模式作用引起的.当 $P_x=P_z=P=600$ nm时,根据式(2)计算得到的透射峰位置在630 nm附近被激发,数值模拟结果得到四种阵列结构在可见光波段的透射峰都在620 nm附近处被激发,两者的结果基本吻合,其误差约为10 nm.

由图4(b)可看出,在红外波段780~5 000 nm,四种阵列结构都有透射峰出现,红外波段的峰值极点(1,0)($i=1, j=0$)随着阵列结构单元轴对称性的降低而逐渐红移,红移量约800 nm,且归一化透射峰峰值近似呈递增变化.单元结构的形状对增强光透射特性有很大的影响,矩形孔阵列的透射谱中(1,0)峰值极点的移动是由小孔的形状共振(Shape resonance)

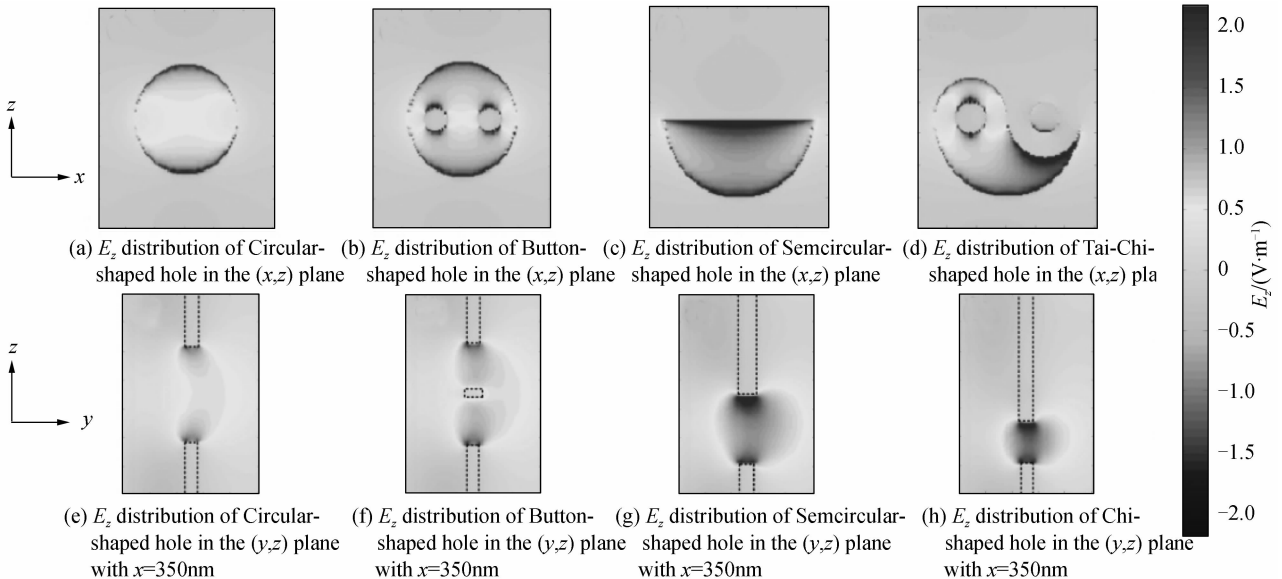


图5 $P_x=600$ nm, $P_z=700$ nm, 银/石英界面(x, z)平面和在 $x=350$ nm时对应的(y, z)平面内电场 z 分量 E_z 的空间分布

Fig. 5 Distribution of z -component of electric field E_z in the Ag/Quartz interface (x, z) plane and in the (y, z) plane with $x=350$ nm

所致^[16],形状共振是由小孔中激发的 LSP 引起的^[29].因此,可以看出阵列结构激发出 LSP 模式的能力与其单元结构的对称性有关.

图 5 为情形 2) 条件下, $P_x=600$ nm, $P_z=700$ nm, 四种银薄膜结构在 17.90 fs 时刻左右银/石英界面处 (x, z) 平面以及相对应平面 $x=350$ nm 内电场 z 分量 E_z 的空间分布,其中平面 (y, z) 内虚线标出的部分表示金属银.图 5(e)~(h) 和图 3(e)~(h) 类似,四种孔阵列结构的上下表面金属孔边缘处有较强的电荷密度聚集,并且半圆形和太极形孔结构的金属孔内壁形成了强烈的电荷密度耦合,可以归结为 LSP 共振^[20].

图 6 为经过 FDTD 方法数值计算的四种矩形阵列结构 ($P_x=600$ nm, $P_z=700$ nm) 的归一化透过率谱.

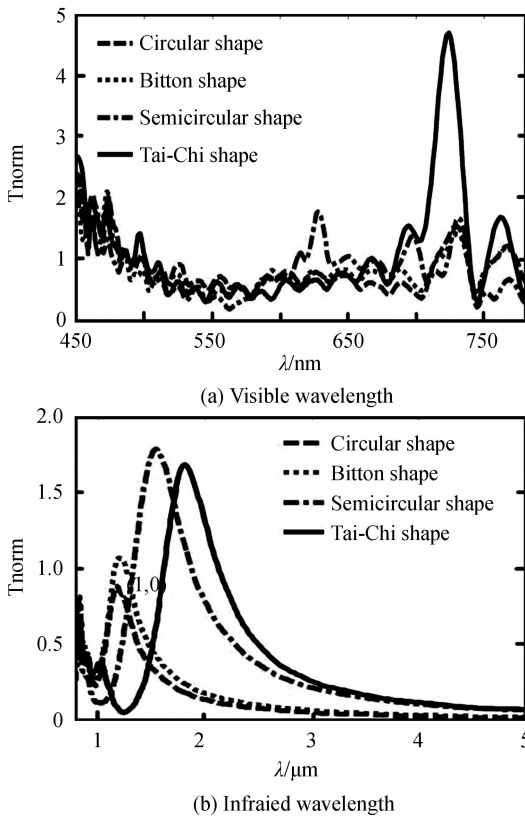


图 6 $P_x=600$ nm, $P_z=700$ nm 圆形孔、纽扣形孔、半圆形孔和太极形孔矩形阵列结构的归一化透过率谱

Fig. 6 Normalized transmission spectra of circular-shaped, button-shaped, semicircular-shaped and Tai-Chi-shaped hole in rectangular arrays $P_x=600$ nm, $P_z=700$ nm

由图 6(a) 可知,在可见光波段 450~780 nm,四种阵列结构都在 $\lambda=720$ nm 附近产生一处共振峰,其中太极形孔阵列的共振峰峰值依然最大,是其他三种阵列的 3 倍多.图 6(b),在红外波段 780~5 000 nm,四种阵列结构共振峰的位置也有变化,随着单元结构对称性的降低,峰值极点 (1,0) 出现红移,红移量相比图 4(b) 略有减小,约为 600 nm;并且归一化透射峰峰值近似呈递增变化.对比两种情况可以发现,太极形孔阵列的归

一化透射峰峰值在四种阵列中是最大的,这是因为太极形孔结构的“鱼尾”端狭缝宽度很小,使得表面等离子体传播常量很大,导致上下表面发生很强的电荷密度耦合^[27].这也可以从图 3(d) 和 (h) 的电场分布看出.另外,可见光波段内透射峰与红外波段内透射峰之间的距离都会随着阵列单元结构对称性的降低而逐渐增大,反之,间距会逐渐减小.如图 4,在正方阵列的情况下,圆形孔阵列、纽扣形孔阵列、半圆形孔阵列、太极形孔阵列中两透射峰的间距分别约为 400 nm、450 nm、750 nm、1 300 nm.这对基于 Plasmonic 的光学滤波器原型器件的构筑有着重要意义.可知周期性亚波长金属孔薄膜结构的透射特性依赖于其单元结构对称性.

2.2 阵列周期和小孔尺寸对这四种阵列结构透射特性的影响

SPPs 模式特性主要依赖于阵列结构的周期性^[6,28],通过调节阵列周期 P 可以调节可见光波段透射峰的位置.由分析可知,红外波段的透射峰是由 LSP 共振引起的,而 LSP 共振特性主要受小孔尺寸和形状的影响^[29,31].即使 LSP 共振对光增强透射现象有不可忽视的贡献,SPPs 模式仍然是主导性因素^[29].为了进一步研究 SPPs 模式和 LSP 共振模式在 EOT 现象中各自的影响,分别研究阵列周期 P 和小孔直径 D 对四种阵列结构的透射特性的影响.

单独对比研究了阵列周期 P 分别对四种阵列结构光学透射特性的影响.太极形孔、半圆形孔、纽扣形孔、圆形孔的外圆直径 D 分别设定为 400 nm、400 nm、295 nm、283 nm.阵列周期 P 设定了 9 组数据,分别从 500~700 nm 范围取值.图 7 为在不同阵列周期 P 取值下,四种阵列结构对应的归一化透过率谱.

由图 7(a) 可知,随着 P 的取值在 500~700 nm 范围内的增大,太极形孔阵列在可见光波段的透射峰归一化峰值近似增大,且透射峰的位置出现线性红移,红移总量约为 200 nm.这主要归结于 SPPs 模式的影响.然而,随着 P 的增大,太极形孔阵列在红外波段的透射峰 (1,0) 的位置红移量很小,约为 40 nm,其归一化峰值也呈增大趋势.这是 LSP 共振模式存在的结果,因为 LSP 模式一般不受阵列周期的影响,而主要受小孔尺寸和形状的影响.由图 7(b) 可知,半圆形孔阵列归一化透过率谱的变化与太极形孔阵列相似,透射峰 (1,0) 的位置红移量相对较大,约为 120 nm.由图 7(c) 和 (d) 可知,随着阵列周期 P 的增大,纽扣形孔阵列和圆形孔阵列的归一化透过率谱中透射峰的峰值均近似减小,透射峰的位置都产生了线性红移,可见光波段与红外波段的透射峰红移量都约为 200 nm.说明纽扣形孔阵列和圆形孔阵列在红外波段的透射峰也主要是由 SPPs 模式引起的,二者小孔中都没有激发 LSP 共振模式,这正好与 Koerkamp 等关于圆形孔阵列中没有产

生形状共振的实验结果相契合^[16]. 对比这四种孔阵列结构中激发 LSP 共振模式的情况, 进一步说明了小孔

激发 LSP 共振模式的能力和孔阵列单元结构的对称性有很大的关系.

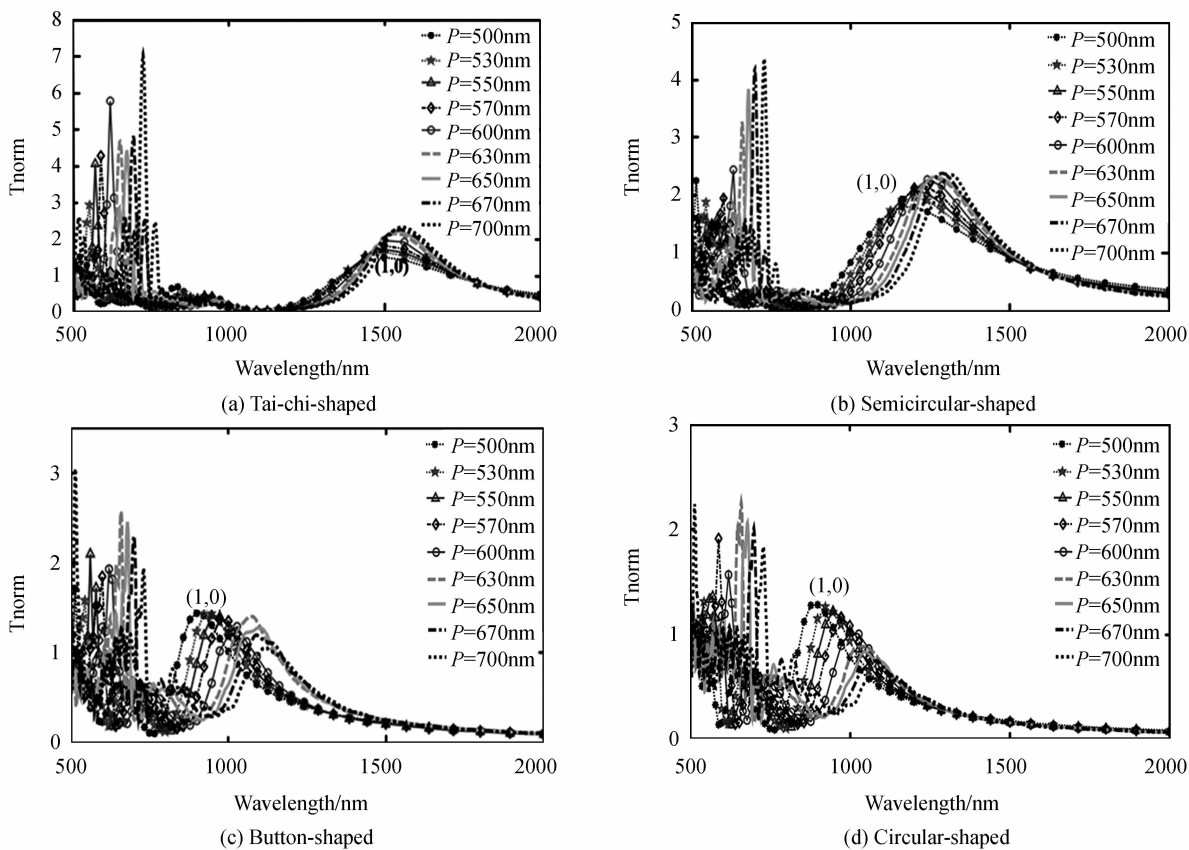
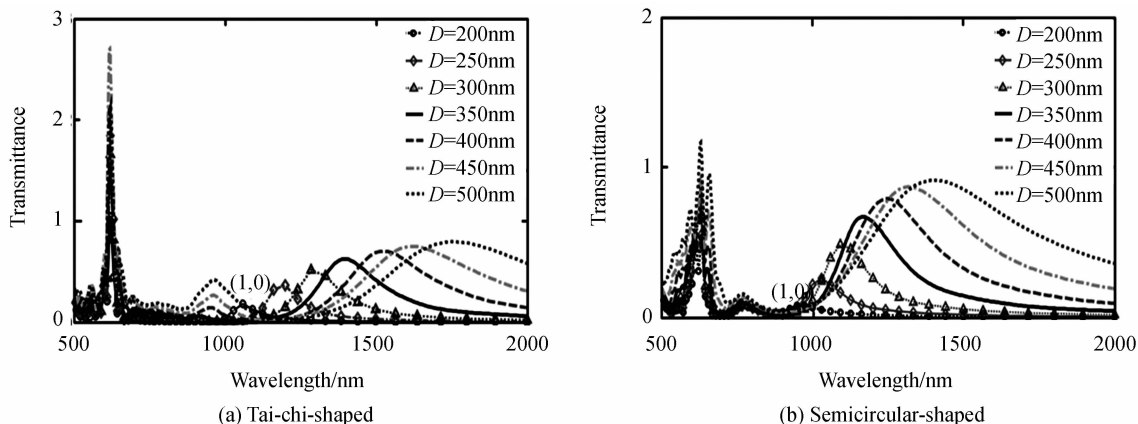


图 7 在不同阵列周期 P 下, 四种阵列结构的归一化透射率谱

Fig. 7 Normalized transmission spectra of the four arrays structures with different hole arrays periodicities P as parameter

单独对比研究小孔尺寸 D 对四种阵列结构的光学透射特性的影响. 为了方便分析, 取四种阵列结构的透射谱进行研究. 四种阵列结构的阵列周期 P 均为 600 nm , 即 $P_x = P_y = P = 600\text{ nm}$, 小孔直径 D 设定了 7 组数据, 分别从 $200\sim 500\text{ nm}$ 范围内取值. 图 8 为在不同小孔直径 D 的取值下, 四种阵列结构的透射率谱. 由图 8(a) 可知, 随着外圆直径 D 取值的增大, 太极形孔阵列在可见光波段的透射峰峰值近似增大, 透射峰位置都在 $\lambda = 620\text{ nm}$ 附近, 此处透射峰是由 SPPs 模式作用引起的; 而在红外波段的透射峰峰值极点 (1,0) 出

现红移, 红移量约为 700 nm , 且峰值逐渐增大. 这说明太极形孔阵列的小孔中激发了 LSP 共振, 使得峰值极点 (1,0) 随着 D 的增大而发生红移, 峰值也随之逐渐增大. 由图 8(b) 可知, 半圆形孔阵列的透射谱受小孔直径 D 的影响和太极形孔阵列相似, 只是在红外波段产生的透射峰的位置不一样, 随着小孔直径的增大, 在红外波段的透射峰峰值极点 (1,0) 也会出现红移, 红移量约为 500 nm . 对比可知, 在可见光波段, 对称性破缺的太极形孔阵列的透射峰峰值要比半圆形孔阵列大一倍; 在红外波段, 太极形孔阵列的透射峰位置



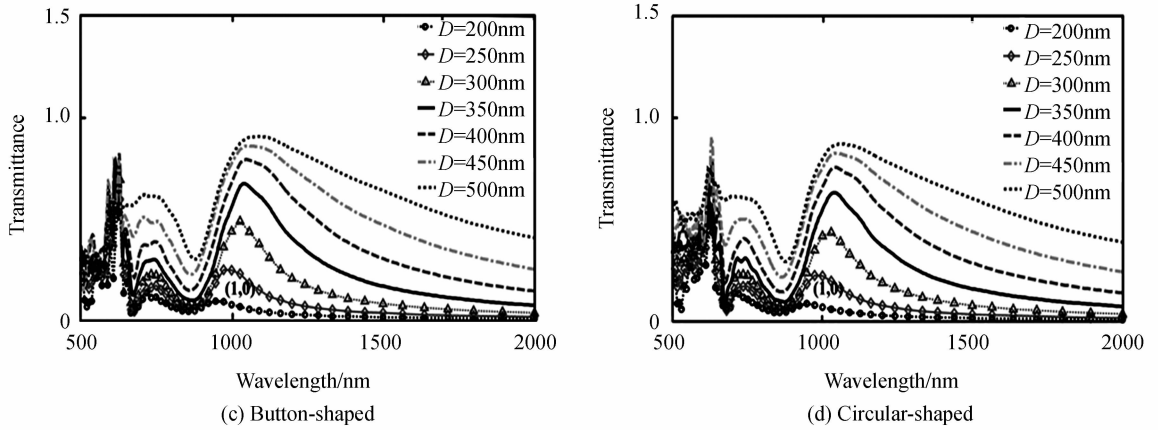

 图 8 在不同小孔直径 D 下,四种阵列结构的透过率谱

 Fig. 8 Transmission spectra of the four arrays structures with different hole diameters D as parameter

的红移量也要比半圆形孔阵列大,说明单元结构对称性越差,LSP 共振模式对其增强透射的影响越大.由图 8(c)和(d)可知,调节小孔直径 D 对纽扣形孔和圆形孔阵列的透射谱的影响大致相同.随着 D 的增大,二者的透射峰峰值都会随之增大,透射峰的位置因为阵列周期 P 一定而没有移动,峰值极点(1,0)仅有微量移动,进一步说明纽扣形孔和圆形孔阵列的透射特性主要是由结构周期性激发的 SPPs 模式主导的.

从图 7 和图 8 中,可以得到分别调节阵列周期 P 和小孔直径 D 对四种阵列结构的(1,0)阶峰值极点位置分布的影响,如图 9.由图 9(a)可以看出,随着阵列周期 P 的增大,峰值极点(1,0)在四种阵列结构中都会发生红移,随着单元结构对称性的降低,红移量会逐渐减小.红移量在圆形孔和半圆形孔阵列结构中最大,在半圆形孔阵列结构中较小,在太极形孔阵列结构中最小.由图 9(b)可知,随着小孔直径 D 的增大,在半圆形和太极形孔阵列结构中峰值极点(1,0)都会发生红移,且随着单元结构对称性的降低,红移量会增大;而在纽扣形孔和圆形孔阵列结构中,(1,0)极点位置只有微量红移.说明在单元结构对称性差的金属阵列(太极形孔和半圆形孔阵列)结构中,小孔中激发出的 LSP 共振模式在 EOT 中的作用不可忽视,在红外波段起着主导作用;而在对称性较好的结构(纽扣形孔和圆形孔阵列结构)中激发不出 LSP 模式,光增强透射主要归结于 SPPs 模式.另外,分析可知,在所研究的这四种不同阵列结构中,可见光波段的增强透射主要是由结构周期性导致的 SPPs 模式引起的,随着阵列周期的增大,四种阵列结构的可见光波段的透射峰都会发生相应红移,并且透射峰值也会发生改变;SPPs 模式在纽扣形孔和圆形孔阵列结构的增强光透射特性中起着主导作用,随着阵列周期的增大,二者可见光与红外波段的透射峰都会发生相应红移,且归一化峰值也逐渐减小.

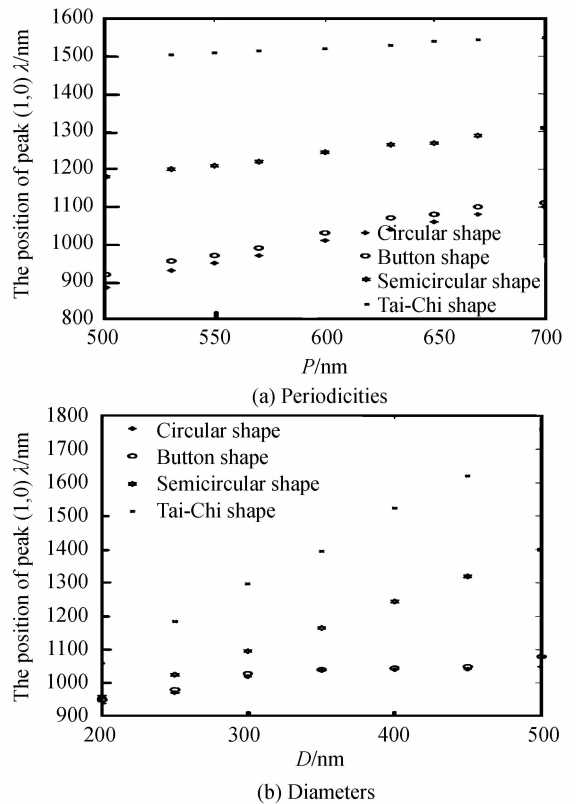

 图 9 峰值极点(1,0)在不同阵列周期 P 和小孔直径 D 下的位置分布

 Fig. 9 The location distribution of transmission peak (1,0) with different hole arrays periodicities P and hole diameters D

3 结论

采用 3D-FDTD 方法,数值模拟了石英基体上以四种对称性不同的圆形、纽扣形、半圆形和太极形孔为单元结构的亚波长孔阵列金属薄膜的光学透射特性.通过对这四种阵列结构的对比研究,发现金属薄膜的增强光透射特性强烈依赖于亚波长小孔阵列结构的单元

结构对称性. 在中心波长为 1 550 nm 的超短高斯光脉冲激励下, 随着单元结构对称性的降低, 红外波段的透射峰位置会逐渐红移, 红移量可达 800 nm 左右, 且红外波段的透射峰与可见光波段的透射峰之间的距离会逐渐增大, 归一化透射峰峰值也逐渐增大, 在对称性破缺的太极形孔阵列中两透射峰间距最大, 可达 1 300 nm 左右. SPPs 模式与 LSP 共振模式在增强光透射现象中都有着重要的作用. 通过调节阵列周期大小和小孔尺寸可以调控 SPPs 模式和 LSP 共振模式在 EOT 中的作用. 数值模拟结果发现, 在可见光波段, SPPs 模式是 EOT 现象的主导性因素; 在红外波段, SPPs 模式仍主导着单元结构对称性较好的阵列结构的增强光透射, 透射峰位置会随着阵列周期的增大而发生明显的红移现象; LSP 共振模式对单元结构对称性差的阵列结构的透射特性有显著影响, 透射峰位置会随小孔直径的增大而发生红移. 本研究有助于揭示增强光透射现象的物理机理, 对新型表面等离子体光学滤波器原型器件的构筑也有一定意义.

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**(6668): 667-669.
- [2] WANG Guo-xi, LU Hua. Tunable multi-channel wavelength demultiplexer based on MIM plasmonic nanodisk resonators at telecommunication regime[J]. *Optics Express*, 2011, **19**(4): 3513-3518.
- [3] LEROSE D, SIAW HEI E K, CHING B C, *et al.* CMOS-integrated geometrically tunable optical filters[J]. *Applied Optics*, 2013, **52**(8): 1655-1662.
- [4] GIRARD-DESPROLET R, BOUTAMI S, LHOSTIS S, *et al.* Angular and polarization properties of cross-holes nanostructured metallic filters[J]. *Optics Express*, 2013, **21**(24): 29412-29424.
- [5] YUAN Ming-hui, ZHAO Di. A tunable terahertz bandpass filter with a slit aperture flanked by symmetrically distributed parallel grooves on both sides[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **44**(3): 0323003.
袁明辉, 赵堤. 一种双面周期开槽型可调太赫兹带通滤波器[J]. *光子学报*, 2014, **44**(3): 0323003.
- [6] BARNES W L, DEREUX A, EBBESEN T W, *et al.* Surface plasmon subwavelength optics [J]. *Nature*, 2003, **424**(6950): 824-830.
- [7] PALA R A, SHIMIZU K T, MELOSH N A, *et al.* A nonvolatile plasmonic switch employing photochromic molecules[J]. *Nano Letters*, 2008, **8**(5): 1506-1510.
- [8] LIU Ming, ZENTGRAF T, LIU Yong-min, *et al.* Light-driven nanoscale plasmonic motors [J]. *Nature Nanotechnology*, 2010, **5**(8): 570-573.
- [9] ATWATER H A. The promise of plasmonics[J]. *Scientific American*, 2007, **296**(4): 56-62.
- [10] XU Ting, Wu Yi-kuei, LUO Xian-gang, *et al.* Plasmonic nanoresonators for high-resolution colour filtering and spectral imaging[J]. *Nature Communications*, 2010, **1**: 59-63.
- [11] MCCRINDLE I J H, GRANT J, DRYSDALE T D, *et al.* Multi-spectral materials: hybridisation of optical plasmonic filters and a terahertz metamaterial absorber[J]. *Advanced Optical Materials*, 2014, **2**(2): 149-153.
- [12] BARNES W L, MURRAY W A, DINTINGER J, *et al.* Surface plasmon polaritons and their role in the enhanced transmission of light through periodic arrays of subwavelength holes in a metal film[J]. *Physical Review Letters*, 2004, **92**(10): 107401-107404.
- [13] FANG Xu, LI Zhi-yuan, LONG Yong-bing, *et al.* Surface-plasmon-polariton assisted diffraction in periodic subwavelength holes of metal films with reduced interplane coupling[J]. *Physical Review Letters*, 2007, **99**(6): 066805-066817.
- [14] GAY G, ALLOSCHERY O, DE LESENGO B V, *et al.* The optical response of nanostructured surfaces and the composite diffracted evanescent wave model[J]. *Nature Physics*, 2006, **2**(4): 262-267.
- [15] MARTIN-MORENO L, GARCIA-VIDAL F J, LEZEC H J, *et al.* Theory of extraordinary optical transmission through subwavelength hole arrays[J]. *Physical Review Letters*, 2001, **86**(6): 1114-1117.
- [16] KOREKAMP K J K, ENOCH S, SEGERINK F B, *et al.* Strong influence of hole shape on extraordinary transmission through periodic arrays of subwavelength holes[J]. *Physical Review Letters*, 2004, **92**(18): 183901-183904.
- [17] VAN DER MOLEN K L, SEGERINK F B, VAN HULST N F, *et al.* Influence of hole size on the extraordinary transmission through subwavelength hole arrays[J]. *Applied Physics Letters*, 2004, **85**(19): 4316-4318.
- [18] GORDON R, BROLO A, MCKINNON A, *et al.* Strong polarization in the optical transmission through elliptical nanohole arrays [J]. *Physical Review Letters*, 2004, **92**(3): 037401-037404.
- [19] LOVERA P, JONES D, CORBETT B, *et al.* Polarization tunable transmission through plasmonic arrays of elliptical nanopores[J]. *Optics Express*, 2012, **20**(23): 25325-25332.
- [20] WANG Yong-kai, QIN Yan, Zhang Zhongyue, *et al.* Extraordinary optical transmission property of X-shaped plasmonic nanohole arrays[J]. *Plasmonics*, 2014, **9**(2): 203-207.
- [21] LEE J W, SEO M A, KIM D S, *et al.* Polarization dependent transmission through asymmetric C-shaped holes [J]. *Applied Physics Letters*, 2009, **94**(8): 081102-081104.
- [22] GAO Hong-tao, SHI Hao-fei, WANG Chang-tao, *et al.* Surface plasmon polariton propagation and combination in Y-shaped metallic channels [J]. *Optics Express*, 2005, **13**(26): 10795-10800.
- [23] FANG Zhe-yu, PENG Qian, SONG Wen-tao, *et al.* Plasmonic focusing in symmetry broken nanocorrals [J]. *Nano Letters*, 2010, **11**(2): 893-897.
- [24] YE J, LAGAE L, MAES G, *et al.* Symmetry breaking induced optical properties of gold open shell nanostructures [J]. *Optics Express*, 2009, **17**(26): 23765-23771.
- [25] LIU Shao-ding, ZHANG Zong-suo, WANG Qu-quan, *et al.* High sensitivity and large field enhancement of symmetry broken Au nanorings: effect of multipolar plasmon resonance and propagation[J]. *Optics Express*, 2009, **17**(4): 2906-2917.
- [26] WANG Xin-lin, LIU Hui, LUO Hu, *et al.* Optical filtering properties of subwavelength Tai-Chi-shaped metal hole arrays [J]. *Optics Communications*, 2015, **340**: 56-62.
- [27] BESBES M, HUGONIN J P, LALANNE P, *et al.* Numerical analysis of a slit-groove diffraction problem[J].

- European Optical Society Rapid Publications*, 2007, **2**(7): 1-17.
- [28] RUAN Zhi-chao, QIU Min. Enhanced transmission through periodic arrays of subwavelength holes: the role of localized waveguide resonances[J]. *Physical Review Letters*, 2006, **96**(23): 233901-233904.
- [29] DEGIRON A, EBBESEN T W. The role of localized surface plasmon modes in the enhanced transmission of periodic subwavelength apertures[J]. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, 2005, **7**(2): S90-S96.
- [30] GORDON R, BROLO A. Increased cut-off wavelength for a subwavelength hole in a real metal[J]. *Optics Express*, 2005, **13**(6): 1933-1938.
- [31] SEPULVEDA B, ALAVERDYAN Y, ALEGRET J, *et al.* Shape effects in the localized surface plasmon resonance of single nanoholes in thin metal films[J]. *Optics Express*, 2008, **16**(8): 5609-5616.
- [32] SUN Mei, XING Su-xia, CHEN Yuan-yuan, *et al.* Enhanced transmission through periodic H-shaped arrays [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(9): 1602-1605.
孙梅,邢素霞,陈媛媛,等.周期排列的H-空气槽光学特性的研究[J]. *光子学报*, 2010, **39**(9):1602-1605.