

多圆孔周期性银膜阵列结构的光学特性

潘庭婷, 曹文, 王鸣*

南京师范大学物理科学与技术学院, 江苏省光电技术重点实验室, 江苏 南京 210023

摘要 提出一种多圆孔周期性银膜阵列结构, 并利用时域有限差分算法探究该结构的光学特性。计算结果表明, 当线性偏振光入射时, 该结构表面激发出表面等离子激元, 且纳米孔间产生了局部表面等离子体共振, 使得该结构的异常透射增强。针对这一现象, 通过对中心孔与边孔所呈角度、入射光偏振角度、结构参数(中心孔直径、边孔直径、结构厚度、边孔与中心孔的间距)的调控来实现结构光学透射属性的优化。此外, 分析所提结构在不同环境折射率条件下透射峰的变化规律, 发现该结构也对周围的环境折射率具有较高的敏感度。因此该结构在表面等离子滤波器 and 折射率传感器中具有广泛的应用前景。

关键词 传感器; 周期性阵列结构; 局部表面等离子体共振; 表面等离子激元; 异常透射现象

中图分类号 O539

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.0104001

Optical Properties of Multi-Hole Periodic Silver Film Array Structure

Pan Tingting, Cao Wen, Wang Ming*

Key Laboratory on Opto-Electronic Technology of Jiangsu Province, School of Physics Science and Technology, Nanjing Normal University, Nanjing, Jiangsu 210023, China

Abstract We propose a multi-hole periodic silver film array structure and explore the optical properties of the proposed structure using the finite-difference time-domain method. Simulation results reveal that when linearly polarized light is incident on the metal surface, the structure possesses extraordinary optical transmission due to the excitation of the surface plasmon polaritons and localized surface plasmon resonances. In view of this phenomenon, the optical transmission property of the proposed structure is further optimized by the angle between the central hole and side holes, polarization angle of the incident light, and structural parameters (*i. e.*, diameters of the central hole and side holes, structural thickness, space between side holes and central hole). Further analysis of the variation of the transmission peak under different refractive indices shows that the structure has a high sensitivity to the refractive index of the surrounding environment. Thus, the proposed structure has potential applications in surface plasma filters and refractive index sensors.

Key words sensors; periodic array structure; localized surface plasmon resonance; surface plasmon polaritons; extraordinary optical transmission

OCIS codes 040.1240; 240.6680; 250.5403

1 引 言

1998 年, Ebbesen 等^[1]首先研究了金属薄膜中周期性亚波长孔阵列的光学传输性, 即在某些特定波长下, 光的透射率不仅高于孔的面积与一个周期面积的比值, 还远高于传统孔径理论给出的数值, 这种现象被称为光学异常透射现象(EOT)^[2-7]。而这种特性在非线性光学^[8]、新型光源^[9]、高灵敏度的生

物传感和检测等领域都有着十分重要的应用^[10-11]。大量研究结果表明, 局部表面等离子体共振(LSPR)和表面等离子激元(SPPs)的激发和耦合是产生 EOT 的主要原因。目前, 研究者们已经就这一光学传输特性, 对其纳米结构如单一圆形^[12-13]、方形、椭圆形, 以及复合结构^[14-16]进行研究, 其中, 复合结构具有克服衍射极限、缩小尺寸和强光学场限制等特性^[17], 受到广泛关注。例如: Irannejad 等^[18]研究金属薄膜

收稿日期: 2018-07-04; 修回日期: 2018-08-06; 录用日期: 2018-08-30

基金项目: 国家自然科学基金(51775283, 51405240)、江苏省自然科学基金(BK20161559)、江苏省高校自然科学研究项目(16KJB510018)、江苏省高校研究生培养创新工程(KYLX16_1289)

* E-mail: wangming@njnu.edu.cn

中多孔纳米结构的光透射；Wang 等^[19]研究菱形等离子体纳米孔阵列的超光学传输特性。考虑到形状复杂的孔型将会增加实际应用的难度，因此，本文将具有简单复合孔阵列的金属纳米结构作为研究重点。

本文提出一种多圆孔周期性银膜阵列结构，利用时域有限差分(FDTD)算法进行仿真探究。当光入射到金属表面，被亚波长孔散射后会在金属薄膜中产生倏逝波，倏逝波通过亚波长孔的隧道效应遂穿到孔的下表面。同时，倏逝波也可以通过该隧穿过程把金属上表面的 SPPs^[20-23] 的能量转移到金属孔洞的下表面，从而在结构的下表面形成 Fabry-Perot(F-P)腔。下表面的倏逝波将再次被散射形成传播波，入射光的透射强度也会随着金属膜厚度的增加而呈指数衰减，局部 SPPs 在补偿这个衰减的过程中发挥了重要作用。LSPR 是在亚波长孔边缘处形成的偶极矩，其附近将产生一个电磁场，强度取决于亚波长孔的几何参数。LSPR 能够在亚波长孔附近产生强烈的电磁场，从而显著增强了结构的光学透射特性。而当 SPPs 与 LSPR 的能量相近时，结构的透射特性将会被进一步增强。另外，在实现简单复合孔阵列的情况下，本文着重研究了结构的边孔与中心孔所呈角度、入射光偏振角度对于异常透射的影响。同时，本文也分别讨论其他结构参数(中心孔直径、边孔直径、结构厚度、边孔与中心孔的间距)对于光透射的影响，进一步优化复合孔阵列结构，以实现透射峰波长的调控。除此之外，该结构还对环境折射率具有较好的敏感性和可调性。

2 仿真模型与计算方法

多圆孔周期性银膜阵列结构模型如图 1(a)所示，单个周期模型如图 1(b)所示，该结构由 1 个大直径中心圆孔与 4 个分布在中心孔旁边的小直径圆孔组成，旁边的 4 个孔呈现左右、上下都对称的状态。中心孔直径 $R = 120 \text{ nm}$ ，边孔直径 $r = 70 \text{ nm}$ ，中心孔与边孔圆心之间的距离 $D = 100 \text{ nm}$ ，中心孔与两边孔所呈角度 $\theta = 45^\circ$ ，厚度 $H = 50 \text{ nm}$ ，衬底为 SiO_2 ，周期长度 $P = 400 \text{ nm}$ 。为了分析结构的透射增强特性，选择银作为金属薄膜材料。当金属的介电常数与频率相关时，金属表现出色散特性，本模拟过程中采用修正的 Drude 模型，可以表示为： $\epsilon_{\text{Ag}} = 1 - \omega_p^2 / [\omega(\omega + i\gamma)]$ 。其中， ϵ_{Ag} 为金属的介电常数， ω 为等离子体频率， γ 为电子的碰撞频率， $\omega_p = 2\pi \times 2.175 \times 10^{15} \text{ s}^{-1}$ 。利用 FDTD 算法建立模型，

采用波长范围为 $400 \sim 1100 \text{ nm}$ 的平面波，沿 z 轴负方向垂直入射到金属表面，偏振方向沿 x 方向。 x 和 y 方向上设置成周期边界条件，相当于将计算区域内的模型结构、电磁场及光源强度分布进行周期性延拓，以达到以有限的计算区域模拟无限空间电磁场分布的目的。 z 方向设置为吸收边界条件(PML)，以保证边界上的介质连续分布。同时设置为自动非均匀共性网格，理论上 $\lambda/10$ 的网格精确度较高，因此模型网格大小设为 2.5 nm ，以满足计算收敛条件，提高计算的精度与速度。

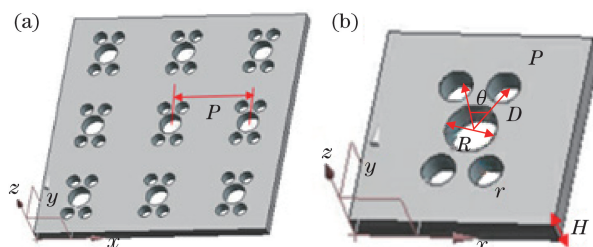


图 1 结构模型。(a)多圆孔周期性银膜阵列结构；(b)单个周期结构

Fig. 1 Structural model. (a) Multi-hole periodic silver film array structure; (b) single periodic structure

3 结果与讨论

3.1 多圆孔周期性银膜阵列结构的异常透射现象

图 2 所示为多圆孔周期性银膜阵列结构的透射谱及电场分布。为了探究多圆孔周期性银膜阵列结构透射峰的产生原因，进一步分析了中心孔和边孔的透射谱及透射峰处的电场分布(图 3)。由图 3 可知：多圆孔周期性银膜阵列结构的透射率略高于中心孔和边孔结构的透射率之和；中心孔及边孔结构的电场增强主要集中在孔中，此时在中心孔及边孔结构上仅激发了 SPPs，使得结构的透射增强；多圆

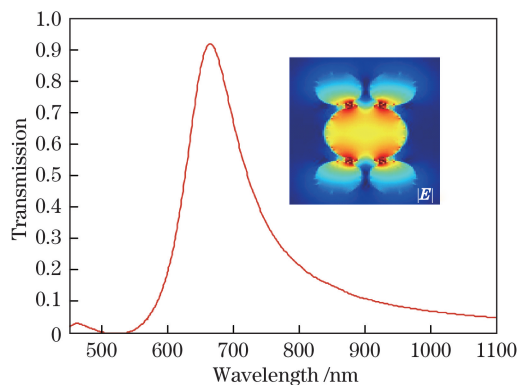


图 2 多圆孔周期性银膜阵列结构的透射谱及电场分布
Fig. 2 Transmission spectrum and electric field distribution of multi-hole periodic silver film array

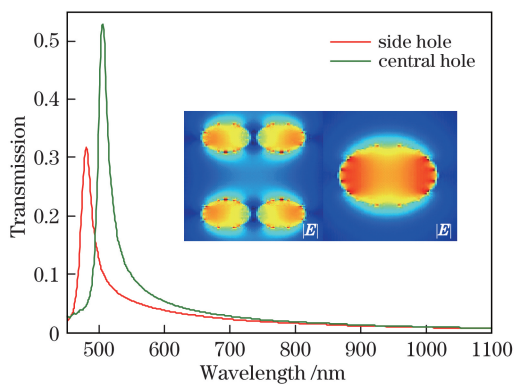


图 3 中心孔和边孔的透射谱及电场分布

Fig. 3 Transmission spectra and electric field distribution of central hole and side holes

孔周期性银膜阵列结构的电场增强主要集中在边孔与中心孔的间隙处及中心孔中,在多圆孔周期性银膜阵列结构上不仅激发了 SPPs,同时产生了 LSPR。此时 SPPs 与 LSPR 相互耦合,形成一种混合等离子元模式,可在一定程度上弥补由于入射光的透射强度随着金属膜厚度增加而产生的衰减,与中心孔及边孔结构相比,该结构的光学透射特性显著增强,并展现出超强的异常透射现象。

3.2 中心孔与边孔所呈角度对结构光学特性的影响

为了探究中心孔与边孔所呈角度对结构光学特性的影响,保持其他参数不变,调整角度从 42°增大到 95°,此时边孔呈现相离状态,此时多圆孔复合周

期性银膜阵列结构的透射谱及不同角度下结构透射峰处的电场分布、 $|E_x|$ 和 $|E_y|$ 的场分布如图 4 和图 5 所示。结果表明,该结构的电场增强主要集中在中心孔与边孔的间隙处,在结构上产生 LSPR。同时,随着角度增大,边孔的间隙距离增加,当结构呈 45°角时, LSPR 强近场耦合强度达到最大值,异常透射现象最明显,故透射率达到最大值,约为 93%。综上所述,所提结构的透射特性严重依赖于中心孔与边孔所呈角度,通过角度的改变可以实现结构透射谱的调制,这对于光与物质的相互作用的相关研究(如折射率传感器)非常有益。

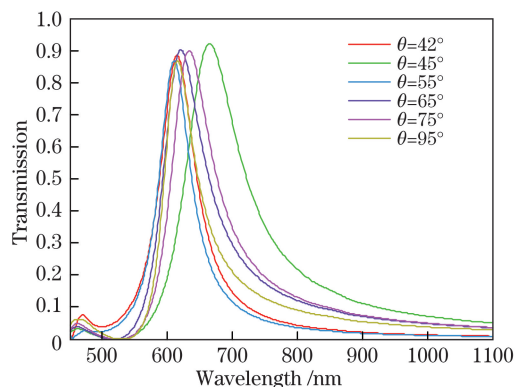


图 4 中心孔与边孔所呈角度不同时多圆孔周期性银膜阵列结构的透射谱

Fig. 4 Transmission spectra of multi-hole periodic silver film array at different angles

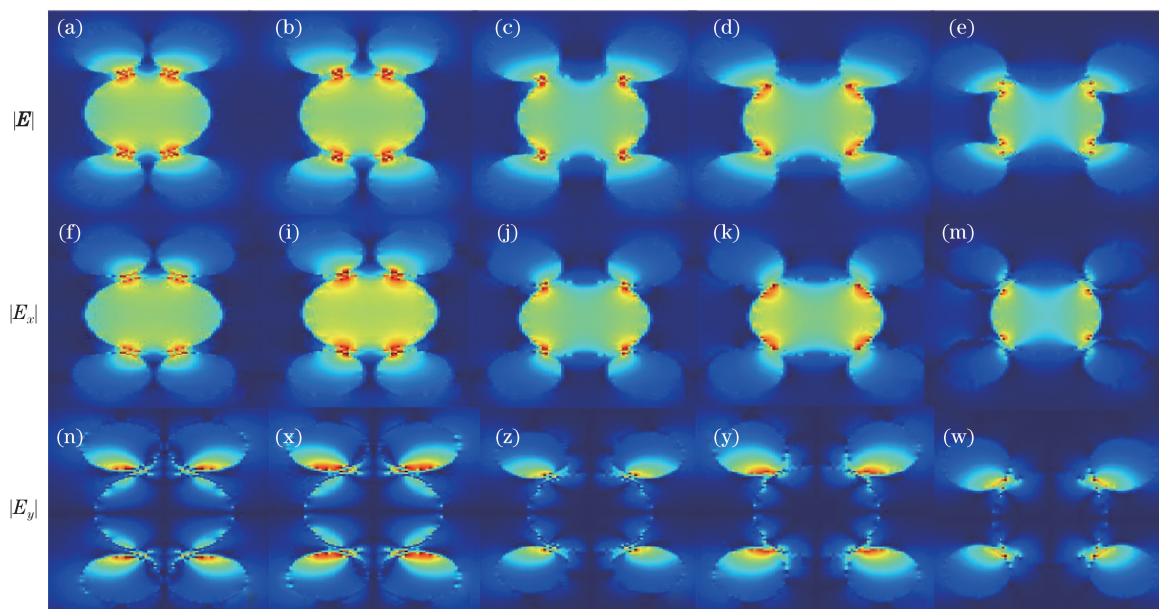


图 5 结构透射峰在不同角度下的电场分布、 $|E_x|$ 和 $|E_y|$ 的场分布。(a)(f)(n) 42°; (b)(j)(z) 65°; (d)(k)(y) 75°; (e)(m)(w) 95°

Fig. 5 Electric field distribution, $|E_x|$ and $|E_y|$ field distribution at the transmission peak of the proposed structure with different angles. (a)(f)(n) 42°; (b)(j)(z) 65°; (d)(k)(y) 75°; (e)(m)(w) 95°

3.3 中心孔直径及边孔直径对结构光学特性影响

保持其他参数不变,调整结构中心孔的直径,当中心孔直径从 100 nm 逐渐增加到 120 nm 时,结构的透射谱及电场分布如图 6 和图 7 所示。可以看到,随着中心孔直径的增加,谱线红移明显,峰值显著增加,最高可达 93%。同时,保持其他参数不变,调整结构边孔的直径,当边孔直径从 50 nm 逐渐增加到 70 nm 时,该结构的透射谱及电场分布如图 8 和图 9 所示。可以看到,随着边孔直径的增加,谱线红移,透射峰值不断增加。此外,这两种结构的电场增强都是由中心孔处逐渐转移到中心孔与边孔的间隙位置,这主要是因为随着孔径的增加,中心孔与边孔的间距不断减小,导致 LSPR 的近场耦合不断增强,结构中 SPPs 的主导地位逐渐减弱,从而弥补由

于入射光的透射强度随着金属膜厚度增加而产生的衰减,具有良好的异常透射特性。

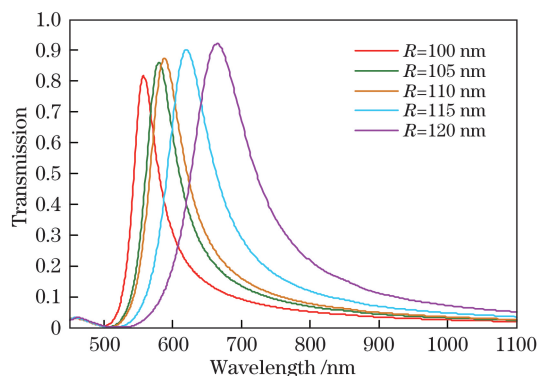


图 6 多圆孔周期性银膜阵列结构在不同中心孔直径处的透射谱
Fig. 6 Transmission spectra of multi-hole periodic silver film array structure at different diameters of central hole

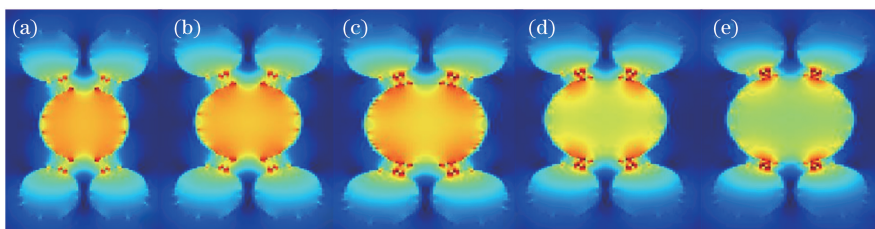


图 7 结构透射峰在不同中心孔直径处的电场分布。(a) 100 nm; (b) 105 nm; (c) 110 nm; (d) 115 nm; (e) 120 nm
Fig. 7 Electric field distribution at the transmission peak of the proposed structure with different diameters of central hole.
(a) 100 nm; (b) 105 nm; (c) 110 nm; (d) 115 nm; (e) 120 nm

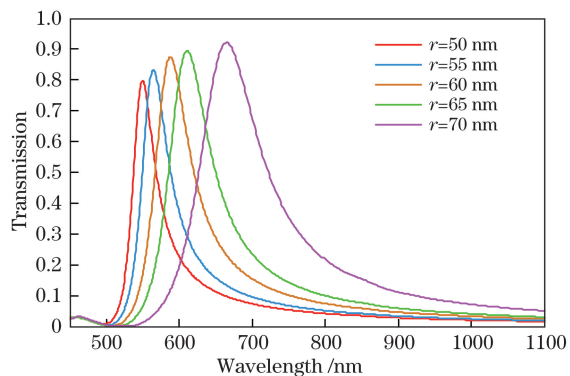


图 8 多圆孔周期性银膜阵列结构在不同边孔直径下的透射谱
Fig. 8 Transmission spectra of multi-hole periodic silver film array structure at different diameters of side holes

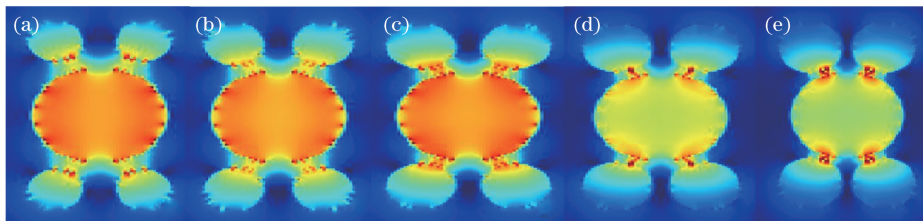


图 9 结构透射峰在不同边孔直径下的电场分布。(a) 50 nm; (b) 55 nm; (c) 60 nm; (d) 65 nm; (e) 70 nm
Fig. 9 Electric field distribution at the transmission peak with different diameters of side holes. (a) 50 nm;
(b) 55 nm; (c) 60 nm; (d) 65 nm; (e) 70 nm

3.4 结构厚度、边孔与中心孔的间距对结构光学特性的影响

保持其他参数不变,调整结构结构厚度从 50 nm 逐渐增加到 80 nm,所提结构的透射谱及电场分布如图 10 和图 11 所示。可以看到,该结构的电场增强主要集中在中心孔与边孔的间隙处,随着厚度的不断增加,近场耦合的强度逐步减弱,透射谱的谱线蓝移,半峰全宽减小,透射峰值减小。这主要是因为金属表面激发的 SPPs 会产生一种倏逝波,这种波随距离的增加迅速减弱,导致 2 个金属表面的 SPPs 耦合效率降低,因此入射光的透射强度也会随着金属膜厚度的增加而快速衰减,而且透射峰

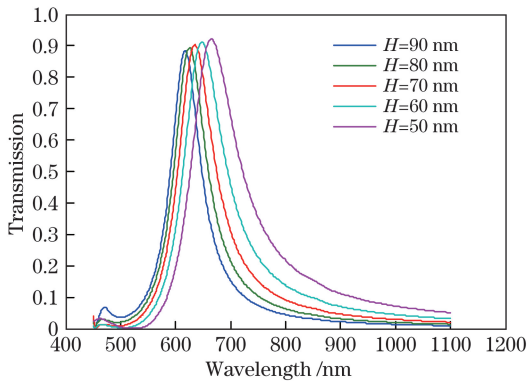


图 10 多圆孔周期性银膜阵列结构在不同厚度处的透射谱
Fig. 10 Transmission spectra of multi-hole periodic silver film array structure at different thickness

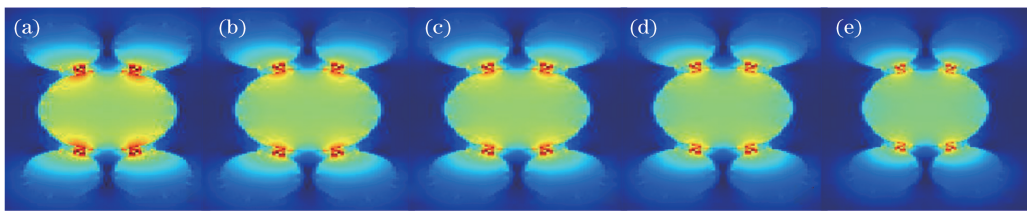


图 11 结构透射峰在不同结构厚度处的电场分布。(a) 50 nm; (b) 60 nm; (c) 70 nm; (d) 80 nm; (e) 90 nm
Fig. 11 Electric field distribution at the transmission peak with different thickness of the structure.

(a) 50 nm; (b) 60 nm; (c) 70 nm; (d) 80 nm; (e) 90 nm

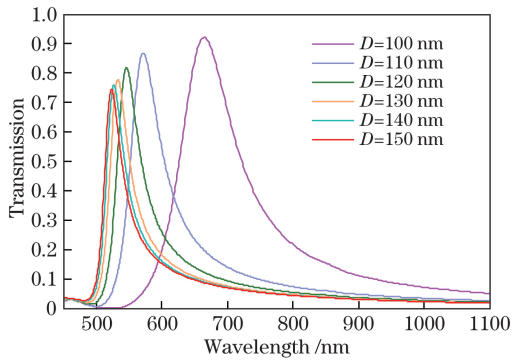


图 12 多圆孔周期性银膜阵列结构在不同边孔与中心孔的间距处的透射谱
Fig. 12 Transmission spectra of multi-hole periodic silver film array structure at different space between side holes and central hole

的半峰全宽也会快速减小。

保持其他参数不变,调整边孔与中心孔的间距从 100 nm 逐渐增加到 150 nm,所提结构的透射谱及电场分布如图 12 和图 13 所示。可以看到,随着间距的增加,结构的电场增强位置由中心孔与边孔的间隙处逐步转移至中心孔处,透射谱的谱线红移,且透射峰值显著增大。这主要是因为边孔与中心孔间距的增加,导致边孔与中心孔之间的相互作用减小,耦合到圆孔边缘的 LSPR 减少,LSPR 的近场耦合减弱,即耦合到金属缝隙中的能量减少,从而使透射强度减弱。同时,当边孔与中心孔的间距增加到足够大时,孔间的耦合效应可忽略,各孔之间的相互作用几乎消失。

3.5 入射光偏振角度对结构光学特性的影响

保持其他参数不变,改变入射光源的偏振方向,即电场强度与 x 轴的夹角。当夹角从 0° 逐渐增加到 90° 时,该结构的透射谱如图 14 所示。可以看到,随着偏振角度的增加,透射峰值逐渐减小,透射峰位置出现微小的蓝移。为了进一步探究这一现象,仿真了偏振角为 0° 、 30° 、 60° 、 90° 时透射峰的电场分布、 $|E_x|$ 和 $|E_y|$ 的场分布,结果如图 15 所示。通过对比 $|E_x|$ 和 $|E_y|$ 的场分布发现,该结构在 x 方向上的电场增强集中在中心孔与边孔的间隙处,同时在 x 方向上激发了 LSPR,而在 y 方向上的电场增强集中在中心孔与边孔的边缘处,且在 y 方向上产生了 LSPR。随着偏振角度的增加,透射率不断减

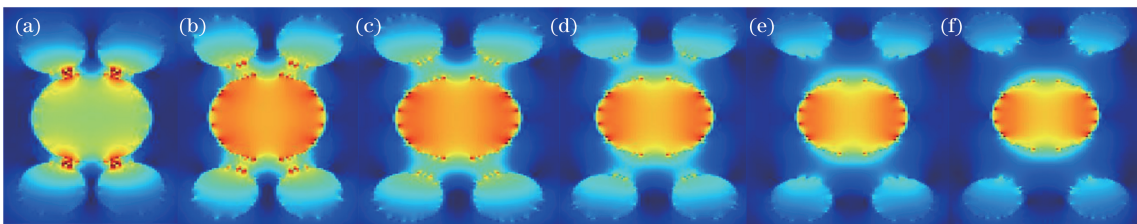


图 13 结构透射峰在不同边孔与中心孔间距处的电场分布。(a) 100 nm; (b) 110 nm;
(c) 120 nm; (d) 130 nm; (e) 140 nm; (f) 150 nm

Fig. 13 Electric field distribution at the transmission peak with different space between side holes and central hole.
(a) 100 nm; (b) 110 nm; (c) 120 nm; (d) 130 nm; (e) 140 nm; (f) 150 nm

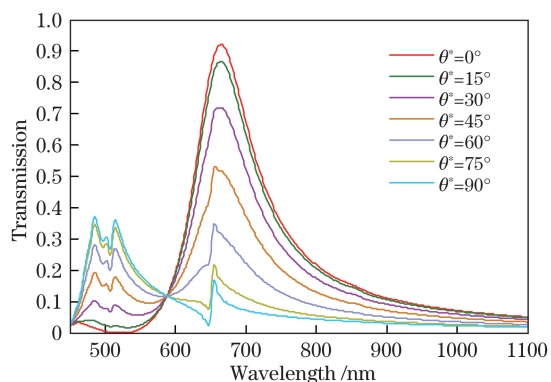


图 14 多圆孔周期性银膜阵列结构在不同偏振角度 θ^* 处的透射谱

Fig. 14 Transmission spectra of multi-hole periodic silver film array structure at different polarization angles

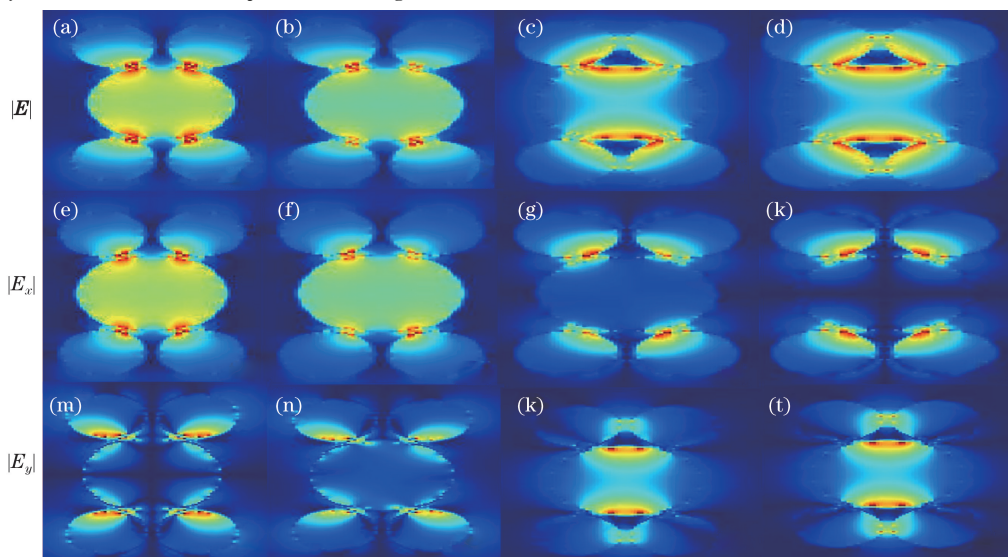


图 15 结构透射峰在不同偏振角度下的电场分布、 $|E_x|$ 和 $|E_y|$ 的场分布。(a)(e)(m) 0° ；(b)(f)(n) 30° ；(c)(g)(k) 60° ；(d)(k)(t) 90°

Fig. 15 Electric field distribution, $|E_x|$ and $|E_y|$ field distribution at the transmission peak with different polarization angles. (a)(e)(m) 0° ; (b)(f)(n) 30° ; (c)(g)(k) 60° ; (d)(k)(t) 90°

加到 1.08, 变化间隔为 0.02, 计算所提结构的透射谱及环境折射率与波长的关系, 结果如图 16 和图 17 所示。随着环境折射率的增加, 透射谱线红移, 透射峰位置也随着环境折射率的增加而红移, 同时峰值增大, 两者具有良好的线性关系。基于环境折射率与波峰位置之间的线性关系, 通过测量透射峰的移动量可得到环境折射率。根据 $S = \frac{\Delta\lambda}{\Delta n}$ (S 为传感器灵敏度, $\Delta\lambda$ 为单位谐振波长, Δn 为单位介质折射率), 通过透射峰位置与折射率的线性关系可以得到此结构的灵敏度为 600 nm/RIU。再根据 $b_{\text{FOM}} =$

$\frac{S}{\Delta\lambda}$ (b_{FOM} 为结构的品质因子), 计算得到所提结构的

小, 透射谱线出现微小的蓝移。而当偏振角度为 0° 时, 该结构的透射率最高, 这主要是因为此时相邻圆孔相交处的近场耦合作用最强, 弥补了由于入射光的透射强度随着金属膜厚度增加而产生的衰减, 增强了银薄膜表面 SPPs 与银孔洞中 SPPs 的转化效率, 从而导致结构的透射率达到最大值。由此可见, 所提结构的透射特性严重依赖于入射光的偏振方向, 偏振方向的改变导致强电场分布位置及大小的变化, 引起透射峰值大小及位置的改变, 从而实现偏振方向对结构透射特性的调控。

3.6 环境折射率对结构光学特性的影响

为了探究环境折射率对结构光学特性的影响, 保持其他参数不变, 将周围环境的折射率从 1.00 增

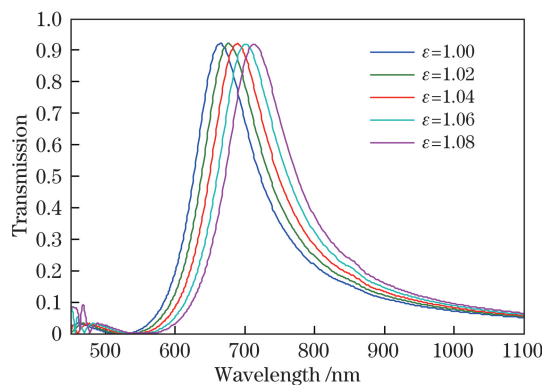


图 16 多圆孔周期性银膜阵列结构在不同环境折射率 ϵ 下的透射谱

Fig. 16 Transmission spectra of multi-hole periodic silver film array structure at different environmental refractive index

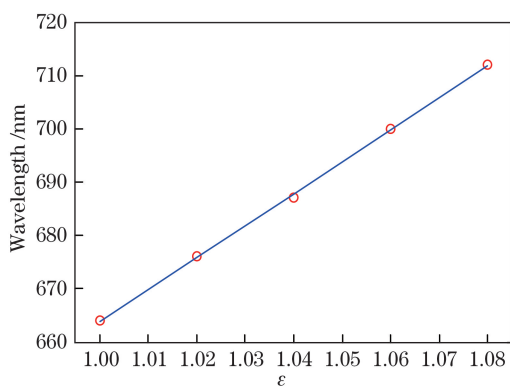


图 17 透射峰波长位置随环境折射率的变化关系

Fig. 17 Relationship between wavelength position of transmission peak and environmental refractive index

品质因数为 6.5。综上所述,该结构可应用于折射率传感器件,并具有显著优势。

4 结 论

提出一种多圆孔周期性银膜阵列结构,利用 FDTD 算法探究了该结构的异常透射增强属性。同时,该结构可以通过对中心孔与边孔所呈角度、入射光偏振角度、结构参数(中心孔直径、边孔直径、结构厚度、边孔与中心孔的间距)的调控来实现结构光学透射属性的优化。另外,分析了在不同环境折射率条件下透射峰的变化规律,可知该结构对周围的环境折射率也有着较高的敏感度。研究表明,这种结构具有简单、紧凑、可控等特点,在 SPPs 滤波器和折射率传感器中具有广泛的应用前景。

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] Martín-Moreno L, García-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.
- [3] Barnes W L, Dereux A, Ebbesen T W. Surface plasmon subwavelength optics[J]. *Nature*, 2003, 424(6950): 824-830.
- [4] Orbons S M, Roberts A. Resonance and extraordinary transmission in annular aperture arrays [J]. *Optics Express*, 2006, 14(26): 12623-12628.
- [5] Yang W X, Song H F, Lei J G. Numerical study on transmission enhancement of metallic nanohole array[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(3): 033101.
- [6] Weng S J, Pei L, Wang J S, *et al.* High sensitivity D-shaped hole fiber temperature sensor based on surface plasmon resonance with liquid filling[J]. *Photonics Research*, 2017, 5(2): 103-107.
- [7] Søndergaard T, Bozhevolnyi S I, Novikov S M, *et al.* Extraordinary optical transmission enhanced by nanofocusing[J]. *Nano Letters*, 2010, 10(8): 3123-3128.
- [8] Nahata A, Linke R A, Ishi T, *et al.* Enhanced nonlinear optical conversion from a periodically nanostructured metal film[J]. *Optics Letters*, 2003, 28(6): 423-425.
- [9] Tsai M W, Chuang T H, Chang H Y, *et al.* Bragg scattering of surface plasmon polaritons on extraordinary transmission through silver periodic perforated hole arrays[J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 88(21): 213112.
- [10] Shen Y, Liu M K, Li J, *et al.* Extraordinary transmission of three-dimensional crescent-like holes arrays[J]. *Plasmonics*, 2012, 7(2): 221-227.
- [11] Rindzevicius T, Alaverdyan Y, Dahlin A, *et al.* Plasmonic sensing characteristics of single nanometric holes[J]. *Nano Letters*, 2005, 5(11): 2335-2339.
- [12] 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]. *Physical Review Letters*, 2004, 92(18): 183901.
- [13] Fang Z Y, Cai J Y, Yan Z B, *et al.* Removing a wedge from a metallic nanodisk reveals a fano resonance[J]. *Nano Letters*, 2011, 11(10): 4475-4479.
- [14] Shuford K L, Ratner M A, Gray S K, *et al.* Finite-difference time-domain studies of light transmission through nanohole structures[J]. *Applied Physics B*, 2006, 84(1/2): 11-18.
- [15] Wang L N, Xu B Z, Bai W L, *et al.* Multiple surface plasmon resonances in compound structure with metallic nanoparticle and nanohole arrays[J]. *Plasmonics*, 2012, 7(4): 659-663.
- [16] Bao Y J, Hu Z J, Li Z W, *et al.* Magnetic plasmonic fano resonance at optical frequency[J]. *Small*, 2015, 11(18): 2177-2181.
- [17] Fang Z Y, Zhu X. Plasmonics in nanostructures[J]. *Advanced Materials*, 2013, 25(28): 3840-3856.
- [18] Irannejad M, Yavuz M, Cui B. Finite difference time domain study of light transmission through multihole nanostructures in metallic film[J]. *Photonics Research*, 2013, 1(4): 154-159.

- [19] Wang Y K, Qin Y, Zhang Z Y. Broadband extraordinary optical transmission through gold diamond-shaped nanohole arrays[J]. IEEE Photonics Journal, 2014, 6(4): 4801508.
- [20] Najiminaini M, Vasefi F, Kaminska B, *et al.* Nanohole array structure with improved surface plasmon energy matching characteristics[J]. Applied Physics Letters, 2012, 100(4): 043105.
- [21] Du L P, Tang D Y, Yuan G H, *et al.* Emission pattern of surface-enhanced Raman scattering from single nanoparticle-film junction[J]. Applied Physics Letters, 2013, 102(8): 081117.
- [22] Rodrigo S G, Mahboub O, Degiron A, *et al.* Holes with very acute angles: a new paradigm of extraordinary optical transmission through strongly localized modes[J]. Optics Express, 2010, 18(23): 23691-23697.
- [23] Zhang W, Wang Y K, Luo L N, *et al.* Extraordinary optical transmission of broadband through tapered multilayer slits[J]. Plasmonics, 2015, 10(3): 547-551.