

## 带有矩形孔阵列的 Au-介质-Au 多层膜的透射特性

韩 晶<sup>1,2</sup>, 邵雅斌<sup>1</sup>, 王 君<sup>1</sup>, 肇 欣<sup>1</sup>, 高亚臣<sup>1</sup>

(1. 黑龙江大学 电子工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150080;  
2. 黑龙江工程学院 电气与信息工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150050)

**摘要:** 周期性亚波长孔阵列的异常透射性质在亚波长光电器件设计中具有重要意义。两层或更多膜层上周期孔阵列结构, 由于层之间电磁场的相互作用可以导致新的光学性质。利用时域有限差分方法理论研究了带有矩形孔阵列的 Au-介质-Au 多层膜的透射特性。结果表明: 该结构在近红外波段的透射谱存在多个透射峰, 并且透射峰的数量、位置和强度可以通过改变结构的几何参数和介质膜的材料进行调控。详细分析了介质膜的厚度和折射率、孔阵列的周期、矩形孔的边长等因素对多层膜矩形孔阵列透射谱的影响, 为利用多个表面等离子共振设计多波长控制器件提供了一定的参考。

**关键词:** 多层膜; 矩形孔阵列; 异常透射; 表面等离子极化激元; 时域有限差分法

**中图分类号:** TN29      **文献标志码:** A      **DOI:** 10.3788/IRLA201948.0721001

## Transmission properties of Au-dielectric-Au multilayer films with rectangular hole arrays

Han Jing<sup>1,2</sup>, Shao Yabin<sup>1</sup>, Wang Jun<sup>1</sup>, Zhao Xin<sup>1</sup>, Gao Yachen<sup>1</sup>

(1. College of Electronic Engineering, Heilongjiang University, Harbin 150080, China;  
2. College of Electrical and Information Engineering, Heilongjiang Institute of Technology, Harbin 150050, China)

**Abstract:** The extraordinary optical transmission properties of periodic subwavelength hole arrays were of great significance in the design of subwavelength optoelectronic devices. The periodic hole array structure on two or more layers can lead to new optical properties due to the interaction of the electromagnetic fields between the layers. The transmission properties of a rectangular nanohole array in Au-dielectric-Au multilayer films were simulated using the finite-difference time-domain method. The results show that there are multiple transmission peaks in the transmission spectra of the structure in the near-infrared region. The number, position and intensity of the transmission peak can be controlled by changing the geometrical parameters of the structure and the dielectric film of material. The influences of the thickness and refractive index of the dielectric film, the period of the hole arrays, the length of the rectangular hole on the transmission spectrum were analyzed in detail. It provides a reference for designing multi-wavelength control devices using multiple surface plasmon resonances.

**Key words:** multilayer films; rectangular hole arrays; extraordinary optical transmission; surface plasmon polaritons; finite difference time domain method

收稿日期: 2019-02-11; 修订日期: 2019-03-21

基金项目: 国家自然科学基金(61275117)

作者简介: 韩晶(1980-), 女, 讲师, 硕士, 主要从事纳米光子学方面的研究。Email: hanjing1980@163.com

导师简介: 高亚臣(1969-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事非线性光学方面的研究。Email: gaoyachen@hlju.edu.cn

## 0 引言

1998 年, Ebbesen 小组研究了光通过金属膜上的亚波长孔洞阵列的透射性质。研究发现, 在透射谱中出现了多个透射峰, 其透射率超出经典理论的预测值, 这一现象称为异常透射 (Extraordinary Optical Transmission, EOT)<sup>[1]</sup>。此后, 科研人员进行了大量相关的理论和实验研究, 提出了各种理论模型以解释异常透射产生的机理。典型的有表面等离子极化激元 (Surface Plasmon Polaritons, SPPs) 模型<sup>[2-4]</sup>、复合衍射波模型<sup>[5-6]</sup>、复合波模型<sup>[7-8]</sup>、法布里-珀罗 (F-P) 腔共振模型<sup>[9-10]</sup>。其中, 表面等离子极化激元观点认为, 金属薄膜上下表面激发的表面等离子极化激元发生了共振耦合加强, 使金属表面近场极大地增强, 导致透射加强。此外, 一些报道指出局域表面等离子 (Localized Surface Plasmon, LSP) 激元在异常透射现象中也起到重要作用, SPPs 与 LSP 共同作用使得透射增强<sup>[11-12]</sup>。复合衍射波模型认为, 增强透射效应本质上就是光散射过程, 当光入射到小孔时散射为自由传播的辐射波和沿表面传播的消逝波。这些消逝波会产生干涉, 在小孔入口处, 如果干涉加强则透射极大, 如果干涉相消则透射最小。复合波模型认为, 在可见光和近红外波段, 表面等离子极化激元和另外一种金属表面波 (准柱面波) 在异常透射中同等重要。两种波按相对比例结合成复合波, 在不同波段两种波比例不同。该模型在近红外和可见光波段与异常透射现象吻合很好。法布里-珀罗腔共振模型认为, 表面结构有突变的位置相当于一个界面, 表面等离子极化激元传到此位置会发生反射, 形成一个类 F-P 腔, 当满足相干条件时, 特定波长的光经多次干涉后传出, 透射得到加强。除了对 EOT 机理的研究外, EOT 现象在滤波<sup>[13]</sup>、传感<sup>[14]</sup>、光控强度调制器<sup>[15]</sup>、光传输器<sup>[16]</sup>、光开关<sup>[17]</sup>等方面的应用也得到了广泛研究。

以上的研究主要集中在单层金属膜亚波长周期结构的 EOT 特性。近年来, 两层或多层膜周期性狭缝或孔阵列的 EOT 现象受到研究者的关注。参考文献 [18-21] 研究了多层膜金属狭缝阵列的 EOT 特性。Ye 等<sup>[22]</sup>研究了金属-介质-金属周期孔洞阵列在中红外波段的 EOT 特性。研究发现, 介质的厚度对透射峰有很大影响。He 等<sup>[23]</sup>研究了被介质分隔的两

层金属膜孔洞的横向和纵向位移改变对可见光波段透射光谱的影响。文中提出了在 Au-介质-Au 多层膜上制作矩形孔洞阵列来实现波长相关透射增强的方法, 采用时域有限差分 (Finite Difference Time Domain, FDTD) 方法研究了该结构的透射性质。分析了介质膜的材料、介质膜的厚度、阵列周期、矩形边长对透射峰的影响。

## 1 结构模型

图 1(a)、(b) 为设计的 Au-介质-Au 多层膜纳米矩形孔阵列结构的  $x$ - $y$  面和  $x$ - $z$  面的截面图。三维结构是两层金膜之间夹一层介质层, 整个结构在玻璃衬底上。在多层膜上按正方晶格周期制作出矩形孔阵列。如图 1 所示, 上层金膜厚度为  $h_1$ , 中间介质膜厚度为  $h_2$ , 下层金膜厚度为  $h_3$ , 玻璃基底厚度为  $h_4$ , 取  $h_4=1 \mu\text{m}$ , 矩形孔的长边长为  $b$ , 短边长为  $a$ , 阵列沿  $x$ - $y$  方向扩展。纳米孔的高度为  $h=h_1+h_2+h_3$ ,  $h$  与  $z$  轴平行, 两个结构单元的中心距离为  $P$ 。

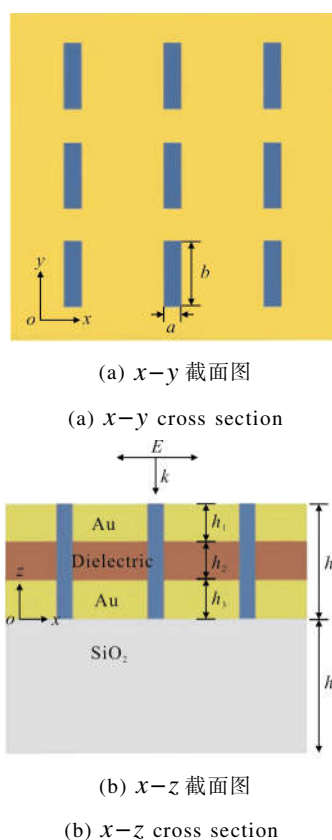


图 1 Au-介质-Au 多层膜矩形孔阵列结构模型  
Fig.1 Structure model of rectangular hole arrays in Au-dielectric-Au multilayer films

利用 FDTD Solutions 时域有限差分仿真软件对多层膜纳米孔洞阵列的透射性质进行了理论模拟。选取光的入射方向沿  $z$  轴向下, 偏振方向沿  $x$  轴, 边界条件选取在  $x, y$  方向为周期性边界条件,  $z$  方向为完美匹配层边界条件。金的介电常数选择 CRC 数据, 环境为空气, 折射率为 1.0, 纳米结构周围的电场强度表示为  $E^2 = E_x^2 + E_y^2 + E_z^2$ 。

## 2 模拟结果与分析

图 2 所示为两层金膜的厚度  $h_1=h_3=100$  nm, 孔的周期  $P=600$  nm, 孔的长边  $b=400$  nm, 短边  $a=50$  nm, 中间介质膜折射率  $n_2=2.0$ , 厚度  $h_2=100$  nm 时的矩形孔阵列的透射谱线。由图可看出, 谱线在波长  $\lambda_1=1896$  nm,  $\lambda_2=1475$  nm,  $\lambda_3=1210$  nm,  $\lambda_4=1024$  nm,  $\lambda_5=793$  nm,  $\lambda_6=732$  nm 处出现了六个透射峰, 其中,  $\lambda_2=1475$  nm 处的峰值最强, 峰宽最大。

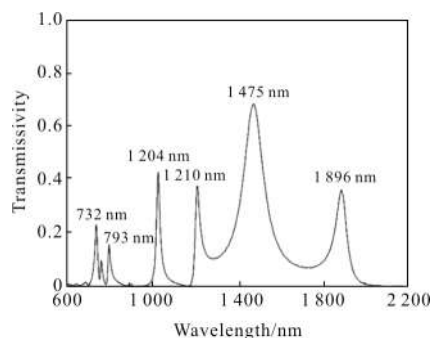


图 2 Au-介质-Au 多层膜矩形孔阵列的透射率

Fig.2 Transmissivity of rectangular hole arrays in Au-dielectric-Au multilayer films

为了研究透射峰产生的物理机制, 图 3 给出了透射峰处波长入射下  $x-z$  平面与  $x-y(z=150$  nm) 平面的电场强度分布。入射场强是归一化的, 图中的比例条表示电场强度  $E^2$  与入射场强  $E_0^2$  的比值。图 3(a)、(b) 分别为  $\lambda_1=1896$  nm 光入射时  $x-z$  平面与  $x-y$

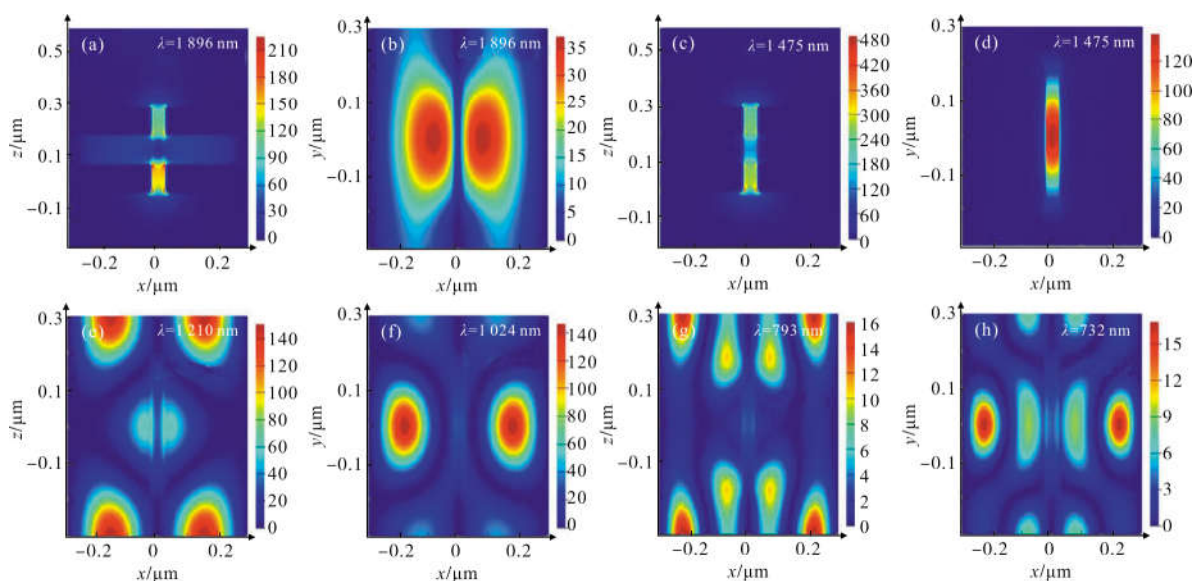


图 3 不同入射波长时, Au-介质-Au 多层膜矩形孔阵列所对应的稳态电场分布。图(a)、(c)为  $x-z$  截面, 图(b)~(h)为  $x-y$  截面( $z=150$  nm)

Fig.3 Steady-state electric field distribution of rectangular hole arrays in Au-dielectric-Au multilayer films with different incident wavelengths. (a), (c)  $x-z$  cross section, (b), (h)  $x-y$  cross section( $z=150$  nm)

( $z=150$  nm)平面的场强分布。可以看到, 电场能量主要集中在矩形孔中, 并通过矩形孔耦合至介质层, 在矩形孔和介质层中均激发形成了 SPPs 且具有驻波性质。同时, 由于衍射作用, 在孔的入口处、孔与各层面的交界处和孔的出口处形成 LSP。SPPs 与 LSP 共同作用形成透射峰。图 3(c)、(d)分别为  $\lambda_2=1475$  nm 光入射时  $x-z$  平面与  $x-y(z=150$  nm)平面的场强分

布。从图 3(c)可看到, 波长  $\lambda_2=1475$  nm 光照射下, 耦合至孔内的入射光的能量被约束在矩形腔内。矩形腔的上端为空气, 下端为玻璃, 沿腔面传播的 SPPs 传播到两个端面会发生反射和衍射, 经多次反射, 不受衍射影响的场分布会趋于稳定, 在腔内形成稳定的电磁模式。在空气与金属膜的交界面, 金属膜与玻璃的交界面形成了 LSP。腔内电磁模式

与 LSP 相互耦合导致透射的加强, 而介质层内没有表现出电场的传输, 见图 3(d)。图 3(e)~(h) 分别为用  $\lambda_3=1\ 210\text{ nm}$ ,  $\lambda_4=1\ 024\text{ nm}$ ,  $\lambda_5=793\text{ nm}$ ,  $\lambda_6=732\text{ nm}$  入射光照射矩形孔洞时介质膜中的电场强度分布, 它们对应着介质膜中不同的电磁模式。可以看出  $\lambda_1$  与  $\lambda_3$ 、 $\lambda_4$ 、 $\lambda_5$ 、 $\lambda_6$  处的透射峰产生的机理相似, 都是孔内 SPPs, 介质膜中 SPPs 与 LSP 相互作用产生的。而  $\lambda_2$  处的透射峰由孔内 SPPs 与 LSP 相互作用产生。

由于透射峰产生的机理不同, 它们对结构参数变化会有不同的敏感性。下面将讨论结构参数变化对透射率较高、波长为  $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ 、 $\lambda_3$ 、 $\lambda_4$  较易分辨的四个透射峰的影响。

### 2.1 介质膜的厚度对透射光谱的影响

为了研究介质膜的厚度对透射光谱的影响, 保证其他参数不变, 使中间介质膜的厚度分别为  $h_2=50$ 、 $100$ 、 $150$ 、 $200\text{ nm}$ 。图 4 显示为不同中间介质膜厚度的透射光谱。由图中可见, 随着介质膜厚度的增加  $\lambda_1$  处的透射峰由  $2\ 206\text{ nm}$  蓝移至  $1\ 701\text{ nm}$ ,  $\lambda_2$  处的透射峰由  $1\ 445\text{ nm}$  红移至  $1\ 547\text{ nm}$ ,  $\lambda_3$  处的透射峰由  $1\ 337\text{ nm}$  蓝移至  $1\ 167\text{ nm}$ ,  $\lambda_4$  处的透射峰由  $1\ 117\text{ nm}$  蓝移至  $969\text{ nm}$ 。对于  $\lambda_2$  处的透射峰, 当介质膜变厚时, 相当于矩形腔腔长增长, 对于同一级共振电磁模式而言, 波长会增加, 所以随着介质膜厚度的增加,  $\lambda_2$  透射峰发生红移。对于  $\lambda_1$ 、 $\lambda_3$ 、 $\lambda_4$  处的透射峰, SPPs 在两层金属之间的介质中传播, 介质层的有效折射率与厚度有关, 当介质膜厚度增加时, 有效折射率减小<sup>[24]</sup>, 相当于两孔之间的光程减小, 所以同一级共

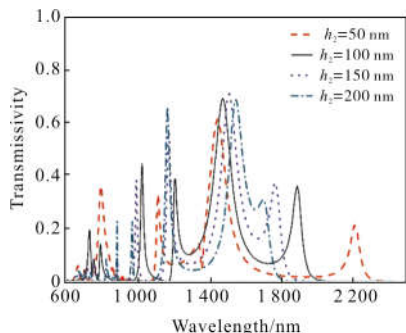


图 4 介质膜厚度不同时, Au-介质-Au 多层膜矩形孔阵列的透射率

Fig.4 Transmissivity of rectangular hole arrays in Au-dielectric -Au multilayer films with different dielectric film thicknesses

振电磁模式的波长就会减小, 峰值出现蓝移。

### 2.2 介质膜的折射率对透射光谱的影响

保证其他参数不变, 选择介质膜的折射率分别为  $n_2=1.8$ 、 $1.9$ 、 $2.0$ 、 $2.1$ 、 $2.2$  时, 仿真了结构的透射特性。图 5 显示中间介质膜具有不同折射率时的透射谱。由图 5 可见, 随着介质膜折射率的增加,  $\lambda_1$  处的透射峰由  $1\ 743\text{ nm}$  红移至  $2\ 037\text{ nm}$ ,  $\lambda_2$  处的透射峰出现了红移但变化不显著,  $\lambda_3$  处的透射峰由  $1\ 121\text{ nm}$  红移至  $1\ 302\text{ nm}$ ,  $\lambda_4$  处的透射峰由  $955\text{ nm}$  红移至  $1\ 092\text{ nm}$ 。 $\lambda_2$  处的透射峰主要受矩形孔结构的影响, 中间介质膜折射率变化对孔结构的影响不大, 所以  $\lambda_2$  处透射峰位置变化不大。而随着介质膜折射率的增加, SPPs 在两个孔之间介质膜中传播时, 光程变大, 同一级共振电磁模式波长增加, 所以  $\lambda_1$ 、 $\lambda_3$ 、 $\lambda_4$  处的透射峰发生红移。

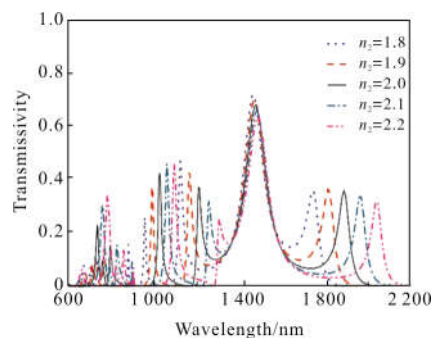


图 5 介质膜折射率不同时, Au-介质-Au 多层膜矩形孔阵列的透射率

Fig.5 Transmissivity of rectangular hole arrays in Au-dielectric-Au multilayer films with different refractive index of dielectric films

### 2.3 矩形孔的周期对透射光谱的影响

图 6 所示为其他参数不变, 结构周期分别为  $P=550$ 、 $600$ 、 $650$ 、 $700\text{ nm}$  的透射谱。由图可见, 随着周期的增加,  $\lambda_2$  处的透射峰出现了轻微地红移。根据上面的分析,  $\lambda_2$  处透射峰主要受孔结构的影响, 周期的变化对孔结构影响不大, 所以透射峰变化不显著。 $\lambda_1$ 、 $\lambda_3$ 、 $\lambda_4$  处的透射峰与介质膜中的电磁模式有关, 周期增加, 相当于 SPPs 在两孔之间介质中传播的光程增加, 同一级共振电磁模式的波长增加, 所以透射峰出现红移。同时, 由于结构周期增加, 介质膜中的 SPPs 传播距离增加, 传播的损耗增加, 各孔间的 LSP 的耦



合效果也在减弱,所以透射峰的强度降低。

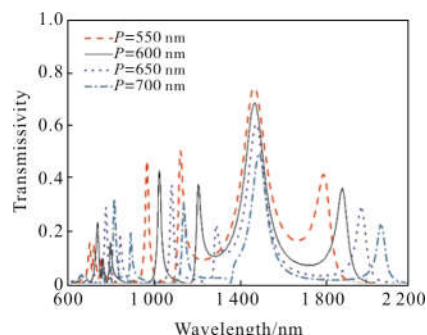


图 6 不同周期时,Au-介质-Au 多层膜矩形孔阵列的透射率

Fig.6 Transmissivity of rectangular hole arrays in Au-dielectric-Au multilayer films with different Periods

### 2.4 矩形孔边长对透射光谱的影响

图 7 所示为其他参数不变,矩形孔长边  $b=400\text{ nm}$ ,矩形孔短边长分别为  $a=25、50、75、100\text{ nm}$  时的透射谱。由图 7 可以看出,随着短边长度的增加(即矩形长宽比减小),各透射峰位置发生了蓝移。矩形孔对光的约束性变差, $\lambda_1、\lambda_3$  透射峰区分度降低,逐渐合并,峰宽变宽。

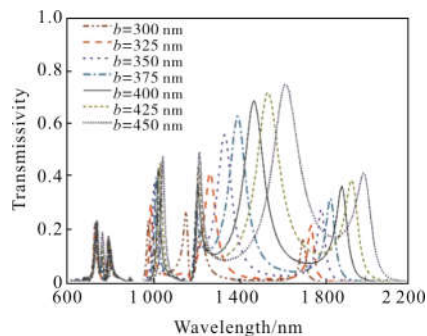


图 7 不同短边长时,Au-介质-Au 多层膜矩形孔阵列的透射率

Fig.7 Transmissivity of rectangular hole arrays in Au-dielectric-Au multilayer films with different short side length

图 8 所示为其他参数不变,矩形孔短边  $a=50\text{ nm}$ ,矩形孔长边长分别为  $b=300、325、350、375、400、425、450\text{ nm}$  时的透射谱。由图可见,随着  $b$  长度的增加(即矩形长宽比增加),各透射峰对应的位置发生了红移,并且透射峰之间形成了重叠。图 9 给出了波长为  $\lambda_2$  的光入射时透射峰的位置与  $b$  边变化的关系,二者近似成线性关系,所以可以通过改变  $b$  边长,很方便的调控  $\lambda_2$  透射峰的位置。边长  $a$  或  $b$  的

变化会使电磁场的局域化程度发生变化,即 LSP 变化。当矩形孔的长宽比增加时 LSP 增强,使得透射峰的位置发生红移。同时,由 LSP 产生的波导作用也会增强,从而可以增加 SPPs 的耦合效率,导致更高的透射率<sup>[11]</sup>。

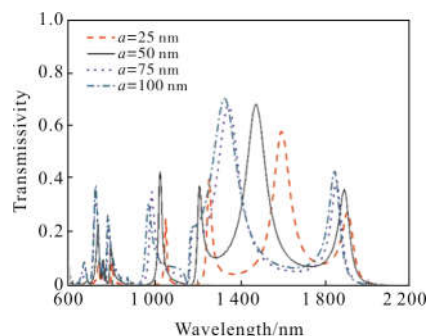


图 8 不同长边长时,Au-介质-Au 多层膜矩形孔阵列的透射率

Fig.8 Transmissivity of rectangular hole array in Au-dielectric-Au multilayer films with different long side length

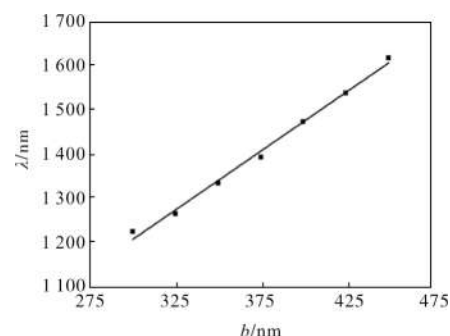


图 9  $\lambda_2$  处透射峰波长与长边长的关系

Fig.9 Relation between transmission peak at  $\lambda_2$  and long side length

## 3 结 论

采用时域有限差分方法,对 Au-介质-Au 多层膜矩形孔阵列的透射性质进行了研究。与单层金属膜相比,由于增加了介质膜而增加了光调控的自由度。分别讨论了介质层的厚度及折射率(即材料种类)、结构周期、矩形孔长短边边长对透射谱的影响。结果表明,入射光在纳米孔洞腔中,介质膜层中形成了表面等离极化激元,在孔与各层面交界处形成了局域表面等离激元,这些电磁模式存在相互耦合并且对结构参数的变化有不同的敏感性。通过改变几何结构和介质层材料可实现对透射峰的调节。上述的讨论与电磁场的偏振性相关,如果在结构两端添

加偏振分束器,透射光将与偏振性无关,为利用多个表面等离子共振设计多波长共振器,多路复用器,滤波器和传感器等器件提供了参考。

### 参考文献:

- [1] Ebbesen T W, Lezec H J, Ghaemi H F, et al. Extraordinary optical transmission through sub-wavelength hole arrays [J]. *Nature*, 1998, 391(6668): 667-669.
- [2] Ghaemi H F, Thio T, Grupp D E, et al. Surface plasmons enhance optical transmission through subwavelength holes [J]. *Phys Rev B*, 1998, 58(11): 6779-6782.
- [3] Salomon L, Grillot F, Zayats A V, et al. Near-field distribution of optical transmission of periodic subwavelength holes in a metal film [J]. *Phys Rev Lett*, 2001, 86(6): 1110-1113.
- [4] Martin-moreno L, Garcia-vidal F J, Lezec H J, et al. Theory of extraordinary optical transmission through subwavelength hole arrays [J]. *Phys Rev Lett*, 2001, 86(6): 1114-1117.
- [5] Lezec H, Thio T. Diffracted evanescent wave model for enhanced and suppressed optical transmission through subwavelength hole arrays [J]. *Opt Express*, 2004, 12(16): 3629-3651.
- [6] Gay G, Alloschery O, Viaris De Lesegno B V, et al. The optical response of nanostructured surfaces and the composite diffracted evanescent wave model [J]. *Nat Phys*, 2006, 2(4): 262-267.
- [7] Liu H T, Lalanne P. Light scattering by metallic surfaces with subwavelength patterns [J]. *Phys Rev B*, 2010, 82(11): 115418.
- [8] Liu H T, Lalanne P. Comprehensive microscopic model of the extraordinary optical transmission [J]. *JOSAA*, 2010, 27(12): 2542-2550.
- [9] Sobnack M B, Tan W C, Wanstall N P, et al. Stationary surface plasmons on a zero-order metal grating [J]. *Phys Rev Lett*, 1998, 80(25): 5667-5670.
- [10] Astilean S, Lalanne Ph, Palamaru M. Light transmission through metallic channels much smaller than the wavelength[J]. *Opt Commun*, 2000, 175(4): 265-273.
- [11] Van Der Molen K L, Klein Koerkamp K J, Enoch S, et al. Role of shape and localized resonances in extraordinary transmission through periodic arrays of subwavelength holes: Experiment and theory [J]. *Phys Rev B*, 2005, 72: 045421.
- [12] Ruan Z C, Qiu M. Enhanced transmission through periodic arrays of subwavelength holes: the role of localized waveguide resonances [J]. *Phys Rev Lett*, 2006, 96: 233901.
- [13] Wang Ang, Dan Yaping. Mid-infrared plasmonic multispectral filters[J]. *Sci Rep*. 2018, 8: 11257.
- [14] Yuan J, Xie Y, Geng Z, et al. Enhanced sensitivity of gold elliptic nanohole array biosensor with the surface plasmon polaritons coupling [J]. *Opt Mater Express*, 2015, 5(4): 818-826.
- [15] Li Chenlong, Feng Lishuang, Zhou Zhen, et al. Optical-control terahertz modulator based on subwavelength metallic hole arrays [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(12): 4013-4016.
- [16] Qi Yunping, Zhang Xuewei, Hu Yue, et al. Broadband extraordinary optical transmission through tapered metallic slits array embedded with rectangular cavities [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(S1): S107001. (in Chinese)
- [17] Miao Sun, Mohammad Taha, Sumeet Walia, et al. A photonic switch based on a hybrid combination of metallic nanoholes and phase-change vanadium Dioxide [J]. *Sci Rep*, 2018, 8: 11106.
- [18] Liu Jing, Liu Juan, Wang Yongtian, et al. Resonant properties of sub-wavelength metallic gratings [J]. *Chinese Optics*, 2011, 4(4): 1674-2915. (in Chinese)
- [19] Xiang D, Wang L L, Zhai X, et al. Optical transmission through metal/dielectric multilayer films perforated with periodic subwavelength slits [J]. *Opt Commun*, 2011, 284(1): 471-475.
- [20] Qu Y, Tian X J, Fu T, et al. Broadband extraordinary optical transmission through a multilayer structure with a periodic nanoslit array [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2015, 7(3): 1-8.
- [21] Nie Junying, Zhang Wan, Luo Lina, et al. Extraordinary optical transmission properties of multilayer metallic slit arrays. [J]. *Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica*, 2015, 45(2): 024202.
- [22] Ye Y H, Zhang J Y. Enhanced light transmission through cascaded metal films perforated with periodic hole arrays[J]. *Opt Lett*, 2005, 30(12): 1521-1523.
- [23] He M D, Wang L L, Liu J Q, et al. Controllable light transmission through cascaded metal films perforated with periodic hole arrays [J]. *Appl Phys Lett*, 2008, 93(22): 221909.
- [24] Luo X G. Principles of electromagnetic waves in metasurfaces [J]. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2015, 58(9): 594201.