

# 折射率对金属-电介质-金属光子晶体强透射特性的影响

杨宏艳<sup>1</sup> 肖功利<sup>2\*</sup>

(<sup>1</sup> 桂林电子科技大学计算机科学与工程学院, 广西 桂林 541004)

(<sup>2</sup> 桂林电子科技大学信息与通信学院, 广西 桂林 541004)

**摘要** 通过改变一个薄电介质层的折射率来研究其对金属-电介质-金属光子晶体(M-D-MPhC)强透射特性的影响。采用与 CMOS 工艺兼容技术制作了由折射率分别为 $[n_d(\text{SU-8})=1.6, n_d(\text{SiO}_{2.1}\text{N}_{0.3})=1.6$  和  $n_d(\text{SiO}_{0.6}\text{N}_1)=1.8]$ 组成的三个正方形晶格圆孔阵列 M-D-MPhC 结构,利用傅里叶变换红外光谱仪测量其透射光谱。实验结果发现,金-SiO<sub>2.1</sub>N<sub>0.3</sub>-金结构能够获得较强的光透射增强效果和较窄的透射峰,证明了 M-D-MPhC 强透射特性既与中间电介质折射率大小有关,又与其材料制作工艺差异有关。采用时域有限差分(FDTD)法模拟了在相同条件下折射率分别为 1.6 和 1.8 组成的 M-D-MPhC 透射光谱和电场强度密度分布,模拟结果较好地符合了实验发现。

**关键词** 表面光学;折射率;强透射特性;时域有限差分法;金属-电介质-金属光子晶体

**中图分类号** O734 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0716002

## Effect of Refractive Index on Extraordinary Transmission Properties for Metal-Dielectric-Metal Photonic Crystal

Yang Hongyan<sup>1</sup> Xiao Gongli<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> School of Computer Science and Engineering, Guilin University of Electronic Technology, Guilin, Guangxi 541004, China)  
(<sup>2</sup> School of Information and Communication, Guilin University of Electronic Technology, Guilin, Guangxi 541004, China)

**Abstract** The effect of refractive index on extraordinary transmission properties for metal-dielectric-metal photonic crystal (M-D-MPhC) by changing a thin dielectric layer is studied. Three M-D-MPhC structures combined with square lattice round holes array with different refractive indexes [ $n_d(\text{SU-8})=1.6$ ,  $n_d(\text{SiO}_{2.1}\text{N}_{0.3})=1.6$  and  $n_d(\text{SiO}_{0.6}\text{N}_1)=1.8$ ] are fabricated using compatible technology with CMOS process, and their transmission spectra are measured using Fourier transform infrared spectrometer. It is found that Au-SiO<sub>2.1</sub>N<sub>0.3</sub>-Au structure can obtain better effect of light transmission enhancement and narrower transmission peak in experimental results. It is demonstrated that extraordinary transmission properties for M-D-MPhC depend strongly on both the size of refractive index of middle dielectric and its material fabrication process difference. The finite-difference time-domain (FDTD) method is used to simulate transmission spectra and electric field intensity density distribution of M-D-MPhC with refractive index of 1.6 and 1.8 respectively under the same conditions. Simulation results agree well with the experimental findings.

**Key words** optics at surfaces; refractive index; extraordinary transmission properties; finite-difference time-domain; metal-dielectric-metal photonic crystal

**OCIS codes** 050.6624; 050.1220; 160.5298; 240.6680

收稿日期: 2012-01-16; 收到修改稿日期: 2012-02-18

基金项目: 国家自然科学基金(61163041)和桂林电子科技大学博士科研启动基金(UF10005Y)资助课题。

作者简介: 杨宏艳(1972—),女,硕士,讲师,主要从事纳米光电子学方面的研究。E-mail: yhy\_gl@126.com

\* 通信联系人。E-mail: xgl\_hy@126.com

# 1 引 言

1998年 Ebbesen 等<sup>[1]</sup>首次报导了光通过金属亚波长孔阵列时展现出强透射(EOT)现象。该开创性的发现促使人们通过大量理论和实验<sup>[2,3]</sup>研究理解其背后丰富的物理机理<sup>[4,5]</sup>,并探讨其在纳米光电子学方面的潜在应用<sup>[6]</sup>。其中大多数的研究工作是探讨具有周期性孔阵列单层金属膜的 EOT 特性。其物理机理是通过光与金属表面自由电子的电荷密度波耦合成表面等离激元(SPP)来增强透射<sup>[7]</sup>。其中单层金属膜孔阵列的特点之一就是其透射峰波长对与金属表面相邻电介质的介电常数极为敏感<sup>[8]</sup>。

最近由两个单金属结构通过一层薄电介质隔开组成的级联金属孔阵列结构的 EOT 特性引起人们关注,这是由于 SPP 耦合作用使其透射效率得到极大的提高<sup>[9]</sup>。故研究使级联金属孔阵列结构具有更优越的 EOT 性能显得极为有用。Ye 等<sup>[10,11]</sup>最先报道了采用两层金属膜中间夹电介质(SU-8)孔阵列结构的中红外频域 EOT 实验结果。他们认为 SPP 耦合作用强弱取决于两个金属膜之间的距离。Tang 等<sup>[12]</sup>理论上探讨具有周期性孔阵列的金属-电介质多层膜结构 SPP 耦合对其 EOT 性能影响。这些研究工作只是详细地探讨了中间电介质厚度变化而其材料是固定的级联金属结构的 EOT 特性。然而,关于电介质折射率( $n_d$ )及其材料属性对 EOT 特性的影响研究工作报道罕见。

本文以金属-电介质-金属光子晶体(M-D-MPhC)为研究对象探讨  $n_d$  对其在中红外频域 EOT 特性的影响。采用 CMOS 工艺兼容技术制作了由折射率不同的电介质  $n_d$ (SU-8)=1.6,  $n_d$ (SiO<sub>2.1</sub>N<sub>0.3</sub>)=1.6 和  $n_d$ (SiO<sub>0.6</sub>N<sub>1</sub>)=1.8 组成的三个 M-D-MPhC, 对其透射光谱进行了测量。同时,采用时域有限差分

(FDTD)法模拟了在相同条件下  $n_d$  分别为 1.6 和 1.8 组成的 M-D-MPhC 透射光谱和电场强度密度分布。结果表明,M-D-MPhC 的 EOT 特性是可以通过改变中间电介质层的  $n_d$  大小来调控。

# 2 实验制作与数值模拟

图 1(a)为由两个相同厚度(亚趋附深度为 20 nm)的金薄膜夹一层电介质组成的 M-D-MPhC 结构示意图。所设计的实验样品是采用正方形晶格圆孔阵列结构。其中包括,晶格间距  $a_0=8 \mu\text{m}$ ,圆孔直径  $d=4 \mu\text{m}$ ,孔的深度  $h=6 \mu\text{m}$ ,金膜厚度  $d_1=20 \text{ nm}$  和中间薄电介质层厚度  $d_2=0.2 \mu\text{m}$ 。采用与 CMOS 工艺兼容技术分别制作了 4 个样品(A,B,C 和 D)。为了便于比较,样品 A 是单层金膜结构用来作为参考。其他三个样品(B,C 和 D)为 M-D-MPhC 级联金膜结构夹三种不同的电介质(SiO<sub>2.1</sub>N<sub>0.3</sub>, SiO<sub>0.6</sub>N<sub>1</sub> 和 SU-8)。其制作的工艺步骤为:1)选择 7.62 cm(100)晶向的 p 型单面抛光的单晶硅片作衬底,然后在其正面热氧化一层厚度为 0.6  $\mu\text{m}$  的 SiO<sub>2</sub> 薄膜;2)在 SiO<sub>2</sub> 膜正面上磁控溅射 20 nm 金膜,其中一片做样品 A;3)采用不同的技术条件淀积三个相同厚度(0.2  $\mu\text{m}$ )不同的电介质膜。对于样品 B,SiO<sub>2.1</sub>N<sub>0.3</sub> 膜(红外频域折射率为 1.6)是在一定比例(30:10:100)混合气体(SiH<sub>4</sub>, Ar 和 N<sub>2</sub>O)条件下采用等离子体增强化学气相(PECVD)淀积而成。对于样品 C,SU-8 膜(红外频域折射率为 1.6)是由单晶圆旋涂器(Laurell WS-400A)旋涂而成。对于样品 D, SiO<sub>0.6</sub>N<sub>1</sub> 膜(红外频域折射率为 1.8)是在一定比例(30:100)混合气体(SiH<sub>4</sub> 和 NH<sub>3</sub>)条件下采用 PECVD 淀积而成;4)另外一层 20 nm 金膜采用溅射淀积在电介质@ SiO<sub>2</sub>@Si 衬底;5)采用深反应离子刻蚀(DRIE)反刻空气圆孔正方形阵列结构(面积

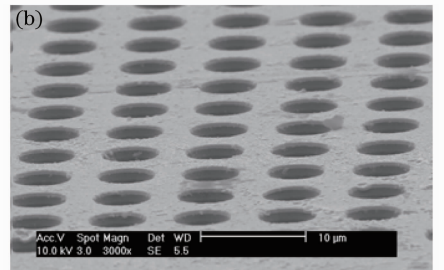
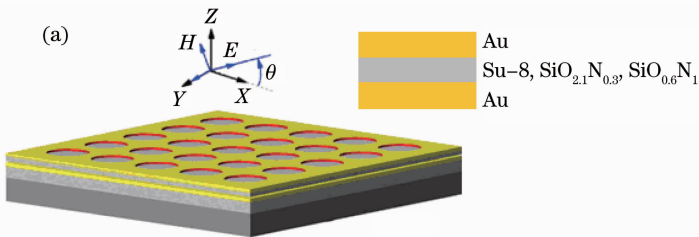


图 1 (a)由三种不同的电介质(SU-8, SiO<sub>2.1</sub>N<sub>0.3</sub>和 SiO<sub>0.6</sub>N<sub>1</sub>)组成的 M-D-MPhC 结构示意图;(b)样品 B 的 SEM 图  
Fig. 1 (a) Schematic diagram of M-D-MPhC structure composed of three different dielectrics (SU-8, SiO<sub>2.1</sub>N<sub>0.3</sub> and SiO<sub>0.6</sub>N<sub>1</sub>); (b) SEM picture of sample B

约  $2\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ )。利用扫描电子显微镜 (SEM) JEOL JSM-5610LV 对 4 个实验样品进行了表征。如图 1(b) 所示, 样品 B 表面光滑且圆孔正方形阵列能够清楚界定, 这表明已经制作了高品质的实验样品。最后使用红外 (IR) 光谱仪系统 (Perkin-Elmer 2000 FTIR) 来测量样品的零阶透射光谱。测量时光是垂直入射样品正表面的金薄膜。为了充分理解  $n_d$  影响 M-D-MPhC 强透射特性的物理机理, 基于 FDTD 方法对样品结构进行了数值模拟。采用商业 FDTD 软件包模拟计算了其零阶透射光谱和 SPP M(1,0) (M 为金属-空气界面) 模式电场强度密度分布。

### 3 结果与讨论

图 2(a), (b) 分别为样品 A 和 B 实验测量与模拟计算的零阶透射光谱。伍德异常影响 (Wood's anomaly effect) 的瑞利极小值 (Rayleigh minima)<sup>[13]</sup> 显然出现在  $\lambda = 8\text{ }\mu\text{m}$  位置, 理论上  $\lambda$  可表示为

$$\lambda = a_0 \sqrt{\epsilon_d} / \sqrt{i^2 + j^2}, \quad (1)$$

式中  $\epsilon_d$  为电介质介电常数,  $a_0$  为阵列的晶格常数,  $i$  和  $j$  是 SPP 的模式指数。在考虑  $a_0 = 8\text{ }\mu\text{m}$  与 SPP M(1,0) 模式的情况下, 实验结果与 (1) 式得到的计算值 ( $\lambda \approx 8\text{ }\mu\text{m}$ ) 几乎是一致。由图 2(a) 看出, 样品 A 和 B 的 SPPs M(1,0) 模式的透射峰波长 ( $\lambda_{\text{SPP}}$ ) 是  $9.2\text{ }\mu\text{m}$  和  $8.9\text{ }\mu\text{m}$ , 后者轻微地蓝移。从图 2(b) 中

也观察到  $\lambda_{\text{SPP}}$  蓝移现象。 $\lambda_{\text{SPP}}$  可表示为<sup>[14]</sup>

$$\lambda_{\text{SPP}} = a_0 \sqrt{\epsilon_m \epsilon_d / (\epsilon_m + \epsilon_d)} / \sqrt{i^2 + j^2}, \quad (2)$$

式中  $\epsilon_m$  是金属介电常数。在考虑  $a_0 = 8\text{ }\mu\text{m}$  与 SPP M(1,0) 模式的情况下, 由 (2) 式得到的计算值为  $\lambda_{\text{SPP}} \approx 8\text{ }\mu\text{m}$ 。计算的位置与实验测量存在细微的差别, 这是由于假设的金属膜结构是连续的<sup>[13]</sup>。此外, 样品 A 和 B 透射峰的半峰全宽 (FWHM) 分别为  $\Delta\lambda = 1.8\text{ }\mu\text{m}$  和  $\Delta\lambda = 0.7\text{ }\mu\text{m}$ 。后者比前者的 FWHM 明显变窄。数值计算的 FWHM ( $\Delta\lambda = 1.4\text{ }\mu\text{m}$  和  $\Delta\lambda = 1\text{ }\mu\text{m}$ ) 与实验测量的结果较好地反映了样品 B 透射峰带宽变窄的变化趋势。与样品 A 相比, 采用级联金属结构样品 B 的透射光谱具有两个主要特点: 1) 获得一种较窄带宽的透射光谱。这是由于上下两个金属膜通过倏逝波耦合起了关键作用, 耦合的 SPP 有助于形成较窄的透射峰。2)  $\lambda_{\text{SPP}}$  相应蓝移。为了进一步验证上述结果, 采用 FDTD 方法对 Au-SiO<sub>2</sub> 和 Au-SiO<sub>2.1</sub>N<sub>0.3</sub>-Au 两种结构的 SPP M(1,0) 模式在  $x$ - $z$  截面电场强度密度分布进行比较, 发现当中间电介质 SiO<sub>2.1</sub>N<sub>0.3</sub> 厚度较薄 ( $0.2\text{ }\mu\text{m}$ ) 时, 上下 Au-SiO<sub>2.1</sub>N<sub>0.3</sub> 界面中的 SPP 会通过倏逝波来耦合, 如图 2(c) 所示。结果表明窄带透射光谱的增强效果是由于级联金属结构的 SPP 耦合作用来推动的。这种现象为采用 M-D-MPhC 结构作高性能等离子体滤波器设计提供依据。

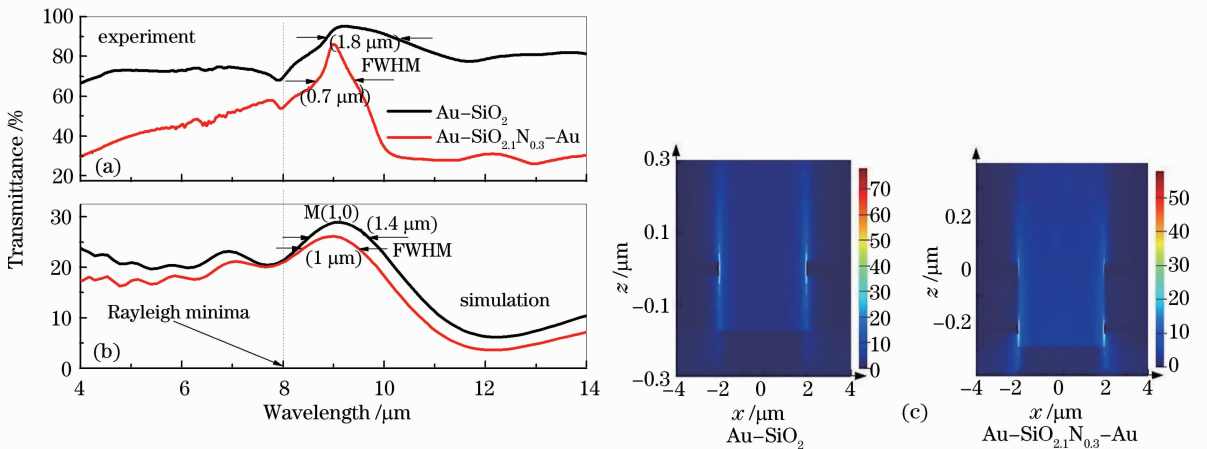


图 2 由 Au-SiO<sub>2</sub> 与 Au-SiO<sub>2.1</sub>N<sub>0.3</sub>-Au 组成的光子晶体。(a) 实验测量; (b) 模拟计算的零阶透射光谱; (c) 其 SPP M(1,0) 模式在  $x$ - $z$  截面电场强度密度分布

Fig. 2 Photonic crystal composed of Au-SiO<sub>2</sub> and Au-SiO<sub>2.1</sub>N<sub>0.3</sub>-Au. (a) Experimental measurement; (b) simulated zero-order transmission spectrum; (c) electric-field intensity density distribution in the  $x$ - $z$  section of its SPP M(1,0) mode

图 3(a)~(c)分别为中间电介质具有不同  $n_d$  ( $\text{SiO}_{0.6}\text{N}_1$ )= $1.8$ ,  $n_d(\text{SiO}_{2.1}\text{N}_{0.3})$ = $1.6$  和  $n_d(\text{SU-8})$ = $1.6$  的三种级联金属结构实验测量的零阶透射光谱。其瑞利极小值同样清楚地出现在  $\lambda \approx 8 \mu\text{m}$  位置。由图 3(a)可以看出,样品 D 的 SPP  $M(1,0)$  模式的  $\lambda_{\text{SPP}}$  是  $9 \mu\text{m}$ 。此外,其透射峰的 FWHM 与强度分别为  $\Delta\lambda = 0.76 \mu\text{m}$  和  $79\%$ 。通过把中间薄电介质从  $\text{SiO}_{0.6}\text{N}_1$  调整到  $\text{SiO}_{2.1}\text{N}_{0.3}$ ,  $n_d$  同时从  $1.8$  降到  $1.6$ ,  $\lambda_{\text{SPP}}$  有规律地从  $9 \mu\text{m}$  移至  $8.96 \mu\text{m}$ , 透射峰强度从  $79\%$  提高到  $86\%$ , 如图 3(b)所示。结果发现由折射率较小的  $\text{SiO}_{2.1}\text{N}_{0.3}$  组成的样品 B 能够得到较大的透射强度和较窄的透射峰。该发现在实际设计基于 M-D-MPhC 可调谐滤波器方面具有理论参考价值。同样,通过把中间薄电介质从  $\text{SiO}_{2.1}\text{N}_{0.3}$  调整到 SU-8, 其  $n_d$  仍为  $1.6$ 。结果发现 SPP  $M(1,0)$  模式的  $\lambda_{\text{SPP}}$  几乎不偏移, 如图 3(c)所示。其透射峰的 FWHM 与强度分别为  $\Delta\lambda = 1.05 \mu\text{m}$  和  $83\%$ 。与具有相同的  $n_d$  ( $n_d = 1.6$ ) 的样品 B 相比发现由 SU-8 组成的样品 C 其透射峰强度降低且变宽。以上实验结果证明中间电介质  $n_d$  大小及其材料制作工艺差异都会影响 M-D-MPhC 的 EOT 特性。 $n_d$  相同的两种不同的电介质 ( $\text{SiO}_{2.1}\text{N}_{0.3}$  和 SU-8) 的 SPP 耦合强度应该是不同的, 由  $\text{SiO}_{2.1}\text{N}_{0.3}$  组成的级联金属结构的耦合作用明显增强了光的透射效果。根据这一有趣新现象, 认为 SPP 耦合在金-电介质-金结构中起了关键作用。当金膜两侧的 SPP 能量相匹配时, EOT 特性就可以得到极大的提高。换句话说, 当  $n_d$  逐渐接近 1(空气)时, 金膜两侧的 SPP 能量相匹配较好。因此这是可以理解为什么低  $n_d$  ( $n_d = 1.6$ ) 比高

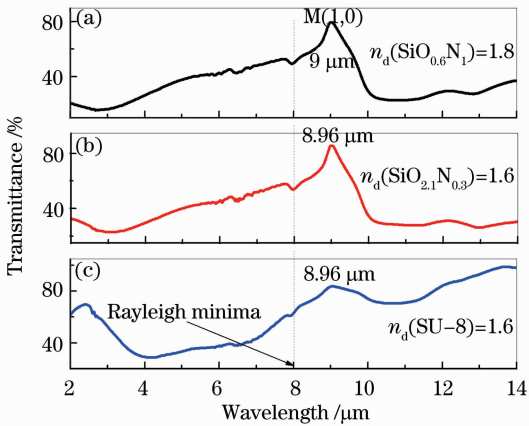


图 3 具有不同的  $n_d$  的 M-D-MPhC 实验测量的零阶透射谱

Fig. 3 Zero-order transmission spectra of experimental measurement of M-D-MPhC with different  $n_d$

$n_d$  ( $n_d = 1.8$ ) SPP 耦合强度更显著。

为了深入理论电介质  $n_d$  对 SPP 耦合作用影响, 引入一个由 Collin 等<sup>[14]</sup> 提出的级联金属结构有效折射率 ( $n_{\text{eff}}$ ) 概念,  $n_{\text{eff}}$  方程为

$$n_{\text{eff}} = \frac{k_x}{k_0} = \sqrt{\epsilon_d} \left[ 1 + \frac{\lambda}{\pi t_d \sqrt{-\epsilon_m}} \sqrt{1 + \frac{\epsilon_d}{-\epsilon_m}} \right]^{1/2}, \quad (3)$$

式中  $t_d$  为电介质厚度,  $\lambda$  为自由空间波长。把实验结果与 (3) 式进行比较, 发现  $n_{\text{eff}}$  作为  $\epsilon_d$  的函数, 且折射率  $n_d = \sqrt{\epsilon_d}$ , 随着  $n_d$  增加,  $n_{\text{eff}}$  变得更大。因此, 出现  $\lambda_{\text{SPP}}$  的红移, 如图 3(a), (b) 所示。根据 (3) 式, 若  $n_d$  不变,  $n_{\text{eff}}$  也是不变的。那么  $\lambda_{\text{SPP}}$  几乎不偏移, 如图 3(b), (c) 所示。

图 4 为中间电介质具有两个不同的  $n_d$  ( $1.6$  和  $1.8$ ) 的 M-D-MPhC 模拟计算的零阶透射谱。随着  $n_d$  增加 (由  $1.6$  到  $1.8$ ), 也出现  $\lambda_{\text{SPP}}$  的轻微红移现象, 模拟结果较好地符合实验发现。这种研究结果为设计离子体可调谐滤波器和高灵敏度生化传感器件提供理论参考。同时,  $n_d$  为  $1.6$  时也能够得到较大的透射强度和较窄的透射峰。插图为其对应的两个不同  $n_d$  的 SPP  $M(1,0)$  模式在  $x$ - $y$  平面电场强度密度分布。

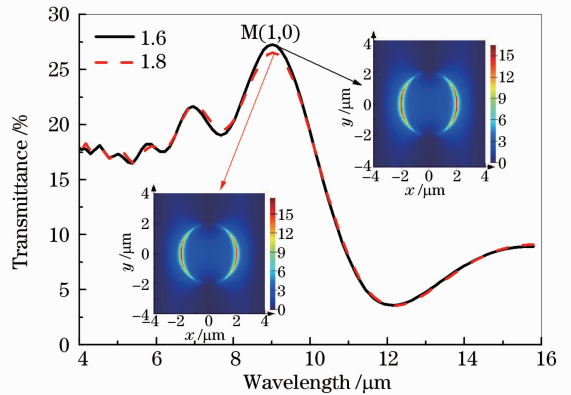


图 4 具有两个不同的  $n_d$  ( $1.6$  和  $1.8$ ) 的 M-D-MPhC 模拟计算的零阶透射谱, 插图为其对应的两个不同的  $n_d$  的 SPP  $M(1,0)$  模式在  $x$ - $y$  平面电场强度密度分布

Fig. 4 Simulated zero-order transmission spectra of M-D-MPhC with two different  $n_d$  ( $1.6$  and  $1.8$ ), illustrations for the electric-field intensity density distribution in the  $x$ - $y$  plane corresponding two different  $n_d$  SPP  $M(1,0)$  modes

## 4 结 论

从实验和理论两个方面探讨了  $n_d$  对 M-D-MPhC 强透射特性的影响。主要研究结果如下。1)

通过比较样品 A 和 B 的强透射特性发现 M-D-MPhC 透射峰变得更窄,这表明在 M-D-MPhC 之间确实存在 SPP 耦合作用;2)由  $n_d$  小的  $\text{SiO}_{2.1}\text{N}_{0.3}$  ( $n_d=1.6$ )比由  $n_d$  大的  $\text{SiO}_{0.6}\text{N}_1$  ( $n_d=1.8$ )组成的 M-D-MPhC 能够得到更窄的透射峰和更高的透射强度,这种现象可以验证 SPP 耦合作用机制的正确性;3)同时也观察到随着中间电介质  $n_d$  的变化, SPP  $M(1,0)$  模式  $\lambda_{\text{SPP}}$  有规律的偏移。这些发现有希望为在中红外频段等离子体可调谐滤波器和生化传感器设计方面提供潜在的应用。

### 参 考 文 献

- 1 T. W. Ebbesen, H. J. Lezec, H. F. Ghaemi *et al.*. Extraordinary optical transmission through sub-wavelength hole arrays [J]. *Nature*, 1998, **391**(6668): 667~669
- 2 Gongli Xiao, Xiang Yao, Xinming Ji *et al.*. Transmission enhancement properties of double-layered metallic hole arrays [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **6**(10): 791~793
- 3 Linhua Xu, Hua Shen, Xiangyin Li *et al.*. Enhanced ultraviolet emission from ZnO thin film covered by  $\text{TiO}_2$  nanoparticles [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2009, **7**(10): 953~955
- 4 L. Martín-Moreno, F. J. García-Vidal, J. B. Pendry *et al.*. Theory of extraordinary optical transmission through subwavelength hole arrays [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2001, **86**(6): 1114~1117
- 5 A. Krishnan, T. Thio, T. W. Ebbesen *et al.*. Evanescently coupled resonance in surface plasmon enhanced transmission [J]. *Opt. Commun.*, 2001, **200**(1-6): 1~7
- 6 Liu Lihui, Zhao Qida, Dong Xiaoyi *et al.*. Study on characteristics of two high-birefringence fiber loops mirror filter [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(9): 1185~1188  
刘丽辉, 赵启大, 董孝义等. 双折射光纤环形镜滤波器特性研究 [J]. *光学学报*, 2004, **24**(9): 1185~1188
- 7 E. Popov, M. Neviere, S. Enoch *et al.*. Theory of light transmission through subwavelength periodic hole arrays [J]. *Phys. Rev. B*, 2000, **62**(23): 16100~16108
- 8 T. J. Kim, T. W. Ebbesen, H. J. Lezec *et al.*. Control of optical transmission through metals perforated with subwavelength hole arrays [J]. *Opt. Lett.*, 1999, **24**(4): 256~258
- 9 Masaki Tanaka, Fumiaki Miyamaru, Eiichi Sano *et al.*. Effect of a thin dielectric layer on terahertz transmission characteristics for metal hole arrays [J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(10): 1210~1212
- 10 Yonghong Ye, Jiayu Zhang. Enhanced light transmission through cascaded metal films perforated with periodic hole arrays [J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(12): 1521~1523
- 11 Yonghong Ye, Desheng Yan, Jiayu Zhang *et al.*. Multiple transmission bands through metal films perforated with two periodic arrays of apertures [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, **89**(12): 121108
- 12 Z. H. Tang, R. W. Peng, W. H. Sun *et al.*. Coupling of surface plasmons in nanostructured metal/dielectric multilayers with subwavelength hole arrays [J]. *Phys. Rev. B.*, 2007, **76**(19): 195405
- 13 H. Rather. Surface Plasmons on Smooth and Rough Surfaces and on Gratings [M]. Berlin: Springer, 1988
- 14 S. Collin, F. Pardo, J. Pelouard. Waveguiding in nanoscale metallic apertures [J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(7): 4310~4320

栏目编辑: 韩 峰