

# 金孔阵列-电介质与金-电介质孔阵列的强透射特性

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** 采用时域有限差分(FDTD)法研究了金膜厚度、电介质折射率及其厚度对金孔阵列-电介质与金-电介质孔阵列两种结构强透射特性的影响。研究发现这两种结构都具有较好的强透射特性,这表明光与金膜表面自由电子的电荷密度波耦合形成表面等离子激元(SPP),对增强透射起到了关键作用。金膜厚度是影响强透射特性的主要因素,其衰减长度为 35 nm;而与金膜相邻的电介质膜厚度对强透射特性影响极小。电介质折射率大小对强透射特性影响明显,折射率为 1.8 时能够获得较好的强透射特性。

**关键词** 表面光学;金孔阵列-电介质;金-电介质孔阵列;强透射特性;时域有限差分法

**中图分类号** O734      **文献标识码** A      **doi:** 10.3788/AOS201232.1130002

## Extraordinary Transmission Properties of Gold Aperture Array-Dielectric and Gold-Dielectric Aperture Array

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 effects of gold film thickness, refractive index of dielectric and its thickness on extraordinary transmission properties of gold aperture array-dielectric and gold-dielectric aperture array are studied using the finite-difference time-domain (FDTD) method. The results show that both structures have a good extraordinary transmission property, which suggests that surface plasmon polariton (SPP), formed by coupling of light and free electron charge density wave of gold film surface, plays a key role in enhanced transmission. The gold film thickness is the major factor affecting the extraordinary transmission property, and its decay length is 35 nm; the thickness of dielectric film adjacent to the gold film has minimal impact on the extraordinary transmission property. The refractive index of dielectric has a distinct impact on the extraordinary transmission property, and the refractive index of 1.8 may lead to a good extraordinary transmission property.

**Key words** optics at surfaces; gold aperture array-dielectric; gold-dielectric aperture array; extraordinary transmission property; finite-difference time-domain method

**OCIS codes** 240.0240; 050.6624; 050.1220; 160.3900; 240.6680

## 1 引 言

自从 1998 年 Ebbesen 等<sup>[1]</sup>首次报道了一束平行光照射到二维金属周期性孔阵列时展现出的强透射(EOT)现象以来,其在可调谐光滤波器、生化传感器、等离子体热发射器等领域具有巨大的应用潜

力,引起了广大学者研究 EOT 特性的热潮<sup>[2~8]</sup>。其物理机理主要是光在金属-电介质界面中产生的表面等离子激元(SPP)共振耦合作用<sup>[3,5,9]</sup>,所以研究金属-电介质孔阵列结构的 EOT 现象备受关注,其中主要包括金属孔阵列-电介质和金属-电介质孔阵

**收稿日期:** 2012-05-02; **收到修改稿日期:** 2012-05-31

**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

列两种典型结构。EOT 是一种复杂的光透射增强现象,取决于材料与结构等参数,如金属材料属性<sup>[10]</sup>、金属膜厚度<sup>[11,12]</sup>、孔的形状和大小<sup>[13]</sup>及阵列类型<sup>[14]</sup>等。然而在以往的研究工作中,并没有很好地区分这些参数对以上两种不同结构 EOT 特性影响的异同,而且各参数在这两种不同结构中所起的作用也并不十分清楚。这些问题的解决对利用这两种典型结构的 EOT 特性设计高性能的等离子体功能器件具有重要的理论参考价值。

本文以金孔阵列-电介质与金-电介质孔阵列两种结构为研究对象,采用时域有限差分(FDTD)法系统探讨了金膜厚度、电介质折射率及其厚度等参数对 EOT 特性的影响。结果表明这两种结构具有较好的 EOT 特性,源于光与金膜表面自由电子的电荷密度波耦合 SPP 对增强透射所起的关键作用。金膜厚度  $t_{Au}$  是影响这两种结构 EOT 的主要因素,其衰减长度为 35 nm;而与金膜相邻的电介质膜厚度  $t_d$  对 EOT 影响极小。电介质折射率  $n_d$  大小对 EOT 影响明显,  $n_d=1.8$  时能够获得较好的 EOT 特性。

## 2 FDTD 数值模拟

图 1 为金孔阵列-电介质与金-电介质孔阵列两种结构的示意图。所设计的结构均采用正方形晶格

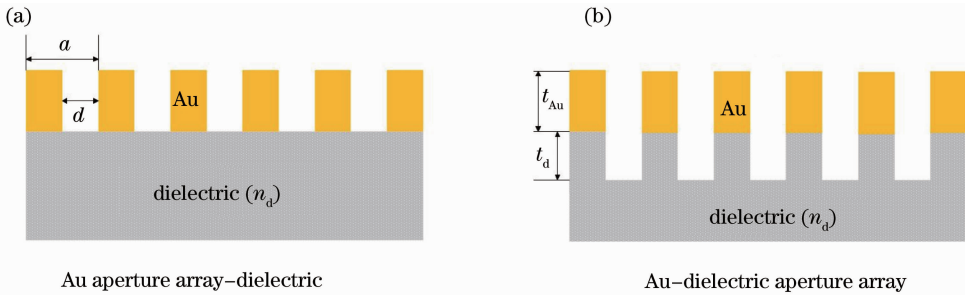


图 1 (a)金孔阵列-电介质与(b)金-电介质孔阵列结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of (a) Au aperture array-dielectric and (b) Au-dielectric aperture array structures

## 3 结果与讨论

图 2 分别为 Au(0.1  $\mu\text{m}$ )-SiO<sub>2</sub> 孔阵列与 Au(0.1  $\mu\text{m}$ )孔阵列-SiO<sub>2</sub> 两种结构模拟计算的零阶透射光谱。在这两种结构中都出现了窄带超强透射峰,其峰波长  $\lambda_{\text{SPP}}$  为 0.49  $\mu\text{m}$ 。  $\lambda_{\text{SPP}}$  可表示为<sup>[14]</sup>

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

式中  $\epsilon_m$  和  $\epsilon_d$  分别为金属、电介质的介电常数,  $i$  和  $j$  是 SPP 的模式指数。在模拟的波长范围内,金和空气的介电常数分别是  $\epsilon_{Au} = -1.86 + 2.61i$ ,  $\epsilon_{air} = 1$ 。

圆孔阵列,其中晶格间距  $a = 2 \mu\text{m}$ 、圆孔直径  $d = 0.2 \mu\text{m}$ 。采用 FDTD 法对所设计的两种结构进行数值模拟。FDTD 作为一种强有力的电磁计算方法已被广泛用于模拟电磁波的传播、散射、耦合和辐射等问题的数值求解,在这里可以探讨金属-电介质纳米结构中光、电子和 SPP 之间的相互作用,其突出优点是可以模拟具有色散特性的金属。这种金属材料模型会考虑到光波可以直接趋附到金属内部,在金属表面产生等离子体效应。本文中金的介电常数  $\epsilon_{Au}$  采用 Drude 模型来描述<sup>[15]</sup>:

$$\epsilon_{Au} = 1 - \omega_p^2 / \omega(\omega + i\gamma), \quad (1)$$

式中  $\omega$  是角频率,  $\omega_p = 1.2 \times 10^{16}$  Hz 和  $\gamma = 1.2 \times 10^{14}$  Hz 分别是体等离子体频率和阻尼频率。采用商业 FDTD Solution 软件包<sup>[16]</sup> 模拟计算了金孔阵列-电介质与金-电介质孔阵列两种结构的零阶透射光谱和 SPP A(1,0) (A 代表空气-金属界面)模式电场强度密度分布,如图 2~6 所示。模拟计算中采用了完全匹配层(PML)做边界条件,计算空间  $x, z$  方向分别被分割成 920 和 1000 网格,网格大小  $\Delta x = \Delta z = 5$  nm, 时间步长  $\Delta t = c / \sqrt{(\Delta x)^{-2} + (\Delta y)^{-2}}$  ( $c$  为真空中的光速),计算中垂直入射的平面光波长范围为 0.4~0.75  $\mu\text{m}$ 。

在考虑  $a = 2 \mu\text{m}$  与 SPP A(1,0)模式的情况下,模拟结果  $\lambda_{\text{SPP}} = 0.49 \mu\text{m}$  与由(2)式得到的计算值  $\lambda_{\text{SPP}} \approx 0.52$  相差不多。计算的位置与模拟结果存在细微的差别,这是由于计算中假设的金属膜结构是连续的<sup>[9]</sup>。通过比较 Au-SiO<sub>2</sub> 孔阵列与 Au 孔阵列-SiO<sub>2</sub> 两种结构的零阶透射光谱,发现这两种结构同样具有较好的 EOT 特性,这表明光与金膜表面自由电子的电荷密度波耦合 SPP 对增强透射起到了关键作用。另外,也发现 Au-SiO<sub>2</sub> 孔阵列与 Au 孔阵列-SiO<sub>2</sub> 两种结构的零阶透射光谱曲线存

在差别,这主要是由于存在于 Au 孔阵列-SiO<sub>2</sub> 结构中的 SiO<sub>2</sub> 平板层与存在于 Au-SiO<sub>2</sub> 孔阵列结构中的 SiO<sub>2</sub> 孔阵列层耦合 SPP 作用的效果不一样。SiO<sub>2</sub> 孔阵列层耦合 SPP 能够形成更窄带的零阶透射光谱。同时,也对 Au-SiO<sub>2</sub> 孔阵列与 Au 孔阵列-SiO<sub>2</sub> 两种结构的 SPP A(1,0) 模式在  $x-z$  截面的电场强度密度分布进行比较,发现这两种结构的场分布本质上没有太大的差别,如图 2 中插图所示。

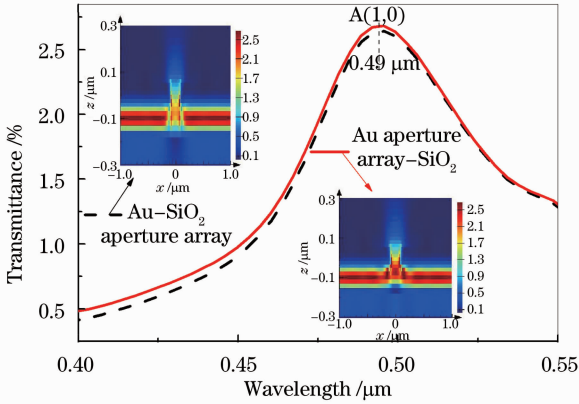


图 2 Au-SiO<sub>2</sub> 孔阵列与 Au 孔阵列-SiO<sub>2</sub> 两种结构模拟计算的零阶透射光谱。插图为 SPP A(1,0) 模式在  $x-z$  截面的电场强度密度分布

Fig. 2 Simulated zeroth order transmission spectra of Au-SiO<sub>2</sub> aperture array and Au aperture array-SiO<sub>2</sub> structures. Insets are the electric-field intensity density distribution in the  $x-z$  section of SPP A(1,0) mode

讨论  $t_{Au}$ ,  $t_d$  和  $n_d$  对金孔阵列-电介质结构 EOT 特性的影响。图 3 为 10~110 nm 每隔 20 nm 来改变  $t_{Au}$  的 Au 孔阵列-SiO<sub>2</sub> 结构模拟计算的零阶透射谱。随着  $t_{Au}$  的增加,其零阶透射谱曲线有规律地衰减,这是由于较厚的金膜上下表面激发的 SPP 通过孔阵列耦合作用其强度会相应地减少。另外,图 3 中的插图显示了峰透射率  $T_{peak}$ ,  $\lambda_{SPP}$  与  $t_{Au}$  的关系。结果发现  $\lambda_{SPP}$  有规律地蓝移,这个模拟结果与其他文献报道的实验现象是一致的<sup>[11,12]</sup>。 $T_{peak}$  呈指数式衰减,其与  $t_{Au}$  的指数关系显而易见。 $T_{peak}$  可采用指数函数曲线拟合来表征  $t_{Au}$  的衰减长度,拟合的方程为  $T_{peak} = 75\exp(-t_{Au}/35) - 1$ ,则  $t_{Au}$  的衰减长度为 35 nm,即随着  $t_{Au}$  的增加, $T_{peak}$  衰减至其初始值的  $1/e$  时  $t_{Au}$  的变化范围。这是一个十分重要的参数,设计不同的  $t_{Au}$  可有效加强 EOT 特性。若选择  $t_{Au}$  为其衰减长度的整数倍时,即  $t_{Au} = 35k$  nm,  $k$  为整数,金孔阵列-电介质结构能够获得较好的 EOT 特性。

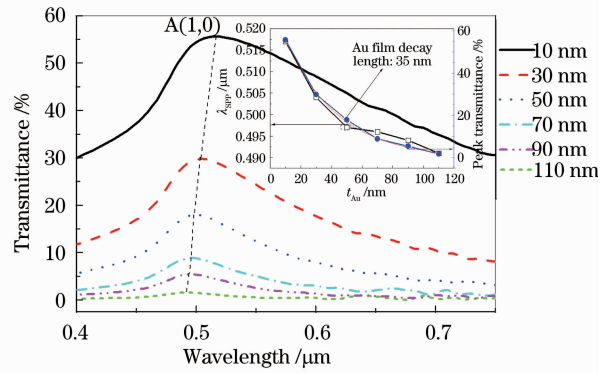


图 3 通过改变  $t_{Au}$  的 Au 孔阵列-SiO<sub>2</sub> 结构模拟计算的零阶透射谱。插图为其  $\lambda_{SPP}$ ,  $T_{peak}$  与  $t_{Au}$  的关系

Fig. 3 Simulated zeroth order transmission spectra of Au aperture array-SiO<sub>2</sub> structure for various  $t_{Au}$ .

Inset is the dependence of  $\lambda_{SPP}$ ,  $T_{peak}$  on  $t_{Au}$

图 4 为从 1~2 每隔 0.2 来改变  $n_d$  的 Au(20 nm) 孔阵列-电介质结构模拟计算的零阶透射谱。随着  $n_d$  的增加,其零阶透射谱曲线发生变化,这说明其 EOT 特性与  $n_d$  有关。 $\lambda_{SPP}$  在 0.51  $\mu$ m 位置几乎没有变化。插图显示其  $T_{peak}$  与  $n_d$  的关系,结果发现随着  $n_d$  的增加, $T_{peak}$  先增加然后减少, $n_d$  为 1.8 时能够获得较大的  $T_{peak}$ 。这是由于局域表面等离子体共振耦合作用的结果,其局域电磁场振荡对与金属相邻的电介质材料  $n_d$  大小十分敏感<sup>[17]</sup>。若优化  $n_d$  的大小,同样也可以提高 EOT 特性,这为设计 Au 孔阵列-电介质结构时考虑采用不同的电介质材料提供了理论参考。同时,也研究了  $t_d$  对其 EOT 特性的影响,结果发现较薄(1~10  $\mu$ m 范围内)条件下的  $t_d$  对 EOT 特性影响极小(图中没有显示),而在较厚(10~200  $\mu$ m

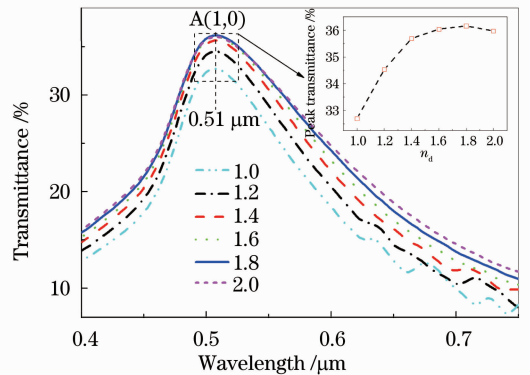


图 4 通过改变  $n_d$  的 Au 孔阵列-电介质结构模拟计算的零阶透射谱。插图为其  $T_{peak}$  与  $n_d$  的关系

Fig. 4 Simulated zeroth order transmission spectra of Au aperture array-dielectric structure for various  $n_d$ .

Inset is the dependence of  $T_{peak}$  on  $n_d$

范围内)条件下的  $t_d$  对太赫兹 (THz) 波段的 EOT 特性影响不可忽略<sup>[18]</sup>。

同样,也讨论了  $t_{Au}$ ,  $t_d$  和对金-电介质孔阵列结构 EOT 特性的影响。为了对比分析金与电介质两种不同材料膜厚度在金-电介质孔阵列结构中对 EOT 特性的影响,设计了总厚度 ( $t_{Au} + t_d$ ) 分别为 0.15, 0.2, 0.25  $\mu\text{m}$  的 Au-SiO<sub>2</sub> 孔阵列结构。图 5(a)为通过改变  $t_{Au}$  且  $t_{SiO_2} = 0.1 \mu\text{m}$  的 Au-SiO<sub>2</sub> 孔阵列结构模拟计算的零阶透射谱。随着  $t_{Au}$  从 0.05~0.15  $\mu\text{m}$  每隔 0.05  $\mu\text{m}$  增加,其零阶透射谱曲线显著地衰减,  $\lambda_{SPP}$  有规律地蓝移。这说明  $t_{Au}$  的变化对金-电介质孔阵列结构的 EOT 特性影响极大。图 5(b)为通过改变  $t_{SiO_2}$  且  $t_{Au} = 0.1 \mu\text{m}$  的 Au-SiO<sub>2</sub> 孔阵列结构模拟计算的零阶透射谱。随着  $t_{SiO_2}$  从 0.05~0.15  $\mu\text{m}$  每隔 0.05  $\mu\text{m}$  增加,其零阶透射谱曲线变化极小,  $t_{SiO_2}$  为 0.15  $\mu\text{m}$  的  $T_{\text{peak}}$  稍微要大一些。 $\lambda_{SPP}$  为 0.49  $\mu\text{m}$  时,其位置几乎没有变化。这说明  $t_{SiO_2}$  的变化对 Au-SiO<sub>2</sub> 孔阵列结构的 EOT 特性影响极小。

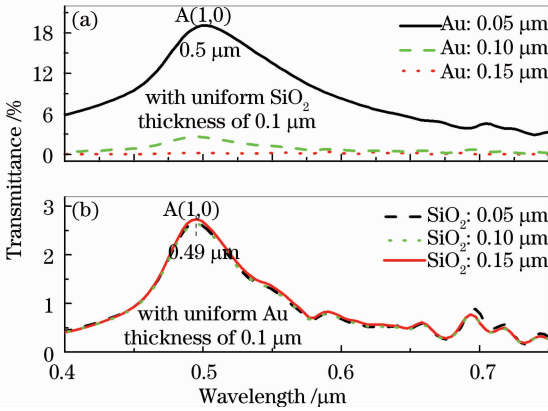


图 5 通过(a)改变  $t_{Au}$  且  $t_{SiO_2} = 0.1 \mu\text{m}$  和(b)改变  $t_{SiO_2}$  且  $t_{Au} = 0.1 \mu\text{m}$  的 Au-SiO<sub>2</sub> 孔阵列结构模拟计算的零阶透射谱

Fig. 5 Simulated zeroth order transmission spectra of Au-SiO<sub>2</sub> aperture array structures (a) for various  $t_{Au}$  with  $t_{SiO_2} = 0.1 \mu\text{m}$  and (b) for various  $t_{SiO_2}$  with  $t_{Au} = 0.1 \mu\text{m}$

图 6 为 1~2 每隔 0.2 来改变  $n_d$  的 Au(0.1  $\mu\text{m}$ )-电介质(0.1  $\mu\text{m}$ )孔阵列结构模拟计算的零阶透射谱。随着  $n_d$  的增加,其零阶透射谱曲线发生变化,这说明其 EOT 特性与  $n_d$  有关。 $\lambda_{SPP}$  为 0.49  $\mu\text{m}$ ,其位置几乎没有变化。插图显示  $T_{\text{peak}}$  与  $n_d$  的关系,结果发现随着  $n_d$  的增加,  $T_{\text{peak}}$  先增加然后减少,  $n_d = 1.8$  时能够获得较大的  $T_{\text{peak}}$ 。

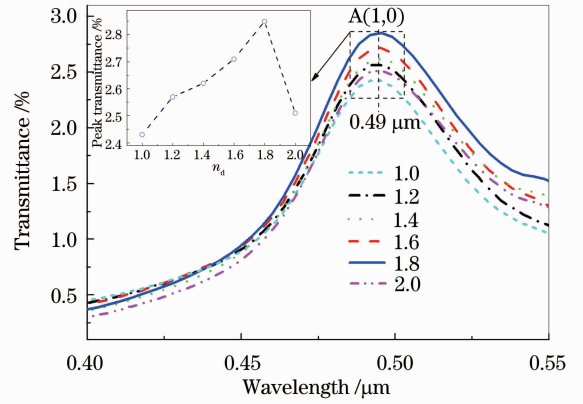


图 6 通过改变  $n_d$  的 Au-电介质孔阵列结构模拟计算的零阶透射谱。插图为其  $T_{\text{peak}}$  与  $n_d$  的关系

Fig. 6 Simulated zeroth order transmission spectra of Au-dielectric aperture array structure for various  $n_d$ .

Inset is the dependence of  $T_{\text{peak}}$  on  $n_d$

## 4 结 论

采用 FDTD 法从理论方面系统探讨了  $t_{Au}$ ,  $t_d$  和  $n_d$  等参数对 Au 孔阵列-电介质与 Au-电介质孔阵列两种结构 EOT 特性的影响。主要研究结果如下:1)这两种结构都具有较好的 EOT 特性,这表明光与 SPP 耦合作用增强透射起关键作用的是在金膜;2)  $t_{Au}$  是影响其 EOT 特性的主要因素,其衰减长度为 35 nm,这为设计金膜厚度提了供理论参考;而  $t_d$  的变化对其 EOT 特性影响极小;3)与金属相邻的电介质  $n_d$  的大小对 EOT 特性影响明显,  $n_d = 1.8$  时能够获得较好的 EOT 特性。这些发现可为利用 Au 孔阵列-电介质与 Au-电介质孔阵列两种结构的 EOT 特性设计等离子体滤波器和生化传感器件提供理论依据。

## 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, Yiping Huang *et al.*. Transmission enhancement properties of double-layered metallic hole arrays[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **6**(10): 791~793
- 3 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
- 4 W. L. Barnes, A. Dereux, T. W. Ebbesen. Surface plasmon subwavelength optics[J]. *Nature*, 2003, **424**(6950): 824~830
- 5 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
- 6 Chunying Guan, Libo Yuan, Jinhui Shi. Transmitted properties of terahertz wave through metallic hole arrays[J]. *Chin. Opt.*

- Lett., 2011, **9**(s1): s10204
- 7 Guan Chunying, Yuan Libo, Shi Jinhui. Microstructured-fiber surface plasmon resonance sensor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(2): 0206003  
关春颖, 苑立波, 史金辉. 微孔光纤表面等离子体共振传感特性分析[J]. *光学学报*, 2011, **31**(2): 0206003
- 8 Gan Fuxi, Wang Yang. Breaking through the optical diffraction limits, developing the nano-optics and photonics[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(9): 0900104  
干福熹, 王 阳. 突破光学衍射极限, 发展纳米光学和光子学[J]. *光学学报*, 2011, **31**(9): 0900104
- 9 H. Raether. Surface Plasmons on Smooth and Rough Surfaces and on Gratings[M]. Berlin: Springer-Verlag, 1988
- 10 A. K. Azad, Yuguang Zhao, Weili Zhang *et al.*. Effect of dielectric properties of metals on terahertz transmission in subwavelength hole arrays [J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(17): 2637~2639
- 11 Xiang Shou, A. Agrawal, A. Nahata. Role of metal film thickness on the enhanced transmission properties of a periodic array of subwavelength apertures [J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(24): 9834~9840
- 12 Je Hong Kim, P. J. Moyer. Thickness effects on the optical transmission characteristics of small hole arrays on thin gold films [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(15): 6595~6603
- 13 Yonghong Ye, Zhibing Wang, Desheng Yan *et al.*. Role of shape in middle-infrared transmission enhancement through periodically perforated metal films [J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(21): 3140~3142
- 14 T. Thio, H. F. Ghaemi, H. J. Lezec *et al.*. Surface-plasmon-enhanced transmission through hole arrays in Cr films [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1999, **16**(10): 1743~1748
- 15 P. B. Johnson, R. W. Christy. Optical constants of the noble metals [J]. *Phys. Rev. B*, 1972, **6**(12): 4370~4379
- 16 Lumerical Solutions Inc.. FDTD Solutions Software [Z]. Vancouver: Lumerical Solutions Ltd., 2003
- 17 Jiajie Xu, Pavel Kvasnička, Qiuming Yu *et al.*. Understanding the effects of dielectric medium, substrate, and depth on electric fields and SERS of quasi-3D plasmonic nanostructures [J]. *Opt. Express*, 2011, **19**(21): 20493~20505
- 18 M. Tanaka, F. Miyamaru, E. 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

栏目编辑: 韩 峰