

文章编号: 1001-3806(2017)02-0196-04

## 亚波长金属柱阵列光透射增强的带通特性研究

陈影, 姜雨虹, 孔小双, 闫珂柱\*

(曲阜师范大学 物理工程学院, 曲阜 273165)

**摘要:** 为了研究玻璃衬底上的亚波长紧凑金属柱阵列薄膜的光透射增强特性, 采用3维时域有限差分法进行了模拟, 得知该膜的增强光透射谱呈现单主峰带结构, 透射谱的峰值位置和带宽也因金属柱阵列周期和金属柱高度的不同而不同, 并对金和银两种金属的模型进行了优化计算和分析。结果表明, 银柱阵列的峰值归一化透过率最大可达到4.55, 通过改变阵列周期可使峰值波长在800nm~1600nm之间变化, 其透射带的半峰全宽也由220nm增加到380nm。此研究结果为光带通滤波器件的设计提供了一种新的方案。

**关键词:** 光学器件; 透射增强; 时域有限差分法; 亚波长; 表面等离子体

**中图分类号:** O436.2 **文献标志码:** A **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2017.02.010

### Study on band-pass characteristics of the enhanced optical transmission of subwavelength metal column array

CHEN Ying, JIANG Yuhong, KONG Xiaoshuang, YAN Kezhu

(Physical Engineering College, Qufu Normal University, Qufu 273165, China)

**Abstract:** In order to study the enhanced optical transmission characteristics of subwavelength compact metal column arrays film on the glass substrates, 3-D finite difference time domain method was adopted to simulate. The enhanced optical transmission spectrum of the film presented a single main peak structure. The peak position and bandwidth of transmission spectrum were different due to the difference of the metal column array period and metal column height. Au and Ag metal model were calculated and analyzed for optimization. The results show that the peak value of the normalized transmittance of Ag column arrays can reach 4.55. By altering array period, the peak wavelength changes between 800nm to 1600nm. The full width at half maximum of transmission band will increase from 220nm to 380nm. The study provides a new solution for the design of micro device about optical band-pass filter.

**Key words:** optical devices; transmission enhancement; finite difference time domain; subwavelength; surface plasma

## 引言

1998年, EBBESEN等人<sup>[1]</sup>通过实验发现, 当一束平行光照射具有亚波长小孔阵列结构的金属薄膜时, 透射光能量与入射光能量的比值比传统衍射理论的估计值提高了4个数量级, 归一化透过率的值超过2。由于这种增强效应突破了经典理论的限制, 在平板显示器、微腔量子电动力学、滤波器等无源纳米器件设计及近场光学等领域具有巨大的应用潜力<sup>[2-9]</sup>。众多研究者<sup>[10-12]</sup>对其物理机理进行了研究, 发现表面等离子

体激元在其中起到了重要作用, 它是入射光与金属表面自由电子的电荷密度波发生共振耦合作用而形成的局域近场增强, 能极大地提高光的透射效率。

本文中以玻璃衬底上亚波长的金属纳米柱阵列结构为研究对象, 采用时域有限差分法<sup>[13-15]</sup>求解特定边界条件下的麦克斯韦方程组来模拟研究光通过亚波长金属柱阵列膜的透射增强特性。研究发现, 金属纳米柱阵列也具有很好的超强透射特性。研究了不同的阵列周期、不同的金属柱高度及不同金属材料的增强光透射谱的带通特性, 提出了该柱阵列金属膜结构在光带通滤波器件设计中的应用。

## 1 模型与计算设置

图1是玻璃衬底上的金属柱阵列的结构模型, 玻璃衬底上方除金属柱外均为空气介质(介质常数 $\epsilon = 1$ ), 金属柱采用紧凑对称排列, 如图2所示。光源沿 $z$ 轴方向由玻璃衬底中竖直向上入射, 偏振方向沿 $x$ 轴

基金项目: 国家级大学生创新创业训练资助项目(20140446013)

作者简介: 陈影(1992-), 女, 大学本科生, 国家级大学生创新创业训练计划项目负责人, 主要进行光通过亚波长结构材料的传播特性的研究。

\* 通讯联系人。E-mail: yankezu@126.com

收稿日期: 2016-03-28; 收到修改稿日期: 2016-04-20

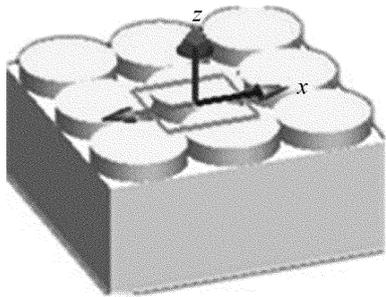


Fig. 1 Schematic diagram of metal column arrays on glass substrate

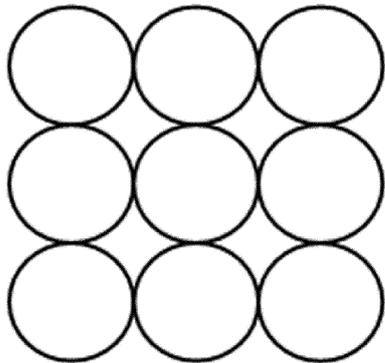


Fig. 2 Top view of compact metal column array

方向,入射光源为平面波,波长为 800nm ~ 2400nm。考虑所研究光频段金属的色散特性,采用 Drude 模型<sup>[16]</sup>来表述金属材料的介电常数与光频率  $\omega$  的关系:

$$\varepsilon(\omega) = \frac{\varepsilon_{\infty} - \omega_p^2}{\omega^2 + i\gamma\omega} \quad (1)$$

式中,  $\omega_p$  为等离子体频率;  $\gamma$  为电子的碰撞频率;  $\varepsilon_{\infty}$  为频率很大时金属的介电常数。

该模型在 600nm ~ 2400nm 可以描述金属介电特性,其色散模型拟合参量如下所示<sup>[17]</sup>。Ag:  $\varepsilon_{\infty} = 3.5790$ ,  $\omega_p = 1.3873 \times 10^{16}$  rad/s,  $\gamma = 3.2044 \times 10^{13}$  rad/s; Au:  $\varepsilon_{\infty} = 4.8952$ ,  $\omega_p = 1.3361 \times 10^{16}$  rad/s,  $\gamma = 1.2315 \times 10^{14}$  rad/s。本模型选取的边界条件为:  $x$  方向是反对称边界条件,  $y$  方向是对称边界条件,  $z$  方向设为完全匹配层边界条件。作者采用 3 维时域有限差分方法计算光束透射过金属膜的电场、磁场分布,由时域场量的傅里叶变换而得到透射光谱。归一化透过率<sup>[18]</sup>定义为:

$$T_{\text{norm}} = \frac{T}{\frac{S_{\text{gap}}}{S_{\text{cell}}}} \quad (2)$$

式中,  $T$  为透过率;  $S_{\text{gap}}$  为单元面积上空隙的面积;  $S_{\text{cell}}$  是单元面积;  $S_{\text{gap}}/S_{\text{cell}}$  为占空比。

## 2 结果及分析

本文中就上上述紧凑型金属柱阵列结构模型和条件进行了计算,得到了不同金属材料、不同金属柱半径和

高度情况下的光透射增强谱,并对光谱的特性随计算参量的变化情况进行了分析。

### 2.1 银柱底面半径对透射谱的影响

设定银柱的高度 80nm 不变,选取平面波光源的波长范围为 800nm ~ 2400nm。计算不同银柱半径(相应于不同银柱阵列周期)情况下的透射光谱,银柱半径  $r$  为 200nm ~ 380nm,选取 8 个点进行计算,得到的透射率如图 3 所示。在很宽的光谱范围内透射谱呈主带结构。透射谱峰值波长在 800nm ~ 1600nm 之间变化,其透射带的半峰全宽(full width at half maximum, FWHM)由 220nm 增加到 380nm。在较宽的金属柱半径变化范围内,峰值透过率超过 0.9,可求得相应的归一化透过率为 4.19,此时的归一化透过率远超过 1。光超强透射现象与表面等离子体激元有紧密联系,由于表面等离子体激元的激发,导致增强的电磁场,在金属表面区域产生局部电磁场比入射光场有一定程度的增强。

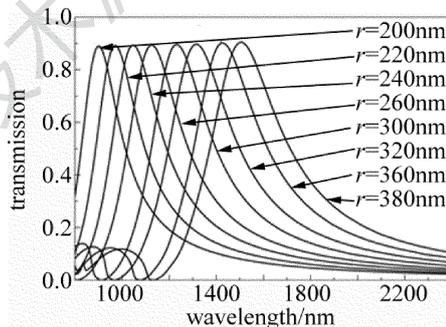


Fig. 3 Transmission spectrum of silver cylinder with different radius

### 2.2 银柱高度对透射谱的影响

为分析银柱高度对透射增强效应的影响,固定银柱阵列周期不变,即半径不变。使用的平面波光源的波长范围为 1000nm ~ 2200nm。计算不同银柱高度情况下的透射谱,在银柱高度  $h$  为 30nm ~ 130nm 的变化范围内选取 8 个点进行计算,得到的透射谱结果如图 4 所示。可以看出,在银柱高度  $h$  为 30nm ~ 60nm 时,随着  $h$  增加,透射率增加,约在  $h = 60$ nm 时,峰值透射率达到最大。之后随着高度  $h$  增加,峰值透射率逐渐下降,其变化关系如图 5 所示。这是因为在金属的上

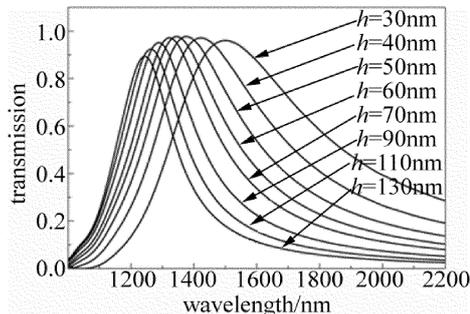


Fig. 4 Transmission spectrum of Ag column with different heights

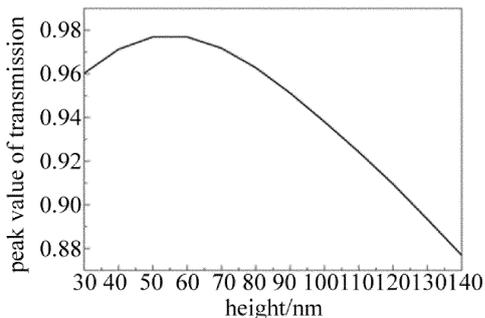


Fig. 5 Relationship of height and peak value of transmission

下界面上传播的波通过小孔相互耦合的效率和金属薄膜的厚度息息相关的,金属薄膜越薄,这种耦合作用越强<sup>[12]</sup>。随着银柱高度的减小,倏逝波能够将更多的能量转移到薄膜的上表面。在  $h = 60\text{nm}$  时,峰值透过率超过 0.977,可求得相应的归一化透过率为 4.55,这是由于表面等离子体效应而产生超强透射现象。

结果还表明,当膜厚为 30nm 时,其透射带的峰值波长为 1500nm,FWHM 约为 575nm,随膜厚度的增加,峰值位置不断减小到 1250nm,FWHM 也单调减小 210nm,如图 6、图 7 所示。

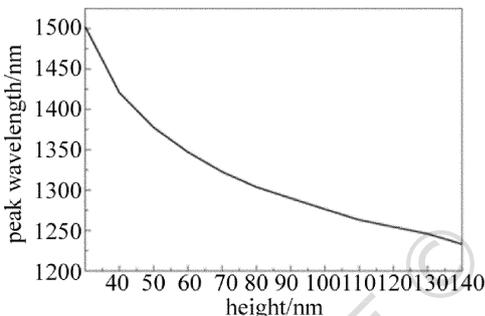


Fig. 6 Relationship of height of silver column and transmission peak wavelength

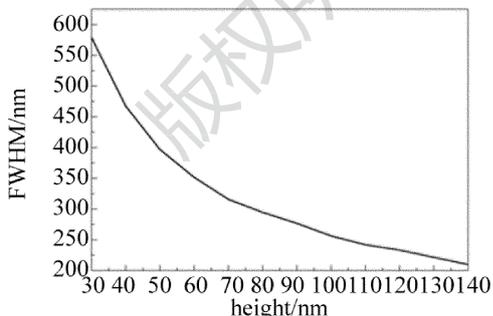


Fig. 7 Relationship of height and FWHM of transmission band

### 2.3 金柱阵列对透射谱的影响

上面已经主要分析了银柱阵列参量的改变对透射谱的影响,下面将银柱的材料换为金,在相同模型下进行透射谱的计算并与前面银材料进行对比。

固定金柱阵列周期不变,即半径不变。金属柱高度的变化范围  $h$  为 30nm ~ 130nm,选取 8 个点进行计算,平面波光源的波长范围为 800nm ~ 2000nm。计算

得到的透射谱结果如图 8 所示。可以看出,随着金柱高度增加,透射带的峰值波长从 1300nm 减小到 1000nm,透射带的半峰全宽也单调减小,而透射带的峰值透过率由 0.76 单调减小为 0.63,如图 9 所示。这与银材料的透射率的大小与变化情况不同。而固定金柱高度不变,对透射谱随金柱半径变化的情况也进行了计算,结果显示,随着金柱半径的增加,透射谱峰值先增加后趋于平稳,透射带的半峰全宽逐渐减小,透射率峰的波长位置不断增大,这些除透过率较小外与银材料的相似。

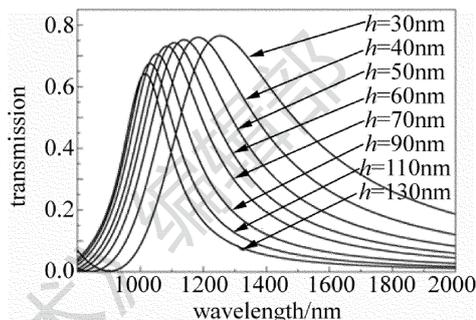


Fig. 8 Transmittance spectrum of Au column with different heights

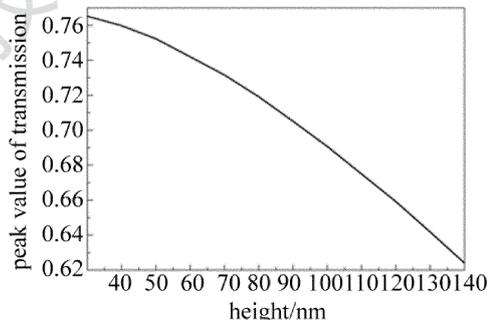


Fig. 9 Relationship of height of Au column and transmission peak

### 3 结论

采用时域有限差分法研究了光通过玻璃衬底上的亚波长金属柱阵列的传输特性。结果表明,不同的亚波长金属柱阵列周期和金属柱高度均具有带通透射特性,且在特定的波长范围内会出现超强透射增强现象,归一化的透射率可达到 4.5 以上。对金和银两种金属的模型进行了优化计算和分析,结果表明,银膜的峰值透过率超过 0.9,通过改变阵列周期可使峰值波长在 800nm ~ 1600nm 之间变化,其透射带的半峰全宽也由 220nm 增加到 380nm。研究结果为光带通滤波器件的设计提供了一种新的方案,且滤波通带中心波长和通带带宽可通过调节金属柱阵列周期和金属膜厚度在很宽的范围内进行选择。

#### 参考文献

[1] EBBESEN T W, IEZEC H J, GHAEMI H F, et al. Extraordinary optical transmission through sub-wavelength hole arrays[J]. Nature,

- 1998, 391(6668): 667-669.
- [2] XIAO G L, YAO X, HUANG Y P, *et al.* Transmission enhancement properties of double-layered metallic hole arrays [J]. Chinese Optics Letters, 2008, 6(10): 791-793.
- [3] BARNES W L, DEREUX A, EBBESEN T W. Surface plasmon sub-wavelength optics [J]. Nature, 2003, 424(6950): 824-830.
- [4] RUAN Zh Ch, QIU M. Enhanced transmission through periodic arrays of subwavelength holes: the role of localized waveguide resonances [J]. Physical Review Letters, 2006, 96(23): 233901.
- [5] XIN Q Q, JU L, RONG R F, *et al.* Simulation model of optical transmission of sub-wavelength holes on metal films [J]. Journal of Fudan University (Natural Science Edition), 2010, 49(6): 757-763 (in Chinese).
- [6] WAN L Y, BAN W H, LU Zh Y. Design of optical hybrids based on a subwavelength polarization grating [J]. Laser Technology, 2011, 35(3): 356-359 (in Chinese).
- [7] XIA Y, XIE H, SUN L P, *et al.* Research of tunable optical filters with ultra-narrow bandwidth [J]. Laser Technology, 2013, 37(4): 493-497 (in Chinese).
- [8] ZHEN H L. Polarization filters based on high birefringence photonic crystal fiber filled with Au [J]. Laser Technology, 2016, 40(1): 1-4 (in Chinese).
- [9] LIU Y F, LIU B, CHEN J, *et al.* Study on filtering characteristics based on tooth-shaped photonic crystal waveguide [J]. Laser Technology, 2016, 40(2): 237-240 (in Chinese).
- [10] MARTIN-MORENO L, GARCIA-VIDAL F J, PENDRY J B, *et al.* Theory of extraordinary optical transmission through subwavelength hole arrays [J]. Physical Review Letters, 2001, 86(6): 1114-1117.
- [11] YE Y H, WANG Z B, YAN D, *et al.* Role of shape in middle-infrared transmission enhancement through periodically perforated metal films [J]. Optics Letters, 2007, 32(21): 3140-3142.
- [12] CHEN Y G, WANG Y H, ZHANG Y, *et al.* Numerical investigation of the transmission enhancement through sub-wavelength hole array [J]. Optics Communications, 2007, 274(1): 236-240.
- [13] TAFLOVE A. Coferemutational electrodynamics; the finite-difference time-domain method [M]. Boston, USA: Artech House, 1995: 82-83.
- [14] GRAY S K, KUPKA T. Propagation of light in metallic nanowire arrays; finite-difference time-domain studies of silver cylinders [J]. Physical Review, 2003, B68(4): 454-456.
- [15] ZHANG J L, HUANG M, HU B J, *et al.* Simulation on light extraction efficiency of subwavelength hole array with FDTD method [J]. Journal of Yunnan University (Natural Science Edition), 2008, 30(5): 472-476 (in Chinese).
- [16] RASHIDI A. Scattering performance of plasmonic nanorodantennas in randomly tilted disordered and Fibonacci configuration [J]. Applied Physics Letters, 2012, 101(6): 062401.
- [17] SU J, SUN Ch, WANG X Q. A metallic dispersion model for numerical dispersion simulation [J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2013, 24(2): 408-414 (in Chinese).
- [18] FAN T, ZHANG J, CHEN Y L. Simulation study on the filter of sub-wavelength metal holes arrays based on FDTD [J]. Piezoelectrics and Acousto-optics, 2013, 35(5): 702-710 (in Chinese).