

# 金属异质波导阵列中的表面等离子激元传播特性

周 林<sup>1</sup> 朱永元<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 南京晓庄学院物理系, 江苏 南京 210017; <sup>2</sup> 南京大学固体微结构物理国家重点实验室, 江苏 南京 210093)

**摘要** 提出了一种新的一维金属异质波导阵列的设计方案, 即波导芯区周期调制的金属波导阵列。数值模拟的结果表明, 金属波导芯区的周期调制引起波导中传播的表面等离子激元有效折射率的周期调制, 从而可在特定的波段打开一个表面等离子激元带隙(如 1550 nm 附近)。通过引入合适的缺陷波导单元, 可获得特定波长的高品质因子( $Q=556$ )的表面电磁模共振。这一结果可用于设计亚波长的布拉格反射器、光发射器、滤波器等, 有可能被用于未来的集成光路。

**关键词** 金属波导; 表面等离子激元; 有效折射率; 时域有限差分方法

**中图分类号** TN242 **文献标识码** A

## Propagation Characteristics of Surface Plasmon Polaritons in a Metal Heterowaveguide Array

Zhou Lin<sup>1</sup> Zhu Yongyuan<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Department of Physics, Nanjing Xiaozhuang College, Nanjing, Jiangsu 210017, China

<sup>2</sup> National Laboratory of Solid State Microstructures, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210093, China

**Abstract** A new scheme of one-dimensional metal heterowaveguide array is proposed that the core layer of the metal waveguide is periodically modulated. Numerical results reveal that, periodic modulation of the core layer of metal waveguide induces the periodic modulation of the effective refraction index of the surface plasmon polaritons (SPP) in the waveguide, which opens up an SPP band gap around a certain waveband, such as waveband around 1550 nm. Further numerical results reveal that, the SPP mode resonance with high quality for example  $Q=556$  can be obtained at some wavelength by introducing a proper defect waveguide layer. The results can be applied to the subwavelength Bragg reflectors, light emitters and filters, and could be also available for the future integrated optics.

**Key words** metal waveguide; surface plasmon polaritons; effective refraction index; finite-difference time-domain method

## 1 引 言

1998 年 Ebbesen 等人发现亚波长金属孔阵的增强透射性质<sup>[1]</sup>以来, 表面等离子激元重新成为研究热点<sup>[2~5]</sup>。表面等离子激元是一种局域于金属表面的电磁激发, 这种准二维性质使得实现突破衍射极限的光传输在亚波长金属微结构材料中成为可能<sup>[6]</sup>, 基于表面等离子激元的纳米光子学元件得到广泛研究<sup>[7~10]</sup>。到目前为止, 亚波长结构的光传输控制大多采用金属表面的几何涨落来调制表面等离子激元的传播特性, 由于强散射对这种结构的影响而难以获得高的效率。虽然金属平板波导阵列的设计方案

为克服散射损耗提供了新思路<sup>[11,12]</sup>, 但实验加工的难度较大。

本文基于金属异质波导阵列的设计思想, 通过调制金属波导芯区介质层来调制波导的有效折射率, 给出了一种新的金属异质波导阵列设计方案。计算结果表明, 通过选择合适的结构参量, 介质层周期调制的波导阵列同样可以实现文献<sup>[11]</sup>覆盖层金属周期调制情形下的亚波长布拉格反射器和光发射器。相比调制金属覆盖层, 调制芯区介质层更容易微加工, 而且由于介质折射率可调范围更大, 本文的方案可更大范围调控表面等离子激元的带结构。

收稿日期: 2007-10-29; 收到修改稿日期: 2007-12-18

基金项目: 江苏省教育厅高校自然科学研究指导性计划项目(06KJD140111)资助课题。

作者简介: 周 林(1981-), 女, 助教, 主要从事光学微结构材料及相关物理效应等方面的研究。E-mail: zhling11@163.com

## 2 基于表面等离子激元的布拉格反射器的设计

金属异质波导阵列的基本单元,对称金属包覆介质波导如图 1(a)所示。由于无限大金属介质界面只支持 TM 偏振的电磁表面模,而借助表面等离子激元可以使尺寸小于衍射极限的微结构中的光束控制成为可能,所以考虑芯区介质层的厚度为亚波长, TM 偏振的电磁波沿波导轴向入射的情形(磁场沿  $y$  方向偏振,电磁波平行于  $z$  轴入射)。当电磁波沿  $z$  方向入射,电场分量引起两个金属-介质界面的电子振荡,入射电磁波与上下金属表面的自由电子振荡发生耦合产生表面等离子激元,而上下金属表面的表面等离子激元间的耦合则形成一种新的电磁表面模并沿波导轴向向前传播<sup>[13]</sup>。波导中传播的表面等离子激元的有效折射率  $n_{\text{eff}}$  是一种模折射率,  $n_{\text{eff}}$  不仅与金属的介电常量  $\epsilon_m$  有关,还与介质层的介电常量  $\epsilon_d$ 、介质层的厚度  $w$  和入射电磁波波长  $\lambda$  有关。因此,当波长  $\lambda$  和介质层厚度  $w$  选定后,除了调制  $\epsilon_m$ <sup>[11]</sup>,调制芯区介质层同样可以调控  $n_{\text{eff}}$ ,从而达到调控亚波长金属平板波导结构中表面等离子激元传播特性的目的。

图 1(b)为据此设计的基于芯区介质层周期调制的表面等离子激元布拉格反射器,即由两种基本的对称金属包覆介质波导单元(记为波导 A, B)交替排列而成的金属异质波导阵列 ABABAB…。其中,波导单元 A 和 B 有相同的覆盖层金属(如金属银),相同的芯区介质层厚度  $w$ ,而介质层的相对介电常量分别为  $\epsilon_1$  和  $\epsilon_2$ , A 和 B 沿  $z$  方向的长度分别为  $d_1$  和  $d_2$ 。类比介电材料布拉格反射器的原理不难推

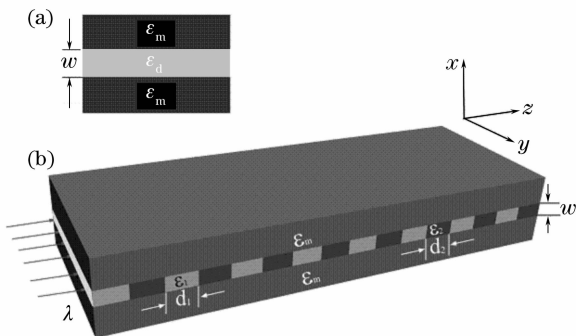


图 1 (a) 对称金属包覆介质波导, (b) 由两种金属波导交替排列的周期异质波导阵列

Fig. 1 (a) Scheme of symmetric metal gap waveguide, (b) Scheme of the periodic metal heterowaveguide array with two metal waveguides alternately stacked

知,当两种波导单元中表面等离子激元的有效折射率  $n_{\text{eff1}}$  和  $n_{\text{eff2}}$  满足布拉格条件  $2(n_{\text{eff1}} \cdot d_1 + n_{\text{eff2}} \cdot d_2) = m\lambda$  ( $m$  为整数)时,相邻一个周期的表面电磁反射波(表面等离子激元)的光程差相差波长的整数倍,即发生共振,表面等离子激元波被全部反射回来,这就是设计表面等离子激元布拉格反射器的基本思想。

考虑 TM 偏振的电磁波入射对称金属包覆介质波导[图 1(a)],波导中表面等离子激元的色散关系(由于主要关注通讯波段,这里色散关系仅取对称模解)<sup>[14]</sup>为

$$\frac{\epsilon_d p}{\epsilon_m k} = \frac{1 - \exp(kw)}{1 + \exp(kw)}, \quad (1)$$

式中

$$k = k_0 \sqrt{(\beta_{\text{spp}}/k_0)^2 - \epsilon_d}, \quad (2)$$

$$p = k_0 \sqrt{(\beta_{\text{spp}}/k_0)^2 - \epsilon_m},$$

$$\beta_{\text{spp}} = n_{\text{eff}} k_0 = n_{\text{eff}} \cdot (2\pi/\lambda), \quad (3)$$

式中  $k_0$  为入射电磁波在自由空间的传播常量,  $\beta_{\text{spp}}$  为波导中表面等离子激元的传播常量。考虑到通讯波段金属介电常量随波长的色散以及金属内在的欧姆损耗,金属的介电常量采用 Drude 模型描述<sup>[11]</sup>:

$$\epsilon_m = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega + i\gamma)}, \quad (4)$$

式中  $\omega_p$  为电子的等离子体共振频率,  $\gamma$  为描述金属损耗的参量,  $\omega$  为入射电磁波的圆频率。计算中采用文献[11]的数据  $\omega_p = 9 \text{ eV}$ ,  $\gamma = 0.001 \text{ eV}$ 。

当  $\lambda$ 、 $w$ 、金属和介质的材料参量给定后,表面等离子激元的有效折射率  $n_{\text{eff}}$  即可通过求解(1)式获得,且对应于不同的  $\epsilon_d$ (对应于不同的波导单元),  $n_{\text{eff}}$  值也不同。计算中选择  $w = 25 \text{ nm}$ ,  $\epsilon_1 = 1$ ,  $\epsilon_2 = 2$ , 由(1)式可求得波导单元 A 和 B 中表面等离子激元的等效折射率(实部)为  $n_{\text{eff1}} = 1.668$ ,  $n_{\text{eff2}} = 2.369$  ( $n_{\text{eff}}$  随波长的色散很小,一般可不考虑<sup>[12]</sup>)。

分别采用转移矩阵方法和时域有限差分方法对上述设计方案予以验证。考虑由长度为  $d_1 = 280 \text{ nm}$  和  $d_2 = 130 \text{ nm}$  的波导单元 A 和 B 沿  $z$  轴交替排列的周期异质波导阵列,如图 1(b)所示,波长为  $\lambda$  的 TM 偏振的电磁波沿  $z$  轴入射该结构的电磁波传播。由布拉格条件可推知表面等离子激元的带结构会在  $\lambda = 1550 \text{ nm}$  附近有一个带隙。图 2 是用转移矩阵方法计算的电磁波经金属异质波导阵列(周期数  $N = 16$ )的透射谱。结果表明,透射谱上  $1550 \text{ nm}$  附近确实打开一个很宽的带隙,即波长在  $1415 \sim 1715 \text{ nm}$  范围的 TM 偏振的电磁波入射图 1(b)所示的金属异质波导阵列将被完全反射不能传播。

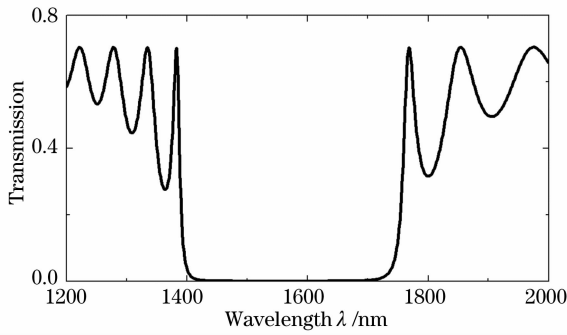


图2 转移矩阵方法计算的光通过金属异质波导阵列的透射谱

Fig. 2 Transmission spectra through the metal heterostructure calculated by the transfer matrix method

任意选取图2中表面等离子激元带隙内波长的电磁波入射图1(b)所示的金属异质波导阵列结构,如取 $\lambda=1550\text{ nm}$ ,计算结果如图3所示(其它结构参数与图2相同)。图3(a)和图3(b)分别为时域有限差分方法和转移矩阵方法的计算结果,不难发现,当入射电磁波波长处于表面等离子激元带隙中时,电磁波将无法穿过该结构,而当波长在带隙之外(如 $\lambda=1250\text{ nm}$ )时,同理计算可发现电磁波可以顺利地穿过该结构。这也进一步证实了芯区周期调制的亚波长布拉格反射器的设计思想。

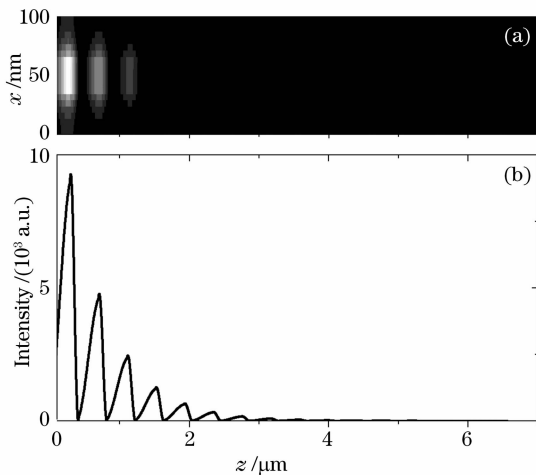


图3 波长为1550 nm的电磁波入射金属异质波导阵列的表面等离子激元的场分布。(a)时域有限差分方法计算,(b)转移矩阵方法计算

Fig. 3 Field distribution of the surface plasmon polaritons calculated by (a) the finite-difference time-domain method, (b) the transfer matrix method, with incident light wavelength  $\lambda=1550\text{ nm}$

### 3 基于表面等离子激元的纳米微腔

以图1(b)所示的布拉格反射器为基础,通过引

入合适的缺陷波导层,可实现高 $Q$ 值<sup>[15]</sup>的基于表面等离子激元的纳米微腔,如图4。仍采用图1中的两种金属波导单元A和B,缺陷波导单元(记为C)两边为对称排列的异质波导阵列,缺陷波导C沿 $z$ 方向长度为 $d$ ,C芯区介质层介电常量 $\epsilon=1$ ,和波导单元A相同。纳米微腔的结构序列可写为ABABAB...C...BABABA。

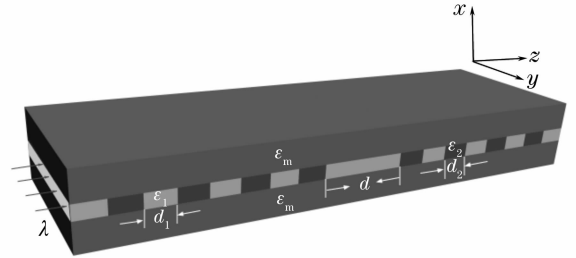


图4 共振模在1550 nm附近的带微腔的金属异质波导阵列结构示意图

Fig. 4 Diagram for metal heterowaveguide array with a microcavity for the resonant mode around 1550 nm

取 $d=505\text{ nm}$ ,缺陷波导单元两边各8个周期,计算TM偏振的电磁波沿 $z$ 轴入射该结构的情形。图5为转移矩阵方法计算得到的电磁波经纳米微腔的透射谱。结果表明,由于缺陷波导单元的引入,在原来的表面等离子激元的带隙中出现了共振模,波长在1550 nm附近。且该缺陷模有较高的 $Q$ 值( $Q=556$ )。以 $\lambda=1550\text{ nm}$ 的TM偏振的电磁波入射表面等离子激元微腔,场分布计算结果如图6,其中图6(a)为时域有限差分方法计算结果,图6(b)为转移矩阵方法计算结果。数值模拟的结果表明,当电磁波以缺陷模的波长入射时,波导中的表面等离子激元发生共振,形成强的驻波场,即表面等离子激元强局域化。由于芯区介质层的调制比覆盖层金属的自由度要大得多,因此相比文献[11],芯区调制的金属异质波导阵列更容易实现表面等离子激元的高局域,而

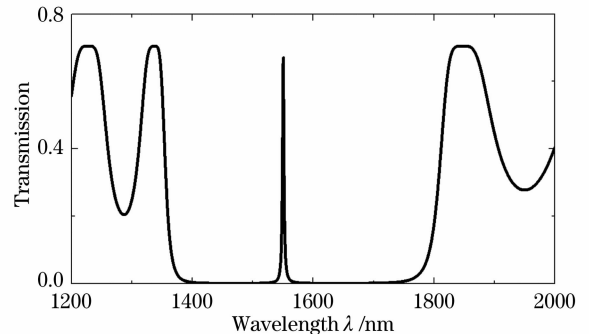


图5 表面等离子激元微腔长度 $d=505\text{ nm}$ 时的透射谱

Fig. 5 Transmission spectra of the microcavity of surface plasmon polaritons with  $d=505\text{ nm}$

缺陷模的强度也不比金属调制的低。

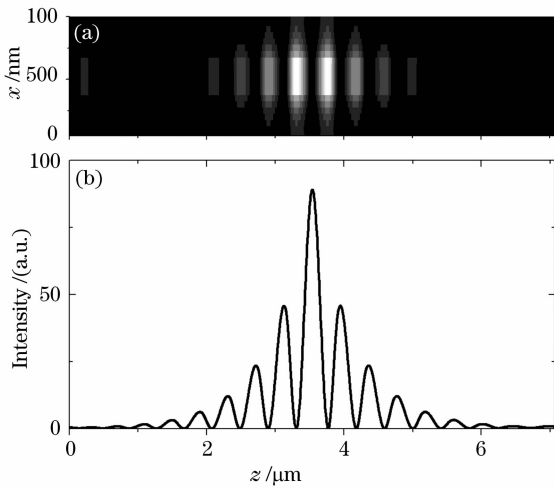


图 6 波长为 1550 nm 的电磁波入射带微腔的波导阵列结构表面等离子激元的场分布。(a) 时域有限差分方法计算, (b) 转移矩阵方法计算

Fig. 6 Field distribution of surface plasmon polaritons in waveguide array with the microcavity calculated by the (a) finite-difference time-domain, (b) transfer matrix method simulations. The incident light wavelength is 1550 nm

## 4 结 论

基于有效折射率近似的思想,设计了一种芯区介质层周期调制的金属异质波导阵列,可以实现通讯波段 1550 nm 附近亚波长的表面等离子激元布拉格反射器。通过在这种结构中引入合适的缺陷波导单元,可以获得 1550 nm 附近高局域的表面等离子激元共振模式。和金属覆盖层调制的情形相比,芯区介质层调制的自由度更大,在不降低缺陷模透射效率的前提下用更少的周期单元即可实现更高的  $Q$  值<sup>[11]</sup>,且实现的难度要小一些。这一设计方案可以被用于设计亚波长的光发射器和滤波器,并有可能被用于未来的纳米光路集成和光网络<sup>[16,17]</sup>。

**致谢** 感谢武汉大学王兵博士的有益讨论和帮助,感谢南京大学张超副教授在程序编写上提供的帮助。感谢南京晓庄学院物理系颜森林副教授的支持和指导。

## 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 W. L. Barnes, A. Dereux, T. W. Ebbesen. Surface plasmon subwavelength optics[J]. *Nature*, 2003, **424**(6950): 824~830
- 3 Q. J. Wang, J. Q. Li, C. P. Huang *et al.*. Enhanced optical transmission through metal films with rotation-symmetrical hole arrays[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, **87**(9): 091105
- 4 B. Wang, G. P. Wang. Confining light in two-dimensional slab photonic crystal waveguides with metal plates[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, **88**(19): 193128
- 5 Qu Xiaochao, Liang Jiaming, Yao Cuiping *et al.*. Optical properties of gold nanoparticle and its application in biological imaging and photothermal therapy[J]. *Chin. J. Lasers*, 2007, **34**(11): 1459~1465
- 6 屈晓超,梁佳明,姚翠萍等. 金纳米微粒的光学性质及其在生物成像和光热疗法中的应用[J]. *中国激光*, 2007, **34**(11): 1459~1465
- 7 J. Takahara, T. Kobayashi. Nano-optical waveguides breaking through diffraction limit of light[C]. *Proc. SPIE*, 2004, **5604**: 158~172
- 8 J. C. Weeber, J. R. Krenn, A. Dereux *et al.*. Near-field observation of surface plasmon polariton propagation on thin metal stripes[J]. *Phys. Rev. B*, 2001, **64**(4): 045411
- 9 S. A. Maier, P. G. Kik, H. A. Atwater *et al.*. Local detection of electromagnetic energy transport below the diffraction limit in metal nanoparticle plasmon waveguides[J]. *Nat. Mater.*, 2003, **2**: 229~232
- 10 X. P. Zhang, B. Q. Sun, H. C. Guo *et al.*. Self-assembly of gold nanoparticles into nanoholes through annealing in the fabrication of square lattices of nanocylinders[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(11): 657~659
- 11 J. A. Sánchez-Gil, A. A. Maradudin. Surface-plasmon polariton scattering from a finite array of nanogrooves/ridges: Efficient mirrors[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, **86**(25): 251106
- 12 B. Wang, G. P. Wang. Plasmon Bragg reflectors and nanocavities on flat metallic surfaces[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, **87**(1): 013107
- 13 L. Zhou, X. Q. Yu, Y. Y. Zhu. Propagation and dual-localization of surface plasmon polaritons in a quasiperiodic metal heterowaveguide[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, **89**(5): 051901
- 14 A. V. Zayats, I. I. Smolyaninov, A. A. Maradudin. Nano-optics of surface plasmon polaritons[J]. *Phys. Report*, 2005, **408**(3~4): 5~12
- 15 E. N. Economou. Surface plasmons in thin films[J]. *Phys. Rev.*, 1969, **182**(2): 539~554
- 16 Dong Xiaowei, Pei Li, Feng Suchun *et al.*. Study and Fabrication of all-fiber microring resonator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(11): 1935~1938
- 17 董小伟,裴丽,冯素春等. 全光纤型微环谐振器的研制[J]. *光学学报*, 2007, **27**(11): 1935~1938
- 18 I. I. Smolyaninov, D. L. Mazzoni, C. C. Davis *et al.*. Imaging of surface plasmon scattering by lithographically created individual surface defects[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1996, **77**(18): 3877~3880
- 19 J. A. Sánchez-Gil. Surface defect scattering of surface plasmon polaritons: Mirrors and light emitters[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1998, **73**(24): 3509~3511