

亚波长金属光栅的表面等离子体激元共振特性

刘 镜, 刘 娟, 王涌天, 谢敬辉
(北京理工大学 光电学院, 北京 100081)

摘要:亚波长金属光栅在共振波长处有光场局域增强、异常透射等现象,为深入认识其共振机制,本文研究了亚波长金属光栅的表面等离子体激元(SPP)共振特性。通过研究不同金属光栅的几何结构以及金属介电常数对SPP共振波长的影响,获得了3种共振波长的基本物理机制。采用周期边界元法进行数值模拟,在边界积分方程的基础上结合平面波展开方法来处理任意形状的周期性结构。模拟结果表明,3种共振波长可以分别由金属的材料、金属光栅周期和金属光栅厚度所调谐。该研究为微纳米光学器件的设计提供了依据。

关键词:亚波长金属光栅;表面等离子体激元;共振波长;边界元方法
中图分类号:0436.1 **文献标识码:**A

Resonant properties of sub-wavelength metallic gratings

LIU Jing, LIU Juan, WANG Yong-tian, XIE Jing-hui

(School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: Sub-wavelength metallic gratings have extraordinary transmission efficiency and local field enhancement in resonant wavelengths. In order to deeply understand the resonant discipline, the resonant origins of the sub-wavelength metallic gratings were investigated. Three resonant wavelengths were analyzed by adjusting the geometric parameters and materials of the gratings, and the physical disciplines of three different resonant wavelengths were obtained. In the simulation, the periodical boundary method based on the boundary integral equation combined with a plane wave expansion method was used to process the period structures with arbitrary shapes. The numerical results show that three resonant center wavelengths can be tuned by the materials, periods, and the thicknesses of the gratings. It is believed that this study will provide useful information for further designing micro-nano optical elements.

Key words: sub-wavelength metallic gratings; Surface Polariton Plasma(SPP); resonant wavelength; boundary element method

1 引言

1998年, Ebbesen等人报道了二维亚波长金属孔阵列的异常增透现象^[1]。虽然这种异常增透特性在光场局域、光刻成像、高密度数据存储、近场光学、生物探测识别等领域具有巨大的应用潜力^[2], 但是产生异常增透的物理机制问题一直以来在国际光学界没能达成共识, 因此该项研究已成为国际上的热点研究问题^[3~9]。为了进一步探讨亚波长金属光栅的共振特性, 本文采用周期边界元方法^[10,11]模拟了亚波长金属光栅的不同几何结构和金属材料对共振波长的影响, 获得了3种共振波长变化的规律, 研究了3种共振峰的起因和调制方法。

2 金属光栅模型和边界积分方程

图1为二维亚波长金属光栅示意图, 光栅沿X方向周期变化, 沿Z方向不变, 这里设一束TM偏振平面波沿-Y方向入射到金属光栅上。

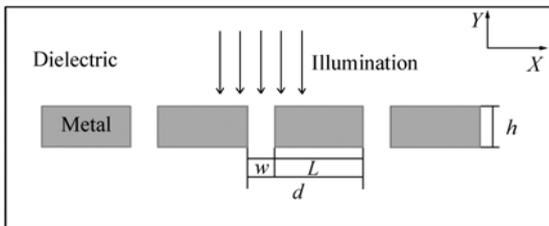


图1 结构模型

Fig. 1 Schematic of metallic gratings

对于每个金属柱, 考虑如图2所示的边界。 C_1, C_2, C_3, C_4 均为虚拟边界, C_0 为金属和介质空气的真实边界。对 C_3 和 C_4 采用周期边界条件, 采用边界元方法在区域1和区域2中求解, 平面波展开法在区域0和区域3求解。利用边界积分方程^[12,13], 获得了二维空间任意点的场分布:

$$\varphi(\mathbf{r}) = \int_c \left[G(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \frac{\partial \varphi(\mathbf{r}')}{\partial \mathbf{n}} - \varphi(\mathbf{r}') \frac{\partial G(\mathbf{r}, \mathbf{r}')}{\partial \mathbf{n}} \right] dl, \quad (1)$$

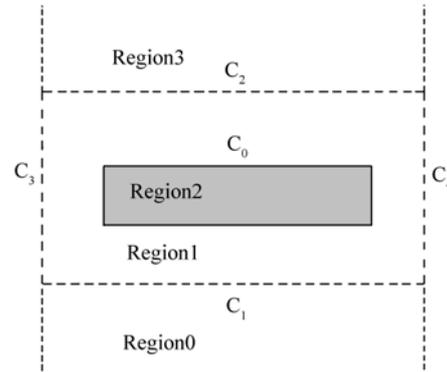


图2 周期单元

Fig. 2 Period cell

式中: $\varphi(\mathbf{r})$ 为区域内的场值, $\varphi(\mathbf{r}')$ 为边界上的场值, $G(\mathbf{r}, \mathbf{r}')$ 为二维格林函数, dl 为对边界点积分时的步长, \mathbf{n} 为边界的外法向。

3 数值模拟

为了研究亚波长金属光栅的共振特性, 首先研究了金属光栅的几何结构对共振波长的影响。为进一步获得各个共振波长的机理, 研究了不同金属所对应的共振波长。本文中金属的介电常数由文献[13]中的数据插值得到, 其波长为300~750 nm。金属光栅的几何结构参数为: 周期 $d = 360$ nm, 厚度 $h = 100$ nm, 金属宽度 $L = 280$ nm, 缝宽 $w = d - L$, 金属光栅的占空比定义为: 缝宽 w /周期 d 。共振强度是在金属下表面100 nm处测得的磁场强度。通过以上数值模拟得到3种共振波长, 第1种共振波长值最小, 称之为 RW_1 , 第3种共振波长最大, 称之为 RW_3 , 介于第1种和第3种共振波长之间的称之为 RW_2 。下面详细研究金属几何结构参数和金属材料对3种共振波长的影响。

3.1 结构参数对共振峰的影响

3.1.1 改变金属膜厚度

为了考虑共振波长对几何结构的依赖关系, 首先改变金属光栅的几何厚度 h 。厚度分别取50, 60, 70, 80, 90, 100, 110, 120, 130, 140 nm, 所获得的共振谱如图3所示。从图3可以看出, 随着金属膜厚度 h 的增大, RW_1 不变, 始终在320 nm, 但共振强度逐渐减弱; RW_2 在380 nm波长附近;

RW_3 发生明显的红移,共振强度逐渐增大后趋于恒定。图4是3种共振峰的共振波长随金属光栅厚度的变化关系,可以看出, RW_1 与金属膜厚度无关; RW_2 随金属膜厚度增大略有红移; RW_3 随金属膜厚度增大呈线性红移趋势。这意味着金属膜厚度 h 是产生和调控 RW_3 的主要参数^[14,15]。

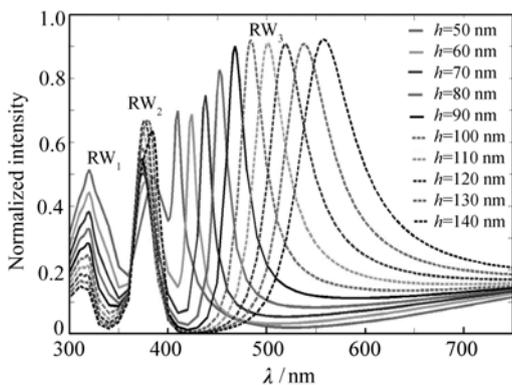


图3 不同金属膜厚度的共振谱

Fig.3 Resonant spectra for different thicknesses of metallic gratings

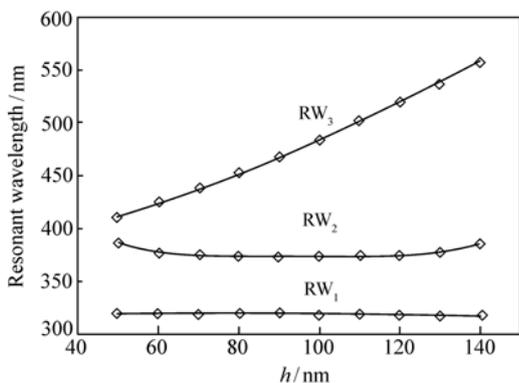


图4 3种共振波长与金属膜厚度的变化关系

Fig.4 Three different resonant wavelengths versus metal film thicknesses

3.1.2 改变周期

金属光栅的周期变化包括2种形式:保持金属条宽度不变和保持金属光栅的占空比不变,下面分别研究这2种情况。

3.1.2.1 保持金属条宽度不变

为了进一步研究 RW_1 和 RW_2 的起因,首先研究了周期对 RW_1 和 RW_2 的影响。保持金属条宽度 $L = 280$ nm,改变周期 d 分别为 310, 320,

330, 340, 350, 360, 370, 380, 390, 400 nm。所对应的缝宽 w 分别为 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 110, 120 nm, 获得的不同周期的共振谱如图5所示。

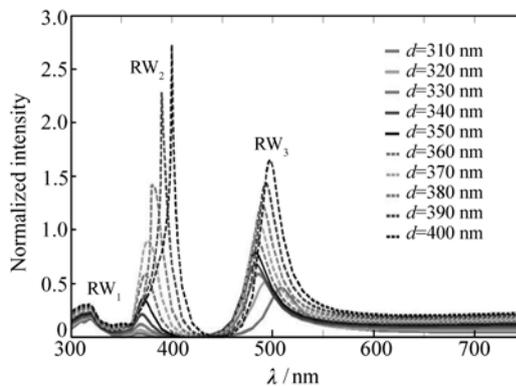


图5 不同周期的共振谱

Fig.5 Resonant spectra of different period

由图5可以看出,随着周期 d 增大(缝宽 w 逐渐增大), RW_1 基本不变; RW_2 逐渐红移,共振峰越来越窄,共振强度发生明显的增大; RW_3 在周期为 310 ~ 350 nm 发生蓝移,360 nm 后红移,共振峰尖锐程度逐渐增强,共振强度逐渐增加。由图6可以看出, RW_1 与缝宽和周期都无关;

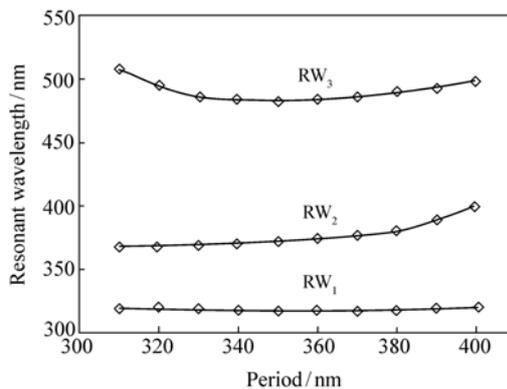


图6 3种共振波长随周期的变化

Fig.6 Three different resonant wavelengths versus period

RW_2 随周期增大发生明显红移,表明 RW_2 可以由周期所调制; RW_3 随着周期的增大开始蓝移,当缝宽 > 60 nm 之后,又缓慢地红移,说明决定 RW_3 的主要因素是光栅介质狭缝中的有效折射

率和光栅厚度,而金属表面等离子体波之间的耦合^[16,17]也会对其有微弱的影响。

3.1.2.2 占空比不变改变周期

由于表面等离子体波是沿着表面传输的波,为了研究单个周期中金属条宽度 L 与共振波长 RW_2 的关系,保持光栅占空比 $w/d = 0.2$,改变周期为 310, 320, 330, 340, 350, 360, 370, 380, 390, 400 nm。所对应的缝宽 w 分别为 60, 62, 64, 68, 70, 72, 74, 76, 78, 80 nm。图 7 为各个不同周期的共振谱。随着周期 d 的增大, RW_1 保持不变;

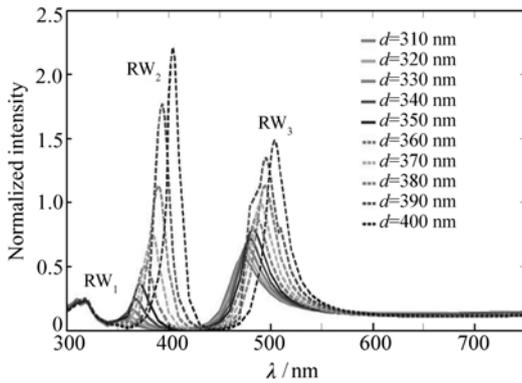


图 7 不同周期的共振谱

Fig. 7 Resonant spectra of different periods

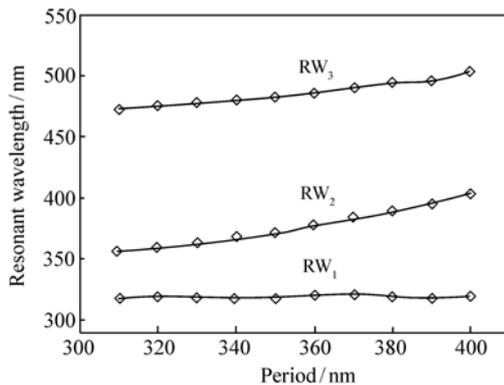


图 8 3 种共振波长随周期的变化

Fig. 8 Three different resonant wavelengths versus periods

RW_2 线性红移且共振峰越来越尖锐,共振强度也越来越大; RW_3 也发生红移,峰值越来越尖锐,共振强度逐渐增大。这 3 种共振波长的变化关系如图 8 所示,这进一步证明 RW_1 与周期无关; RW_2 随着周期增大发生线性红移; RW_3 也发生微弱红

移,这是因为当缝宽 > 60 nm 后,缝中有效折射率基本不变, SPP 共振耦合^[18,19]对其的影响起主要作用。

3.2 金属材料对共振波长的影响

为了研究第一个共振波长 RW_1 的起因,这里改变金属材料,即把银换为金,研究金属条宽度仍为 280 nm,金属膜厚度为 100 nm 时,不同周期 340, 350, 360, 370 nm 时的共振谱,如图 9 所示。可以看出,对同样结构,当改变了金属材料时,固有的 RW_1 (320 nm) 消失。研究银在不同波长时的介电常数发现,在 320 nm 处银的吸收率最小,因而会形成一个透射峰,这说明 RW_1 是金属银的固有共振波长^[20]。

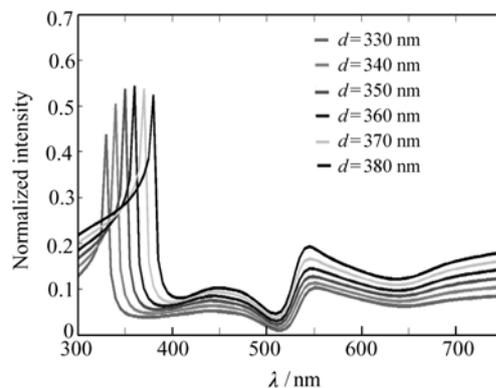


图 9 金膜在不同周期下的共振谱

Fig. 9 Resonant spectra of Au grating

4 结果分析

通过上述研究发现: RW_1 始终在 320 nm 波长处,且与结构参数无关。当改变金属材料时,该共振峰消失,这说明 RW_1 由金属材料决定。在该共振波长处的光场分布如图 10(a) 所示,可以看出,第 1 种共振峰场局域在金属上表面,而在下表面较弱。如果需要调控由 RW_1 所决定的光场分布,需要采取一些措施(如减小金属厚度)从上表面把局域光场耦合到下表面。

第 2 种共振峰 RW_2 与周期有关,并随着周期的增大而红移,共振强度随着周期的增大而增强。进一步研究该处的光场分布发现:此时光能量很好地耦合到金属下表面,在距离下表面 300 nm 内

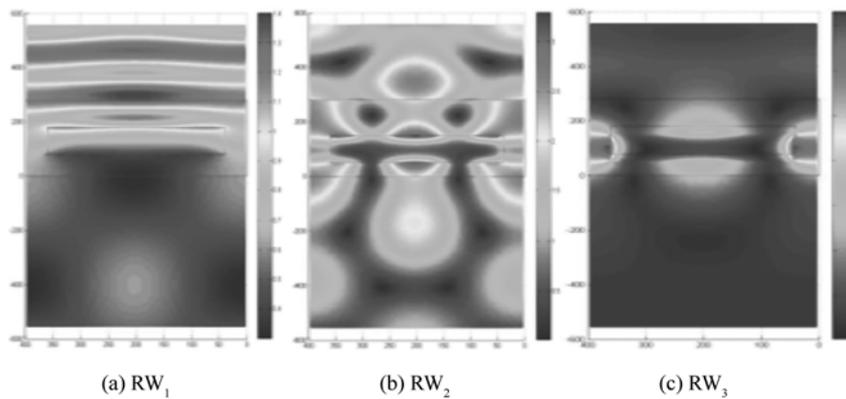


图 10 3 种不同共振波长对应的光场分布

Fig. 10 Field distributions of three different resonant wavelengths

形成局域场增强,并能向下方传输。因此该处的场分布可以用做光场调制,如光场的汇聚、分束等等。

RW_3 与金属膜的厚度、缝宽和周期都有关系,主要由缝中 F-P 腔的有效光程决定^[21,22]。当缝宽 < 60 nm 时,缝中的有效折射率随缝宽的减小指数增大,因此会导致缝中 F-P 腔共振起主要作用,当缝宽 < 60 nm 时,缝中有效折射率基本不变,周期 SPP 间的耦合占主导作用,所以 RW_3 本质上是受金属厚度和缝宽的调制。第 3 种共振峰对应的光场如图 10(c) 所示,可以看出能量主要局域在狭缝中,在金属上下表面的局域场受金属光栅周期结构所导致,强度较弱。因此,该共振波长主要受金属厚度和缝宽的调制。

5 结 论

本文应用周期边界元方法研究了金属光栅的几何结构参数和金属材料对共振波长的影响,模拟了 3 种共振波长对应的光场分布。研究表明,第 1 种共振峰 RW_1 与金属材料有关而与结构无关。第 2 种共振峰 RW_2 受金属光栅周期的调制,随着周期的增大而发生线性红移。第 3 种共振峰 RW_3 主要由金属厚度 h 和较窄的缝宽所调控, h 增大共振波长发生红移;同时 RW_3 也受周期 SPP 共振耦合的影响,随着周期的增大共振峰略有红移。3 种共振波长物理机制的研究可为未来设计和制作微纳光学元件提供重要的技术参考。

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: 667-669.
- [2] 顾本源. 表面等离子体亚波长光学原理和新颖效应[J]. 评述, 2007, 36(4): 280-285.
GU B Y. Surface plasmon subwavelength optics: principles and novel effects [J]. *Comments*, 2007, 36(4): 280-285. (in Chinese)
- [3] GARCIA-VIDAL F J, LEZEC H J, EBBESEN T W, *et al.*. Multiple paths to enhance optical transmission through a single subwavelength slit [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2003, 90(21): 213901-1-213901-3.
- [4] PORTO J A, GARCIA-VIDAL F J, PENDRY J B. Transmission resonances on metallic gratings with very narrow slits [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1999, 83(14): 2845-2848.
- [5] YANG J, YANG C C, KIANG Y W. Numerical study on surface plasmon polariton behaviors in periodic metal-dielectric structures using a plane-wave-assisted boundary integral equation method [J]. *Opt. Express*, 2007, 15(14): 9048-9055.
- [6] LIU J, XIE J H, WANG Y T. Transmission and diffraction through metallic nanoslit [J]. *Modern Phys. Lett. B*, 2008, 22

- (29):2821-2829.
- [7] LIU J, XIE J H, WANG Y T. Transmission and diffraction through metallic nanoslit[J]. *Modern Phys. Lett. B*, 2008, 22(29):2821-2829.
- [8] DI S, LIU J. Transmitted behavior of the light waves through horn-opened single nanoslit in finite width metallic films[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2007, 24(9):2349-2356.
- [9] WANG SH Q, LIU J. Rigorous electromagnetic analysis of the common focusing characteristics of cylindrical microlens with long focal depth by multi-wavelength incidence[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2007, 24(2):512-516.
- [10] CHEN K M. A mathematical formulation of the equivalence principle[J]. *IEEE T. Microw Theory*, 1989, 37(10):1576-1580.
- [11] HU B, LIU J. Enhanced effect of local-fields in subwavelength metallic series nano-cavities from surface plasmon polaritons[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2007, 24(10):A1-A6.
- [12] LIU J, HU B. Analysis of surface plasmons excitations from fabrication defects of metallic nanofilm with nonsymmetrical and finite grating-like corrugation[J]. *Modern Phys. Lett. B*, 2007, 21(25):1677-1685.
- [13] PALIK E W. *Handbook of Optical Constants of Solids*[M]. San Diego: Academic Press, 1985.
- [14] 谈春雷, 易永祥, 汪国平. 一维金属光栅的透射光学特性[J]. *物理学报*, 2002, 51(5):1063-1066.
TAN CH L, YI Y X, WANG G P. Optical transmission properties of one-dimensional metallic gratings[J]. *Acta Physica Sinica*, 1997, 2002, 51(5):1063-1066. (in Chinese)
- [15] ASTILEAN S, LALANNE Ph, PALAMARU M. Light transmission through metallic channels much smaller than the wavelength[J]. *Opt. Communication*, 2000, 175(4-6):265-273.
- [16] LIU P, LIU J, LIU J, *et al.*. Scattering properties of an individual metallic nano-spheroid by the incident polarized light wave[J]. *Opt. Communications*, 2011, 284(4):1076-1081.
- [17] LIU J, WANG Y T, SUN F, *et al.*. Optical transmission through metallic nanoslit with symmetric or asymmetric surface-relief profile[J]. *Optik*, 2011, 122(9):782-786.
- [18] 何启浩, 汪国平. 一维金属光栅的透射光增强效应的物理机制[J]. *激光杂志*, 2003, 24(4):29-30.
HE Q H, WANG G P. Physical mechanism for transmission enhancement of one-dimensional metallic gratings[J]. *Laser J.*, 2003, 24(4):29-30. (in Chinese)
- [19] 白文理, 郭宝山, 蔡利康, 等. 亚波长金属光栅的光耦合增强效应及透射局域化的模拟研究[J]. *物理学报*, 2009, 58(11):8021-8024.
BAI W L, GUO B S, CAI L K, *et al.*. Simulation of light coupling enhancement and localization of transmission field via sub-wavelength metallic gratings[J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, 58(11):8021-8024. (in Chinese)
- [20] 张剑龙, 黄铭, 胡宝晶. 亚波长孔阵透射增强特性的 FDTD 数值仿真[J]. *云南大学学报*, 2008, 30(5):472-476.
ZHANG X L, HUANG M, HU B J. Simulation on light extraction efficiency of subwavelength hole array with FDTD method[J]. *J. Yunnan University*, 2008, 30(5):472-476. (in Chinese)
- [21] 王亚伟, 刘明礼, 刘仁杰, 等. Fabry-Perot 谐振腔对横电波激励下亚波长一维金属光栅的异常透射特性的作用[J]. *物理学报*, 2011, 60(2):024217-1-024217-5.
WANG Y W, LIU M L, LIU R J, *et al.*. Fabry-Perot resonance on extraordinary transmission through one-dimensional metallic gratings with sub-wavelength under transverse electric wave excitation[J]. *Acta Phys. Sin.*, 2011, 60(2):024217-1-024217-5. (in Chinese)
- [22] LINDBERG J, LINDFORS K, SETALA T, *et al.*. Spectral analysis of resonant transmission of light through a single sub-wavelength slit[J]. *Op. Express*, 2004, 12(4):623-626.

作者简介:刘 镜(1986—),女,山东曲阜人,硕士研究生,主要从事亚波长微纳光学方面的研究。

E-mail:ssruoshui666@163.com

刘 娟(1970—),女,河南信阳人,教授,博士生导师,主要从事微纳光学元件设计和应用、全息光学、衍射光学及其应用等方面的研究。E-mail:juanliu@bit.edu.cn