

环形狭缝腔阵列光学特性的研究

周静 王鸣 倪海彬 马鑫

Finite difference time domain simulation of optical properties of annular cavity arrays

Zhou Jing Wang Ming Ni Hai-Bin Ma Xin

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 227301 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.227301

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.227301>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I22>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

纳米银六角阵列在掺氧氮化硅中的局域表面等离激元共振特性仿真

Simulation of localized surface plasmon resonance of hexagonal Ag nanoarrays and amorphous oxidized silicon nitride

物理学报.2015, 64(17): 177301 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.177301>

Au 纳米颗粒和 CdTe 量子点复合体系发光增强和猝灭效应

Enhancement and quenching of photoluminescence from Au nanoparticles and CdTe quantum dot composite system

物理学报.2015, 64(16): 167301 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.167301>

复合金属光栅模式分离与高性能气体传感器应用

Split modes of composite metal grating and its application for high performance gas sensor

物理学报.2015, 64(14): 147302 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.147302>

径向偏振光下的长焦、紧聚焦表面等离子体激元透镜

Plasmonic lens with long focal length and tight focusing under illumination of a radially polarized light

物理学报.2015, 64(9): 097301 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.097301>

十字结构银纳米线的表面等离极化激元分束特性

Surface plasmon polaritons splitting properties of silver cross nanowires

物理学报.2015, 64(9): 097303 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.097303>

环形狭缝腔阵列光学特性的研究*

周静 王鸣† 倪海彬 马鑫

(南京师范大学物理科学与技术学院, 江苏省光电技术重点实验室, 南京 210023)

(2015年4月25日收到; 2015年7月31日收到修改稿)

设计了一种六角密排的二维环形纳米腔阵列结构, 利用时域有限差分算法对该结构的光学特性进行了探究. 仿真结果表明, 在线性偏振光入射时, 环形腔内可以形成多重圆柱形表面等离子激元谐振, 谐振波长的个数和大小与环形腔的结构参数相关. 根据透、反射光谱, 电场矢量的模式分布及截面电荷密度的分布, 谐振波长处形成圆柱形表面等离子激元, 谐振波长处入射光能量大部分在环形腔内损耗, 此时反射率为极小值, 环形腔内的电场增强效应为极大值(光强增强可达1065倍). 谐振波长与环形腔的结构参数(狭缝内径、狭缝外径、膜厚、环境介质折射率、金属的材质)相关, 通过调节结构参数, 谐振波长在350—2000 nm范围内可调. 通过对比相同结构参数的单个环形腔和环形腔阵列的仿真结果, 周期排布对环形腔内的圆柱形表面等离子激元吸收峰位置影响不明显. 该结构反射光谱对入射光电矢量偏振方向不敏感. 谐振波长的可调控性对于表面拉曼增强和表面等离子激元共振传感器的设计与优化具有指导性意义, 且应用于折射率传感器时灵敏度可达1850 nm/RIU.

关键词: 圆柱形表面等离子激元谐振, 时域有限差分法, 环形腔, 二维周期性结构

PACS: 73.20.Mf, 78.67.-n, 61.46.-w

DOI: 10.7498/aps.64.227301

1 引言

对于亚微米/纳米尺度下的贵金属周期狭缝结构在光照射条件下所激发的表面等离子激元(surface plasmon polaritons, SPPs)的相关研究, 促进了金属微纳光学的发展和应用^[1-5]. SPPs的产生是光与金属表面自由电子相互作用的结果, 当入射光子的频率与电子的振动频率相匹配时, 所激发的电磁场会产生强烈的散射和吸收共振效应. SPPs主要沿着金属/电介质或者金属/空气的表面传播, 可以突破衍射极限, 因此可以应用于光刻技术、超分辨成像技术、光开关器件的设计以及SPPs传感器的研究等领域^[6-8].

近年来, 对于相关金属微结构阵列激发SPPs的研究层出不穷, 如: 内嵌银纳米棒圆形银缝隙结构^[9]、金纳米球壳对结构^[10]、金哑铃结构^[11]以及金纳米杯结构等^[12]. 文献^[13]指出, 贵金属狭缝腔

具有强局域性, 可以将特定频率的光束缚在其内部. 随着镀膜工艺的发展, 在周期性排列的介质表面镀金属膜, 使之形成介质/金属的周期性微结构, 成为能够激发SPPs的又一大研究热点^[14,15]. 但是仅仅通过实验的探究, 难以从本质上认识其形成原因, 并且实验的重复性很难控制, 所以需要用理论计算来分析结构的光学特性. 其中, 应用较为广泛的包括有限元法^[16]、离散偶极近似法^[17]、时域有限差分(finite difference time domain, FDTD)法^[18]等. 其中FDTD算法可直接在时域中计算, 对麦克斯韦差分方程组进行空间离散, 只需要根据相关电磁性质的参数, 划分相对精细的网格, 便可模拟复杂的电磁结构. 并且该算法适合并行计算, 相对于传统的数值计算可以节约大量的时间.

本文提出和设计了一种六角密排的一类柱状环形金属银狭缝腔阵列结构, 该模型可以激发出多重圆柱形表面等离子激元(cylindrical surface plasmons, CSPs, 是SPPs类型之一)谐振效应^[19]. 基

* 国家自然科学基金(批准号: 61178044)、江苏省高校研究生培养创新工程(批准号: KYLX_0723)和江苏省科技支撑计划(批准号: BE2008138)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: wangming@njnu.edu.cn

于FDTD算法, 仿真了该模型的透反谱和谐振中心频率的截面电场以及电荷分布, 分析了该周期结构激发CSPs的原因. 通过结构参数对光谱特性影响的仿真探究, 有效地实现了对吸收峰波长的调控.

2 仿真模型和计算方法

六角密排的环形银狭缝腔阵列结构如图1(a)所示, 定义PS外表面的银膜为柱状银帽, 其模型结构剖面图如图1(b)所示. 二氧化硅填充物的高度 $H = 530$ nm, 银膜的厚度 $t = 275$ nm, 狭缝内径(柱状银帽的半径) $r = 235$ nm, 狭缝外径 $R = 270$ nm, PS的介电常数为2.5, 玻璃衬底 SiO_2

的介电常数为2.37, 厚度为1000 nm. 根据金属银的Drude模型, 利用商业仿真软件EastFDTD建立模型. 周期 $T_y = T_z = 690$ nm, 环形狭缝腔结构六角密排于YOZ面上. 中心频率为 5.5×10^{14} Hz的高斯脉冲光沿X轴负方向入射, 光源种类为扩展激励源(高斯窗). 根据空间离散间隔的要求, 设置空间步长为5 nm. 根据courant稳定条件, 设置时间间隔为 $0.5 \times 1.66782 \times 10^{-17}$ s, 计算步数为100000步. Y和Z方向上设置为周期边界条件, 相当于将计算区域内的模型结构、电磁场及光源强度分布周期延拓, 以便达到以有限的计算区域模拟无限空间电磁场分布的目的^[20]. X方向上, 设置为吸收边界条件PML, 以保证边界上的介质连续分布.

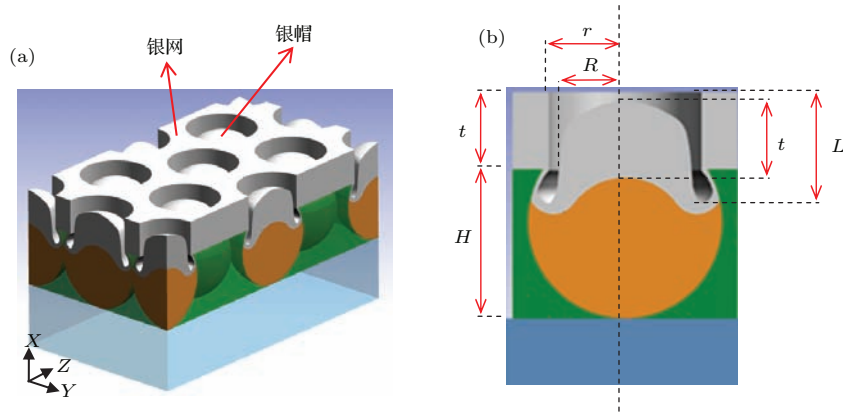


图1 (网刊彩色) 模型结构示意图 (a) 环形狭缝腔阵列; (b) 剖面图
 Fig. 1. (color online) Model structure diagram: (a) Annular cavity arrays; (b) cross section of an annular cavity.

3 结果与讨论

3.1 透反谱以及截面场分布分析

通过研究发现不同结构参数的模型, 其光学响应不同. 基于前述模型参数, 计算了该狭缝腔阵列的透反谱. 对比了仿真反射谱线与实验反射谱线^[21], 如图2(a)所示, 两者光谱特征相同. 光谱对比图中, 可见光波段形成两个吸收峰, 对应波长分别为483 nm和692 nm(定义为峰I和峰II). 在近红外波段1416 nm处, 也形成了一个吸收峰(定义为峰III). 仿真了三个吸收峰对应波长下的截面电场以及电荷分布, 如图2(b)所示.

根据波导理论^[22]、文献^[23]以及计算的模场分布分析, 在线性偏振光入射下, 单个狭缝微腔中会形成TE₁₁波导模式(TE₁₁模式满足狭缝圆周方向

的相位匹配条件, 即圆周截面上有对称分布的两个电场增强的节点). 同时考虑狭缝微腔的高度有限, 环形腔的上下界面形成一个Fabry-Perot(F-P)腔, 只有满足相位匹配条件的TE₁₁模才能在环形腔内形成共振, 其共振模式满足方程:

$$|2Lk_{\text{SPP}}(\omega) + \Delta\phi_1 + \Delta\phi_2| = 2\pi m, \quad (1)$$

其中, L 为狭缝腔的竖直高度光程, $\Delta\phi_1$ 和 $\Delta\phi_2$ 分别为上下界面处光波的相位变化, $k_{\text{SPP}}(\omega)$ 为在特定频率 ω 下的波矢量, m 为光波在波导中传播的模阶数. 入射光中波长为483, 692以及1416 nm的光波满足模式方程(1), 这些特定频率的光在竖直方向上满足F-P腔的相位匹配条件, 同时它们也满足TE₁₁导模的边界条件, 因此这些频率的光在狭缝内形成谐振模式(即为CSPs). 图2(b)中的截面电荷交替分布表明在狭缝的内壁形成了SPPs. 对应谐振波长下的入射光能量大部分因束缚在环

形腔内而损耗, 故而表现为反射光谱中的反射率极小. 对于完美电导体, TE₁₁ 模的截止频率约为 $\pi \times (R + r)$. 对于贵金属(如金, 银)狭缝微腔来说, 当狭缝间距趋于 0 nm ($R \rightarrow r$) 时, 狭缝两个圆柱曲面上各自形成的表面等离子激元波会部分重合形成强烈的耦合, 因此金属环形狭缝微腔的 TE₁₁ 膜

截止频率趋于 0 Hz^[23]. 当狭缝微腔的结构尺寸和材料改变时, 满足 TE₁₁ 导模的波长和模式都会改变, 同时垂直方向的相位匹配条件也会发生变化. 观察发现电场强度最强处位于银帽与银网的间隙处, 这对于光与物质的相互作用的相关研究非常有益(如表面增强拉曼散射、折射率传感等).

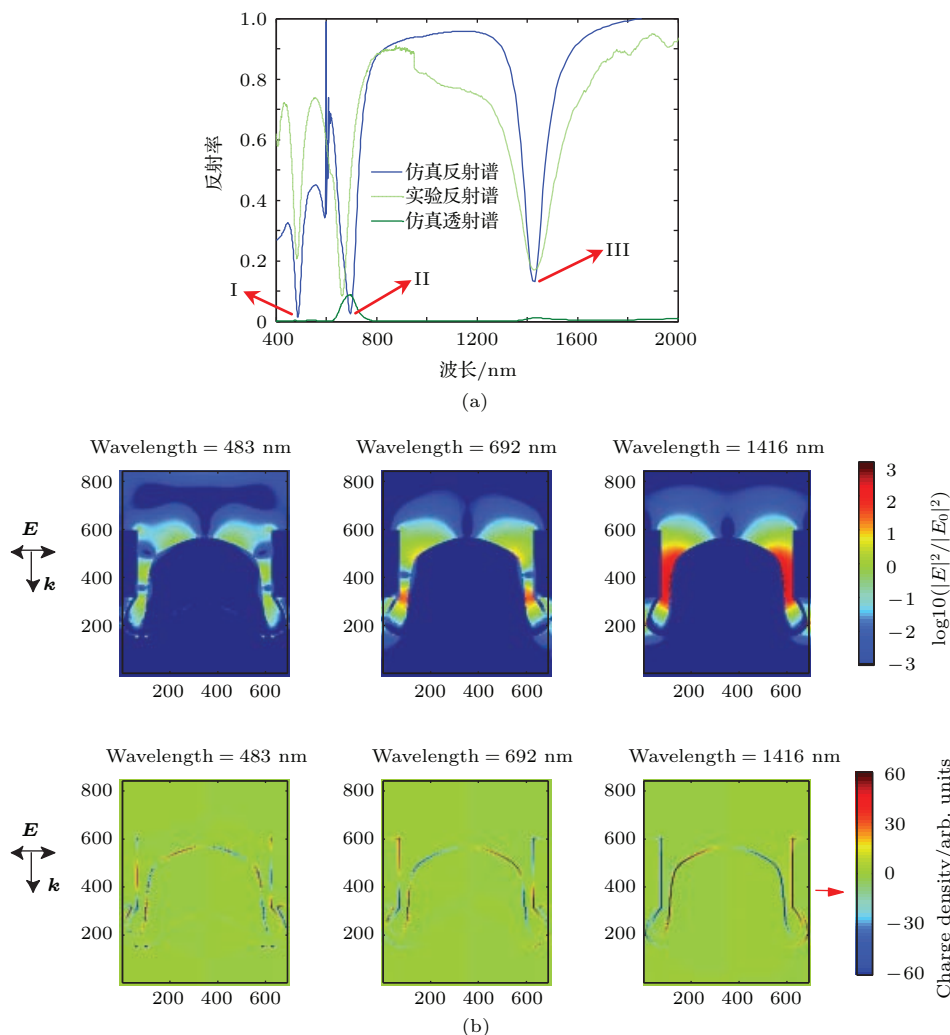


图2 (网刊彩色) 光谱图以及截面电场强度、电荷分布 (a) 仿真反射谱线与实验反射谱线对比以及仿真透射谱; (b) 三个共振吸收峰处的纵向的截面场强度及截面场电荷分布

Fig. 2. (color online) Reflectance and transmission spectra, electric field distributions and charge density distributions of annular cavity array: (a) Comparison of calculated and experimental reflectance spectra, and simulated transmission spectrum; (b) electric field distributions and charge density distributions at resonance wavelengths.

3.2 结构参数对共振吸收峰波长的调控

进一步通过仿真计算分析了模型结构参数: 银膜厚度 t 、狭缝内径 r 、狭缝外径 R 以及结构环境介质折射率 n 的改变对环形腔中 CSPs 谐振波长变化的原理. 并且仿真研究了周期性的排布以及入射偏振光偏振方向对环形狭缝腔光学特性的影响.

3.2.1 银膜厚度 t 、狭缝内径 r 以及狭缝外径 R 对吸收峰的调控

根据前述模型参数, 仅改变银膜垂直方向上的厚度 t , 从 225 nm 到 325 nm, 膜厚变化间隔为 25 nm, 其反射谱线对比如图 3(a) 所示. 为方便对比, 归一化的反射率放在一个图中, 纵坐标进行平移. 随着 t 的增加, 吸收峰红移. 银膜厚度 t 的改

变, 表现为竖直方向上狭缝腔长度的改变. 根据(1)式, 入射光在狭缝腔内产生F-P共振时, 对于相同的干涉级次, L 增加则 $k_{SPP}(\omega)$ 减小, 对应的吸收峰红移.

根据示意图1, 前述已定义PS外表面的银膜为柱状银帽, 现定义开口边缘的银为银网. 调整狭缝内径 r 从 225 nm 到 245 nm, 变化间隔为 5 nm. 反射谱线对比如图3(b)所示, 随着 r 的增加, 银帽与银网之间的狭缝距离减小, 吸收峰红移. 调整周期结构狭缝外径 R 的大小, 当 R 从 540 nm 逐渐减小到 480 nm (波长变化间隔为 20 nm) 时, 反射谱变化如图3(c)所示, 谱峰红移. 这里重点探究峰II和峰III的变化. 当某一参数(定义为 $R1$) 下峰II的

反射率相对于相邻参数(定义为 $R2$) 下峰II的反射率较低时, $R1$ 对应的峰III必然比 $R2$ 对应的峰III的反射率高, 这里的 $R2$ 与 $R1$ 相差 20 nm. 进一步研究峰III, 当 R 减小到 510 nm 时, 达到了反射率的极小值, 继续减小 R , 吸收峰反射率又会增大. 也就是说, 结构狭缝外径的大小既可以调控结构对于特定光波的反射率大小, 又可以调控吸收谱峰的位置. 狭缝内径 r 和外径 R 的变化会引起满足同轴波导TE₁₁导模的边界条件发生变化, 从而导模波长改变, 因为TE₁₁模式的谐振波长与构成波导的材料、狭缝内径 r 以及外径 R 相关^[23]. 以吸收峰III为例, 给出该峰波长与不同结构参数(t, R, r) 变化的折线图, 如图3(d)所示.

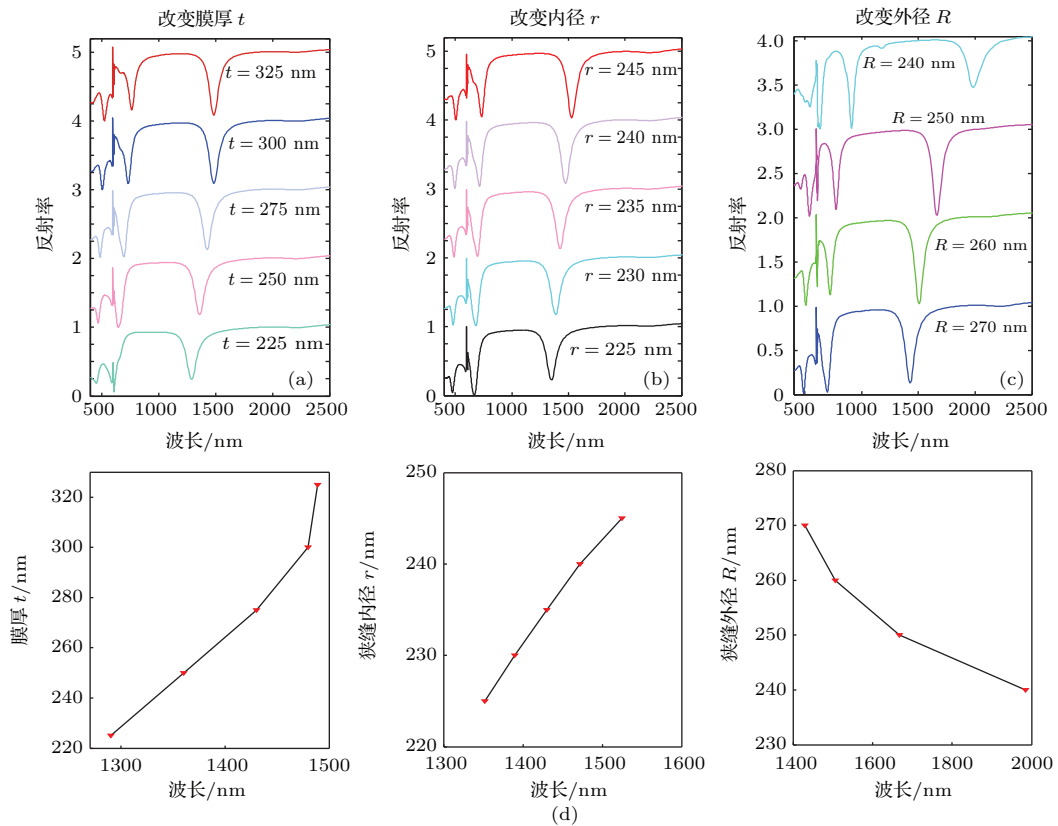


图3 (网刊彩色) 不同结构参数 (t, R, r) 的反射谱与折线图 (a) 不同膜厚的反射谱线对比; (b) 不同柱状银帽半径的反射谱线对比; (c) 不同狭缝外径的反射谱线对比; (d) 峰III波长与结构参数 (t, R, r) 变化的折线图

Fig. 3. (color online) Reflectance spectra of simulated annular cavity arrays with different geometry sizes (t, r, R), and relationship between reflectance dip wavelengths and geometry sizes: comparison of reflectance spectra of annular cavity array with (a) increased film thickness, (b) increased inner radius, and (c) increased outer radius; (d) relationships between wavelengths of reflectance dip (III) and geometry sizes (t, r, R).

3.2.2 环形狭缝腔内环境介质折射率 n 对吸收峰的调控

本文所设计的环形狭缝腔结构, 其反射光谱的吸收峰对填充在环形狭缝腔中的介质的折射率敏感. 从吸收峰形成机理上分析: 首先(1)式中 L 是

指光程, 其不仅与狭缝腔的绝对高度有关, 还与填充介质的介电常数有关; 其次TE₁₁导模的模式波长与狭缝腔中环境介质的介电常数也是相关的. 为了研究环形狭缝腔中介电常数与反射光谱吸收峰的定量关系, 仿真了该结构表面覆盖不同折射率 n

液体的几类模型, n 分别为 1.33, 1.35, 1.4 和 1.5. 反射谱线如图 4 (a) 所示, 随着介质环境折射率 n 的增大, 吸收峰红移. 根据 (1) 式, 我们也可验证这一规律特性. 进一步仿真了吸收峰 III 波长与环境介质折射率 n 的对应关系折线图, 如图 4 (b) 所示, 折射率与谐振波长是线性关系. 计算了环境介质折射率变化所引起的峰 III 波长的变化值, 得到其灵敏度最高可达 1850 nm/RIU, 故而该结构应用于折射率传感器件, 优势显著.

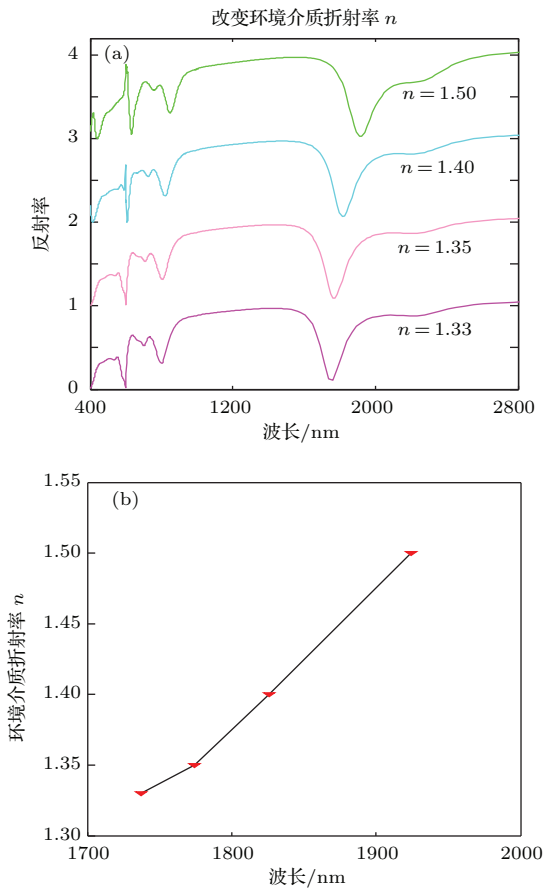


图 4 (网刊彩色) 反射谱与折线图 (a) 不同环境介质折射率反射谱线对比; (b) 吸收峰 III 波长与环境介质折射率 n 的对应关系折线图

Fig. 4. (color online) (a) Reflectance spectra of annular cavity arrays with liquids of different refractive indices infiltrated in the cavities; (b) relationship between wavelengths of dip III and refractive indices of infiltrated liquids.

3.2.3 周期性对环形狭缝腔光学特性的影响

上述仿真均是讨论环形狭缝腔在周期排列下的光电特性, 考虑单一的环形狭缝腔结构是否也有相似的光电特性, 即周期性对于环形狭缝腔的光学特性是否有影响, 故将仿真区域设置为单一狭

缝腔区域, Y 和 Z 方向上均为吸收边界条件 PML. 仿真所得的单一结构与周期结构的反射谱线对比如图 5 (a) 所示, 谱峰波长偏差很小. 选取波长为 1454 nm 的吸收峰, 计算了其截面电场强度分布, 与周期排布下吸收峰波长为 1421 nm 时的场分布对比, 如图 5 (b) 所示, 单一环形狭缝腔结构的局域共振相对于周期结构而言较弱. 这说明单一结构也能够激发 CSPs, 即具备吸收峰形成的条件, 而周期性的排布则主要是增加了吸收强度.

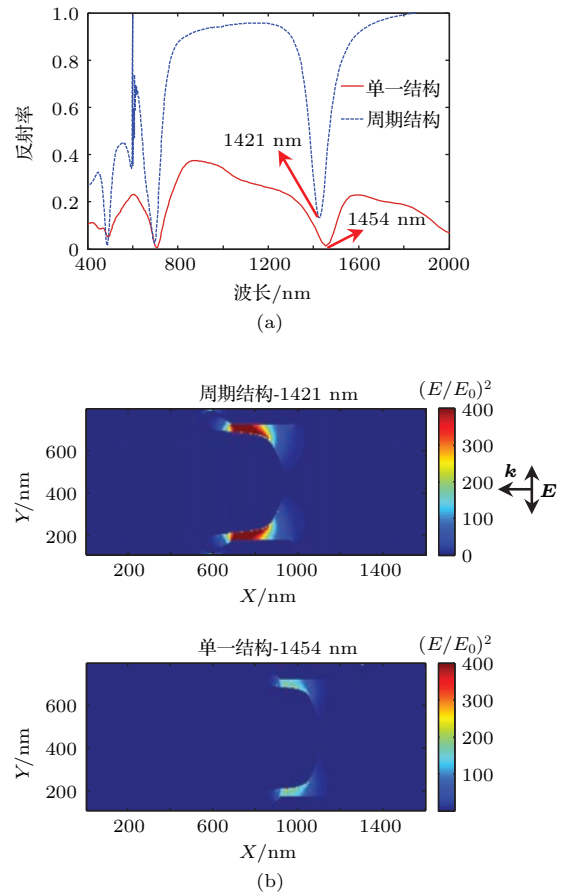


图 5 (网刊彩色) 反射谱与截面电场分布 (a) 单一结构与周期结构的反射谱线对比; (b) 截面电场强度对比

Fig. 5. (color online) (a) Reflectance spectra of a single annular cavity and annular cavity arrays with the same geometry size; (b) electric field distributions at cross sections of a single annular cavity and annular cavity arrays.

3.2.4 入射光偏振方向对结构光学性质的影响

改变入射光源高斯脉冲的偏振方向, 即电矢量与 Y 轴夹角分别为 0° , 15° , 30° 以及 60° . 反射谱线对比如图 6 所示, 0° 为光源电矢量的初始偏振角度. 从仿真反射谱可以看出, 偏振角的改变轻微地调控

了吸收峰 III 高度, 也就是随着电矢量角度的增大, 在吸收峰 III 处的反射率略微升高, 说明光源电矢量角度的改变对吸收峰位置的调控不明显. 因此该结构对入射光偏振方向的改变不敏感, 这是由于狭缝腔的几何形貌是圆对称的.

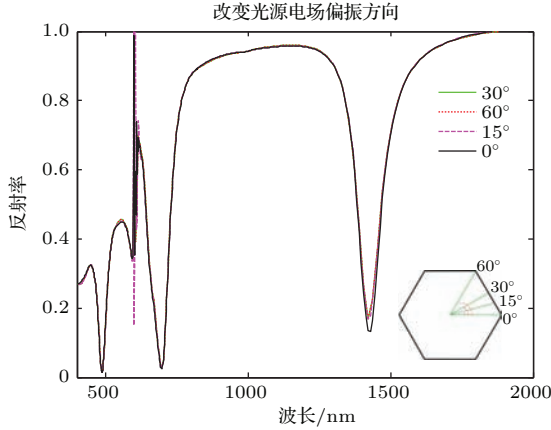


图 6 (网刊彩色) 不同光源电矢量角度改变的反射谱线对比 (内插图: 偏振角度示意图)

Fig. 6. (color online) Reflectance spectra of annular cavity arrays with linearly polarized incident light at normal incidence with different polarization degrees (Illustration: polarization angle diagram).

3.3 狭缝形状和材料分布对 CSPs 的影响

通过改变柱状银帽的表面形状和环形狭缝结构材料的分布同样可以改变 TE₁₁ 导模的模式及上下界面的相位匹配条件 (即 (1) 式), 从而可以产生新的共振模式, 形成更多的吸收峰.

3.3.1 柱状银帽的几何外形对共振模式的调控

调整不规则柱状 PS 的形状为规则的三角柱、圆柱和立方柱, 其中圆柱的底面半径为 235 nm, 与前述所定义的柱状银帽的半径 r 相等. 三角柱和立方柱的横截面均内接于圆柱的横截面, 其截面示意图见图 7 中的内插图. 仿真得到的不同柱状结构的反射谱对比如图 7 所示. 圆柱和立方柱的反射谱线在可见光波段和近红外波段有三个明显的吸收峰 (i—iii, I—III), 而三角柱的反射谱线中有四个明显的吸收峰 (I'—IV'). 三角柱特殊的狭缝腔形貌决定了它不同于圆柱和立方柱, 进而产生了新的局域共振模式.

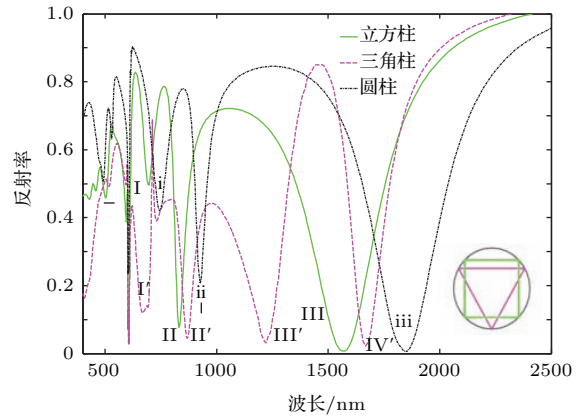


图 7 (网刊彩色) 不同类柱状结构的反射谱线 (内插图: 柱状结构截面图)

Fig. 7. (color online) Comparison of reflectance spectra of annular cavity arrays with cylindrical, square and triangular inner column (Illustration: similar columnar PS cross section diagram).

3.3.2 金属镀膜材料的改变对共振模式的影响

将镀膜金属银改变为铝、金、铜, 分别进行仿真计算. 得到的反射谱线对比如图 8 所示, 反射谱线中峰 II 和峰 III 谱峰位移很小. 当镀膜材料为金和铜时, 虽然吸收峰 I 相对于镀膜材料银的模型有了约 120 nm 的红移, 但是反射谱线整体所表现出的光学特性没有改变. 故该环形狭缝腔结构对材料的选择性不高, 常用金属材料都能满足该模型形成 CSPs 的条件.

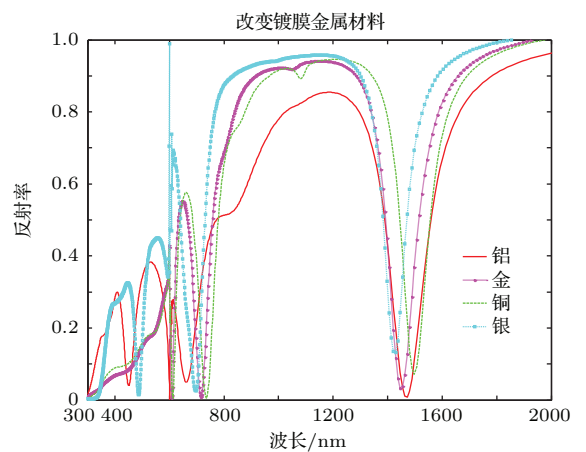


图 8 (网刊彩色) 改变镀膜材料反射谱线对比

Fig. 8. (color online) Comparison of reflectance spectra of annular cavity arrays in different metal materials.

3.3.3 层叠式金属/介质膜对共振模式的调控

另一种改变TE₁₁导模的方法是将原本一层275 nm的银膜改变为银-二氧化硅-银的三层膜,其中第一层和第三层的银膜厚度为100 nm,第二层的二氧化硅厚度为75 nm,总的镀膜厚度不变,模型截面示意图见图9(a)的内插图.反射谱线对

比图9(a)所示.在峰II和峰III之间的近红外波段出现新的波长为955 nm的吸收峰II',而峰I、峰II、峰III的谱峰位移很小.仿真了层叠结构的截面电场强度分布如图9(b)所示.材料中间部分从金属银变成非金属二氧化硅后,环形狭缝腔内波导的模式发生改变,形成新的吸收峰.

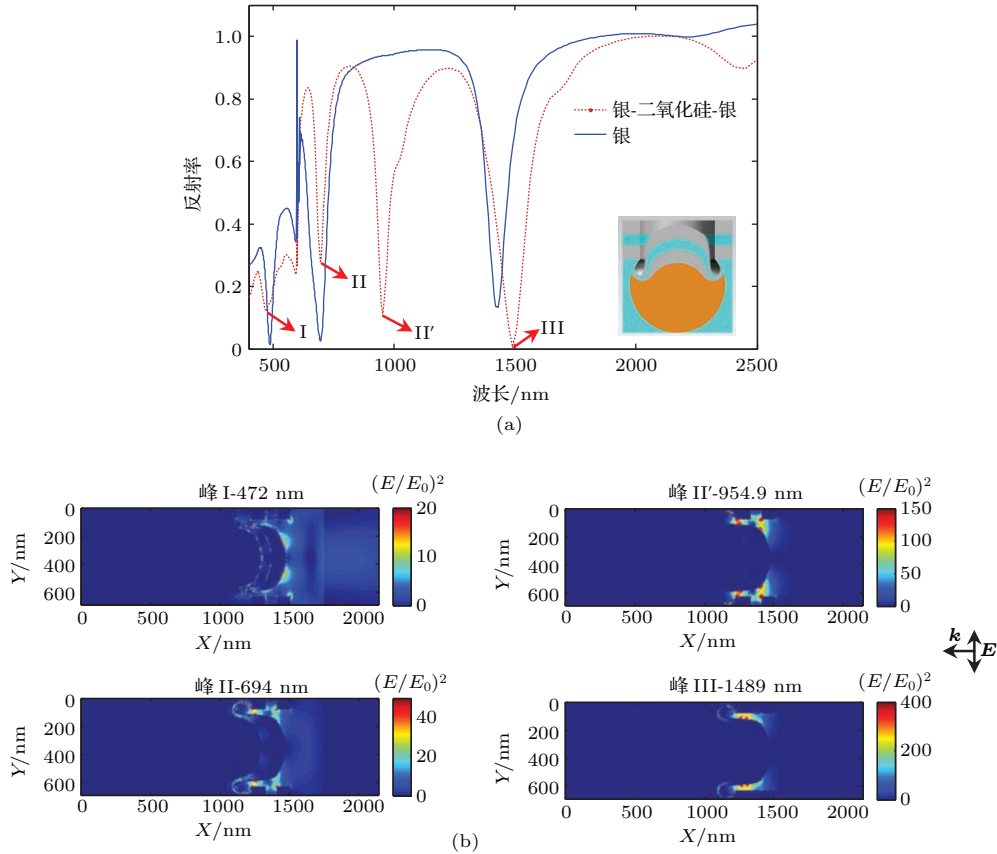


图9 (网刊彩色) 反射谱与截面电场强度分布 (a) 银-二氧化硅-银膜结构与单层银膜结构的反射谱线对比(内插图: 层叠结构截面图); (b) 层叠结构的截面电场强度分布

Fig. 9. (color online) Reflectance spectra and cross section of electric field distribution: (a) The reflectance spectrum comparison of silver-silica-silver film structure and single-silver film structure (Illustration: silver-silica-silver film structure cross section diagram); (b) the electric field distribution of silver-silica-silver film structure at the resonance peaks.

4 结 论

本文通过FDTD仿真计算,研究了环形狭缝腔阵列中的圆柱形表面等离子体谐振效应的形成机理.通过对比不同结构参数下结构所表现出的不同的光学特性,归纳出反射谱中吸收峰的变化规律.通过改变狭缝内径 r ,狭缝外径 R ,所镀银膜的厚度 t 以及结构所处的环境折射率 n ,发现吸收峰随着

狭缝内径 r 的增大、狭缝外径 R 的减小、银层厚度 t 的增大以及环境介质折射率 n 的增大,呈现一定规律的红移.通过改变柱状银帽的表面形状以及进行层叠式金属/介质的镀膜,会形成新的共振模式.验证了该模型对于入射光偏振角度的不敏感性以及相近特性镀膜材料的选择所表现出的光学稳定性.并且发现单个环形狭缝腔已具备能够激发CSPs谐振的特性,周期性的排列较单一结构而言只是吸收强度有所增加.

参考文献

- [1] Zhou W, Dridi M, Suh J Y, Kim C H, Co D T, Wasielewski M R, Schatz G C, Odom T W 2013 *Nat. Nanotech.* **8** 784
- [2] Hao F, Nordlander P 2007 *Phys. Rev. B* **76** 245417
- [3] Prodan E, Radloff C, Halas N J, Nordlander P 2003 *Science* **302** 419
- [4] Nordlander P, Prodan E 2004 *Nano. Lett.* **4** 899
- [5] Anker J N, Hall W P, Lyandres O, Shah N C, Zhao J, van Duyne R P 2008 *Nat. Mater.* **7** 442
- [6] Ren X P, Fan R H, Peng R W, Huang X R, Xu D H, Zhou Y, Wang M 2015 *Phys. Rev. B* **91** 045111
- [7] Homola J, Yee S S, Gauglitz G 1999 *Sens. Actuators B: Chem.* **54** 3
- [8] Subramania G, Foteinopoulou S, Brener I 2011 *Phys. Rev. Lett.* **107** 163902
- [9] Luo S, Fu T, Zhang Z Y 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 147303 (in Chinese) [罗松, 付统, 张中月 2013 物理学报 **62** 147303]
- [10] Zou W B, Zhou J, Jin L, Zhang H P 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 097805 (in Chinese) [邹伟博, 周骏, 金理, 张昊鹏 2012 物理学报 **61** 097805]
- [11] Zhu J, Ren Y J 2013 *Appl. Surf. Sci.* **285** 649
- [12] Heo C J, Kim S H, Jang S G, Lee S Y, Yang S M 2013 *Adv. Mater.* **21** 1726
- [13] Huang F M, Wilding D, Speed J D, Russell A E, Bartlett P N, Baumberg J J 2011 *Nano. Lett.* **11** 1221
- [14] Meinzer N, Barnes W L, Hooper I R 2014 *Nat. Photon.* **8** 889
- [15] Ren W Z, Dai Y M, Cai H B, Ding H Y, Pan N, Wang X P 2013 *Opt. Express* **21** 10251
- [16] Chris K J 2002 *Neuroscience* **22** 639
- [17] Zhang X M, Xiao J J, Zhang Q 2014 *Chin. Phys. B* **23** 017302
- [18] Hong X, Guo X B, Fang X, Li K, Ye H 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 178502 (in Chinese) [洪霞, 郭雄彬, 方旭, 李衍, 叶辉 2013 物理学报 **62** 178502]
- [19] Heshmat B, Li D 2011 *Opt. Express* **19** 5912
- [20] Ge D B, Yan Y B 2002 *Finite-Difference Time-Domain Method for Electromagnetic Waves* (3rd Ed.) (Xi'an: Xidian University Press) (in Chinese) [葛德彪, 闫玉波 2002 电磁波时域有限差分方法 (第3版) (西安: 西安电子科技大学出版社) 第25页]
- [21] Ni H B, Wang M, Shen T Y, Zhou J 2015 *ACS Nano* **9** 1913
- [22] Ma C S, Liu S Y 2006 *Optical Waveguide Mode Theory* (1st Ed.) (Jilin: Jilin University Press) (in Chinese) [马春生, 刘式慵 2006 光波导模式理论 (第1版) (吉林: 吉林电子科技大学出版社) 第305页]
- [23] Haftel M I, Schlockermann C, Blumberg G 2006 *Phys. Rev. B* **74** 235405

Finite difference time domain simulation of optical properties of annular cavity arrays*

Zhou Jing Wang Ming[†] Ni Hai-Bin Ma Xin

(Key Laboratory on Opto-Electronic Technology of Jiangsu Province, School of Physics Science and Technology, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

(Received 25 April 2015; revised manuscript received 31 July 2015)

Abstract

Optical properties of two-dimensional periodic annular cavity arrays in hexagonal packing are investigated by finite difference time domain simulation method in this paper. According to simulated reflectance/transmission spectra, electric field distribution and charge distribution, we confirm that multiple cylindrical surface plasmon resonances, which result in reflectance dips, can be excited in annular cavities by linearly polarized light. Mechanism of the cylindrical surface plasmons is investigated. A coaxial waveguide mode TE₁₁ is excited in the annular cavities and a Fabry-Perot resonance is fulfilled along the depth direction of the annular cavities at the resonance wavelengths. While the number of reflectance dips and wavelengths of these dips in reflectance spectra are dependent on the geometric sizes of the annular cavities, the periodicity and polarization of incident light do not affect their reflectance spectra dramatically. Incident light beams with resonant wavelengths are localized in annular cavities with large electric field increasing and dissipate gradually due to metal loss. Reflectance dips can be tuned from 350 to 2000 nm by adjusting geometric size parameters of the annular cavities, such as outer and inner radii of the annular gaps, gap sizes and metal film thickness values. Reflectance dips shift toward longer wavelength with increasing inner and outer radii of the annular gaps, metal film thickness and with reducing the gap distance. In addition, infiltrate liquids in the annular gaps will result in a shift of the resonance wavelengths, which makes the annular cavities good refractive index sensors. A refractive index sensitivity up to 1850 nm/RIU is demonstrated. The refractive index sensitivities of annular cavities can also be tuned by their geometric sizes. Annular cavities with large electric field enhancement and tunable cylindrical surface plasmons can be used as surface enhanced Raman spectra substrates, refractive index sensors, nano-lasers and optical trappers.

Keywords: cylindrical surface plasmons, finite difference time domain, ring cavity, two-dimensional periodical structure

PACS: 73.20.Mf, 78.67.-n, 61.46.-w

DOI: 10.7498/aps.64.227301

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61178044), the University Postgraduate Research and Innovation Project of Jiangsu Province, China (Grant No. KYLX_0723), and the Jiangsu Province Prospective Joint Research Project, China (Grant No. BE2008138).

[†] Corresponding author. E-mail: wangming@njnu.edu.cn