

文章编号: 1000-5862(2018)04-0389-04

# 基于金属/介质混合腔阵列结构的 偏振完美吸收及传感应用研究

李 聪, 喻思丹, 刘天长, 桑明煌\*

(江西师范大学物理与通信电子学院 江西省光电子通信重点实验室 江西 南昌 330022)

摘要: 提出一种完美吸收结构, 其包含一金衬底层, 上方为金圆柱与氧化铝长方柱镶嵌而成的金属/介质混合腔阵列. 模拟计算发现: 电场主要局域在金圆柱的边缘和氧化铝长方柱内部, 该结果表明偶极等离子体共振和等离子体激元腔模式是产生多频带完美吸收的主要机理. 该结构制作简单, 且其完美吸收具备偏振调控和对周围样品折射率变化高度灵敏, 这些特性有望为实现痕量检测提供一种简便方法.

关键词: 光学腔模; 偶极等离子体共振; 灵敏度; 偏振可调多带吸收

中图分类号: TN 253 文献标志码: A DOI: 10.16357/j.cnki.issn1000-5862.2018.04.12

## 0 引言

因等离激元能促使光电器件<sup>[1]</sup>向高紧凑型转变, 故其光学特性<sup>[2-3]</sup>的探索近年来得以不断深入. 在众多金属微纳结构中, 如层块状<sup>[4]</sup>、圆盘<sup>[5]</sup>、纳米颗粒<sup>[6]</sup>, 人们发现了异乎寻常的完美吸收现象, 即入射光除了被吸收外, 无反射、透射和散射. 此外, 等离激元的相互作用高度依赖于周围介质, 所以金属微纳结构非常适用于超灵敏监测周围介质折射率变化. 如基于晶格共振的金属-绝缘体-金属结构<sup>[7]</sup>, 实现了  $505.80 \text{ nm} \cdot \text{RIU}^{-1}$  的折射率灵敏度. 金属微纳结构一般也是偏振相关的, 然而结合其传感测量与偏振特性的综合分析文献甚少.

本文通过在不透明的金衬底上沉积金圆柱阵列, 且向金圆柱中嵌入氧化铝长方柱, 建立了一种基于金属/介质混合腔阵列结构的多频带完美吸收体. 模拟仿真发现: (i) 中心谱线吸收率接近 100%; (ii) 改变入射光的偏振角度, 可便利调控吸收率, 并能实现近乎完美吸收态和近乎完美反射态之间的相互转换; (iii) 吸收峰的中心波长会随周围介质折射率变化而相应移动. 上述特性表明, 本文所提出的金属/介质混合腔阵列结构可用于构建基于吸收的微型传感器和陷波滤波器<sup>[8-9]</sup>.

## 1 结构设计和仿真

如图 1(a) 所示, 金属/介质混合腔阵列结构包含 2 部分: 下方衬底为金 (Au) 薄膜, 厚度为  $h$ ; 上方为 2 维阵列, 每个阵列元由介质  $\text{Al}_2\text{O}_3$  长方柱嵌入金圆柱组成, 它们的高度均设为  $t$ , 金圆柱的直径设为  $D$ , 介质  $\text{Al}_2\text{O}_3$  长方柱的长和宽分别设为  $a$ 、 $b$ , 阵列周期设为  $P$ . 该结构的衬底可利用磁控溅射技术在玻璃片上镀金膜, 而金属/介质混合腔阵列可通过电子束光刻技术<sup>[10]</sup>和孔掩膜胶体光刻法<sup>[11]</sup>制备.

该结构的光学反射、吸收及其电场分布可由 3 维时域有限差分法<sup>[12]</sup>计算. 激励光源设为高斯型光源, 传播方向沿  $z$  轴负方向. 金和氧化铝的介电常数由 Palik<sup>[13]</sup>的实验数据拟合得出, 且结构参数分别为  $h = 100 \text{ nm}$ ,  $t = 500 \text{ nm}$ ,  $D = 440 \text{ nm}$ ,  $P = 470 \text{ nm}$  及  $a = b = 170 \text{ nm}$ . 为缩短计算时间,  $x$  和  $y$  方向设为周期性边界条件,  $z$  方向设为完美匹配层. 3 个方向上网格大小的尺寸设为  $1 \text{ nm}$ , 以此来保证计算的收敛. 因为金衬底厚度足以防止光透射, 所以吸收率可定义为  $A = 1 - R$ , 其中  $R$  为反射率.

金属/介质混合腔阵列结构的吸收 ( $A$ ) 和反射

收稿日期: 2018-01-22

基金项目: 国家自然科学基金(61505073, 61765008, 11764020), 江西省自然科学基金(20161ACB21011, 20161BAB212045) 和江西省教育厅科技课题(GJJ150313, GJJ160273)项目资助.

通信作者: 桑明煌(1965-), 男, 江西德安人, 教授, 主要从事导波光学和光纤激光器研究. E-mail: sangqdli@aliyun.com

( $R$ ) 光谱如图 1(b) 所示, 其中实线和虚线分别表示为吸收和反射. 在可见光和近红外光区域存在 4 个吸收峰, 所对应的中心波长分别为  $\lambda_1 = 720.2 \text{ nm}$ ,  $\lambda_2 = 818.6 \text{ nm}$ ,  $\lambda_3 = 913.8 \text{ nm}$ ,  $\lambda_4 = 1\,094.5 \text{ nm}$ . 相较而言, 第 2 个和第 3 个吸收峰的半高宽比第 1 个和第 4 个吸收峰的半高宽要窄, 而除了第 4 个吸收峰中心波长的吸收率为 83.9% 外, 其余 3 个中心波长的吸收率几乎接近 100%. 为更好理解近完美吸收的物理机理, 计算了 4 个中心波长下的电场强度分布, 图 2(a) ~ 图 2(d) 分别是在  $xoy$  平面氧化铝

长方柱顶部的电场强度分布, 图 2(e) ~ 图 2(h) 分别是在  $xoz$  平面上金圆柱体中心位置的电场强度分布. 在所有 4 个吸收峰的中心波长处, 电场均强烈地聚集在沿着光偏振方向的金属圆柱体边缘, 即其激发了偶极等离子体共振<sup>[14]</sup>. 图 2(e) 存在一个波节 (零光强), 归因于氧化铝长方柱激发了第一腔模式. 图 2(f) 强电场聚集在氧化铝长方体中, 这是因存在于 2 个氧化铝-金界面处的表面等离子体激元相互耦合而成. 对波长  $\lambda_3$  而言, 氧化铝长方柱中的电场模式可理解为 Mie 共振<sup>[15]</sup>.

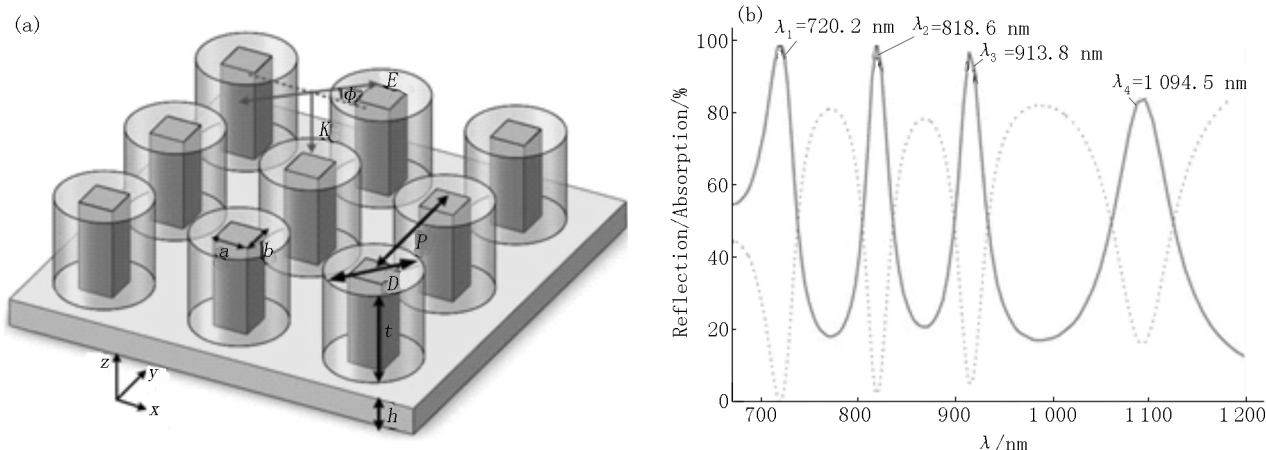
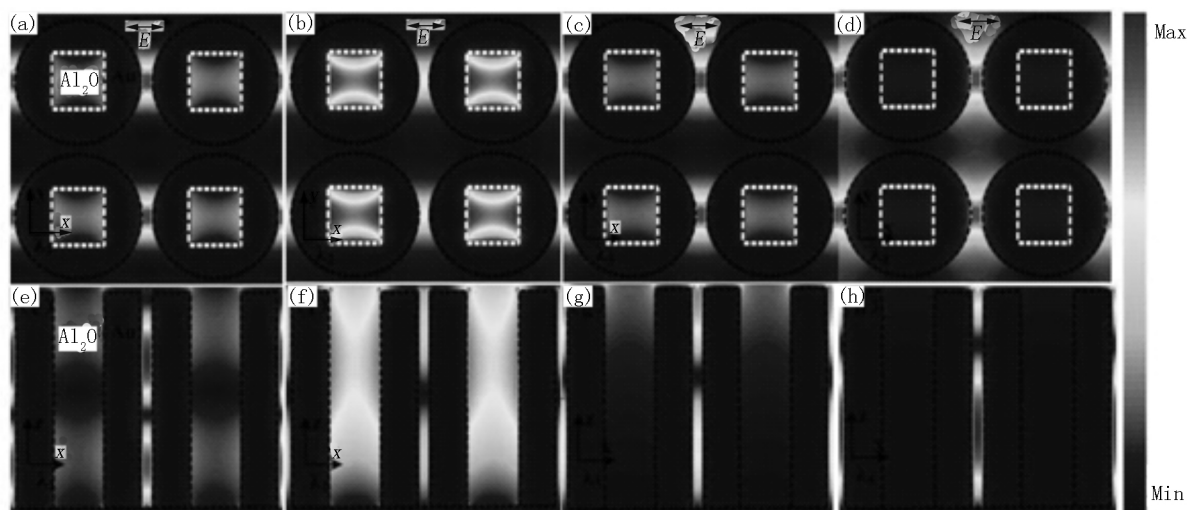


图 1 (a) 金属/介质混合腔阵列结构示意图 (b) 光学吸收和反射光谱图, 吸收率和反射率分别记为 (实线) 和 (虚线)



(a ~ d) 为  $xoy$  平面氧化铝长方柱顶部的电场强度分布, (e ~ h) 为平面上金圆柱体中心位置的电场强度分布.

图 2 各中心波长所对应的电场强度分布

近乎完美吸收的光学性质与金属/介质混合腔的尺寸大小紧密相联. 如图 3 所示, 改变氧化铝长方柱和金圆柱的高度  $t$ , 从 490 nm 变到 520 nm, 步长为 10 nm, 4 个吸收峰均有明显的红移. 该复合腔结构参数多, 可通过优化参数设计, 以得到所需要的近乎完美吸收.

## 2 偏振特性和传感应用

偏振相关的吸收特性可广泛运用到光学器件中. 为实现此特性, 打破结构对称性, 即保持其它参数不变, 将氧化铝长方柱的宽由 170 nm 改为 190 nm, 使长、宽不再相等. 将入射光的电场振动方向从  $x$  方向逐步变到  $y$  方向, 步长为  $15^\circ$ , 如图 4(a) 所示, 随着入射光偏振角度的改变, 各吸收峰呈现不同的变

化趋势.第1个吸收峰稍有红移,紧接着裂为2个吸

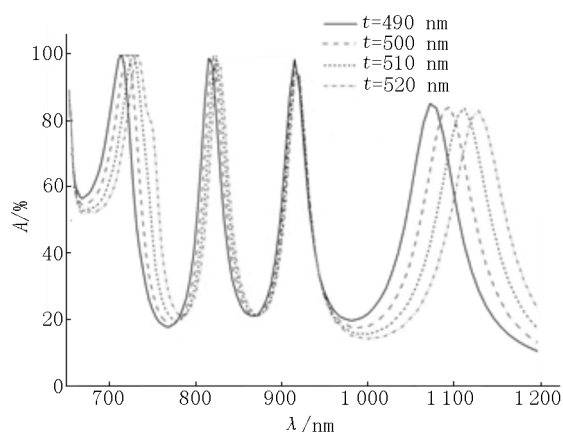


图3 不同高度金圆柱所对应的吸收谱线

收峰.相较于第1个吸收峰,第2个吸收峰的红移更加明显,其最大吸收率从99.6% ( $\varphi = 0^\circ$ ) 逐渐下降到73.1% ( $\varphi = 45^\circ$ ),然后增加到99.2% ( $\varphi = 90^\circ$ ).在第3个吸收峰,中心波长几乎不变,但最大吸收率从98.4% ( $\varphi = 0^\circ$ ) 逐渐下降为11.7% ( $\varphi = 90^\circ$ ).在第4个吸收峰中,中心波长和最大吸收率均保持不变.由此可知,通过改变入射光的偏振角,近乎完美吸收态和近

乎完美反射态可相互转换.为更方便展示偏振可控的吸收情况,图4(b)给出了正交偏振旋转下的吸收率差谱线,可见有3个吸收增强峰和2个吸收抑制峰.如在752.7 nm处,其吸收抑制率可达69.3%.

下面将氧化铝长方柱替换成液体样品,并将液体样品置于相邻金圆柱的间隙内,图5(a)为不同液体样品折射率的吸收光谱,折射率从1.30增加到1.36,变化间隔为0.02.吸收峰中心波长的变化情况如图5(b)所示,随液体样品折射率增加,中心波长会呈线性红移.折射率传感灵敏度可定义为中心波长变化与液体样品折射率变化之比,即  $S = \Delta\lambda / \Delta n$ ,其中  $\Delta\lambda$  为光谱位移,  $\Delta n$  为液体折射率变化.由图5(b)可知,最大折射率灵敏度可达  $(587.00 \pm 4.79)$  nm,其结果与文献[16]相当,并能进行痕量检测.例如若将葡萄糖溶液浓度增加1% ( $\Delta n = 0.0015$ ),中心波长的红移值可达0.88 nm.目前商用的光谱分析仪(Agilent 86146B)所能检测到的波长最小变化是2 pm<sup>[17]</sup>,可推断出所提吸收体的最小探测的折射率变化可低至  $3.407 \times 10^{-6}$  RIU.

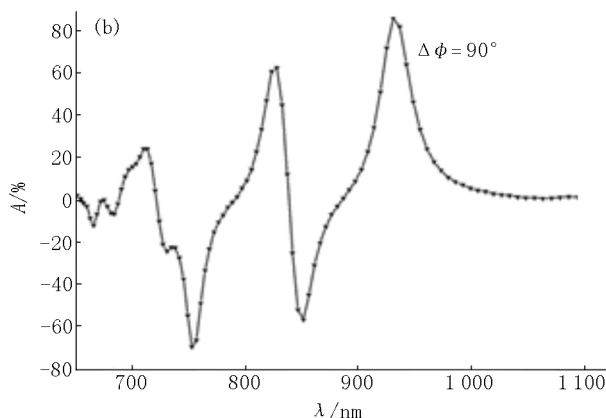
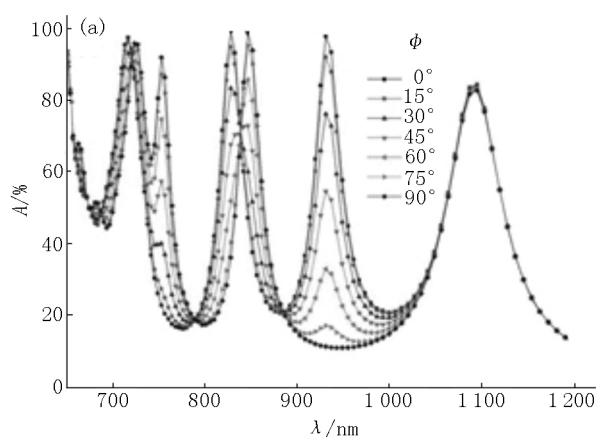


图4 (a) 旋转入射光偏振角所对应的吸收光谱, (b) 正交偏振旋转下结构的吸收率差谱线

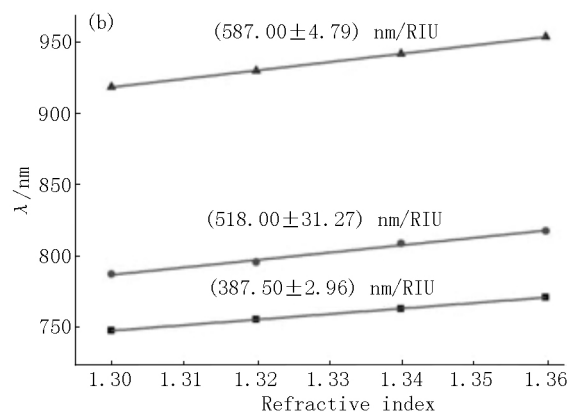
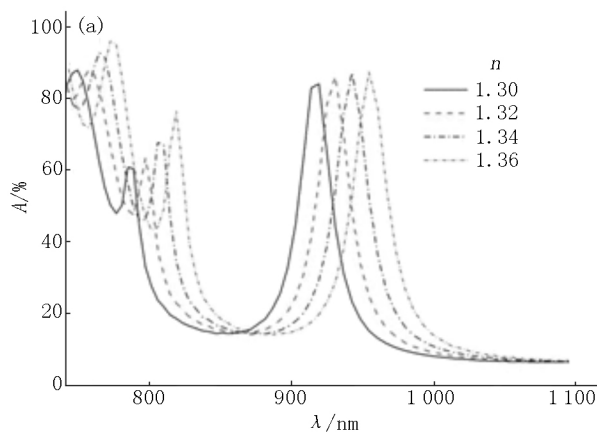


图5 (a) 不同折射率液体样品下入射光的吸收光谱与波长关系图, (b) 3条反射率谱线中心波长随液体样品折射率的变化关系图

### 3 结论

本文提出了一种改进型金属/介质混合腔阵列结构的近乎完美吸收体,其结构包含金衬底和氧化铝长方柱嵌入金圆柱的 2 维阵列. FDTD 模拟结果表明:多频带完美吸收的物理机制是由于激发等离子体腔模式和偶极等离子体共振. 通过打破结构的对称性和改变入射光的偏振角度,可实现近乎完美吸收态和近乎完美反射态间的相互转换. 最重要的是实现了对环境折射率变化的高灵敏度测量,其折射率灵敏度可达  $(587.00 \pm 4.79) \text{ nm}$ . 该结构的近乎完美吸收,可偏振调控和具有高折射率灵敏度等特性,在生物传感器和滤波器件中具备良好的应用前景.

### 4 参考文献

- [1] Chang D E ,Sorensen A S ,Demler EA ,et al. A single-photon transistor using nanoscale surface plasmons [J]. *Nature Physics* 2007 3(11):807-812.
- [2] Cui Yanxia ,He Yingran ,Jin Yi ,et al. Plasmonic and metamaterial structures as electromagnetic absorbers [J]. *Laser & Photonics Reviews* 2014 8(4):495-520.
- [3] Willets K A ,Van Duyne R P. Localized surface plasmon resonance spectroscopy and sensing [J]. *Annual Review of Physical Chemistry* 2007 58(1):267-297.
- [4] Aydin K ,Ferry V E ,Briggs R M ,et al. Broadband polarization-independent resonant light absorption using ultrathin plasmonic super absorbers [J]. *Nature Communications* 2011 2(1):517.
- [5] Liu Zhengqi ,Liu Guiqiang ,Wang Yan ,et al. Polarization-induced tunability of plasmonic light absorption in arrays of sub-wavelength elliptical disks [J]. *Plasmonics* 2016 11(1):79-86.
- [6] Wang Jing ,Chen Yiting ,Chen Xi ,et al. Photothermal reshaping of gold nanoparticles in a plasmonic absorber [J]. *Optics Express* 2011 19(15):14726-14734.
- [7] Lu Xiaoyuan ,Wan Rengang ,Zhang T. Metal-dielectric-metal based narrow band absorber for sensing applications [J]. *Optics Express* 2015 23:29842-29847.
- [8] 桑明煌 ,李新华 ,余子星. 基于对称金属包覆波导的高精度微位移测量 [J]. *江西师范大学学报:自然科学版* 2013 37(2):111-115.
- [9] Zhao Ding ,Meng Lijun ,Gong Hanmo ,et al. Ultra-narrow-band light dissipation by a stack of lamellar silver and alumina [J]. *Applied Physics Letters* 2014 104(22):207402.
- [10] Xiong Xiang ,Jiang Shangchi ,Peng Ruwen ,et al. Structured metal film as a perfect absorber [J]. *Advanced Materials* 2013 25(29):3994-4000.
- [11] Langhammer C ,Schwind M ,Kasemo B ,Zoric I. Localized surface plasmon resonances in aluminum nanodisks [J]. *Nano Letters* 2008 8(5):1461-1471.
- [12] Taflov A ,Hagness S C. Computational electrodynamics: the finite-difference time-domain method [EB/OL]. [2017-11-16]. <http://www.gbv.de/dms/ilmenau/toc/310485800.PDF>.
- [13] Palik E D. Handbook of optical constants of solids [J]. *Optica Acta International Journal of Optics* 1998 39(1):189-189.
- [14] Le F ,Brandl D W ,Urzhumov Y A ,et al. Metallic nanoparticle arrays: a common substrate for both surface-enhanced Raman scattering and surface-enhanced infrared absorption [J]. *ACS Nano* 2008 2(4):707-718.
- [15] Kuznetsov A I ,Miroshnichenko A E ,Brongersma M L ,et al. Optically resonant dielectric nanostructures [J]. *Science* 2016 354:2472.
- [16] Li Yulian ,An Bowen ,Jiang Shengming ,et al. Plasmonic induced triple-band absorber for sensor application [J]. *Optics Express* 2015 23(13):17607-17612.
- [17] Bahramipanah M ,Abrishamian M S ,Mirtaheria S A ,et al. Ultracompact plasmonic loop-stub notch filter and sensor [J]. *Sens Actuators B Chem* 2014 194(194):311-318.

## The Metal and Dielectric Hybrid Cavity Arrays for Polarization-Manipulated Multispectral Perfect Absorption and Sensitive Sensing

LI Cong ,YU Sidan ,LIU Tianchang ,SANG Minghuang\*

(College of Physics and Communication Electronics ,Jiangxi Key Laboratory of Optoelectronic and Telecommunication ,  
Jiangxi Normal University ,Nanchang Jiangxi 330022 ,China)

**Abstract:** A multispectral perfect absorber is proposed and demonstrated by utilizing a square array of an  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -cuboid intercalated with an Au-cylinder deposited on an opaque Au substrate. It is shown that the electric field is strongly localized in the corner region of Au cylinder and the inside area of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  cuboid ,namely ,the dipolar plasmon resonance and the plasmon cavity mode are the two primary reasons for the occurrence of perfect absorption. Moreover ,the absorption is polarization depended and highly sensitive to the refractive index variation of the surrounding sample. These findings could open a simplified alternative approach to achieve the practical trace detection.

**Key words:** optical cavity mode ; dipolar plasmon resonance ; sensitivity ; polarization-manipulated multispectral absorption

(责任编辑: 冉小晓)