

工字形椭圆纳米结构的吸收及其折射率敏感特性研究

旷依琴^{1,2}, 李刚^{1,2}, 闫竹青^{1,2}, 张彦军^{1,2*}, 张志东^{1,2}, 郝现伟³

¹中北大学仪器与电子学院, 山西, 太原 030051;

²中北大学电子测试技术国防科技重点实验室, 山西, 太原 030051;

³北京宇航系统工程研究院, 北京 100000

摘要 设计了一个由金纳米结构顶层、中间介质层和金属基底层构成的复合超材料结构。其中,金属纳米结构顶层是由三个椭圆形纳米盘所组成的“工”字形单元阵列,中间介质层是二氧化硅,金属基底层是金膜。利用有限元方法研究了该结构的吸收特性、电场分布及折射率传感特性。结果表明:该结构的吸收光谱中出现了三个吸收峰,其吸收率分别达到 91.06%、99.63%和 97.26%。此外,研究了结构参数和周围环境介质对吸收率的影响及其折射率变化的响应特性,折射率灵敏度最大达到 425 nm/RIU(RIU 为单位折射率),品质因数(FOM)为 14。这些研究将为基于表面等离激元超材料结构的完美吸收器用作折射率传感器提供理论指导。

关键词 表面光学; 表面等离激元; 完美吸收器; 有限元方法; 折射率传感器

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.1424001

Absorption and Refractive Index Sensitivity of the I-Shaped Elliptical Nanostructures

Kuang Yiqin^{1,2}, Li Gang^{1,2}, Yan Zhuqing^{1,2}, Zhang Yanjun^{1,2*},
Zhang Zhidong^{1,2}, Hao Xianwei³

¹School of Instrument and Electronics, North University of China, Taiyuan, Shanxi 030051, China;

²Science and Technology on Electronic Test and Measurement Laboratory, North University of China, Taiyuan, Shanxi 030051, China;

³Beijing Institute of Aerospace Engineering, Beijing 100000, China

Abstract In this study, a composite metamaterial structure comprising a gold-nanostructure top layer, an intermediate dielectric layer, and a metal base layer was proposed. An I-shaped cell array comprising three oval nanodisks is the top layer of the metamaterial nanostructure, silicon dioxide is the intermediate dielectric layer, and a gold film is the metal base layer. Herein, the absorption characteristics, electric field distribution, and refractive index sensitivity characteristics of the structure were studied via the finite element method. Thus, three absorption peaks can be observed, and the corresponding absorptions are observed to be 91.06%, 99.63%, and 97.26%. In addition, the influence of the structural parameters and surrounding media on the absorption and response characteristics with respect to the changes in the refractive index was studied. The maximum sensitivity is 425 nm/RIU (RIU is the refractive index unit), and the figure of merit is 14. This study would provide theoretical guidance for developing perfect absorbers by considering the surface plasmon metamaterial structure as a refractive index sensor.

Key words surface optics; surface plasmon; perfect absorber; finite element method; refractive index sensor

OCIS codes 240.6680; 260.3910; 260.5730; 260.5740

收稿日期: 2020-01-17; 修回日期: 2020-03-26; 录用日期: 2020-04-14

基金项目: 国家自然科学基金(61605177)、山西省重点研发计划(高新技术领域)(201803D121050)、山西省自然科学基金(201801D221212)、山西省“1331 工程”重点学科建设(1331KSC)

* E-mail: zhangyanjun@nuc.edu.cn

1 引 言

对于超材料完美吸收器,从频段来分,可以分为微波^[1]、太赫兹^[2-3]、红外^[4]、可见频带等频段的完美吸收器^[5];从吸收带宽角度来分,又可分为宽带完美吸收器和窄带完美吸收器。其中,宽带完美吸收器一般可应用于太阳能电池^[6-8],窄带吸收器可应用于传感器^[9-10]、成像^[11-12]和光探测器^[13]等方面。对于光波段的完美吸收器,近年来,受到研究者们广泛关注的是基于表面等离激元共振的超材料完美吸收器,其主要用于光学隐身^[14-15]和光学传感^[16-18]等方面。表面等离激元(SPs)是贵金属表面自由电子在入射光子的激发下而产生的一种集体振荡的电磁模式^[19]。SPs因具有局域电磁场的特性而使其具有突破传统光学衍射极限的能力和增强局域电磁场的特性^[19-20]。

近年来,随着表面等离激元光子学研究的不断深入,SPs在生物学^[21]、化学^[22-23]和材料学^[24]等诸多领域有着广泛的应用,其中最典型的就是其作为一种光子与电子的相互作用,对周围介质环境、贵金属纳米颗粒形状、尺寸等非常敏感。随着人工超表面/超材料结构的出现,SPs因其具有可重复性和可控性,在各个领域的应用更具前景^[25-27]。在人工超材料研究中发现,一些纳米结构对入射光的吸收不但效率高且具有窄带宽的特点。基于光学共振的传感器中,光谱带宽或品质因数(FOM, f_{FOM})是光学共振传感器非常重要的一个指标参数,即 FOM 越高,该传感器的灵敏度越高^[28-31]。因此,基于窄带宽、高吸收、高 FOM 的超材料结构用于高灵敏折射率传感研究受到了研究者的极大关注,各种结构的超材料结构被设计并研究,如纳米圆盘^[32]、纳米圆

环^[33]、三重嵌套的半方形裂环^[34]等。2010年,刘等^[9]设计了以金为基底、氟化镁为介质层、金纳米圆盘结构的吸收器,该结构的吸收率达到 99%,但是其吸收带宽在 40 nm 以上,相对较宽,使得 FOM 降低,限制了其在传感器方面的应用。2015年, Lu 等^[35]设计了以金为基底、二氧化硅为介质层、金属纳米棒阵列的吸收器,并研究了其在传感器方面的应用,研究表明,该结构的吸收率达到 95%,带宽、灵敏度和 FOM 分别为 8 nm、190 nm/RIU(RIU 为单位折射率)和 25,实现了窄带宽、高吸收的特点,但是灵敏度较低。2018年, Rifat 等^[36]提出的一种以二氧化硅为基底、金为介质层、顶部为非晶硅纳米盘阵列的吸收器,其吸收率达到 99.8%,最大灵敏度为 350 nm/RIU,但是基于等离子体完美吸收器的传感特性仍可进一步优化。

本文提出一种工字形椭圆盘纳米超材料结构,该超材料结构由顶层的周期性阵列纳米结构、中间的介质层和底层的金属反射层所组成。其中顶层周期性结构单元结构由三个椭圆形金纳米盘以工字的形式排列构成,中间层为二氧化硅材料,底层为金膜。采用有限元方法研究了其吸收光谱特性、共振峰处的电场分布以及折射率传感特性,进而研究了结构参数变化对吸收光谱特性和折射率传感特性的影响,这些研究将为超材料结构在光学隐身和折射率传感器方面的应用提供参考。

2 结构与计算方法

本文设计的吸收器由厚度为 t_1 的金作为基底,厚度为 t_2 的二氧化硅作为介质层,“工”字型金椭圆盘周期性阵列作为顶层组成,椭圆盘阵列结构是周期性的,具有相同的周期 P ,如图 1(a)所示。阵

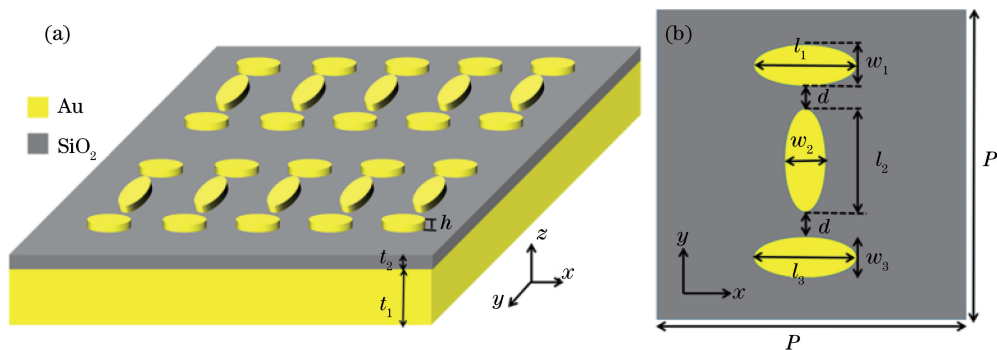


图 1 吸收器结构示意图。(a)椭圆盘完美吸收器三维示意图;(b)结构单元俯视图

Fig. 1 Schematic diagram of absorber structure. (a) Three-dimensional illustration of an oval disc perfect absorber; (b) top view of unit cell

列单元结构如图 1(b)所示, 竖直和水平椭圆纳米盘之间的间距均为 d , 椭圆盘的长轴分别为 l_1, l_2 和 l_3 , 短轴分别为 w_1, w_2 和 w_3 , 其高度均为 h 。平面波沿 z 轴负方向入射, 沿 y 方向极化, x 和 y 方向设置为周期性边界条件, 并且在 z 方向上使用完美匹配层(PML)。金的介电函数为 Johnson 模型, 中间二氧化硅层的介电常数设定为 2.07。吸收率 $A=1-R-T$, 其中 R 代表反射率, T 代表透射率。本文运用有限元方法分析完美吸收器的吸收特性, 所有实验数据均由 COMSOL Multiphysics 5.2a 测得。另外, 本文还研究了该超表面结构的折射率传感器的传感特性, 其中灵敏度 S 和品质因数 f_{FOM} 定义如下: $S=\delta\lambda/\delta n$, 其中 $\delta\lambda$ 是与折射率变化 δn 对应的波长变化; $f_{\text{FOM}}=S/\omega_{\text{FWHM}}$, 其中 ω_{FWHM} 称之为半峰全宽, 是指在吸收光谱位于 1/2 峰值点的波长差。

3 结果与讨论

3.1 吸收特性

基于表面等离激元超结构的窄带吸收器的吸收机理主要由以下两方面决定: 1) 当入射光照射到结构表面时, 尽量使反射率 R 为 0, 即调整阻抗匹配。由于 $R=|S_{11}|^2$, S_{11} 越小, 反射率越低。反射系数可表示为: $S_{11}=(Z_1-Z_0)/(Z_1+Z_0)=(\sqrt{\mu_1\epsilon_1}-\sqrt{\mu_0\epsilon_0})/(\sqrt{\mu_1\epsilon_1}+\sqrt{\mu_0\epsilon_0})$, 其中 Z_0 表示自由空间的阻抗, μ_0 和 ϵ_0 分别表示自由空间的磁导率和介电常数, Z_1 表示超表面的等效阻抗, μ_1 和 ϵ_1 分别表示超表面的磁导率和介电常数。因此, 当 $Z_1=Z_0$ 时, 反射率趋于 0。2) 当入射光照射到结构表面时, 尽量使透射率 T 为 0, 即减少电磁损耗。由于 $T=|S_{21}|^2$, S_{21} 越小, 透射率越低。透射系数可表示为: $S_{21}=\exp[i(n_1-1)kd]/\exp(n_2kd)$, 其中 d 为吸收超材料的厚度, n 为复折射参数($n=n_1+in_2$), $k=\omega/c$, c 为真空中的光速, ω 为入射光的角频率。因此, 当 n_2 越大, 透射越小, 透射率趋于 0。

图 2 给出了该吸收器结构在有金基底(实线)和没有金基底(虚线)的吸收谱线。相应的结构参数如下: 周期 $p=540$ nm; 基底金厚度 $t_1=50$ nm; 二氧化硅介质层厚度 $t_2=30$ nm; 椭圆盘纳米柱高 $h=100$ nm, 长轴 $l_1=l_2=l_3=120$ nm, 短轴 $w_1=w_2=w_3=50$ nm, 两个相邻纳米椭圆盘的间距 $d=30$ nm。对于有金基底的结构, 其吸收光谱中出现三个明显的共振峰, 其共振波长分别为

580 nm(I)、670 nm(II)和 810 nm(III), 对应的吸收率分别为 91.06%、99.63%和 97.26%。对于没有金基底的结构, 在波长为 655 nm(IV)处出现一个波峰, 其吸收率为 43.33%。该结果表明金基底在吸收器结构中具有至关重要的作用。

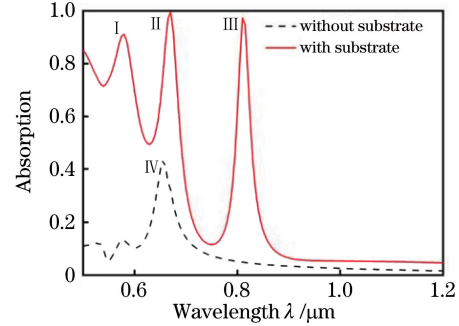


图 2 有金基底(实线)和无金基底(虚线)时的吸收光谱
Fig. 2 Absorption spectra with gold substrate (solid line) and without gold substrate (dotted line)

为研究该结构产生吸收峰的物理机制以及基底对其吸收率的影响, 分别计算了吸收谱中位置 I、II、III、IV 处在 xy 平面和 yz 平面上的电场分布。当 $\lambda=0.58$ μm (I) 时, 其电场辐射主要分布在竖直椭圆盘的两端、水平椭圆盘的上下两侧及它们之间的间隙, 如图 3(a)、(e) 所示, 这说明此处的吸收峰主要是由每个椭圆盘的偶极振荡及其之间的近场耦合作用所致。当 $\lambda=0.67$ μm (II) 时, 其电场辐射主要分布在竖直椭圆盘的两端及其与水平椭圆盘的间隙, 如图 3(b)、(f) 所示, 这说明此处的吸收峰主要是由竖直椭圆盘的偶极振荡及其与水平椭圆盘的近场耦合作用所致。当 $\lambda=0.81$ μm (III) 时, 其电场辐射主要分布在竖直椭圆盘的两端, 如图 3(c)、(g) 所示, 这说明此处的吸收峰主要是由竖直椭圆盘的偶极振荡所致。当 $\lambda=0.655$ μm (IV) 时, 其电场辐射主要分布在竖直椭圆盘的两端及其与水平椭圆盘的间隙, 如图 3(d)、(h) 所示, 这说明此处的吸收峰主要是由竖直椭圆盘的偶极振荡及其与水平椭圆盘的近场耦合作用所致。此外, 对比图 3(a)~(d), 可以明显看出在不同位置处发生的局域等离激元共振强度不同, 其中 IV 处的共振强度明显弱于其他三处; 这是由于 IV 处没有金膜作为反射镜, 入射光极易透射, 因此其对应的吸收峰值也较低。综上分析, 该吸收器接近完美吸收是因为: 在入射光作用下可产生局域表面等离激元共振, 引起局域场增强; 基底的反射作用使得入射光可以在基底和介质层之间来回反射, 足以保证充分吸收。

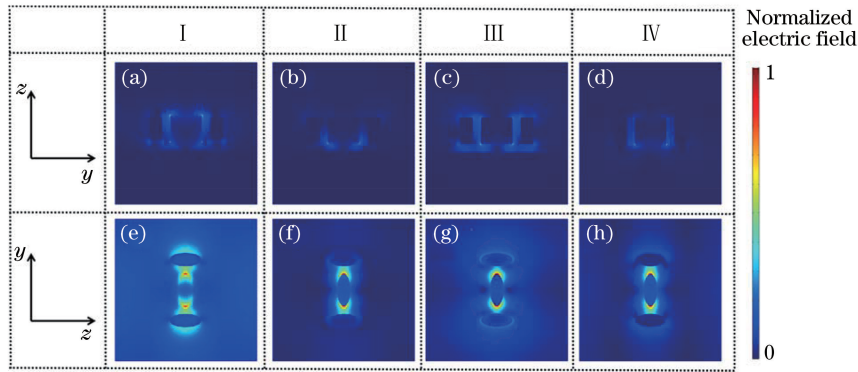


图 3 不同波长处的电场分布。(a)~(d)对应波长 I、II、III 和 IV 处在 yz 平面电场分布；
(e)~(h)对应波长 I、II、III 和 IV 处在 xy 平面电场分布

Fig. 3 Electric field distributions at different wavelengths. (a)–(d) Electric field distributions in the yz plane corresponding to the wavelengths I, II, III, and IV, respectively; (e)–(h) electric field distributions in the xy plane corresponding to the wavelengths I, II, III, and IV, respectively

吸收器的部分结构参数对吸收光谱的影响如图 4(a)~(d)所示。为研究三个椭圆盘之间的垂直距离 d 对吸收光谱的影响,研究了 $h=100$ nm, $l_1=l_2=l_3=120$ nm, $w_1=w_2=w_3=50$ nm, $p=540$, $t_2=30$ nm, $t_1=50$ nm 时, d 从 10 nm 变化到 40 nm 的吸收谱,如图 4(a)所示。随着 d 的增加,椭圆盘之间的近场耦合减弱,吸收光谱中每个吸收峰都出现蓝移现象。为研究三个椭圆盘的柱高 h 对吸收光谱的影响,研究了 $d=30$ nm, h 从 70 nm 变化到 130 nm 的吸收谱(其余结构参数与图 4(a)相同),如图 4(b)所示。随着 h 的增加,吸收光谱中的每个吸收峰出现红移。此外, I 处的吸收率随着

h 的增加明显提高, II 处的吸收率随着 h 的增加先增大后减小, III 处的吸收率随着 h 的增加而降低。为研究一个水平放置的椭圆盘短轴 w_1 对吸收光谱的影响,研究了 $d=30$ nm, w_1 从 50 nm 变化到 120 nm 的吸收谱(其余结构参数与图 4(a)相同),如图 4(c)所示。随着 w_1 的增加,吸收光谱中的吸收峰略微红移,同时在 I 和 II 之间、II 和 III 之间又产生了新的吸收峰。图 4(d)和 (e)分别为仅改变一个水平放置的椭圆盘长轴 l_1 和仅改变竖直放置的椭圆盘短轴 w_2 对吸收光谱的影响,从图中可以看出吸收谱几乎不发生变化,这是由于光沿着 y 轴方向极化,因此 l_1 和 w_2 的变化对吸收光谱的位置、峰

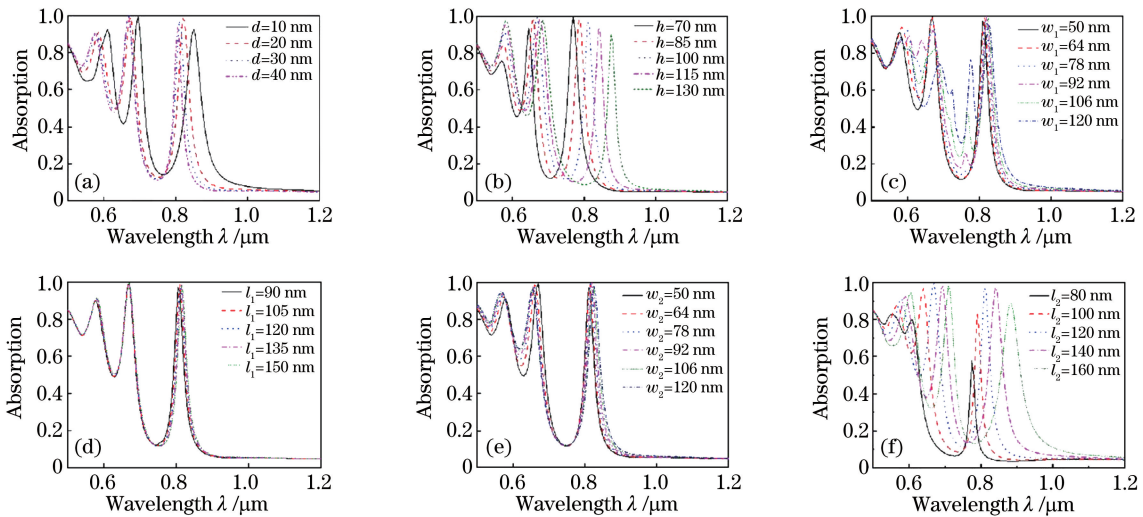


图 4 不同结构参数对吸收光谱的影响。(a)不同间距 d ; (b)不同柱高 h ; (c)不同短轴 w_1 ;
(d)不同长轴 l_1 ; (e)不同短轴 w_2 ; (f)不同长轴 l_2

Fig. 4 Effects of different structural parameters on absorption spectra. (a) Different distances d ; (b) different column heights h ; (c) different short axes w_1 ; (d) different major axes l_1 ; (e) different minor axes w_2 ; (f) different major axes l_2

值和吸收率几乎没有影响。为研究竖直放置的椭圆盘长轴 l_2 对吸收光谱的影响,研究了在 $d = 30 \text{ nm}$, l_2 从 80 nm 变化到 160 nm 的吸收谱(其余结构参数与图 4(a)相同),如图 4(f)所示。随着 l_2 的增加,吸收光谱中所有吸收峰明显红移。此外, I 处的吸收率随着 l_2 的增加略微提高; III 处的吸收率当 l_2 处在 $100 \sim 120 \text{ nm}$ 时变化不大,当 $l_2 = 80 \text{ nm}$ 时较低; III 处的吸收率随着 l_2 的增加而先增加后降低($l_2 = 120 \text{ nm}$ 时吸收率达到最高值)。

改变吸收器旋转角度 θ 对吸收光谱的影响如图 5(a)所示,其中 $h = 100 \text{ nm}$, $l_1 = l_2 = l_3 = 120 \text{ nm}$, $w_1 = w_2 = w_3 = 50 \text{ nm}$, $p = 540$, $t_2 = 30 \text{ nm}$, $t_1 = 50 \text{ nm}$ 时, $d = 30 \text{ nm}$, θ 从 0° 变换到 90° 。

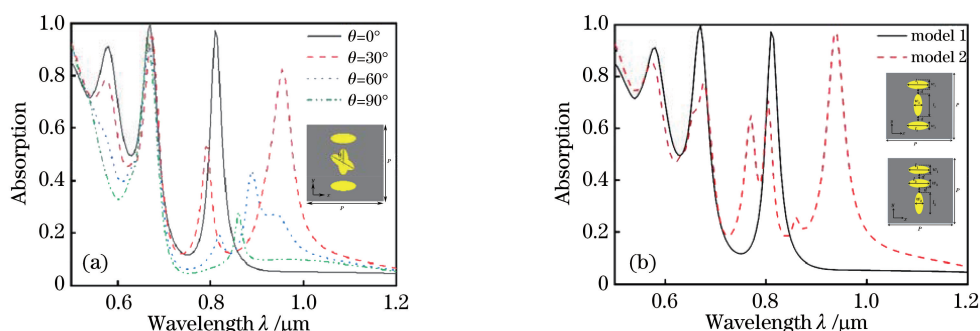


图 5 不同角度和不同结构对吸收光谱的影响。(a)不同角度;(b)不同结构

Fig. 5 Effects of different angles and structures on absorption spectra. (a) Different angles; (b) different structures

3.2 折射率敏感特性

由于窄带超表面吸收器结构表面会产生等离子体,当自由电子和光子频率相同时,将产生等离激元共振现象,电场增强,此时入射光的反射率下降直至趋于 0,且入射光均被结构吸收,因此,其会产生窄带吸收峰。表面等离子体对折射率变化十分敏感,吸收器的共振峰会随着折射率的变化而变化,因此,

随着角度的增大, I 处吸收率逐渐减小直至波峰消失(60° 波峰消失); II 处吸收率略微减小,波峰位置无明显变化; III 处吸收率逐渐减小直至波峰消失(90° 波峰消失);在波长 $0.81 \mu\text{m}$ 之后(即 III 处后),当角度为 0° 时,没有波峰,随着角度增大,吸收率逐渐减小并出现蓝移现象。图 5(b)是工字型结构(model 1)和改变其结构层排列顺序(model 2)的情况下吸收光谱图, model 1 出现 3 个吸收峰且这 3 个吸收峰的吸收率都在 90% 以上,吸收率分别为 91.06%、99.63% 和 97.26%; model 2 出现 5 个吸收峰,其中在波长 $0.94 \mu\text{m}$ 处 97.18%,其余波峰处的吸收率均在 90% 以下。因此,本文提出的工字型结构比改变其结构层排列顺序的吸收效果更好。

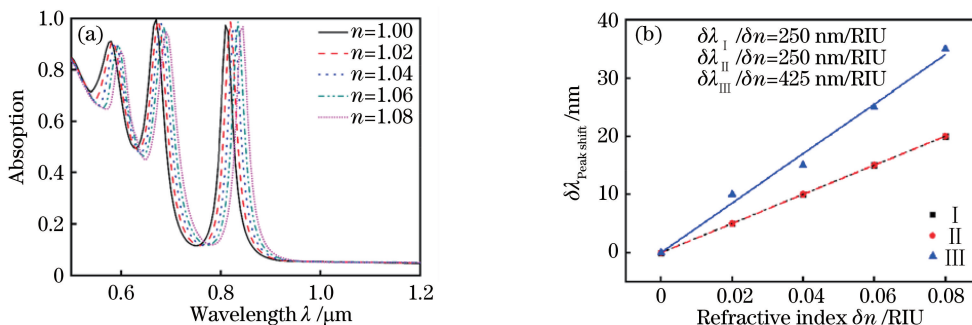


图 6 外界环境折射率对吸收光谱的影响。(a)不同外界环境折射率 n 下椭圆盘的吸收光谱;
(b)外界环境折射率 n 的变化与吸收光谱波峰位置的变化情况的关系图

Fig. 6 Effect of external environment refractive index n on absorption spectra. (a) Different external environment refractive index n ; (b) relationship between the change of the external environment refractive index n and the change of the peak position of the absorption spectra

可知,随着折射率的增大,吸收光谱整体出现红移,同时在谐振波长处都能保持较高的吸收率,该吸收器对折射率变化非常敏感。图 6(b)是外界环境折射率 n 的变化与吸收光谱波峰位置的变化情况的关系图,拟合直线的斜率为该吸收器用作传感器时的灵敏度。当外界折射率从 1.00 变化到 1.08 时, I 处谐振波长从 580 nm 增加到 600 nm, II 处谐振波长从 670 nm 增加到 690 nm, III 处谐振波长从 810 nm 增加到 845 nm。根据灵敏度 $S = \delta\lambda/\delta n$, $f_{\text{FOM}} = S/\omega_{\text{FWHM}}$, 可以计算出 I、II 处灵敏度为 250 nm/RIU, III 处灵敏度为 425 nm/RIU, 且 III 处 ω_{FWHM} 为 31 nm, $f_{\text{FOM}} = 14$ 。

4 结 论

设计了一种工字形椭圆纳米盘超材料结构窄带完美吸收器,用有限元方法研究了吸收器的光谱特性、共振峰处的电场分布以及其折射率传感特性,并分析了结构参数对吸收光谱和传感特性的影响。本文所设计的吸收器具有高吸收特性有以下三方面的原因:当入射光垂直照射到吸收器表面时,结构层的工字形椭圆盘之间的相互作用,使得局域电场增强;结构层和介质层之间产生局域等离激元共振,使得电场增强;吸收器的基底能够对入射光进行反射,将光局域在介质层和基底之间,极大地提高了吸收器的吸收率。通过结构参数的变化可以调整吸收器的吸收率、波峰位置及其传感特性,本文设计的吸收器具有三个吸收峰,在波长分别为 580 nm (I)、670 nm (II) 和 810 nm (III) 处,其吸收率分别达到 91.06%、99.63% 和 97.26%, 其中在 III 处吸收器的灵敏度达到 425 nm/RIU, $f_{\text{FOM}} = 14$ 。因此,本文设计的工字形椭圆纳米盘超材料结构窄带完美吸收器,为等离激元超表面结构在光学隐身和折射率传感器方面提供了重要的参考价值。

参 考 文 献

- [1] Meshram M R, Agrawal N K, Sinha B, et al. Characterization of M-type barium hexagonal ferrite-based wide band microwave absorber[J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2004, 271 (2/3): 207-214.
- [2] Ma Y, Chen Q, Grant J, et al. A terahertz polarization insensitive dual band metamaterial absorber[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(6): 945-947.
- [3] Cui Z J, Wang Y, Zhu D Y, et al. Perfect absorption conditions and absorption characteristics of terahertz

metamaterial absorber [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(6): 0614023.

崔子健, 王玥, 朱冬颖, 等. 太赫兹超材料吸收器的完美吸收条件与吸收特性[J]. *中国激光*, 2019, 46(6): 0614023.

- [4] Zhao L, Liu H, He Z H, et al. Theoretical design of twelve-band infrared metamaterial perfect absorber by combining the dipole, quadrupole, and octopole plasmon resonance modes of four different ring-strip resonators [J]. *Optics Express*, 2018, 26 (10): 12838-12851.
- [5] Li M L, Muneer B, Yi Z X, et al. A broadband compatible multispectral metamaterial absorber for visible, near-infrared, and microwave bands [J]. *Advanced Optical Materials*, 2018, 6(9): 1701238.
- [6] Boström T, Wäckelgård E, Westin G. Solution-chemical derived nickel-alumina coatings for thermal solar absorbers[J]. *Solar Energy*, 2003, 74(6): 497-503.
- [7] Stranks S D, Eperon G E, Grancini G, et al. Electron-hole diffusion lengths exceeding 1 micrometer in an organometal trihalide perovskite absorber[J]. *Science*, 2013, 342(6156): 341-344.
- [8] Yin W J, Shi T T, Yan Y F. Unusual defect physics in CH₃NH₃PbI₃ perovskite solar cell absorber[J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 104(6): 063903.
- [9] Liu N, Mesch M, Weiss T, et al. Infrared perfect absorber and its application as plasmonic sensor[J]. *Nano Letters*, 2010, 10(7): 2342-2348.
- [10] Wu D, Liu Y M, Li R F, et al. Infrared perfect ultra-narrow band absorber as plasmonic sensor[J]. *Nanoscale Research Letters*, 2016, 11: 483.
- [11] Alves F, Grbovic D, Kearney B, et al. Microelectromechanical systems bimaterial terahertz sensor with integrated metamaterial absorber [J]. *Optics Letters*, 2012, 37(11): 1886-1888.
- [12] Ullah H, Khan A D, Noman M, et al. Novel multi-broadband plasmonic absorber based on a metal-dielectric-metal square ring array [J]. *Plasmonics*, 2018, 13(2): 591-597.
- [13] Chalabi H, Schoen D, Brongersma M L. Hot-electron photodetection with a plasmonic nanostripe antenna[J]. *Nano Letters*, 2014, 14(3): 1374-1380.
- [14] Salisbury W W. Absorbent body for electromagnetic waves: US 2599944[P]. 1952.
- [15] Schurig D, Mock J J, Justice B J, et al. Metamaterial electromagnetic cloak at microwave frequencies [J]. *Science*, 2006, 314(5801): 977-980.
- [16] Cheng F, Yang X D, Gao J. Enhancing intensity and refractive index sensing capability with infrared plasmonic perfect absorbers [J]. *Optics Letters*,

- 2014, 39(11): 3185-3188.
- [17] Wang H L, Qin J, Kang T T, et al. Magneto-optical surface plasmon resonance and refractive index sensor based on Au/Ce: YIG/TiN structure [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(20): 202403.
王会丽, 秦俊, 康同同, 等. 基于 Au/Ce: YIG/TiN 结构的磁光表面等离子共振及折射率传感器研究 [J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(20): 202403.
- [18] Xu Y, Bian J, Zhang W H. Principles and processes of nanometric localized-surface-plasmonic optical sensors [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(20): 202407.
徐娅, 边捷, 张伟华. 局域表面等离子元纳米光学传感器的原理与进展 [J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(20): 202407.
- [19] Barnes W L, Dereux A, Ebbesen T W. Surface plasmon subwavelength optics [J]. *Nature*, 2003, 424(6950): 824-830.
- [20] Zayats A V, Smolyaninov I I, Maradudin A A. Nano-optics of surface plasmon polaritons [J]. *Physics Reports*, 2005, 408(3/4): 131-314.
- [21] Ly-Gagnon D S, Balram K C, White J S, et al. Routing and photodetection in subwavelength plasmonic slot waveguides [J]. *Nanophotonics*, 2012, 1(1): 9-16.
- [22] Bagheri S, Strohfeldt N, Sterl F, et al. Large-area low-cost plasmonic perfect absorber chemical sensor fabricated by laser interference lithography [J]. *ACS Sensors*, 2016, 1(9): 1148-1154.
- [23] Yoo M, Kim H K, Lim S. Electromagnetic-based ethanol chemical sensor using metamaterial absorber [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2016, 222: 173-180.
- [24] Kats M A, Sharma D, Lin J, et al. Ultra-thin perfect absorber employing a tunable phase change material [J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 101(22): 221101.
- [25] Wang B X, Zhai X, Wang G Z, et al. A novel dual-band terahertz metamaterial absorber for a sensor application [J]. *Journal of Applied Physics*, 2015, 117(1): 014504.
- [26] Xiao D, Tao K Y, Wang Q. Ultrabroadband mid-infrared light absorption based on a multi-cavity plasmonic metamaterial array [J]. *Plasmonics*, 2016, 11(2): 389-394.
- [27] Zhu L, Zhao X, Miao F J, et al. Dual-band polarization convertor based on electromagnetically induced transparency (EIT) effect in all-dielectric metamaterial [J]. *Optics Express*, 2019, 27(9): 12163-12170.
- [28] Cong L Q, Tan S Y, Yahiaoui R, et al. Experimental demonstration of ultrasensitive sensing with terahertz metamaterial absorbers: a comparison with the metasurfaces [J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 106(3): 031107.
- [29] Sreekanth K V, ElKabbash M, Alapan Y, et al. A multiband perfect absorber based on hyperbolic metamaterials [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 26272.
- [30] Li R F, Wu D, Liu Y M, et al. Infrared plasmonic refractive index sensor with ultra-high figure of merit based on the optimized all-metal grating [J]. *Nanoscale Research Letters*, 2017, 12: 1.
- [31] Huang H L, Xia H, Guo Z B, et al. Dynamically tunable dendritic graphene-based absorber with thermal stability at infrared regions [J]. *Applied Physics A*, 2018, 124(6): 429.
- [32] Xu H X, Hu L Z, Lu Y X, et al. Dual-band metamaterial absorbers in the visible and near-infrared regions [J]. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2019, 123(15): 10028-10033.
- [33] Wang S, Sun X H, Ding M J, et al. The investigation of an LSPR refractive index sensor based on periodic gold nanorings array [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2018, 51(4): 045101.
- [34] Xu J, Zhao Z Y, Yu H C, et al. Design of triple-band metamaterial absorbers with refractive index sensitivity at infrared frequencies [J]. *Optics Express*, 2016, 24(22): 25742-25751.
- [35] Lu X Y, Zhang L X, Zhang T Y. Nanoslit-microcavity-based narrow band absorber for sensing applications [J]. *Optics Express*, 2015, 23(16): 20715-20720.
- [36] Rifat A, Rahmani M, Xu L, et al. Hybrid metasurface based tunable near-perfect absorber and plasmonic sensor [J]. *Materials*, 2018, 11(7): 1091.