

基于磁激元的嵌套环超材料吸波器的吸收特性

毛前军*, 冯春早

武汉科技大学城市建设学院, 湖北 武汉 430065

摘要 多频段超材料完美吸波器的设计在多色光学领域具有重要意义。提出一种多频段金属-绝缘层-金属超材料吸波器,其表面电磁响应单元为三圈嵌套的金属环阵列,采用时域有限差分方法计算结构单元的吸收光谱和电磁场密度分布。结果表明:该结构单元在 1.44, 2.28, 3.25 μm 处分别实现了 98.5%、99.6% 和 99.9% 的吸收率,物理机理为磁激元共振激发。系统分析结构几何参数对共振的影响,通过改变金属环的直径和高度,可以对不同的共振进行独立调控。该结构单元的吸收光谱对入射光极化角度具有良好的稳健性。并进一步分析了超材料吸波器的传感特性,其最大品质因数高达 8.3 RIU^{-1} (RIU 为折射率单元),对应的灵敏度为 1.08 $\mu\text{m} \cdot \text{RIU}^{-1}$,表现出优良的红外传感性能。该吸波器可应用于传感领域,亦可为其他超材料的设计带来新启示。

关键词 材料; 吸波器; 超材料; 磁激元共振

中图分类号 TK51

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.0816001

Absorptance Properties of Nested-Ring Metamaterial Absorbers Based on Magnetic Polaritons

Mao Qianjun*, Feng Chunzao

School of Urban Construction, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430065, China

Abstract The design of multi-band metamaterial perfect absorbers is of great significance in the field of multi-color optics. In this study, a multi-band metal-insulator-metal metamaterial absorber is designed. Its surface electromagnetic response unit is a three-loop nested metal ring array. The finite-difference time-domain method is used to calculate the absorption spectra and electromagnetic field density distributions of the unit. The results show three absorption peaks at 1.44, 2.28, and 3.25 μm with maximal absorptivity of 98.5%, 99.6%, and 99.9%, respectively. The physical mechanism for these peaks is ascribed to the excitation of magnetic polaritons. The influence of the structural geometric parameters on the resonance is systematically analyzed. By altering the height and outer diameter of metal rings, different resonance wavelengths can be independently tuned. The absorption spectra of the structure are very robust to the polarization angle of incident light. In addition, the refractive index infrared sensing performance of the metamaterial absorber is examined. It is found that the structure exhibits excellent performance for refractive index sensing. The maximum figure of merit can reach 8.3 RIU^{-1} (RIU is the refractivity unit), and the corresponding sensitivity reaches 1.08 $\mu\text{m} \cdot \text{RIU}^{-1}$. The proposed absorber can be applied to the sensing field and provide new insights for the design of other metamaterials.

Key words material; absorbers; metamaterial; magnetic polaritons resonance

OCIS codes 160.3918; 230.3990; 350.2450; 240.5420

1 引 言

超材料是指通过设计特定的结构或者选择特殊的介质材料,获得天然材料所不具有的超常电磁性质的人工复合结构或材料,超材料由亚波长尺寸的金属微结构单元周期性排列组合而成,其电磁响应不仅由其构成材料决定,更与其谐振单元的微结构

和排列组合息息相关^[1-6]。其中,基于超材料的完美吸波器(PMA)通过设计合理的谐振器微结构可实现对特定频段电磁波的 100% 吸收。PMA 可广泛用于隐身材料^[7]、频率选择表面^[8]、电磁波探测及调控^[9-10]、热光伏设备^[11-12]等诸多领域。现有 PMA 的一种典型结构为“金属-绝缘层-金属”(MIM)三层结构,结构表面层的金属微结构谐振单元表现为

收稿日期: 2019-02-26; 修回日期: 2019-03-23; 录用日期: 2019-04-08

基金项目: 国家自然科学基金(51876147)

* E-mail: maoqianjun@163.com

不同的形状,如矩形^[13-15]、球形^[16-17]、圆盘形^[18-19]、环形^[20]等。但是,一种电磁谐振仅仅能够实现极窄频段的吸收增强^[21],为了实现 PMA 在多色光学领域的广泛应用,许多专家致力于多频和宽频段超材料完美吸波器的研究^[22-25],这些研究可以分为两类,一类是基于不同原理或不同阶的电磁谐振^[26-28]。Wang 等^[26]设计的近完美超材料吸波器通过激发磁激元和表面等离子体共振实现从紫外到红外区域的宽频吸收。Zhao 等^[27]设计一种核壳圆柱形结构实现多频段吸收,物理机理为多阶磁激元和表面等离子体共振的激发。但是,不同电磁谐振的场增强区域通常会发生重叠,而且谐振频率对结构尺寸有不同的依赖性,因此不同共振的独立调节很难通过改变结构参数实现。另一类是基于电磁谐振的尺寸效应,在同一个结构单元中叠加不同尺寸的谐振结构,有水平叠加、垂直叠加以及打破原有结构的对称性三种^[29-31]。Liu 等^[29]利用不同尺寸的光栅所激发的磁激元的谐振波长不同,将尺寸逐渐增加的矩形结构垂直叠加,制备出金字塔型的超宽红外 PMA。Bouchon 等^[30]通过水平叠加四个不同尺寸矩形结构,实现了四频段吸收。Hai 等^[20]设计的超材料吸波器打破了圆盘的对称性,从单频段拓展为双频段,但是其垂直叠加在加工上存在困难,因为各层之间的图案要精确对准,水平叠加中多个子单元组成的结构单元通常需要较大的尺寸,因此利用有效的方法设计出多频段超材料吸波器,是当前亟待解决的问题。

本文提出一种 MIM 结构的三频段 PMA,超材料表面由三组嵌套的金属圆环组成,中间为绝缘层,底层为金属薄膜。通过在超材料结构表面叠加不同几何参数的金属环,可以激发不同频率处的磁激元,实现对不同频率入射辐射的超强吸收。共振波长与金属环的直径和高度具有强烈的对应关系,通过调节相应金属环的几何参数,可以实现对不同共振的独立调控。采用时域有限差分(FDTD)方法研究结构在不同几何参数和入射光极化角度下的吸收特性。此外,在最优结构参数下,分析吸波器的红外传感特性。

2 模型和理论

图 1 为本文提出的超材料吸波器的结构单元示意图,第一层为三圈嵌套的金属圆环,材质为金,从内圈到外圈,直径为 R_1 、 R_2 、 R_3 ,高度为 h_1 、 h_2 、 h_3 ,三组圆环的厚度均为 ΔR 。第二层为实现阻尼匹配

的二氧化硅(SiO_2)介质层,其厚度为 d 。第三层为金属薄膜,材质为金,厚度固定为 150 nm,该厚度大于红外入射光的趋肤深度,能使入射光几乎不从结构中透过。使用基于 FDTD 方法的数值模拟软件(Lumerical Solutions)对结构的吸收和调制特性进行仿真计算。在仿真中,边界条件设置为: x 和 y 方向上为周期性边界条件, z 方向为完美匹配层。金属 Au 的介电常数取自文献[32]。在模拟中,入射光为偏振方向平行于 y 轴的横磁(TM)平面波,模拟结果均通过了收敛性实验。为了检验结构的不透明性,在结构下方设置检测器来计算透射率,结果显示在 1000~5000 nm 的光谱范围内透射率均小于 10^{-5} ,并且对吸收率的影响很小,因此结构的吸收率可通过 $A=1-R$ 计算,其中 R 为结构的反射率,可由检测器直接测得。

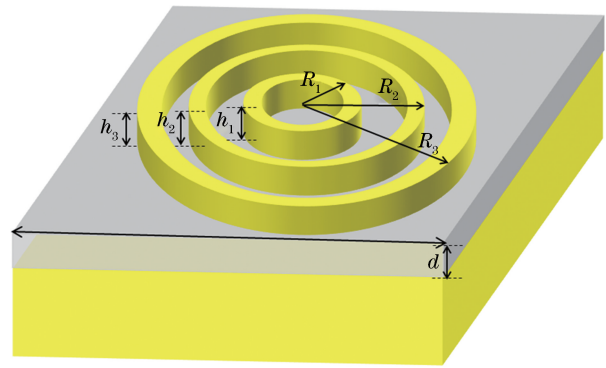


图 1 超材料吸波器的结构单元示意图

Fig. 1 Schematic of structural unit of metamaterial absorber

3 结果与讨论

超材料表面圆环的圈数和外径对吸收光谱的影响如图 2 所示,图 2(a)为表面结构单元具有三圈嵌套圆环时的吸收光谱。经过优化设计的结构几何参数为 $R_1=110$ nm, $R_2=170$ nm, $R_3=240$ nm, $h_1=h_2=h_3=60$ nm, $\Delta R=30$ nm, $d=20$ nm,周期 $p=600$ nm,三个吸收峰在 $1.44 \mu\text{m}$ 、 $2.28 \mu\text{m}$ 以及 $3.25 \mu\text{m}$ 处,吸收率分别达 98.5%、99.6% 和 99.9%。为了直观地了解每一个吸收峰的性质,需要对超材料结构表面仅具有一个金属环时的吸收光谱进行计算,图 2(b)为超材料表面仅具有一圈金属环时的吸收光谱,其他结构参数保持不变。直线代表金属环外径为 110 nm 时的吸收光谱,吸收率为 88.3% 的吸收峰出现在 $1.39 \mu\text{m}$ 处,点线、点划线代表金属环外径为 170 nm 和 240 nm 时的吸收光谱,谐振波长分别为 $2.16 \mu\text{m}$ 和 $3.19 \mu\text{m}$ 。三个金属环各形成了

一个共振峰,外径越大,谐振所对应的波长越长。此外,也对超材料表面含有两圈金属环时的吸收光谱进行计算,如图 2(c)所示。结构中仅含有中间环和外圈环,外径分别为 170 nm 和 240 nm,相比于三圈环结构,中间环对应的谐振波长轻微蓝移,外圈环对应的谐振波长维持在 3.25 μm 不变,吸收率分别为 98.3% 和 99.9%。对比图 2 中超材料结构单元含有单个和多个环的吸收光谱,可以看出一个金属环对应于一处谐振,谐振所在的位置与金属直径具有强烈的对应关系,且当一个结构单元中包含多个不同直径的金属环时,相邻金属环所对应的磁激元之间具有轻微的耦合作用,这说明三个吸收峰的独立调控可以通过调节金属环的直径来实现。此外,可以预测超材料表面结构单元叠加更多(大于 3)金属环时,可以实现更多频段的吸收。

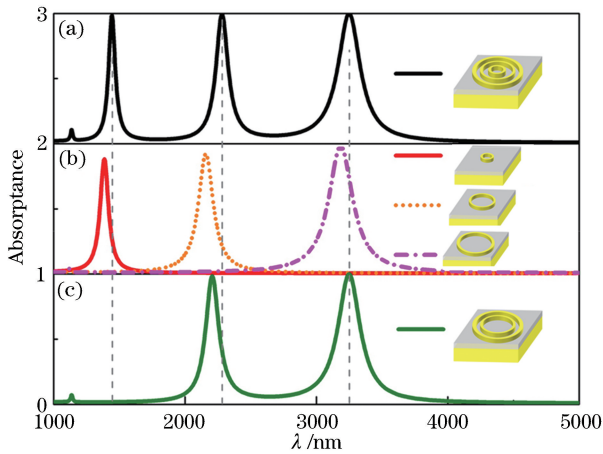


图 2 不同圆环圈数和外径下的吸收光谱。(a)三圈环;
(b)单圈环;(c)两圈环

Fig. 2 Simulated absorption spectra for structures with different circles and outer diameters. (a) Three rings; (b) one ring; (c) two rings

为了进一步理解 PMA 实现多频段吸收的物理机理,对吸波器在三个吸收峰处的标准电磁密度分布进行研究。图 3 为垂直 y 轴且经过圆环圆心的横截面结构单元,虚线为结构的轮廓线,箭头为电场的方向,结构参数与图 2(a)保持一致。从图中可知,结构单元在不同谐振处的电磁场密度分布与金属环的尺寸具有强烈的对应关系。图 3(a)为结构单元在 1.44 μm 处的电场强度分布,在内圈环下面的 SiO_2 绝缘层中出现明显的电场增强。图 3(b)为结构单元在 1.44 μm 处的磁场强度分布图,可以看出磁场增强区域并不局限于金属环下面的绝缘层,在金属环内部真空区域下面的绝缘层内同样出现了磁场增强;此外,一个顺时针的感应电流环路出现在

磁场增强区域周围。这样的电磁场分布对应于激发磁激元(MPs)的特征,磁激元的激发机理为在 TM 入射光的垂直照射下,平行于 y 轴方向有一个时变磁场,在 xoz 平面上沿绝缘层两边形成了方向相反的电流,从而形成电流环路,该电流环路导致强烈的抗磁效应,入射电磁辐射就被集中到超材料结构中^[19,33-34]。图 3(c)和图 3(d)为 2.28 μm 处的电磁场强度分布情况,表现了中间环激发磁激元的特征。从图中可以看出中间环的电流环路方向与内圈环不同,这是因为示意图中箭头方向表示某一瞬态的电流方向,实际电场方向会随着磁场方向的周期性改变而改变。图 3(e)和图 3(f)为结构单元在 3.25 μm 处的电磁场强度分布情况,外圈环下的 SiO_2 绝缘层内出现了明显的场增强,对应于外径为 240 nm 的外圈环激发磁激元的特征。此外,除了在 SiO_2 绝缘层中的场增强,在不同金属环之间的间隙处也出现了场增强,这使得结构单元对金属环所接触的介质比较敏感,其作为传感应用时能够表现出较高的灵敏度。

磁激元的激发波长与金属环直径具有强烈的相关性,通过调节金属环的直径,可以有效地调节谐振波长。首先分析超材料表面结构单元仅具有一个金属环时,外径对谐振波长的影响。图 4(a)为金属环外径从 80 nm 增加至 280 nm 时反射光谱的变化情况,其他结构参数固定为 $h_1 = h_2 = h_3 = 60 \text{ nm}$, $\Delta R = 30 \text{ nm}$, $d = 20 \text{ nm}$, $p = 600 \text{ nm}$ 。从图中可以看到一个很明显的吸收带,当直径从 80 nm 增加至 260 nm 时,共振波长与直径几乎呈线性变化,对应的 110 nm、170 nm 和 240 nm 的共振峰位置与图 2(b)保持一致。当直径大于 260 nm 时,由于金属环直径较大,相邻结构单元之间发生耦合作用,共振波长发生了更大的红移。图 4(b)为结构单元表面含有两个金属环时反射光谱的变化情况,大环的外径 R_3 固定在 240 nm,小环外径 R_2 从 80 nm 增加至 210 nm,两个金属环厚度 ΔR 均保持 30 nm 不变,其他结构参数与图 4(a)中保持一致。从图 4(b)中可以看到两个明显的吸收带,左边的吸收带对应于小环,共振波长随直径增加逐渐红移,当 R_2 从 80 nm 增加至 180 nm 的范围内,共振波长呈线性增加;当 $R_2 > 180 \text{ nm}$ 时,共振波长随外径增加红移趋势减小。右边的吸收带对应于大环,当 $R_2 < 180 \text{ nm}$ 时,共振波长维持在 3.25 μm 不变,这与图 2(c)中的吸收光谱保持一致;当 $R_2 > 180 \text{ nm}$ 时,吸收峰所在波长出现红移,且红移趋势越来越强,但

吸收率越来越小;当 $R_2 > 200$ nm 时,右边的吸收峰消失,这是因为随着两个金属环间距减小,相邻金属环发生耦合作用。当小环外径 R_2 为 210 nm 时,两个

金属环接触成为厚度 ΔR 为 60 nm,外径为 240 nm 的金属环,仅能激发一处磁激元。因此为了保持多频段吸收的独立性,相邻金属环的间距应大于 30 nm。

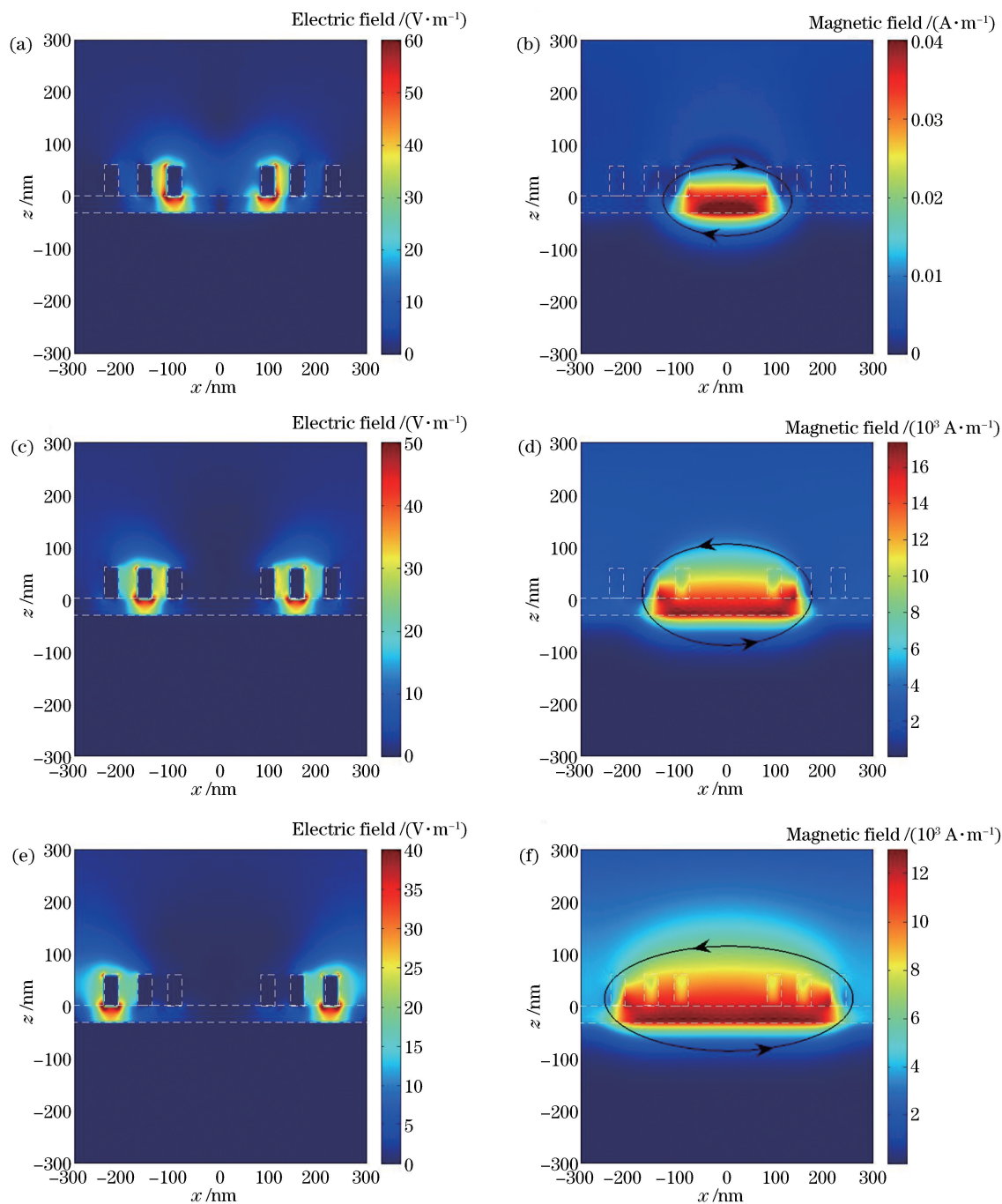


图 3 共振波长处的电场强度和磁场强度分布图。(a)(b) $1.44 \mu\text{m}$; (c)(d) $2.28 \mu\text{m}$; (e)(f) $3.25 \mu\text{m}$

Fig. 3 Simulated intensity distributions of electric and magnetic fields at resonance wavelengths.

(a)(b) $1.44 \mu\text{m}$; (c)(d) $2.28 \mu\text{m}$; (e)(f) $3.25 \mu\text{m}$

金属环的厚度对共振强度和波长也有影响,图 4(c)为外径固定在 240 nm,内径从 230 nm 减小至 150 nm 时反射光谱的变化情况,即为金属环厚度 ΔR 从 10 nm 增加至 100 nm 的变化情况。从图中可以看出,当 $\Delta R > 30$ nm 时,反射率越来越大,

这意味着吸收率的减小, ΔR 为 60 nm 时即为图 2(b)中小环外径为 210 nm 的情况。当 $\Delta R < 15$ nm 时,共振强度太小导致结构吸收率减小,因此为了使结构获得最优的吸波效果,金属环的厚度选择为 30 nm。

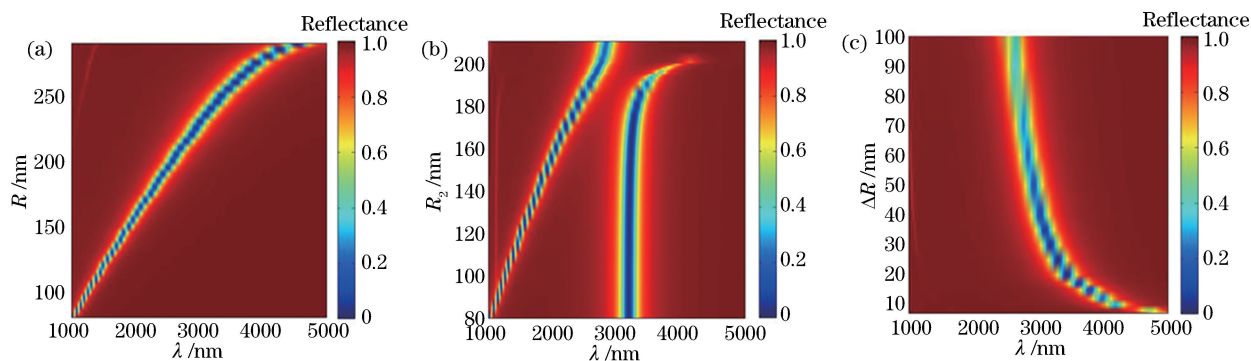


图 4 反射光谱随圆环直径的变化。(a)单环结构外径 R ; (b)双环结构小环外径 R_2 ; (c)单环厚度 ΔR

Fig. 4 Variation of simulated reflection spectra with diameters of rings. (a) Outer diameter R in one-ring structure; (b) outer diameter of small ring R_2 in two-ring structure; (c) thickness ΔR in one-ring structure

除了直径对共振峰位置的影响,金属环阵列的高度对反射光谱的影响也被研究,如图 5 所示。随金属环高度增加,吸收率呈现出先增加后减小的趋势。当金属环高度小于 20 nm 时,由于金属环的厚度太薄导致谐振不够强烈,吸收率较小;当金属环的高度大于 80 nm 时,一部分入射光会被反射出去,磁激元强度减弱,吸收率减小。当绝缘层厚度从 20 nm 增加 80 nm 时,三个吸收带均维持较大的吸收率。从图中可以看出随高度增加,三个近完美吸收带均出现了蓝移,通过调节金属环的高度,三个谐振可以覆盖 1.2~4.8 μm 的整个波长范围。

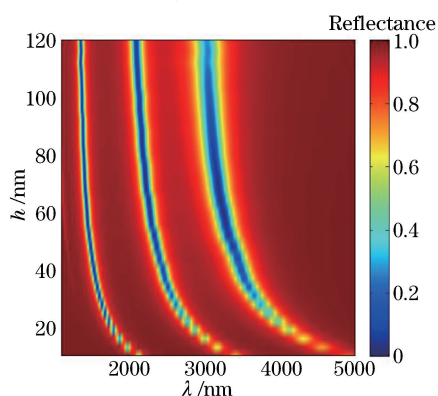


图 5 反射光谱随金属环高度的变化

Fig. 5 Variation of simulated reflection spectra with heights of metal rings

图 6 所示为超材料结构单元反射光谱随周期的变化情况。随着周期从 600 nm 增加到 1200 nm,对应于内圈环和中间环的共振位置保持不变,这与之前关于磁激元的报道保持一致^[12,28]。对应于外圈环的共振波长存在轻微的蓝移,这是因为随着周期增大而金属环的直径保持不变,相邻结构单元中外圈环的耦合作用减弱,共振向更短波长处移动。磁激元所引起的共振波长对金属环的直径非常敏感但

是对周期具有强烈的稳健性,因此本文在不扩大结构单元前提下,叠加不同直径的金属环来激发磁激元,实现了独立可调的三频段吸收。还需注意的是,三个谐振峰的吸收率都随周期的增大而减小,这是因为磁激元的激发主要与金属环有关,周期增大导致该结构单元表面磁响应面积的占比减少,因此为了维持较高的吸收率,超材料表面结构的周期应保持在合理范围内,这里周期为 600 nm。

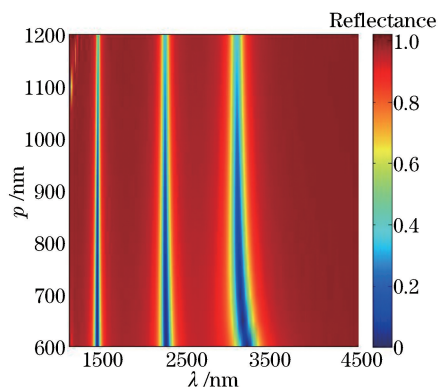


图 6 反射光谱随周期的变化

Fig. 6 Variation of simulated reflection spectra with periods

由于共振发生时,电场强度增加主要集中在绝缘层内,因此间隔层的厚度也可以对共振产生影响。图 7 为不同间隔层厚度所对应的吸收光谱,其他结构参数保持不变,随着间隔层厚度从 15 nm 增加至 50 nm,三个共振峰表现出相同的变化趋势,共振峰位置均表现出蓝移现象,吸收率先增加后减小。这是因为当厚度过小时,不能充分集中增强局部电磁辐射;当间隔层厚度过大时,金属环与底部金属基底之间的电磁响应减弱,因此,绝缘层厚度选择为 30 nm。

除了几何参数,结构单元在不同极化角度照射下的反射光谱也被计算,如图 8 所示。结构单元参数与图 2(a)保持一致,可以看出极化角度对吸收光

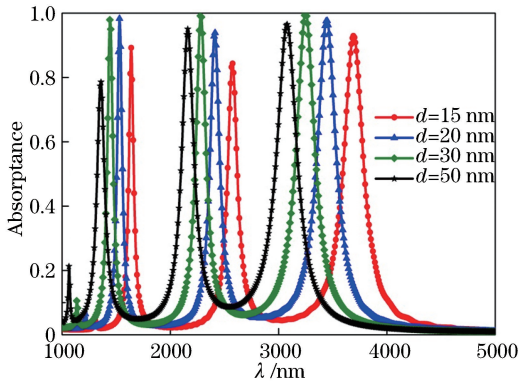


图 7 吸收光谱随绝缘层厚度的变化
Fig. 7 Variation of simulated absorption spectra with thicknesses of insulation layer

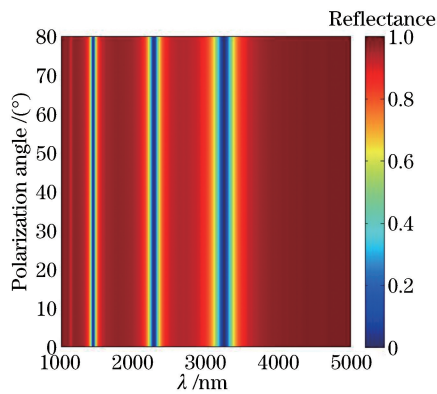


图 8 反射光谱随入射光极化角度的变化
Fig. 8 Variation of simulated reflection spectra with polarization angles of incident light

谱完全没有影响,这是因为该结构单元的金属环在 xoy 平面上关于中心对称。

除了结构单元的几何尺寸对吸收光谱的影响,吸波器的红外传感性能也被研究。超材料表面为嵌套的三圈金属环,可以与周围介质进行充分接触,因此吸波器对周围介质折射率变化的灵敏度较高。图 9 为吸波器处于不同介质环境中的吸收光谱,内圈环、中间环、外圈环的吸收峰分别表示为 Peak 1、Peak 2、Peak 3。当周围介质折射率从 1 增加到 1.5 时,Peak 1 所对应的谐振波长从 $1.50 \mu\text{m}$ 红移到 $1.74 \mu\text{m}$,吸收率从 95.6% 下降到 78.5%。Peak 2 和 Peak 3 所对应的谐振波长分别从 $2.38 \mu\text{m}$ 和 $3.40 \mu\text{m}$ 红移到 $2.84 \mu\text{m}$ 和 $4.04 \mu\text{m}$,吸收率几乎不发生变化,均大于 99.5%。

结构单元对折射率的灵敏度可表示为

$$S = \frac{\delta\lambda}{\delta n}, \quad (1)$$

式中, λ 为波长, n 为该结构单元所处环境的折射率。此外,传感器的总体性能通常用品质因数

(FOM, F_{OM}) 来评价,品质因数的表达式为

$$F_{\text{OM}} = \frac{S}{\Delta\lambda_{1/2}}, \quad (2)$$

式中, $\Delta\lambda_{1/2}$ 为半峰全宽(FWHM)。图 10(a) 为环境折射率从 1.1 以 0.1 的幅度增加到 1.9 时,吸波器灵敏度的变化情况,虽然三个峰对应于不同的磁激元,但是表现出相同的变化趋势,即随着折射率的增加,灵敏度增加,而且金属环的外径越大,对应谐振的灵敏度越高,其随折射率的增加变化趋势更大。图 10(b) 为 FOM 随环境折射率的变化情况。随着折射率从 1.1 增加到 1.9,三个谐振的 FOM 均呈现减小趋势,但变化程度相较于灵敏度有一些不同,当折射率为 1.8 和 1.9 时,Peak 3 获得最大值。当折射率在 1.1~1.7 的范围内,由于 FWHM 最小,Peak 2 的 FOM 最高,并在环境折射率为 1.1 时达到最大值 8.3 RIU^{-1} (RIU 为折射率单元),此时金属环对应的灵敏度为 $1.08 \mu\text{m} \cdot \text{RIU}^{-1}$ 。文献[9]中所提出的结构单元同样为纳米环阵列,通过激发表面等离子激元获得两个吸收峰,实验测得的灵敏度分别为 $386 \text{ nm} \cdot \text{RIU}^{-1}$ 与 $615 \text{ nm} \cdot \text{RIU}^{-1}$,对应的 FOM 约为 5 RIU^{-1} 和 44 RIU^{-1} 。此外,从图 10(b) 可以看出圆环尺寸越小,品质因数变化程度越大,因此可以预测:当超材料表面嵌套尺寸更小的金属环时,谐振峰的 FOM 将呈现更加不同的变化趋势。

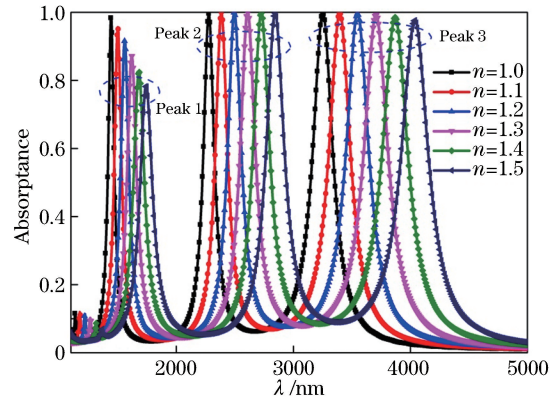


图 9 周围介质折射率对吸收光谱的影响
Fig. 9 Influence of refractive index of surrounding medium on simulated absorption spectra

4 结 论

提出一种多频段金属-绝缘层-金属超材料完美吸波器,该结构单元由三圈嵌套的金属环阵列、绝缘层和金属薄膜组成。FDTD 方法被用于计算结构单元的吸收光谱和电磁密度分布。在特定的结构参数下,吸波器可以在 $1.44 \mu\text{m}$ 、 $2.28 \mu\text{m}$ 以及 $3.25 \mu\text{m}$

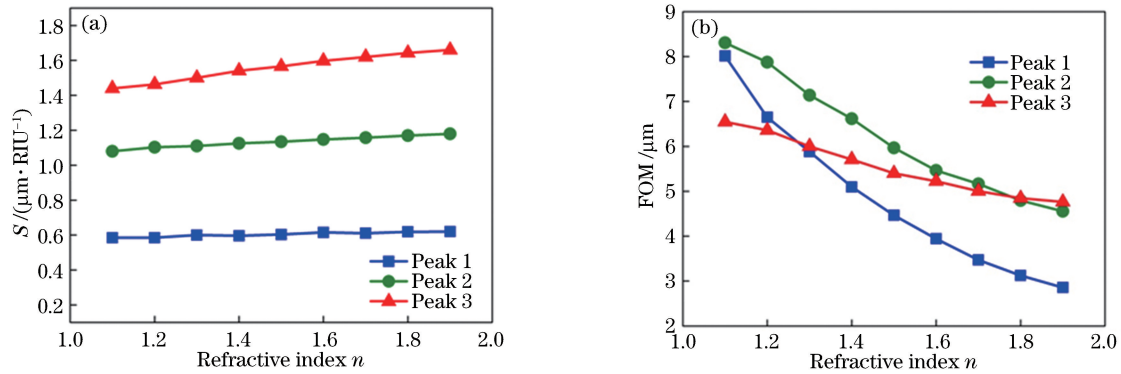


图 10 周围介质折射率对传感性能的影响。(a)对灵敏度的影响;(b)对品质因数的影响

Fig. 10 Influence of refractive index of surrounding medium on sensing performance.

(a) Influence on sensitivity; (b) influence on FOM

处分别实现 98.5%、99.6%和 99.9%的超强吸收,物理机理为磁激元的激发。通过调节结构单元的几何参数,可以实现不同谐振峰之间的独立调控。由于结构在 xoy 平面上的对称性,吸收光谱不受入射光极化角度的影响。此外,结构单元表现出优良的红外传感特性,品质因数最高可达 8.3 RIU^{-1} 。本文研究成果可以应用于传感领域,对超材料的设计和理论研究带来新的启示。

参 考 文 献

- [1] Hedayati M, Faupel F, Elbahri M. Review of plasmonic nanocomposite metamaterial absorber[J]. *Materials*, 2014, 7(2): 1221-1248.
 - [2] Qian Q Y, Sun T, Yan Y, *et al.* Large-area wide-incident-angle metasurface perfect absorber in total visible band based on coupled Mie resonances [J]. *Advanced Optical Materials*, 2017, 5(13): 1700064.
 - [3] Guo C F, Sun T Y, Cao F, *et al.* Metallic nanostructures for light trapping in energy-harvesting devices[J]. *Light: Science & Applications*, 2014, 3 (4): e161.
 - [4] Chen H T, Taylor A J, Yu N F. A review of metasurfaces: physics and applications[J]. *Reports on Progress in Physics*, 2016, 79(7): 076401.
 - [5] Zhang Z Y, Liu X L, Wen X D. Enhance absorption based on the resonance of localized surface plasmon modes in a metamaterial absorber [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2018, 37(5): 533-539.
- 张振亚, 刘晓丽, 温小栋. 基于局部表面等离子体激元的共振增强超材料吸收器的吸收性质[J]. *红外与毫米波学报*, 2018, 37(5): 533-539.
- [6] Cai Q, Ye R W, Fang Y T. Broadband absorption based on graphene metamaterial composite structure [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44 (10):

1003005.

蔡强, 叶润武, 方云团. 石墨烯超材料复合结构的宽带吸收[J]. *中国激光*, 2017, 44(10): 1003005.

- [7] Iwaszczuk K, Strikwerda A C, Fan K B, *et al.* Flexible metamaterial absorbers for stealth applications at terahertz frequencies [J]. *Optics Express*, 2012, 20(1): 635-643.
- [8] Zhong Y K, Fu S M, Huang W M, *et al.* Polarization-selective ultra-broadband super absorber [J]. *Optics Express*, 2017, 25(4): A124-A133.
- [9] Liang Y Z, Li L X, Lu M D, *et al.* Comparative investigation of sensing behaviors between gap and lattice plasmon modes in a metallic nanoring array [J]. *Nanoscale*, 2018, 10(2): 548-555.
- [10] Zhu J, Li X, Li J J, *et al.* Enlarge the biologic coating-induced absorbance enhancement of Au-Ag bimetallic nanoshells by tuning the metal composition [J]. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 2018, 189: 571-577.
- [11] Zhao B, Wang L P, Shuai Y, *et al.* Thermophotovoltaic emitters based on a two-dimensional grating/thin-film nanostructure [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2013, 67: 637-645.
- [12] Wang L P, Zhang Z M. Wavelength-selective and diffuse emitter enhanced by magnetic polaritons for thermophotovoltaics [J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 100(6): 063902.
- [13] Mulla B, Sabah C. Multiband metamaterial absorber design based on plasmonic resonances for solar energy harvesting [J]. *Plasmonics*, 2016, 11 (5): 1313-1321.
- [14] Mao Q J, Feng C Z, Yang Y Z, *et al.* Design of broadband metamaterial near-perfect absorbers in visible region based on stacked metal-dielectric gratings[J]. *Materials Research Express*, 2018, 5

- (6): 065801.
- [15] Liu Y, Chen Y G. Resonance of I-shaped metamaterials[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(3): 0324001.
刘瑶, 陈跃刚. 工型超材料共振研究[J]. *光学学报*, 2018, 38(3): 0324001.
- [16] Mader S, Martin O J F. Mechanisms of perfect absorption in nano-composite systems [J]. *Optics Express*, 2018, 26(21): 27089-27100.
- [17] Le K Q, Bai J. Enhanced absorption efficiency of ultrathin metamaterial solar absorbers by plasmonic Fano resonance[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2015, 32(4): 595-600.
- [18] Yao G, Ling F R, Yue J, *et al.* Dual-band tunable perfect metamaterial absorber in the THz range[J]. *Optics Express*, 2016, 24(2): 1518-1527.
- [19] Han X, He K B, He Z B, *et al.* Tungsten-based highly selective solar absorber using simple nanodisk array[J]. *Optics Express*, 2017, 25(24): A1072-A1078.
- [20] Hai L D, Qui V D, Dinh T H, *et al.* Dual-band perfect absorption by breaking the symmetry of metamaterial structure [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2017, 46(6): 3757-3763.
- [21] Xiao G L, Liu X G, Yang H Y, *et al.* Refractive index sensing property based on extraordinary optical transmission of metal circular arc hole array[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(2): 0224001.
肖功利, 刘小刚, 杨宏艳, 等. 基于金属圆弧孔阵列强透射的折射率传感特性[J]. *光学学报*, 2018, 38(2): 0224001.
- [22] Proust J, Bedu F, Gallas B, *et al.* All-dielectric colored metasurfaces with silicon Mie resonators[J]. *ACS Nano*, 2016, 10(8): 7761-7767.
- [23] Yang S C, Richter K, Fischer W J. Multicolor generation using silicon nanodisk absorber [J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 106(8): 081112.
- [24] Zhu L, Wang Y, Xiong G, *et al.* Design and absorption characteristics of broadband nano-metamaterial solar absorber[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(9): 0923001.
朱路, 王杨, 熊广, 等. 宽波段纳米超材料太阳能吸收器的设计及其吸收特性[J]. *光学学报*, 2017, 37(9): 0923001.
- [25] Wang Y, Leng Y B, Dong L H, *et al.* Design of tunable metamaterial absorber based on graphene-metal hybrid structure[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(7): 0716001.
王越, 冷雁冰, 董连和, 等. 基于石墨烯-金属混合结构的可调超材料吸波体设计[J]. *光学学报*, 2018, 38(7): 0716001.
- [26] Wang H, Wang L P. Perfect selective metamaterial solar absorbers[J]. *Optics Express*, 2013, 21(S6): A1078-A1093.
- [27] Zhao Y, Fu C J. Multiband selective absorbers made of 1D periodic Ag/SiO₂/Ag core/shell coaxial cylinders horizontally lying on a planar substrate[J]. *Optics Express*, 2017, 25(8): A208-A222.
- [28] Zhai Y S, Chen G D, Xu J, *et al.* Multiple-band perfect absorbers based on the combination of Fabry-Perot resonance and the gap plasmon resonance[J]. *Optics Communications*, 2017, 399: 28-33.
- [29] Liu Y B, Qiu J, Zhao J M, *et al.* General design method of ultra-broadband perfect absorbers based on magnetic polaritons [J]. *Optics Express*, 2017, 25(20): A980-A989.
- [30] Bouchon P, Koechlin C, Pardo F, *et al.* Wideband omnidirectional infrared absorber with a patchwork of plasmonic nanoantennas [J]. *Optics Letters*, 2012, 37(6): 1038-1040.
- [31] Wang H S, Han K, Sun W, *et al.* Design and experimental investigation of triple-band metamaterial broadband bandpass filter [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(6): 0623001.
王昊深, 韩奎, 孙威, 等. 三波段超材料宽带带通滤波器的设计及实验研究 [J]. *光学学报*, 2017, 37(6): 0623001.
- [32] Johnson P B, Christy R W. Optical constants of the noble metals[J]. *Physical Review B*, 1972, 6(12): 4370-4379.
- [33] Feng R, Qiu J, Liu L H, *et al.* Parallel LC circuit model for multi-band absorption and preliminary design of radiative cooling[J]. *Optics Express*, 2014, 22(S7): A1713-A1724.
- [34] Wang L P, Zhang Z M. Phonon-mediated magnetic polaritons in the infrared region[J]. *Optics Express*, 2011, 19(S2): A126-A135.