

红外波段十字阵列光吸收材料光学特性研究

黎永前 苏磊 王斌斌 郭勇君 寿宸

(西北工业大学空天微纳系统教育部重点实验室, 陕西 西安 710072)

摘要 尺寸为光波长量级的微纳结构材料与电磁波的相互作用, 使得其具有许多特殊的光学性能, 金属-电介质-金属微纳结构具有电磁波完美吸收特性。基于 S 参数法, 研究十字阵列光吸收材料在红外波段的光学特性参数, 分析其谐振吸收机理及光学特性参数调谐性。研究表明, 十字阵列单元尺寸对其等效光学参数具有调谐作用; 当材料表面与入射介质之间满足阻抗匹配条件, 以及等效折射率系数虚部值足够大时, 可以有效提高其吸收率; 经过结构优化的十字阵列光吸收材料在红外波段具有大于 95% 的吸收率, 实验样件测试结果大于 80%。十字结构臂长和电介质层厚度决定吸收谱特性, 而十字结构臂宽仅仅影响吸收谱峰值大小。十字阵列光吸收材料在红外波段的完美吸收及光谱调谐性特点, 使其可用于红外探测和光谱成像等领域。

关键词 光学器件; 完美吸收材料; 散射参数; 红外探测; 谐振吸收

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0123002

Optical Properties of Cross-Shaped Array Optical Absorber in the Infrared Region

Li Yongqian Su Lei Wang Binbin Guo Yongjun Shou Chen

(Key Laboratory of Micro/Nano Systems for Aerospace, Ministry of Education, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, Shaanxi 710072, China)

Abstract Metamaterials have many exotic optical properties due to the interaction between the electromagnetic wave and the nanostructures. Metamaterials (PAMs) with metal-dielectric-metal structure have perfect absorption characteristics. The optical parameters of a cross-shaped absorber in infrared band are retrieved by the S-parameters method. The mechanism of resonant absorption and optical tunability are studied. The experiments and simulations results indicate that the size of cross-shaped absorber can tune its effective optical parameters and can effectively increase its absorptivity on the conditions that the effective impedance matches well to the incident medium, and the imaginary part of the effective refractive index approaches as great value as possible. The absorptivity of optimized cross-shaped absorber is greater than 95% and maximum absorption of 80% is experimentally obtained in infrared region. The resonance peaks of the absorption spectrum depends on the length of the cross arm and thickness of the dielectric materials, while the width of the cross arm plays a critical role to the maximum absorption value. The characteristics of perfect absorption and spectral tenability of corss-shaped absorber make it promising in many applications, including infrared detection, spectral imaging and so on.

Key words optical devices; perfect absorber; scattering parameters; infrared detection; resonance absorption

OCIS codes 040.3060; 300.6340; 300.1030

1 引言

光吸收材料是制作光电探测器^[1-2]、微型辐射热计^[3]、太阳能光伏热转换器^[4]以及热成像系统^[5-7]的基础。完美吸收超材料可以通过设计其结

构形式和尺寸参数, 调整其等效介电常数 ϵ_{eff} 和磁导率 μ_{eff} , 实现对电磁波接近 100% 的完美吸收^[8]。2008 年, Landy 等^[9]首次通过实验证实这种材料在微波波段的完美吸收特性。随后的研究不断向短波

收稿日期: 2013-06-19; **收到修改稿日期**: 2013-08-12

基金项目: 国家自然科学基金(51175436)、航空科学基金(2012ZC53036)、西北工业大学基础研究基金(JC200811)、高等学校学科创新引智计划(111 计划, B13044)

作者简介: 黎永前(1970—), 男, 副教授, 主要从事微纳结构与中远红外光、太赫兹电磁波的相互作用及应用等方面的研究。E-mail: liyq@nwpu.edu.cn

方向发展, Shchegolkov 等^[10]设计的鱼网结构实现了太赫兹波段大于 90% 的吸收率, 并研究了入射角度和偏振方向对吸收率的影响。Liu 等^[11]基于超材料结构在中红外波段实现了空间和频率的选择性窄带吸收。目前超材料的吸收结构包括十字阵列^[12]、矩形块阵列^[13]和金属环阵列^[14]等, 其谐振频率从微波波段^[15]到太赫兹波段^[13]和红外波段^[16], 并向可见光^[17]波段发展。窄带吸收材料在生物光谱学检测中, 能有效提高拉曼吸收光谱系数以及红外吸收截面^[16]; 对于吸收材料的工程应用, 宽带吸收谱能提高光电探测器的吸收能量。Huang 等^[18]利用尺寸结构对吸收的调谐性, 将多组不同尺寸结构阵列叠加组合, 实现了宽波段太赫兹吸收。

为了探索用于红外波段探测的光吸收材料结构, 以克服现有红外探测器在目标波长和光电转换效率方面的限制, 本文研究十字结构阵列吸收材料的光学特性参数, 研究结构尺寸对吸收频谱和光学特性参数的调谐效应, 通过 S 参数法计算这种结构的等效光学特性参数, 分析其谐振吸收的产生机理。

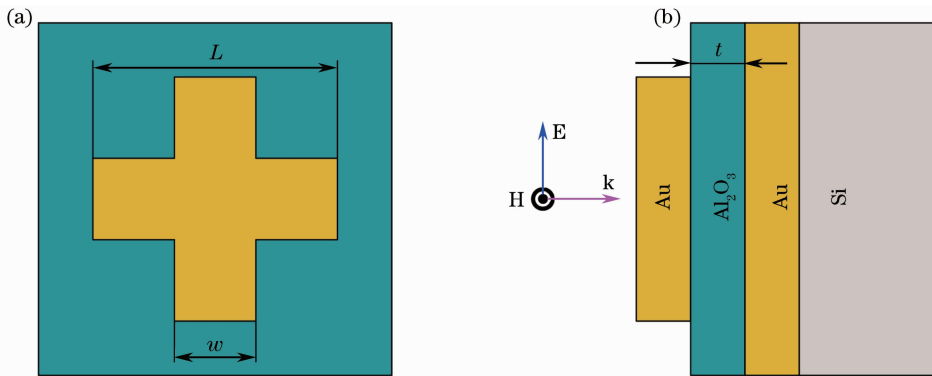


图 1 十字阵列光吸收材料单元结构示意图。(a)正视图;(b)侧视图

Fig. 1 Schematic of cross-shaped absorber array cell. (a) Front view; (b) side view

从探索机理的角度看, 十字结构可以看成两个矩形块结构的叠加, 在分析过程中将其可分解为两个矩形块进行分析, 继而推广应用到复合结构或者更通用的结构。更重要的是, 从多波长谐振以及吸收峰展宽的需求出发, 十字结构阵列可以在两个垂直的偏振方向进行更灵活的设计。后面的研究表明, 十字阵列具有较好的光学特性调谐性能, 通过调整结构尺寸能够方便调整其吸收效果, 实现目标波段的完美吸收。

微纳结构的光学特性由其单元结构形式及尺寸决定。本文采用时域有限差分计算方法(FDTD)对十字阵列光吸收材料结构进行仿真分析。在入射光

2 材料单元结构及其吸收光谱

如图 1 所示, 十字阵列光吸收材料单元结构由顶层金属十字谐振器、底层金属薄膜和中间介质层组成, 金属十字谐振器呈对角 45° 排列。十字谐振器结构长度为 L , 宽度为 w , 中间介质层厚度为 t 。按照等效介质理论设计十字阵列单元结构尺寸, 使得入射电磁波在光吸收材料结构中产生电磁谐振, 其等效介电常数为 $\epsilon(\omega) = \epsilon_r(\omega) + i\epsilon_i(\omega)$, 等效磁导率为 $\mu(\omega) = \mu_r(\omega) + i\mu_i(\omega)$, 表面等效阻抗为 $Z(\omega) = \sqrt{\mu(\omega)/\epsilon(\omega)}$ ^[19], ϵ_r, ϵ_i 分别代表介电常数的实部和虚部; μ_r, μ_i 分别代表磁导体的实部和虚部。当表面等效阻抗与入射介质之间满足阻抗匹配条件时, 反射率达到最小 $R(\omega) = 0$; 由于底层金属薄膜厚度大于红外电磁波的穿透深度, 当等效折射率的虚部足够大时, 透射率近似为零。通过优化结构参数, 使得等效介电常数和等效磁导率满足最大吸收率 $A(\omega) = 1 - R(\omega) - T(\omega)$, 此时入射电磁波几乎被介质完全吸收。

传播方向上采用完美匹配层边界条件, 采用周期边界条件表示阵列结构。红外波段材料折射率为实际测量值的拟合模型。非均匀网格划分得到最小网格尺寸为 0.25 nm , 时间步长为 0.027 fs 。模拟计算十字阵列单元长度、宽度和电介质层厚度对其吸收光谱特性的影响, 结果如图 2 所示。当十字长度增大时, 吸收峰值向长波方向移动, 如图 2(a)所示; 当十字宽度增加时, 吸收峰位置保持不变, 但其吸收谱线宽度及最大吸收值随宽度的增加而增大, 如图 2(b)所示; 电介质厚度变化对吸收特性的影响如图 2(c)所示。结构尺寸为 $L=1.7 \text{ }\mu\text{m}, w=0.5 \text{ }\mu\text{m}, t=0.1 \text{ }\mu\text{m}$ 时, 在 $6.00 \text{ }\mu\text{m}$ 处吸收率大于 95%。

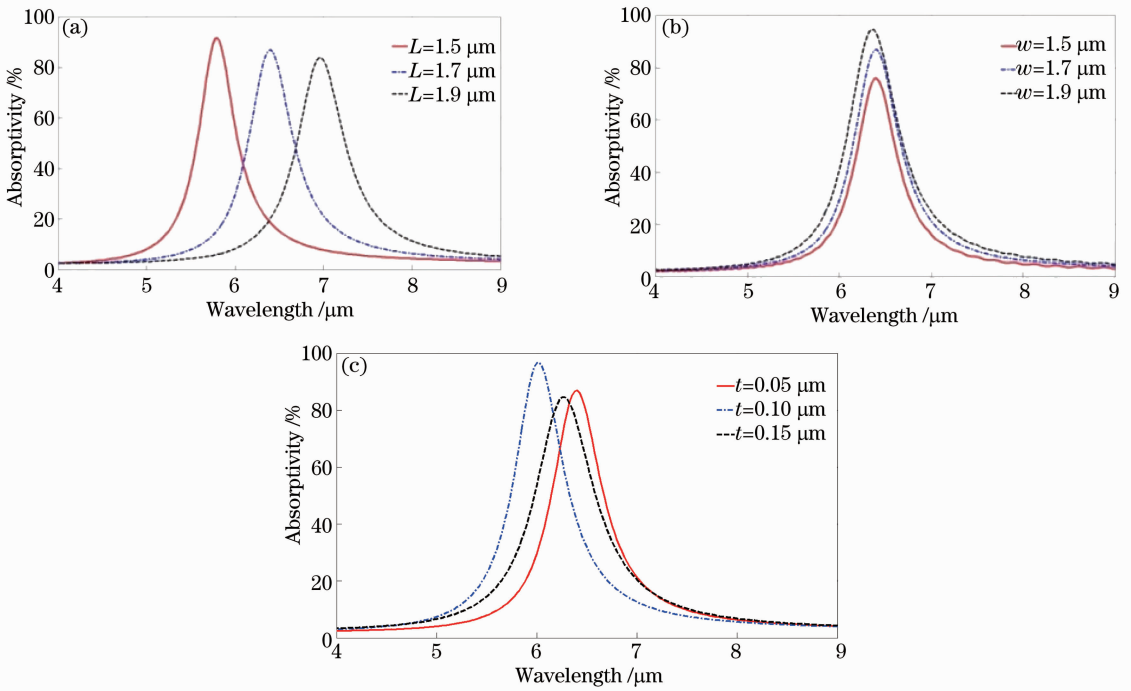


图2 十字阵列单元(a)长度 L , (b)宽度 w 和(c)电介质层厚度 t 对吸收光谱的影响
 Fig. 2 Fluences of (a) the arm length L , (b) width w and (c) the dielectric layer thickness t of the cross-shape array cell on absorptivity

实验制作的十字阵列光吸收材料结构扫描电镜结果如图 3(a) 所示。使用红外光谱仪 (Bruker VERTEX 70v) 对样品进行测试, 其吸收光谱特性如图 3(b) 所示。图中显示不同结构尺寸得到的吸收峰位于 $\lambda_1 = 5.75 \mu\text{m}$, $\lambda_2 = 6.39 \mu\text{m}$, $\lambda_3 = 6.94 \mu\text{m}$ 处, 其对应吸收率最大值分别达到 83.0%, 82.0%, 81.5%。测试得到的吸收曲线与图 2 仿真计算结果一致, 谐振波长对应的吸收峰值与仿真结果有所偏差, 其原因主要有: 1) 模拟计算时使用的材料光学特性参数来自于参考文献中实测值的拟合, 而实验所用材料光学特性参数与拟合结果之间存在差异^[20];

2) 电子束光刻工艺加工尺寸受到曝光量、曝光时间等诸多因素影响, 使得实际结构尺寸与设计尺寸存在偏差^[21]; 3) 傅里叶变换红外光谱仪测量环境及测量精度也会带来测量误差。

3 微纳结构材料光学特性参数估计方法

Smith 等^[22] 提出了 S 参数法计算多层结构的有效光学特性参数。S 参数法根据等效介质理论, 将微纳结构表面等效为匀质介质, 根据反射和透射光谱、相位信息计算其等效光学特性参数。

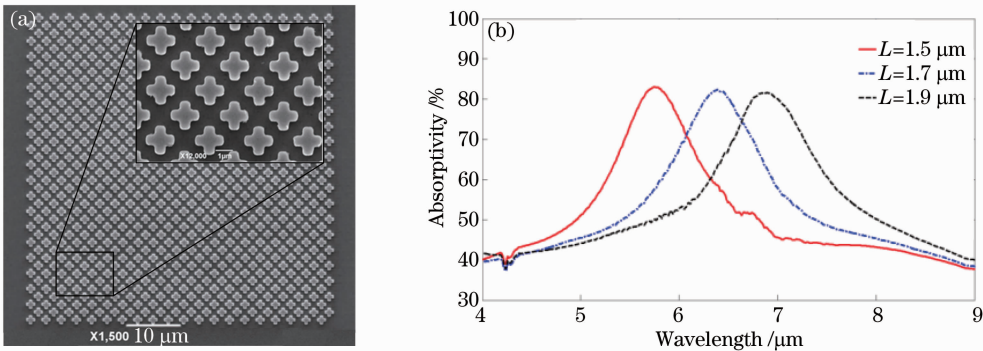


图3 十字阵列光吸收材料样品的(a)扫描电镜图和(b)实验测得的吸收频谱
 Fig. 3 (a) Scanning electronic microscopy image and (b) measured absorption spectra of the fabricated cross-shaped absorber array

$$S_{11} = \frac{i}{2} \left(\frac{1}{z} - z \right) \sin(nkd), \quad (1)$$

$$S_{21} = \frac{1}{\cos(nkd) - \frac{i}{2} \left(z + \frac{1}{z} \right) \sin(nkd)}, \quad (2)$$

式中 S_{11} 和 S_{21} 分别表示反射光谱和透射光谱中的幅值与相位信息参数, k 为波矢, d 为结构层厚度。根据此方法, 光吸收材料等效折射率系数 n_{eff} 和等效阻抗 z_{eff} 为

$$n_{\text{eff}} = \frac{1}{kd} \arccos \left[\frac{1}{2S_{21}} (1 - S_{11}^2 + S_{21}^2) \right], \quad (3)$$

$$z_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{(1 + S_{11})^2 - S_{21}^2}{(1 - S_{11})^2 - S_{21}^2}}. \quad (4)$$

他们与等效介电常数 ϵ_{eff} 和磁导率 μ_{eff} 的关系是

$$\epsilon_{\text{eff}} = n_{\text{eff}}^2 / z_{\text{eff}}, \quad (5)$$

$$\mu_{\text{eff}} = n_{\text{eff}} z_{\text{eff}}. \quad (6)$$

利用 S 参数法计算图 2(c) 结构 ($t=0.1 \mu\text{m}$) 的光学特性参数, 结果如图 4 所示, 对应谐振波长处的光学特性参数值如表 1 所示, 其中等效介电常数为

$\epsilon_{\text{eff}} = 1.283 + i13.66$, 等效磁导率为 $\mu_{\text{eff}} = 4.525 + i27.82$ 。等效磁导率虚部对应的谐振峰值波长与吸收谐振波长一致, 表明这种结构材料的吸收谐振波长由入射电磁波的磁谐振响应决定。等效介电常数和等效磁导率实部在谐振波长附近均通过零点, 且二者的实部符号始终相反, 即介电常数实部为正值时磁导率实部始终为负值, 反之亦然, 这满足微纳吸收结构材料实现透射为零的条件^[23]。计算得到的等效阻抗和等效折射率分别为 $z_{\text{eff}} = 1.433 - i0.048$ 和 $n_{\text{eff}} = 2.499 + i19.51$, 等效阻抗实部值在谐振吸收波长峰值位置达到最大值。此处入射介质为真空, 即入射介质阻抗为自由空间阻抗。由计算的相对等效阻抗实部值可以看出, 十字阵列光吸收材料的表面等效阻抗与自由空间阻抗近似满足匹配条件, 使得超材料结构表面反射达到最小。此时等效折射率系数虚部值相对较大, 电磁波在十字阵列光吸收材料结构中的吸收率达到最大。

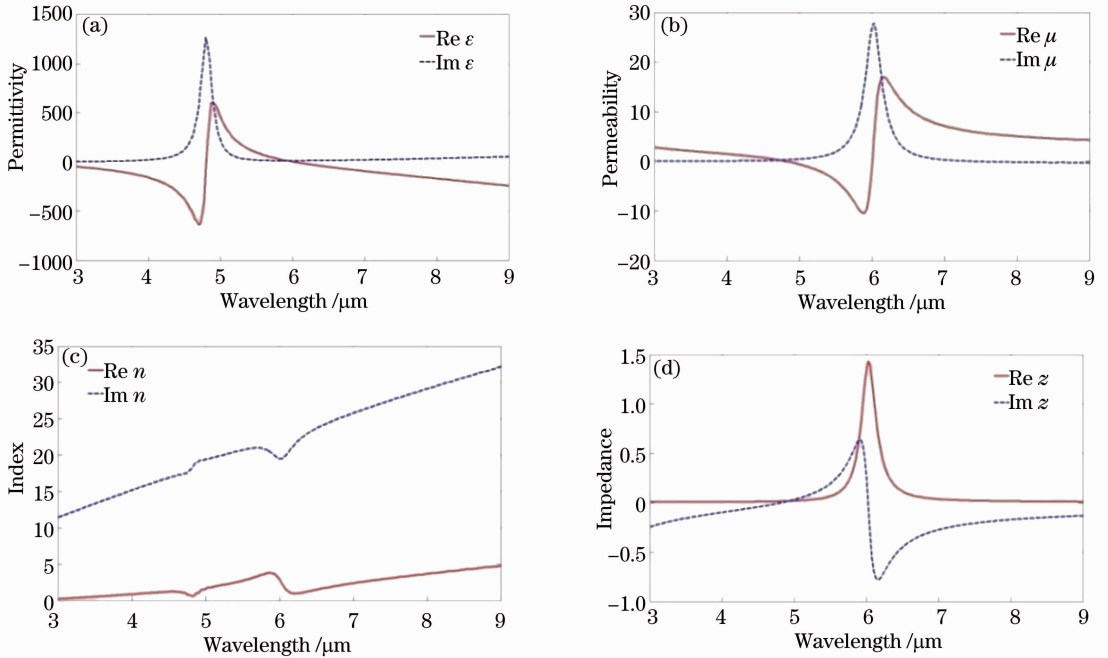


图 4 散射参数法计算十字阵列光吸收材料在红外波段的光学特性参数。(a) 等效介电常数; (b) 等效磁导率; (c) 等效折射率系数; (d) 等效阻抗 (样品结构尺寸为 $L=1.7 \mu\text{m}$, $w=0.5 \mu\text{m}$, $t=0.1 \mu\text{m}$)

Fig. 4 Retrieved effective optical parameters of a cross-shaped absorber array by S-parameters method. (a) Effective permittivity; (b) effective permeability; (c) refractive index; (d) impedance (dimensional sizes: arm length $L=1.7 \mu\text{m}$, arm width $w=0.5 \mu\text{m}$ and thickness of dielectric layer $t=0.1 \mu\text{m}$)

表 1 在谐振波长处光学特性参数

Table 1 Optical parameters at resonance wavelength

	μ_{eff}	ϵ_{eff}	z_{eff}	n_{eff}
Real	4.525	1.283	1.433	2.499
Imaginary	27.82	13.66	-0.048	19.51

4 结构尺寸对光学特性参数的调谐性

根据微纳结构单元尺寸对光吸收材料吸收光谱的影响,进一步分析其对光学特性参数的影响。如图 5 所示,当十字长度增大时,等效磁导率的虚部峰值始终与结构吸收峰位置相对应,但幅值逐渐减小,这一规律与吸收特性变化规律完全对应;同时,介电

常数虚部峰值向长波方向移动,幅值逐渐增加。如图 6 所示,当十字宽度增大时,磁导率虚部峰值位置保持不变,但幅值增加;介电常数虚部向短波方向移动,幅值增加。如图 7 所示,当电介质厚度 t 增加时,虽然等效磁导率的虚部峰值仍然能够与吸收峰位置对应,但其幅值大小却不影响最终的吸收率大小。

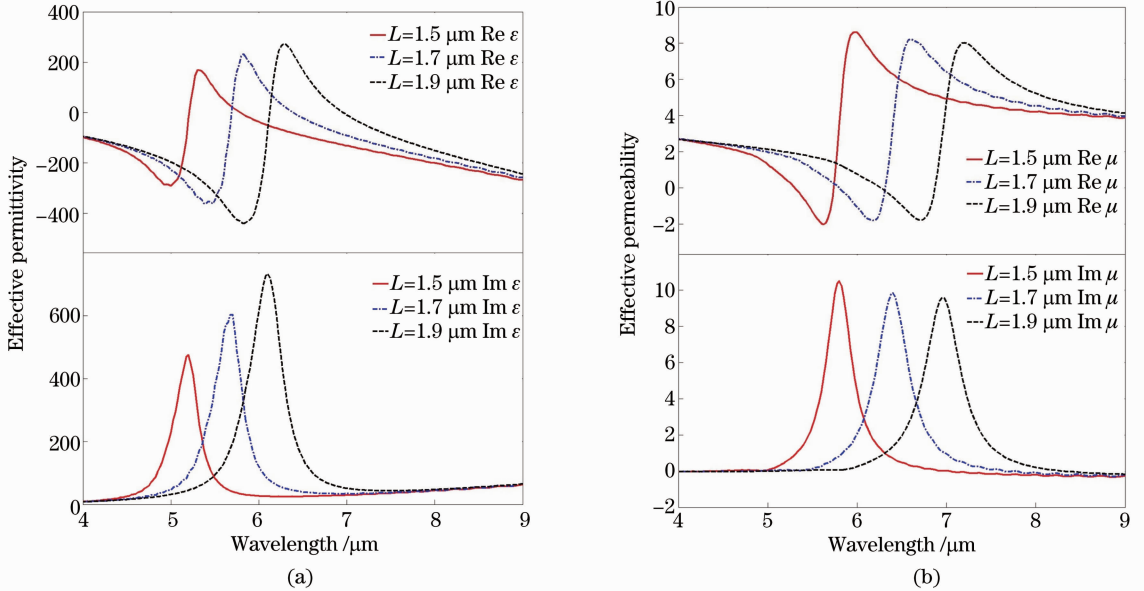


图 5 长度 L 对光学特性参数的影响。(a) 等效介电常数;(b) 等效磁导率

Fig. 5 Fluences of arm length L on optical parameters. (a) Effective permittivity; (b) effective permeability

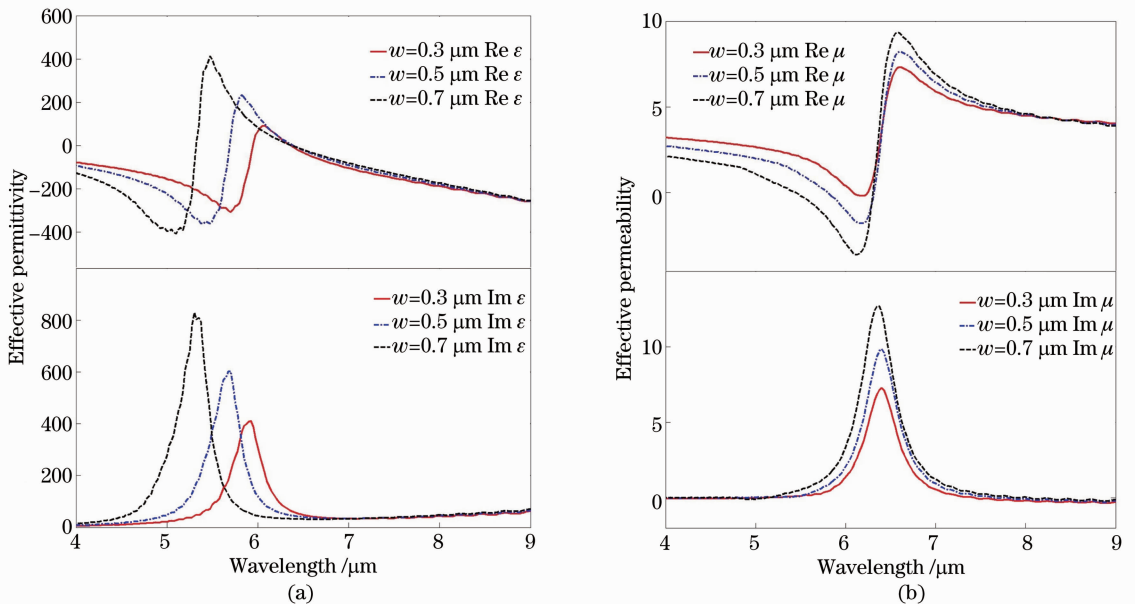


图 6 宽度 w 对光学特性参数的影响。(a) 等效介电常数;(b) 等效磁导率

Fig. 6 Fluences of arm width w on optical parameters. (a) Effective permittivity; (b) effective permeability

可以看出,十字阵列光吸收材料结构尺寸变化时,谐振吸收峰值位置始终与等效磁导率的虚部峰值相对应,证明入射电磁波的磁响应决定了其吸收

峰值位置。而吸收率峰值大小是电响应和磁响应综合作用的结果,与等效磁导率的虚部并不完全对应。十字结构长度和电介质层厚度决定吸收谱特性,而

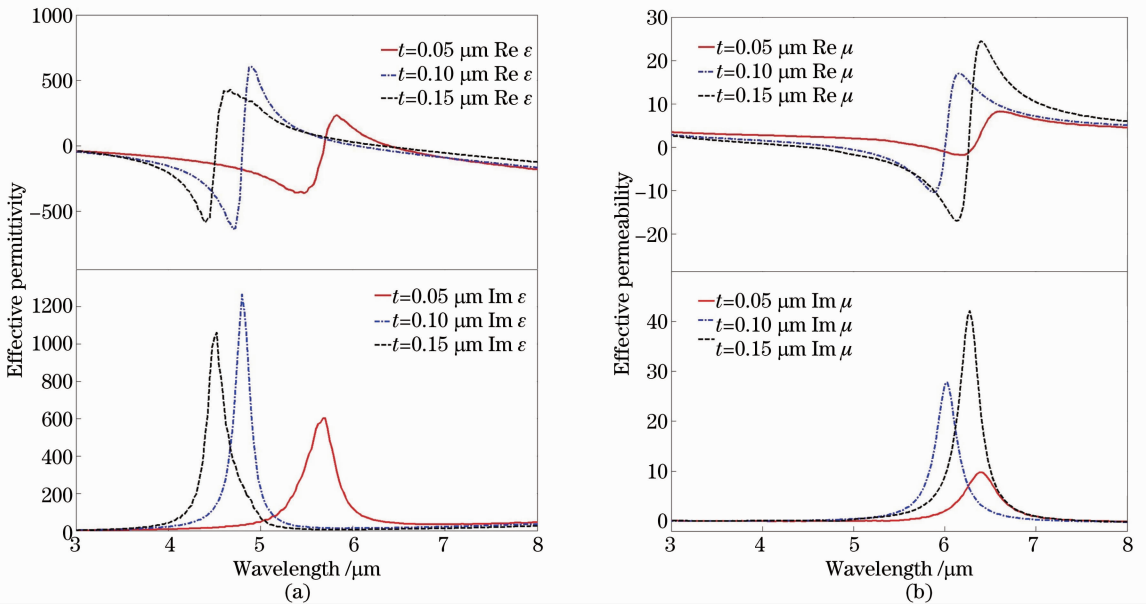


图 7 电介质厚度 t 对光学特性参数的影响。(a)等效介电常数;(b)等效磁导率

Fig. 7 Dependence of dielectric thickness t on optical parameters. (a) Effective permittivity; (b) effective permeability

十字结构宽度仅仅影响吸收谱峰值大小。

5 结 论

研究了十字阵列光吸收材料在中红外波段的光学特性,分析了结构尺寸对吸收光谱和光学特性参数的调谐作用。所研究的十字阵列光吸收材料在红外波段得到大于 95% 的窄带吸收率。根据等效介质理论,利用 S 参数方法计算了微纳结构吸收材料的等效光学特性参数,据此研究了微纳结构吸收材料的电磁波吸收机理。

研究了光吸收结构单元几何参数与等效光学参数之间的关系,发现十字阵列光吸收材料的谐振吸收位置始终与等效磁导率的虚部峰值一致,这证明磁响应决定了十字阵列光吸收材料的谐振吸收峰值位置;同时也发现吸收光谱峰值大小和宽度是电响应和磁响应的综合作用结果。

十字阵列光吸收材料单元结构尺寸对其吸收光谱具有调谐作用,在红外波段可实现高效吸收。这种特殊的光学特性,使得其有望应用于红外探测和光谱成像等领域。

致谢 论文工作得到国家自然科学基金(51175436)、航空科学基金(ASFC-No. 2012ZC53036)、西北工业大学基础研究基金(JC200811)、高等学校学科创新引智计划(111计划, B13044)的资助。

参 考 文 献

- 1 C Chang, H Chang, C Chen, *et al.*. Wavelength selective quantum dot infrared photodetector with periodic metal hole arrays [J]. *Appl Phys Lett*, 2007, 91(16): 163107.
- 2 Xu Zhonghua, Fang Jiaxiang. Modulation transfer function measurement of near infrared linear focal plane arrays [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(12): 1204001.
- 3 许中华, 方家熊. 近红外阵列探测器传递函数测试系统[J]. *光学学报*, 2012, 32(12): 1204001.
- 4 T Maier, H Brueckl. Multispectral microbolometers for the midinfrared [J]. *Opt Lett*, 2010, 35(22): 3766–3768.
- 5 L Chang, R R Lunt, P R Brown, *et al.*. Low-temperature solution-processed solar cells based on PbS colloidal quantum Dot/CdS heterojunctions [J]. *Nano Lett*, 2013, 13(3): 994–999.
- 6 X Liu, T Starr, A F Starr, *et al.*. Infrared spatial and frequency selective metamaterial with near-unity absorbance [J]. *Phys Rev Lett*, 2010, 104(20): 207403.
- 7 Han Shunli, Zhang Peng. Research on multispectral imaging based on spectral band extension of infrared thermal image [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(s1): s109004.
- 8 韩顺利, 张 鹏. 基于红外热像波段拓展的多光谱成像研究[J]. *中国激光*, 2012, 39(s1): s109004.
- 9 Cheng Teng, Zhang Qingchuan, Gao Jie, *et al.*. Analysis of optical readout sensitivity for uncooled infrared imaging based on optical readout [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(2): 0204002.
- 10 程 腾, 张青川, 高 杰, 等. 光学读出非制冷红外成像技术的光学灵敏度分析[J]. *光学学报*, 2012, 32(2): 0204002.
- 11 C M Watts, X Liu, W J Padilla. Metamaterial electromagnetic wave absorbers [J]. *Adv Mater*, 2012, 24(23): 98–120.
- 12 N I Landy, S Sajuyigbe, J J Mock, *et al.*. Perfect metamaterial absorber [J]. *Phys Rev Lett*, 2008, 100(20): 207402.
- 13 D Y Shchegolkov, A K Azad, J F O' Hara, *et al.*. Perfect subwavelength fishnetlike metamaterial-based film terahertz absorbers [J]. *Phys Rev B*, 2010, 82(20): 205117.
- 14 X Liu, T Tyler, T Starr, *et al.*. Taming the blackbody with infrared metamaterials as selective thermal emitters [J]. *Phys*

- Rev Lett, 2011, 107(4): 045901.
- 12 E C Kinzel, J C Ginn, R L Olmon, *et al.*. Phase resolved near-field mode imaging for the design of frequency-selective surfaces [J]. Opt Express, 2012, 20(11): 11986–11993.
- 13 M Pu, M Wang, C Hu, *et al.*. Engineering heavily doped silicon for broadband absorber in the terahertz regime [J]. Opt Express, 2012, 20(23): 25513–25519.
- 14 Y Ma, Q Chen, J Grant, *et al.*. A terahertz polarization insensitive dual band metamaterial absorber [J]. Opt Lett, 2011, 36(6): 945–947.
- 15 D Schurig, J J Mock, B J Justice, *et al.*. Metamaterial electromagnetic cloak at microwave frequencies [J]. Science, 2006, 314(5801): 977–980.
- 16 K Chen, R Adato, H Altug. Dual-band perfect absorber for multispectral plasmon-enhanced infrared spectroscopy [J]. ACS Nano, 2012, 6(9): 7998–8006.
- 17 J Zhang, J-Y Ou, K F MacDonald, *et al.*. Optical response of plasmonic relief meta-surfaces [J]. J Opt, 2012, 14(11): 114002.
- 18 L Huang, D R Chowdhury, S Ramani, *et al.*. Experimental demonstration of terahertz metamaterial absorbers with a broad and flat high absorption band [J]. Opt Lett, 2012, 37(2): 154–156.
- 19 C R Simovski, S A Tretyakov. Local constitutive parameters of metamaterials from an effective-medium perspective [J]. Phys Rev B, 2007, 75(19): 195111.
- 20 E D Palik. Handbook of Optical Constants of Solids [M]. Salt Lake City: Academic press, 1998.
- 21 C Vieu, F Carcenac, A Pepin, *et al.*. Electron beam lithography: resolution limits and applications [J]. Appl Surf Sci, 2000, 164(1): 111–117.
- 22 D R Smith, D C Vier, T Koschny, *et al.*. Electromagnetic parameter retrieval from inhomogeneous metamaterials [J]. Phys Rev E, 2005, 71(3): 036617.
- 23 J Grant, Y Ma, S Saha, *et al.*. Polarization insensitive terahertz metamaterial absorber [J]. Opt Lett, 2011, 36(8): 1524–1526.

栏目编辑：李志兰