

文章编号 1004-924X(2014)11-2998-06

矩形块微纳结构材料在红外波段的偏振光吸收

黎永前^{1*}, 郭勇君¹, 苏磊¹, 王斌斌¹, 朱振宇², 徐征³

- (1. 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;
2. 中国航空工业集团北京长城计量测试技术研究所 计量与校准技术重点实验室, 北京 100095;
3. 大连理工大学微系统研究中心, 辽宁大连 116023)

摘要:研究了矩形块微纳结构吸收材料在中远红外波段的光学偏振吸收特性。该吸收材料由金属阵列-电介质层-金属膜组成,在 2.0 μm ~5.0 μm 波长具有双波长谐振吸收效应,其理论吸收率大于 80%。模拟计算和实验测试表明,该吸收材料的短波吸收峰值与矩形块长轴方向入射偏振光的 3 阶谐振响应对应,而长波吸收峰值与短轴方向基模谐振响应对应。实验制备了矩形阵列光吸收器并测试了它的的光学特性,结果表明:该吸收器结构在两个偏振方向的等效磁导率系数满足 Lorentz 模型,等效磁导率谱线虚部峰值波长与吸收谐振波长相对应,表明这种吸收材料的偏振吸收与入射电磁波的磁谐振响应有关。研究结果揭示了微纳结构吸收器的双波长频谱吸收机理,有助于实现特定波长生物传感器及光电探测器的设计。

关键词:微纳结构吸收材料;红外探测;偏振吸收;表面等离子;磁谐振

中图分类号:TN215;TB383 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20142211.2998

Polarization-dependent absorption of rectangular-block metamaterials in infrared region

LI Yong-qian^{1*}, GUO Yong-jun¹, SU Lei¹, WANG Bin-bin¹, ZHU Zhen-yu², XU Zheng³

- (1. Key Laboratory of Micro/Nano System for Aerospace of the Ministry of Education, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;
 2. Science and Technology on Metrology and Calibration Laboratory, Beijing Changcheng Institute of Metrology Technology, Aviation Industry Corporation of China, Beijing 100095, China;
 3. Key Laboratory for Micro& Nano Technology and System of Liaoning Province, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China)
- * Corresponding author, E-mail: liyq.nwpu@gmail.com

Abstract: The polarization-dependent absorption of the rectangular-block perfect absorber metamaterials in mid-infrared regime was investigated theoretically and numerically. The rectangular-shaped nanostructure absorber consisting of metal-dielectric-metal layers has dual-band resonant absorption spectrum at infrared wavelength of 2.0—5.0 μm and its absorptivity is more than 80%.

收稿日期:2014-02-21;**修订日期:**2014-03-14.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51175436);中国航空运动协会航空科学基金资助项目(No. 2012ZC53036, No. 20145653029);西北工业大学基础研究基金资助项目(NPU-FFR-JC200811);高等学校创新引智计划资助项目(B13044);辽宁省微纳技术及系统重点实验室开放基金资助项目

The simulation results indicate that the dual-band resonance spectra of the materials are attributed to the third order resonance mode and the fundamental mode of the perpendicular polarized incident electronic field. A rectangle array optical absorber was developed and its optical properties were measured. The test results show that equivalent permeability of the absorber in two polarized configurations is satisfied the Lorentz model and the imaginary parts of the permeability agree well with the resonance absorption wavelengths, which indicates that the polarization absorption of the materials is depended on the magnetic resonance induced by the incident wave. These results point out that the dual-band resonant absorption mechanism of the nanostructure absorber is conducive to design of biosensors and photoelectric detectors in special wavelengths.

Key words: absorber metamaterial; infrared detection; polarization dependent absorption; surface plasmonics; magnetic resonance

1 引 言

结构尺寸小于光波波长的微纳结构具有新颖的光学特性,如负折射率系数、超越衍射极限的分辨率、局部电磁场增强效应和双频谐振等^[1-2];其中金属-电介质层-金属 3 层复合结构具有的完美吸收特性,在提高超薄太阳能电池吸收系数、非制冷红外探测器波长选择、以及生物传感器分子识别中得到广泛应用,目前已经实现了太赫兹波、红外以及可见光波段的微纳结构吸收材料^[3]。

限于微纳制备技术的发展,微纳结构材料的研究始于微波和太赫兹波段。最初是基于 LC 电路谐振原理来分析设计太赫兹和微波波段的吸收器结构。在此波段结构研究中,电介质层材料的介电常数实部调节谐振系统电容,进而产生磁谐振;虚部损失影响吸收率^[4-5]。Shen 采用封闭环谐振器和电介质组成 GHz 波段吸收器,在较宽波段内实现了 93% 的吸收率,具有偏振不敏感以及宽角度响应的特性^[6]。Landy N. I. 在 11.5 GHz 时得到大于 88% 的单峰值吸收,Grant J. 在聚酰亚胺和二氧化硅基底上制备的微纳结构,在 2.12 THz 时得到了大于 77% 的吸收率^[7]。通过改变电介质材料种类及微纳结构的几何参数,实现吸收谐振波长峰值大小及位置的调节,目前正在太赫兹波段实现了单波段、双波段及多波段吸收^[4,7-9]。随着电子束光刻技术的发展,在可见光波段,基于金属结构和电介质材料界面间产生的等离子谐振效应,实现了单波段或者双波段可见光吸收,同时实现局部电场增强^[10]。Ding 用椭圆形 Au 纳米颗粒以及聚合物包覆层组成多层结构,产生大于 100 的局部电场增强系数,在可见光范围实现了双波段吸收^[11]。

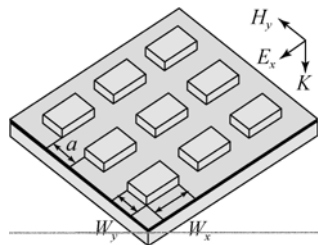
在 2.0~20.0 μm 的红外波段研究的电磁波吸收器结构具有宽带吸收和窄带吸收特性。前者应用于如太阳能薄膜电池、红外探测器中可以提高吸收谱宽度和光电转换效率^[12];后者应用于多波长敏感或者生物传感器中可以得到选择性窄带吸收^[13-14]。多波长选择性吸收方法包括利用单元结构的多阶谐振模^[15],复合单元结构的多个谐振模,或者优化设计结构尺寸来实现多波长选择性窄带吸收以及通过合并多个窄带谐振模实现宽带吸收特性。

为了实现多波段窄带频谱吸收特性,本文研究了金属-电介质-金属多层矩形块阵列结构在红外波段的多波长吸收特性,实验发现矩形块结构阵列的双波长吸收具有偏振性。实验制备并测试了矩形阵列光吸收器的光学特性,数值计算了吸收器结构内部的电磁场和电流密度分布,同时研究了它的偏振吸收机理。

2 红外波段矩形吸收器结构

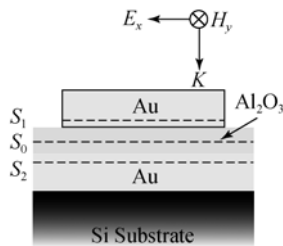
图 1(a) 所示为矩形块结构吸收器阵列示意图,吸收结构由金属-电介质-金属 3 层材料组成。横截面如图 1(b) 所示,上层为 $w \times l$ 的矩形块金属谐振器,下层是厚度为 h 的金属薄膜,中间是厚度为 d 的 Al_2O_3 电介质层,吸收结构制备在硅基底材料上。入射电磁波在金属和电介质材料界面上产生等离子谐振效应,使得红外波段电磁波在电介质区域产生谐振吸收^[16]。使用多物理场耦合软件 (COMSOL Multiphysics) 对上述结构进行建模及光学性能参数计算。在单元结构 X 和 Y 方向设定周期性边界条件,计算了扩展结构阵列的光学吸收特性。在入射光及透射光方向设定完美匹配边界层条件,将结构反射和透射光完全

吸收,消除其对矩形微纳结构的光学特性参数仿真计算结果产生影响。根据 Drude 模型估计 Au 的色散系数,其等离子频率为 1.36×10^{16} Hz^[16],电介质 Al₂O₃ 的折射率系数为 1.767 3。阵列结构的周期长度 $P_x=2 \mu\text{m}$, $P_y=1.5 \mu\text{m}$, 矩形块长度 $W_x=1.5 \mu\text{m}$, 宽度 $W_y=0.75 \mu\text{m}$, Au 厚度为 $0.1 \mu\text{m}$, Al₂O₃ 层厚度为 $0.05 \mu\text{m}$ 。计算垂直入射光沿着 X 轴和 Y 轴偏振情况下,吸收器阵列结构在 $2.0 \sim 5.0 \mu\text{m}$ 内的吸收谱线如图 1(c) 所示, E_x 线偏振光正入射时的吸收谐振波长为 $2.75 \mu\text{m}$, 而 E_y 线偏振光正入射时的吸收谐振波长为 $3.95 \mu\text{m}$ 。两个谐振波长峰值吸收率均大于 80%。



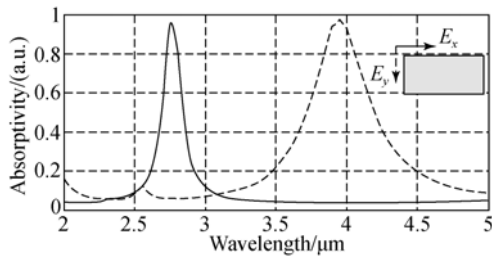
(a) 矩形块红外吸收结构示意图

(a) Schematic of rectangular-block array absorber



(b) 纵截面结构

(b) Metal-dielectric-metal three layers



(c) 偏振吸收谱

(c) Absorption spectra in E_x and E_y polarized incident lights

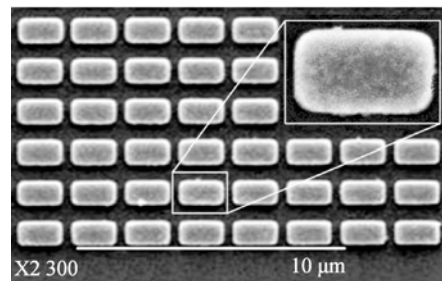
图 1 吸收器结构

Fig. 1 Schematic of absorber

S_0, S_1, S_2 标注出电磁场强度分布与电流密度分布位置。 S_0 位于 Al₂O₃ 电介质层中间, S_1 位于电介质层与金属谐振器界面上侧 5 nm 处, S_2 位于电介质层与金属薄膜界面下侧 5 nm 处。

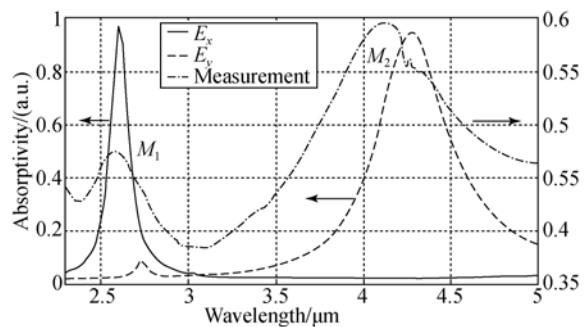
3 红外波段吸收结构光学特性

采用电子束光刻及剥离工艺制备的吸收器样品如图 2(a) 所示, 矩形结构阵列面积为 $40 \mu\text{m} \times 30 \mu\text{m}$ 。用傅里叶变换红外光谱仪 (FTIR, Vertex80V, Bruke) 在红外显微镜 (Bruke, Hyperion 2000) 下, 采用液氮制冷式碲镉汞红外探测器测量反射率。由于底层金膜厚度为 100 nm, 远大于中远红外光 ($2.0 \sim 10.0 \mu\text{m}$) 在该波段金薄膜的穿透深度, 认为所研究的吸收器材料透射率为 0。在 FTIR 反射模式测量垂直入射情况下得到反射率为 $R(\omega)$, 根据能量守恒计算其吸收率为 $A(\omega) = 1 - R(\omega)$ 。实验光源为 $2.0 \sim 10.0 \mu\text{m}$ 的非偏振光, 测量其吸收谱如图 2(b) 点划线所示。扫描电镜 (SEM) 测量制备的器件在 XY 平面结构尺寸, 重新建模计算得到吸收谱线如图 2(b) 所示, 与图 1(c) 设计吸收谱之间存在偏移。测试结果曲线在 $2.0 \sim 5.0 \mu\text{m}$ 波长内存在 2 个谐振吸收峰值, M_1 谐振吸收峰值与 E_x 偏振吸收峰值一致, M_2 谐振吸收峰值与 E_y 偏振吸收峰值接近。



(a) 实验制备的矩形块阵列结构扫描电镜 (SEM) 图

(a) Scanning electron microscopy (SEM) image of fabricated absorber arrays



(b) 傅里叶变换红外光谱仪测试吸收谱线

(b) Absorption spectra

图 2 扫描电镜与吸收光谱

Fig. 2 SEM and absorption spectra

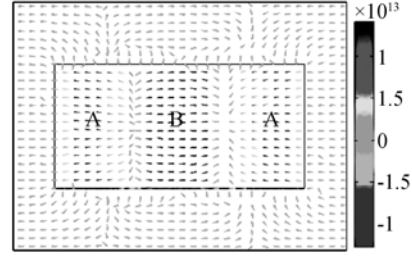
虽然测试与模拟计算结果的谐振峰值相接近,由于制造误差使得图 2(b)中的实验测试数据与模拟计算结果之间仍存在一定的偏差。分析其原因包括:(1)矩形块单元结构制备误差,如图 2(a)中单元结构放大图所示,制备圆角并非理想直角;(2)结构材料的纯度对所制备结构的光学特性有影响。样品 SEM 组分分析表明,电子束热沉积工艺制备的金属结构中含有微量硅及氮等元素,影响了制备材料的光学特性;(3)模拟计算中材料的光学特性参数来自于文献资料,与实验中材料的真实值之间存在差异。尽管测试曲线与模拟计算谱线之间存在上述偏差,双波长谐振吸收峰值仍明显存在。

4 偏振吸收波长磁场及电流密度分布

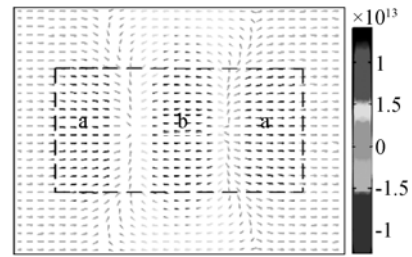
为了研究偏振吸收的产生机理,计算了在入射电磁场作用下,矩形块单元结构中诱导电流密度及磁场分布。如图 3(a)和(b)所示,入射光 M_1 的电场分量 E_x 沿矩形块长轴方向偏振入射时,在金属谐振器与金属反射层内诱导产生反向位移电流密度分布,该电流密度分布呈现 3 次谐波分布形式。在金属谐振器内 A 和 B 部位产生电流密度峰值,但中间部位 B 与两端 A 部位的位移电流相位相反;在下层反射层内同样产生 3 次谐波峰值,但与金属谐振器内对应位置(a 和 b)的位移电流运动方向相反。 E_x 偏振入射情况下,入射电磁波的磁场分量 H_y 作用在上层矩形金属谐振器与下层金属反射层中产生反向感应电荷积累,形成 3 阶磁偶极子。当入射电磁波频率与磁偶极子振动频率相匹配时产生磁偶极子谐振^[17],得到最大吸收系数。同样,当波长为 M_2 的入射光 E_y 分量沿矩形块短轴方向偏振入射时,在对应金属层内同样产生反向环形位移电流密度分布,但该电流密度呈现一次基模分布形式。

在谐振波长 E_x 偏振入射光激励下,中间介质层内的磁场强度分布同样呈现偏振谐振形式。如图 3(c)所示,在电介质层内沿矩形块长轴方向产生对应的高阶磁场谐振,该磁场谐振模与上、下金属层内的电流密度分布的空间位置相对应。谐振波长 E_y 分量沿矩形块短轴方向偏振入射时,在中间介质层内短轴方向产生一次基模磁谐振(这里没有显示)。与可见光波段相同,在中远红

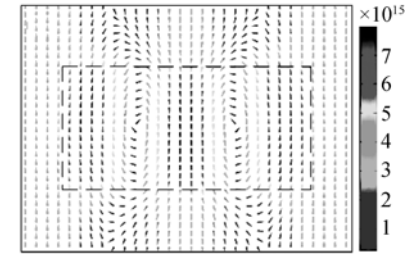
外波段(2.0~5.0 μm)的谐振原理同样是基于金属结构与电介质材料界面的等离子谐振效应^[18]。



(a) 上层金属矩形块内图 1(b) 中 S_1 位置的电流密度分布
(a) Current density distribution in cross section S_1



(b) 下层金属膜内图 1(b) 中 S_2 位置电流密度分布
(b) Current density distribution in cross section S_2



(c) 对应中间介质层内图 1(b) 中 S_0 位置的磁场分布
(c) Magnetic field distribution in the dielectric layer

图 3 入射电磁波电场分量 E_x 沿着 X 轴偏振入射,在矩形块单元内产生的电流密度和磁场分布(箭头表示电流密度和磁场的矢量方向,颜色表示幅值。电流密度单位为 A/m^2 ,磁场的单位为 H/m^2)

Fig. 3 Current density and magnetic field distribution within the unit cell of the rectangular block absorber in the condition of polarized electronic field along the X axis. (Arrows represent the direction of displacement current and magnetic field. Color denotes the magnitude. Unit of current density is A/m^2 , Unit of magnetic field is H/m^2).

5 偏振吸收的等效磁导率系数

根据等效介质理论,当结构表面尺寸小于或

等于电磁波波长的情况下,将微纳结构表面等效为匀质介质来研究其宏观光学特性参数^[19]。D. R. Smith 提出散射参数(S 参数)方法,根据反射和透射频谱、相位信息计算多层结构的等效光学特性参数^[20]。

利用 S 参数法计算矩形块结构阵列在偏振光激励下的等效磁导率系数如图 4 所示, E_x 偏振方向的磁导率系数虚部峰值波长与图 2(b) M_1 吸收波长对应,而 E_y 偏振方向的磁导率系数虚部峰值波长与 M_2 吸收波长对应。

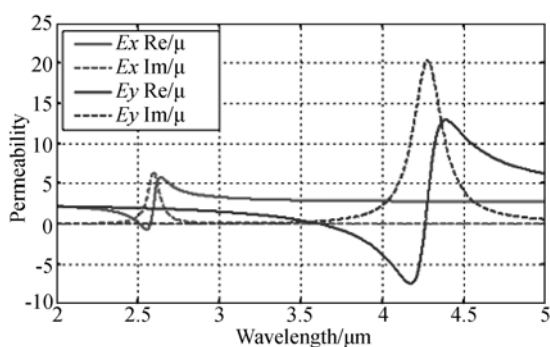


图 4 矩形块阵列吸收器的偏振磁导率系数

Fig. 4 Relative permeability of rectangular block absorber in E_x and E_y polarized incident lights by scattering parameter method

多层复合结构的等效磁导率系数由 Lorentz 模型描述:

$$\mu_r(\omega) = \mu_\infty + \frac{\omega_{pm}^2}{\omega_{om}^2 - \omega^2 - i\gamma_m \omega}, \quad (1)$$

式中: ω_{pm} , ω_{om} , γ_m 和 μ_∞ 分别为由磁偶极子谐振产生的等离子体频率、金属结构中束缚电子的振动频率、阻尼系数和极限频率下的静态磁导率。该

模型用于描述非金属外层电子及金属内层电子的束缚运动。用式(1)描述矩形块结构中产生的磁偶极子谐振时,拟合出图 4 所示 E_x 和 E_y 偏振光作用下的磁导率谱分别为:

$$\mu_{xr}(\omega) = 2.5 + \frac{334^2}{725^2 - \omega^2 - i \cdot 24\omega}, \quad (2)$$

$$\mu_{yr}(\omega) = 2.5 + \frac{444^2}{441^2 - \omega^2 - i \cdot 22\omega}, \quad (3)$$

式中 $\mu_{xr}(\omega)$ 和 $\mu_{yr}(\omega)$ 分别为 E_x 和 E_y 偏振光作用下矩形块阵列结构的磁导率系数谱值。图 4 中显示等效磁导率系数虚部峰值波长与图 2(b)所示谐振吸收波长相对应,表明这种结构的吸收特性与入射电磁波的磁谐振响应相关。

6 结 论

研究了红外波段矩形块阵列吸收器结构的偏振光吸收特性,该吸收器结构在 $2.0 \sim 5.0 \mu\text{m}$ 波段内具有双吸收峰值特性。在 E_x 和 E_y 偏振光激励下,计算了矩形块单元结构内位移电流密度和磁场分布,以及磁导率系数的 Lorentz 模型。理论计算和实验测试表明,双谐振吸收峰值分别对应矩形块长轴方向入射偏振光的 3 阶谐振响应和矩形块短轴方向的基模谐振响应。根据等效介质理论计算出该吸收器在 E_x 和 E_y 方向的磁导率系数谱线均满足 Lorentz 模型;等效磁导率虚部峰值波长与吸收谐振波长相一致,表明这种吸收结构的偏振吸收谐振波长与入射电磁波的磁谐振响应有关。研究结果为设计中远红外波段生物传感器及多波长光电探测器提供了基础。

参考文献:

- [1] LIU Y M, ZHANG X. Metamaterials: a new frontier of science and technology [J]. *Chemical Society Reviews*, 2011, 40(5): 2494-2507.
- [2] 袁纵横, 苏睿, 黄静. 宽谐振区光学纳米天线的谐振 [J]. *光学 精密工程*, 2013, 21(6): 1518-1523.
YUAN Z H, SU R, HUANG J. Resonance of optical nano-antenna with wider resonant areas [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(6): 1518-1523. (in Chinese)
- [3] SCHURING D, MOCK J J, JUSTICE B J, et al..

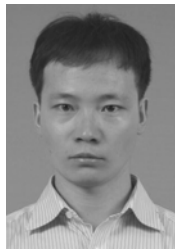
- Metamaterial electromagnetic cloak at microwave frequencies [J]. *Science*, 2006, 314 (5801): 977-980.
- [4] CHENG G H, XIONG L, QIN F, et al.. Investigation on the role of the dielectric loss in metamaterial absorber [J]. *Optics Express*, 2010, 18(7): 6598-6603.
- [5] LANDY N I, SAJUYIGBE S, MOCK J J, et al.. Perfect metamaterial absorber [J]. *Physical Review Letters*, 2008, 100(20): 207402.
- [6] SHEN X P, CUI T J, ZHAO J M, et al.. Polarization-independent wide-angle triple-band metamate-

- rial absorber [J]. *Optics Express*, 2011, 19(10): 9401-9407.
- [7] GRANT J, MA Y, SAHA S, *et al.*. Polarization insensitive terahertz metamaterial absorber [J]. *Optics Letters*, 2011, 36(8): 1524-1526.
- [8] HU T, BINGHAM C M, PILON D, *et al.*. A dual band terahertz metamaterial absorber [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2010, 43(22): 225102.
- [9] MA Y, CHEN Q, JAMS G, *et al.*. A terahertz polarization insensitive dual band metamaterial absorber [J]. *Optics Letters*, 2011, 36(6): 945-947.
- [10] BARNES W L, DEREUX A, EBBESEN T W. Surface plasmon subwavelength optics [J]. *Nature*, 2003, 424(6950): 824-830.
- [11] DING P, ERJUN L, CAI G W, *et al.*. Dual-band perfect absorption and field enhancement by interaction between localized and propagating surface plasmons in optical metamaterials [J]. *Journal of Optics*, 2011, 13(7): 075005.
- [12] SHCHEGOLKOV D Y, AZAD A K, O'HARA J F, *et al.*. Perfect subwavelength fishnet like metamaterial-based film terahertz absorbers [J]. *Physical Review B*, 2010, 82(20): 205117.
- [13] HAO J M, JING W, LIU X L, *et al.*. High performance optical absorber based on a plasmonic metamaterial [J]. *Applied Physics Letters*, 2010, 96(25): 251104-1-3.
- [14] LIU X L, TATIANA S, ANTHONY S, *et al.*. Infrared spatial and frequency selective metamaterial with near-unity absorbance [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2010, 104(20): 207403.
- [15] WANG J Q, FAN C Z, DING P, *et al.*. Tunable broad-band perfect absorber by exciting of multiple plasmon resonances at optical frequency [J]. *Optics Express*, 2012, 20(14): 14871-14878.
- [16] JOHNSON P B, CHRISTY R W. Optical Constants of the Noble Metals [J]. *Physical Review B*, 1972, 6(12): 4370-4379.
- [17] HAO J M, LEI Z, MIN Q. Nearly total absorption of light and heat generation by plasmonic metamaterials [J]. *Physical Review B*, 2011, 83(16): 165107.
- [18] 黎永前,王斌斌,苏磊,等. 微纳结构红外吸收材料光学常数的解析模型[J]. *光学学报*, 2013, 33(12): 1216002-1-6.
- LI Y Q, WANG B B, SU L, *et al.*. Analytic model of optical constants for infrared absorption material with nanostructure [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(22): 1216002-1-6
- [19] EHSAN A, MORTENSEN N A, WUBS M. Quantum optical effective-medium theory for loss-compensated metamaterials [J]. *Physical Review Letters*, 2013, 110(15): 153602.
- [20] SMITH D R, VIER D C, KOSCHNY T, *et al.*. Electromagnetic parameter retrieval from inhomogeneous metamaterials [J]. *Physical Review*, 2005, 71(3): 036617.

作者简介:



黎永前(1970—),男,陕西富平人,博士,副教授,1998年、2003年于西北工业大学分别获得硕士、博士学位。研究方向:1.光电测试计量理论与技术;研究光电传感器、测试方法及其应用技术,基于微流体与光学集成的生物检测方法;2.微纳光学理论及应用:微纳结构与中远红外光、太赫兹电磁波的相互作用理论及应用研究。E-mail: liyq.nwpu@gmail.com



郭勇君(1987—),男,陕西商洛人,硕士,2011年于长安大学获得学士学位,主要从事微纳光学理论及应用方面的研究。E-mail: guoyongjun99@mail.nwpu.edu.cn