

微纳结构红外吸收材料光学常数的解析模型

黎永前¹ 王斌斌¹ 苏磊¹ 朱振宇² 周自力²

(¹ 西北工业大学空天微纳米系统教育部重点实验室, 陕西 西安 710072)
(² 中国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)

摘要 在红外微纳结构吸收材料的研究中, 对其等效光学常数的估计有助于理解材料的吸收、反射及辐射特性。常用的方法是依据等效介质理论将微纳结构等效为匀质材料, 采用 Smith 于 2002 年提出的 S 参数法进行估计, 而该方法没有直接反映微纳结构材料特性及几何结构与等效光学常数之间的关系。采用 Drude-Lorentz 模型描述红外微纳结构材料吸收性能的色散关系, 根据有效电子数浓度理论和等效电路理论, 以矩形结构吸收材料为代表, 建立了红外微纳结构吸收材料的几何结构参数与 Drude-Lorentz 模型参数之间的函数关系。该模型建立了微纳材料的结构、材料参数与其光学常数之间的量化关系, 为红外微纳结构吸收材料的设计提供了理论依据。

关键词 物理光学; 微纳结构; 吸收; Drude-Lorentz 模型; 介电常数; 磁导率; 红外探测器

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.1216002

Analytic Model of Optical Constants for Infrared Absorption Material with Nanostructure

Li Yongqian¹ Wang Binbin¹ Su Lei¹ Zhu Zhenyu² Zhou Zili²

(¹ Key Laboratory of Micro/Nano Systems for Aerospace of Ministry of Education, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, Shaanxi 70072, China)
(² Science and Technology on Metrology and Calibration Laboratory, Beijing 100095, China)

Abstract The estimation of equivalent optical parameters of the nanostructure absorber materials will help to understand its absorption, reflection and radiation characteristics. The effective optical parameters of the metamaterials are estimated by the S-parameters proposed by Smith in 2002, which assumes the nanostructure metamaterials to be homogeneous bulk material, without reflecting the relationship between the equivalent optical parameter, the geometrical structure and material characteristics. Here an analytical theory in which the Drude-Lorentz model is adopted to describe the dispersion relations of metamaterials' absorptive characteristics in infrared (IR) is presented. Based on the effective electron density and the equivalent circuit analysis, a functional description between the geometrical parameters and its Drude-Lorentz model parameters has been built. This analysis on periodic arrangements of rectangular structures array is performed. The model establishes the quantitative relationship between structure parameters, material parameters and its optical constants. It offers an accurate prediction for their dispersive behavior at near-IR wavelengths.

Key words physical optics; nanostructure; absorption; Drude-Lorentz model; permittivity; permeability; infrared detector

OCIS codes 260.3060; 160.1890; 240.6680; 160.4760; 350.3618

1 引言

当微纳结构材料特征尺寸接近或者小于电磁波

波长时, 这种材料与电磁波的相互作用会产生新颖的光学效应, 如负折射^[1-2]、超强吸收^[3]、电磁诱导

收稿日期: 2013-05-30; **收到修改稿日期**: 2013-08-08

基金项目: 国家自然科学基金(51175436)、西北工业大学基础研究基金(JC200811)、航空科学基金(2012ZC53036)、高等学校创新引智计划(B13044)、辽宁省微纳米技术及系统重点实验室开放基金

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方面的研究。

E-mail: liyq@nwpu.edu.cn

透射^[4]、表面等离子体效应^[5-6]、纳米天线^[7]等。微纳结构材料学与电磁波学的交叉研究产生了新的研究领域——微纳光子学。其中,微纳结构的超强吸收特性研究起源于2008年Landy等^[8]提出的“完美吸收器”概念。利用微纳结构对入射电磁波的谐振效应,可实现对特定波段电磁波接近100%的吸收,这种特性使它在光电探测^[9]、微测辐射热计^[10]、热成像^[11]等领域有广阔的应用前景。

在红外吸收微纳结构材料的研究中,对其等效光学常数的估计有助于理解材料的吸收、反射及辐射特性。2002年Smith等^[12]根据等效介质理论将亚波长结构等效为均匀材料提出S参数法,该方法一直被用于微纳结构材料等效光学常数的计算。S参数法根据结构材料的透射率和反射率求解折射率系数 n 、表面阻抗 Z 、相对介电常数 ϵ_r 和相对磁导率 μ_r ,而无法直接反映光学常数与吸收材料结构参数、材料特性之间的关系^[13],这使得吸收材料的设计缺少直观性^[14]。本文建立了微纳结构吸收材料的色散模型,并据此建立微纳结构光学常数与吸收器结构及材料参数之间的关系。

经典的材料色散模型——Drude模型和Lorentz模型可解释匀质材料的色散关系。Drude模型用于计算低频电磁波作用下金属材料的介电常数,而Lorentz模型用于计算非金属材料及高频电磁波作用下金属材料的介电常数。1996年Pendry等^[15-17]研究了金属丝阵列的色散关系,建立了描述其相对介电常数的等效Drude模型,随后建立了双金属开口谐振环相对磁导率的等效Lorentz模型。随着微纳结构材料研究范围的扩大,更多新型微纳结构材料被提出,如矩形块结构^[18]、渔网结

构^[19-20]、十字结构^[21-22]等。矩形块结构为红外吸收材料的基本结构单元,本文在Drude-Lorentz模型的基础上,建立了矩形块微纳结构吸收材料的色散模型。

2 微纳结构吸收材料单元结构及其工作原理

图1(a)所示的红外吸收材料单元结构由金属材料 and 电介质材料组成,上层为 $w \times l$ 的矩形块金属谐振器,中间层是厚度为 d 的电介质层,底部是厚度为 h 的金属反射层。如图1(b)所示,在入射磁场 H_y 分量的作用下,在单元内上层金属谐振器与下层金属反射层中产生反向感应电荷积累,形成磁偶极子。当入射电磁波频率与磁偶极子振动频率相当时产生磁偶极子谐振^[23]。在入射电场 E_x 分量的作用下,单元内上层金属与下层金属中分别产生同向感应电荷积累,形成两个同向电偶极子,当入射电磁场频率与电偶极子振动频率匹配时产生电偶极子谐振。当结构的等离子体频率与入射电磁场频率相当时,上层金属与下层金属同时发生等离子体谐振。上述金属中产生的等离子体谐振与Pendry研究的金属丝阵列中的等离子体谐振产生原理相同,只与金属材料的性质有关,与介质层材料无关,可以用Drude模型描述。Pendry研究的金属双开口谐振环可等效为LC电路,并用Lorentz模型描述金属双开口谐振环的相对磁导率。图1中上下层金属结构为金属双开口谐振环的变形,其产生的电偶极子谐振和磁偶极子谐振也可以等效为LC电路,因此也可以用Lorentz模型描述其相对介电常数和相对磁导率。

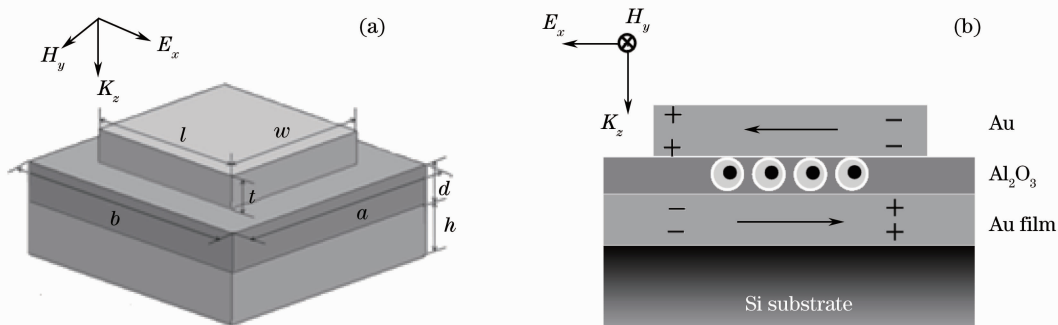


图1 矩形块单元(a)结构及(b)其光吸收原理

Fig. 1 (a) Geometry and (b) absorption principles of the rectangular block cell

3 Drude-Lorentz 模型

Drude 模型色散方程为^[15,24]

$$\epsilon_r(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + i\gamma\omega}, \quad (1)$$

式中 γ 为阻尼系数, ω_p 为金属材料的等离子体频率, $\omega_p^2 = Ne^2/\epsilon_0 m$, N 为金属中单位体积的自由电子数, ϵ_0 为真空中的介电常数, e 为自由电子的电荷量, m 为自由电子的质量。该色散方程描述低频电磁波作用下, 金属原子最外层自由电子的运动^[15]。

Lorentz 模型色散方程为^[3, 23-25]

$$\epsilon_r(\omega) = 1 + \frac{\omega_p^2}{\omega_0^2 - \omega^2 - i\gamma\omega}, \quad (2)$$

式中 ω_0 为电子的固有谐振频率。该色散方程用于描述非金属外层电子或者金属内层电子的束缚运动, 如非金属材料及高频电磁波作用下金属材料中电子绕原子核的振动。在存在多个电子振动模式的情况下, Lorentz 色散方程为

$$\epsilon_r(\omega) = 1 + \sum_{j=1}^M \frac{\omega_{pj}^2}{\omega_{0j}^2 - \omega^2 - i\gamma_j\omega}. \quad (3)$$

由于非铁磁性材料的相对磁导率 $\mu_r(\omega) \approx 1$, 故以上两模型中均没有出现磁导率。在微纳结构材料中, 相对介电常数与相对磁导率均为入射电磁波角频率的函数, 使得其宏观等效相对介电常数和相对磁导率发生变化^[17]。采用 Drude-Lorentz 模型综合考虑电介质材料与金属材料在电磁场作用下的响应^[26-27]:

$$\epsilon_r(\omega) = 1 - \frac{\omega_{pe1}^2}{\omega^2 + i\gamma_{e1}\omega} + \frac{\omega_{pe2}^2}{\omega_{oe}^2 - \omega^2 - i\gamma_{e2}\omega}, \quad (4)$$

$$\mu_r(\omega) = 1 + \frac{\omega_{pm}^2}{\omega_{om}^2 - \omega^2 - i\gamma_m\omega}, \quad (5)$$

式中 ω_{pe1} 和 γ_{e1} 为等离子体谐振对应的等离子体谐振频率和阻尼系数, ω_{pe2} 、 ω_{oe} 和 γ_{e2} 分别为电偶极子谐振产生的等离子体频率、谐振频率和阻尼系数, ω_{pm} 、 ω_{om} 和 γ_m 分别为磁偶极子谐振产生的等离子体频率、谐振频率和阻尼系数。在图 1 结构中, (4) 式中前两项描述等离子体谐振分量, 第三项描述电偶极子谐振分量, 得到微纳结构吸收材料的相对介电常数; (5) 式则描述了上下两层金属中产生的磁偶极子谐振分量, 得到微纳结构吸收材料的相对磁导率。在上述 Drude-Lorentz 模型中, (4) 式中等离子体谐振分量和电偶极子谐振分量分别对应吸收材料对低频和电磁波的作用, 描述了电磁波作用下金属和电介质的谐振响应。

当单元结构由不同尺寸、形状或者不同材料的周期性单元组成时, 各个不同的结构单元将表现出不同的吸收特性, 从而产生多个吸收峰, 这时 (4) 式和 (5) 式的扩展形式为

$$\epsilon_r(\omega) = 1 - \frac{\omega_{pe1}^2}{\omega^2 + i\gamma_{e1}\omega} + \sum_{j=1}^N \frac{\omega_{pe2j}^2}{\omega_{oej}^2 - \omega^2 - i\gamma_{e2j}\omega}, \quad (6)$$

$$\mu_r(\omega) = 1 + \sum_{k=1}^M \frac{\omega_{pmk}^2}{\omega_{omk}^2 - \omega^2 - i\gamma_{mk}\omega}, \quad (7)$$

式中 j 表示第 j 个电谐振分量, k 表示第 k 个磁谐振分量, 分别对应 M 个不同的吸收峰。上述模型可以从理论上解释多个微纳吸收结构形式、不同单元尺寸以及结构单元之间产生的多吸收峰机理^[28]。

4 Drude-Lorentz 模型求解

以图 1 所示矩形块微纳结构吸收材料为例, 根据 (4) 式和 (5) 式描述的 Drude-Lorentz 模型, 求解光学参数与矩形块结构之间的函数关系。在入射电磁波 E_x 分量的作用下, 图 1 所示的矩形块结构上层金属谐振器与下层金属膜同时产生等离子体谐振。根据有效电子浓度理论有^[16]

$$n_{\text{eff}} = N \frac{\omega(t+h)}{a(t+d+h)}, \quad (8)$$

式中 n_{eff} 表示单元结构内的有效电子浓度, 其他参数见图 1 定义。在图 1 所示吸收结构中, 金属内的电子受到邻近金属结构的磁场作用, 以及金属之间的互感作用, 提高了电子的有效质量。推导出电子受到上述两种作用后的等效电子质量为

$$m_{\text{eff}} = \frac{\mu_0 Ne^2 \omega(t+h)}{2\pi} \left(\ln \sqrt{\frac{a(d+t+h)}{\omega(t+h)}} + \frac{\omega(t+h)}{2a(d+t+h)} - \frac{1}{2} \right), \quad (9)$$

式中 μ_0 为真空中的磁导率。

等离子体谐振频率表示为

$$\omega_{pe1}^2 = \frac{e^2 n_{\text{eff}}}{\epsilon_0 m_{\text{eff}}}. \quad (10)$$

将 (8) 式和 (9) 式代入 (10) 式即可得到矩形块吸收结构的等离子体谐振频率。

矩形块单元结构在磁场 H_y 作用下产生磁偶极子谐振, 在上下层金属间将产生反向平行电流, 如图 1(b) 所示, 从而使电荷在金属两端聚集。金属两端由于电荷聚集形成电容效应, 上下两金属之间形成电感效应。将上下金属层等效为如图 2(a) 所示的 LC 电路, 其等效电路参数求解如下:

$$C'_m = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r \omega(l/2)}{d}, \quad (11)$$

$$L'_m = \frac{\mu_0 dl}{\omega}, \quad (12)$$

$$C_m = \frac{C'_m}{2} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r \omega l}{4d}. \quad (13)$$

由此得到磁谐振频率 ω_{om} 为

$$\omega_{om} = \sqrt{\frac{1}{L'_m C_m}} = \frac{2c}{nl}, \quad (14)$$

式中 C'_m 为两个金属平板末端各自产生的电容, C_m 为两个金属平板产生的总电容, L'_m 为两个金属平板产生的电感。 ϵ_r 为中介质层的相对介电常数, μ_r 为中介质层的相对磁导率, $n = \sqrt{\epsilon_r \mu_r}$ 为中介质层

的折射率, c 为真空中的光速。(14)式说明矩形块结构的磁谐振频率取决于矩形块平行于电场方向的长度 l 和中介质层的折射率 n 。

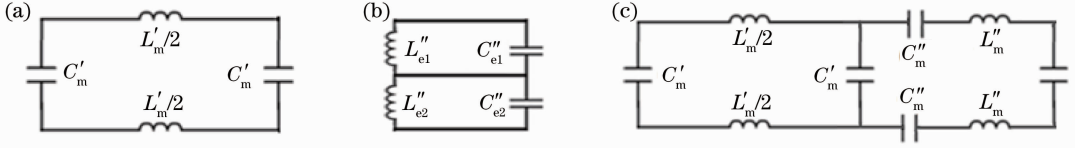


图 2 矩形块结构电磁谐振响应的等效 LC 电路模型。(a)磁偶极子谐振；(b)电偶极子谐振；(c)考虑结构单元间电容和电感作用

Fig. 2 Equivalent circuit model of electromagnetic resonance response of rectangular absorber structure. (a) Magnetic dipole resonance; (b) electric dipole resonance; (c) considering both capacitance and inductive effective

考虑结构单元之间的电容和电感耦合效应, 则其等效 LC 电路模型如图 2(c)所示, 故

得到阻尼系数为

$$\gamma_{e1} = \frac{\epsilon_0 a(d+t+h)}{\alpha \omega} \omega_{pe1}^2, \quad (23)$$

$$\gamma_{e2} = \frac{2\sigma}{\mu_0} \sqrt{\frac{a(d+t+h)}{\omega(t+h)}}, \quad (24)$$

$$\gamma_m = \frac{2\sigma}{\mu_0} \sqrt{\frac{a}{l}}. \quad (25)$$

$$\omega_{om} = \sqrt{\frac{1}{L_m C_m}} = \frac{c}{n} \sqrt{\frac{2}{\left[\frac{l}{4d} + \frac{t}{2(a-l)} \right] [2dl + t(a-l)]}}. \quad (15)$$

由于 $L'_m \gg L''_m, C'_m \gg C''_m$, 使得单元结构之间的耦合效应项 L''_m 和 C''_m 可以忽略, 故用(14)式计算 ω_{om} 。

5 结果与讨论

考虑微纳结构吸收材料中, 电介质材料与金属材料在电磁场作用下的响应, 根据单元结构几何参数和材料特性, 采用上述 Drude-Lorentz 模型即可求解出相对介电常数和磁导率。对图 1 所示矩形块微纳结构吸收材料, 计算出其在近红外波段的相对介电常数和相对磁导率如图 3(a)和(b)所示, 同时, 采用 S 参数法计算其光学参数结果如图 3(c)和(d)所示^[23]。由图可见, 尽管两者之间谐振波长存在微小的偏移, 上述方法计算得到的矩形块结构吸收材料光学特性曲线与 S 参数法计算结果一致。

制备出的矩形块微纳结构吸收材料扫描电镜 (SEM)图如图 4(a)所示。其结构参数为: 矩形块长度 $l=0.75 \mu\text{m}$, 宽度 $w=1.50 \mu\text{m}$, 矩形块短轴方向的周期 $a=2.00 \mu\text{m}$, 矩形块长轴方向的周期 $b=1.50 \mu\text{m}$, 上层金属谐振器厚度 $t=0.10 \mu\text{m}$, 中介质层厚度 $d=0.05 \mu\text{m}$, 下层金属膜厚度 $h=0.10 \mu\text{m}$; 上下层为金, 电阻率 $\rho=2.40 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$; 中介质层为 Al_2O_3 , 其折射率 $n=1.75$ 。采用基于时域有限差分法的商业软件 FDTD Solution 计算其在 E_x 入射电磁波作用下吸收频谱特性如图 4(b)所示, 其谐振波长为 $3.67 \mu\text{m}$ 。实验发现在 $1.0 \sim 3.0 \mu\text{m}$ 范围内存在较小的吸收峰值, 这归结于单元结构和与其相邻单元结构或者更远处单元结构的电磁响应。

假设金属材料的占空比为 $F = \frac{w}{ab}$, 则与磁谐振频率 ω_{om} 相对应的等离子体频率为^[15]

$$\omega_{pm} = \omega_{om} / \sqrt{1-F}. \quad (16)$$

图 1 所示矩形块吸收结构在电场 E_x 作用下产生电偶极子谐振, 如图 2(b)所示。上下两层金属板内产生同向平行电流, 故在此方向上单元结构内部不产生电容。单元结构之间的电容和电感为

$$C'_{e1} = C'_{e2} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r t w}{a-l}, \quad (17)$$

$$L''_{e1} = L''_{e2} = \frac{\mu_0 t(a-l)}{w}. \quad (18)$$

C'_{e1} 和 C'_{e2} 为并联关系, L''_{e1} 和 L''_{e2} 为并联关系, 故此总电容与总电感计算为

$$C_e = 2C'_{e1} = \frac{2\epsilon_0 \epsilon_r t w}{a-l}, \quad (19)$$

$$L_e = 2L''_{e1} = \frac{2\mu_0 t(a-l)}{w}. \quad (20)$$

得到电谐振频率

$$\omega_{oe} = \sqrt{\frac{1}{L_e C_e}} = \frac{c}{2nt}. \quad (21)$$

与电谐振频率 ω_{oe} 对应的等离子体频率为^[15]

$$\omega_{pe2} = \omega_{oe} / \sqrt{1-F}. \quad (22)$$

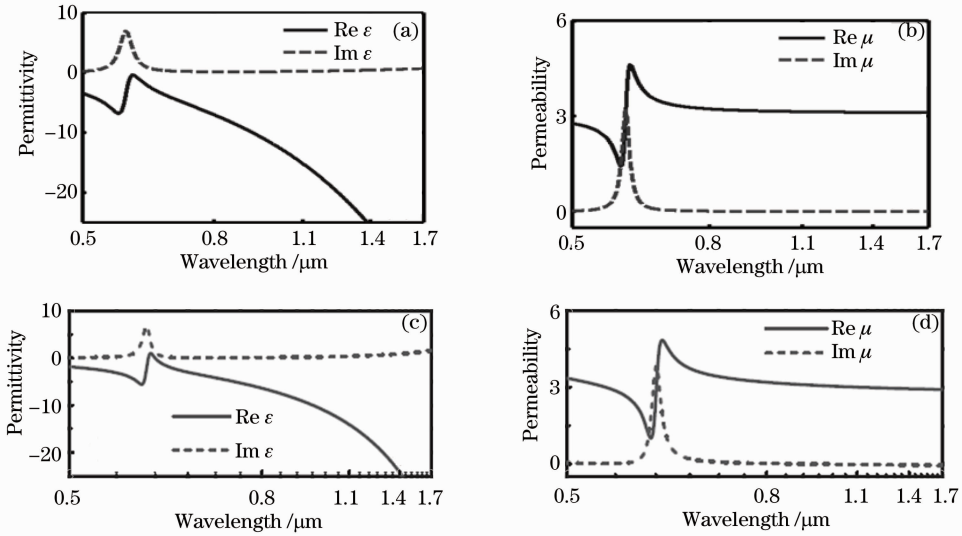


图 3 矩形块微纳结构吸收材料在红外波段的光学常数曲线。文中计算方法得到的(a)相对介电常数与(b)相对磁导率；S 参数法计算得到的(c)相对介电常数与(d)相对磁导率

Fig. 3 Optical constant curves of the rectangular absorber structure in infrared wavelength range. (a) Relative permittivity and (b) relative permeability calculated by the proposed method; (c) relative permittivity and (d) relative permeability calculated by S-parameter method

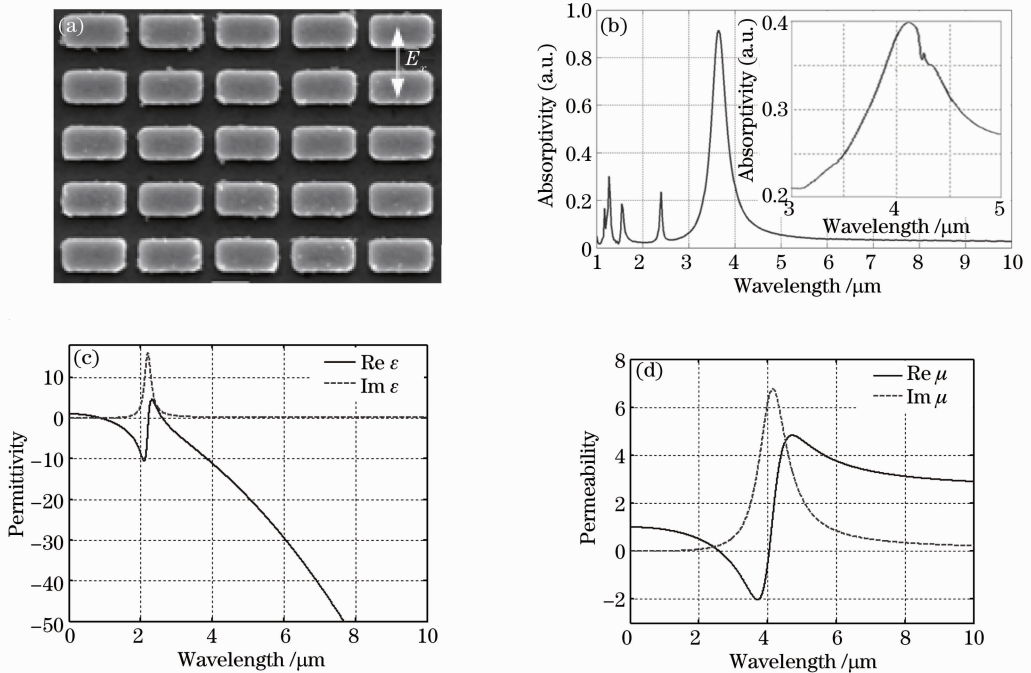


图 4 微纳结构红外波吸收材料光学特性参数实验结果。(a)矩形块微纳结构吸收材料局部 SEM 图；(b)仿真计算对应 E_x 入射方向吸收频谱特性，插图为测试样件在 $3.0 \sim 5.0 \mu\text{m}$ 之间的吸收谱线；(c)相对介电常数；(d)相对磁导率

Fig. 4 Experimental optical parameters of the absorber nanostructure in infrared wavelength range. (a) SEM images of absorber structures; (b) absorption spectrum for the E_x polarized incidence, where the inset shows the experimental absorption spectrum in the range of $3.0 \sim 5.0 \mu\text{m}$; (c) relative permittivity; (d) relative permeability

使用 Bruker 公司的 VERTEX 70v FT-IR 光谱仪测量样件的反射率和透射率，并根据能量守恒计算吸收率。图 4(b)中插图显示了所制备样品在

$3.0 \sim 5.0 \mu\text{m}$ 之间的测量吸收谱，从图中可见，制备样品测量吸收谱与模拟仿真结果一致。用上述方法计算出制备样件在 E_x 偏振方向的有效介电常数和

有效磁导率,如图 4(c)和(d)所示,对应磁响应谐振峰值位置为 $4.12 \mu\text{m}$,而图 4(b)中对应实际测试谱线吸收峰值位置为 $4.23 \mu\text{m}$ 。由此可见相对磁导率虚部峰值与吸收谱线峰值位置相对应,证明上述计算方法可以估计吸收材料的吸收峰值位置。

6 结 论

建立了以 Drude-Lorentz 模型为基础的微纳结构吸收材料色散模型,用以计算红外波段微纳结构吸收材料的光学特性参数。以红外波段矩形块结构吸收材料为例,根据有效电子数浓度理论和等效电路理论,求解了所建立模型中微纳结构几何参数、材料特性与光学常数之间的函数关系。分析结果表明该模型在描述红外波段矩形块微纳结构吸收材料的色散关系时,与传统的 S 参数方法计算结果相一致。该模型为红外波微纳结构吸收材料的设计提供了理论依据。

参 考 文 献

- 1 D R Smith, J B Pendry, M C K Wiltshire. Metamaterials and negative refractive index [J]. *Science*, 2004, 305(5685): 788—792.
- 2 C M Soukoulis, S Linden, M Wegener. Negative refractive index at optical wavelengths [J]. *Science*, 2007, 315(5808): 47—49.
- 3 C M Watts, X Liu, W J Padilla. Metamaterial electromagnetic wave absorbers [J]. *Advanced Materials*, 2012, 24(23): OP98—OP120.
- 4 L Verslegers, Z Yu, Z Ruan, *et al.*. From electromagnetically induced transparency to super-scattering with a single structure: a coupled-mode theory for doubly resonant structures [J]. *Phys Rev Lett*, 2012, 108(8): 083902.
- 5 D K Gramotnev, S I Bozhevolnyi. Plasmonics beyond the diffraction limit [J]. *Nature Photonics*, 2010, 4(2): 83—91.
- 6 C Genet, T W Ebbesen. Light in tiny holes [J]. *Nature*, 2007, 445(7123): 39—46.
- 7 P Biagioni, J S Huang, B Hecht. Nanoantennas for visible and infrared radiation [J]. *Reports on Progress in Physics*, 2012, 75(2): 024402.
- 8 N I Landy, S Sajuyigbe, J J Mock, *et al.*. Perfect metamaterial absorber [J]. *Phys Rev Lett*, 2008, 100(20): 207402.
- 9 O Hayden, R Agarwal, C M Lieber. Nanoscale avalanche photodiodes for highly sensitive and spatially resolved photon detection [J]. *Nature Materials*, 2006, 5(5): 352—356.
- 10 P Fan, K C Y Huang, L Cao, *et al.*. Redesigning photodetector electrodes as an optical antenna [J]. *Nano Letters*, 2013, 13(2): 392—396.
- 11 D Shrekenhamer, W Xu, S Venkatesh, *et al.*. Experimental realization of a metamaterial detector focal plane array [J]. *Phys Rev Lett*, 2012, 109(17): 177401.
- 12 D R Smith, S Schultz, P Markoš, *et al.*. Determination of

- effective permittivity and permeability of metamaterials from reflection and transmission coefficients [J]. *Phys Rev B*, 2002, 65(19): 195104.
- 13 D R Smith, D C Vier, T Koschny, *et al.*. Electromagnetic parameter retrieval from inhomogeneous metamaterials [J]. *Phys Rev E*, 2005, 71(3): 036617.
 - 14 Y Liu, X Zhang. Metamaterials: a new frontier of science and technology [J]. *Chem Soc Rev*, 2011, 40(5): 2494—2507.
 - 15 J B Pendry, A J Holden, W J Stewart, *et al.*. Extremely low frequency plasmons in metallic mesostructures [J]. *Phys Rev Lett*, 1996, 76(25): 4773—4776.
 - 16 J B Pendry, A J Holden, D J Robbins, *et al.*. Low frequency plasmons in thin-wire structures [J]. *J Physics: Condensed Matter*, 1998, 10(22): 4785.
 - 17 J B Pendry, A J Holden, D J Robbins, *et al.*. Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1999, 47(11): 2075—2084.
 - 18 J Hendrickson, J Guo, B Zhang, *et al.*. Wideband perfect light absorber at midwave infrared using multiplexed metal structures [J]. *Opt Lett*, 2012, 37(3): 371—373.
 - 19 S Zhang, W Fan, K J Malloy, *et al.*. Near-infrared double negative metamaterials [J]. *Opt Express*, 2005, 13(13): 4922—4930.
 - 20 Liu Liming, Zhao Guozhong, Wei Bo. Numerical simulation of filtering characteristics of two-dimensional metallic grid in terahertz band [J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(s1): s111005.
刘立明, 赵国忠, 魏 波. 二维金属线网格结构的太赫兹滤波特性仿真研究[J]. *中国激光*, 2011, 38(s1): s111005.
 - 21 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.
 - 22 Wei Bo, Zhao Guozhong, Liu Liming, *et al.*. Terahertz transmission properties through asymmetrical cross metallic structures by the numerical simulation [J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(s1): s111007.
魏 波, 赵国忠, 刘立明, 等. 非对称十字形金属结构的太赫兹透射特性模拟研究[J]. *中国激光*, 2011, 38(s1): s111007.
 - 23 J Hao, L Zhou, M Qiu. Nearly total absorption of light and heat generation by plasmonic metamaterials [J]. *Phys Rev B*, 2011, 83(16): 165107.
 - 24 Liang Lanju, Yan Xin, Yao Jianquan, *et al.*. Two-dimensional left-handed material based on parallel metallic double rods in terahertz wave [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(3): 0316001.
梁兰菊, 闫 昕, 姚建铨, 等. 基于平行金属双柱的太赫兹波二维左手材料[J]. *光学学报*, 2012, 32(3): 0316001.
 - 25 J Hao, J Wang, X Liu, *et al.*. High performance optical absorber based on a plasmonic metamaterial [J]. *Appl Phys Lett*, 2010, 96(25): 251104.
 - 26 Z Liu, A Boltasseva, R H Pedersen, *et al.*. Plasmonic nanoantenna arrays for the visible [J]. *Metamaterials*, 2008, 2(1): 45—51.
 - 27 W Z Hu, J Dong, G Li, *et al.*. Origin of the spin density wave instability in AFe_2As_2 ($A = \text{Ba}, \text{Sr}$) as revealed by optical spectroscopy [J]. *Phys Rev Lett*, 2008, 101(25): 257005.
 - 28 P V Tuong, J W Park, J Y Rhee, *et al.*. Polarization-insensitive and polarization-controlled dual-band absorption in metamaterials [J]. *Appl Phys Lett*, 2013, 102(8): 081122.