

光控可调谐多频带太赫兹超材料吸收器的特性

孟庆龙^{1**}, 张艳^{2*}, 张彬³, 尚静¹

¹ 贵阳学院食品与制药工程学院, 贵州 贵阳 550005;

² 贵阳学院电子与通信工程学院, 贵州 贵阳 550005;

³ 四川大学电子信息学院, 四川 成都 610065

摘要 设计了一种光控可调谐且具有多个吸收频带的太赫兹超材料吸收器, 并采用 CST 2014 仿真软件对该吸收器的结构进行了仿真。为实现吸收器从单频带到四频带的完美吸收, 在吸收器衬底上设计了 4 个不同长度的金属条。为深入研究该吸收器的传输特性, 分别对该吸收器在 4 个吸收峰处的电场分布进行了仿真。为了进一步实现该吸收器的光控可调谐, 利用抽运激光照射填充在两旁金属条中间的光敏介质。仿真结果表明, 该吸收器在 4 个吸收峰处的吸收率均超过了 95%, 共振机理为 4 个不同长度的金属条所对应共振频率的线性叠加。该吸收器实现了从四频带到双频带的调控。

关键词 材料; 太赫兹; 完美吸收器; 超材料; 多频带; 光控

中图分类号 O439

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.101603

Characteristics of Optically Tunable Multi-Band Terahertz Metamaterial Absorber

Meng Qinglong^{1**}, Zhang Yan^{2*}, Zhang Bin³, Shang Jing¹

¹ Food and Pharmaceutical Engineering Institute, Guiyang University, Guiyang, Guizhou 550005, China;

² School of Electronic and Communication Engineering, Guiyang University, Guiyang, Guizhou 550005, China;

³ College of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610065, China

Abstract An optically tunable terahertz metamaterial absorber with multiple absorption bands is designed. The CST 2014 simulation software is used to simulate the structure of the designed metamaterial absorber. We designed four metallic bars with varied lengths on the substrate to realize that the perfect absorption of the designed metamaterial absorber which can be controlled from single-band to dual-band. The electric field distributions at four absorption peaks of the metamaterial absorber is simulated to further study the transmission characteristics of the metamaterial absorber. The photosensitive medium in the gap of two metallic bars is further irradiated by a pump laser to realize the optically-controlled tuning of the absorber. The simulation results show that the absorptivity of the designed metamaterial absorber at four absorption peaks all exceed 95%. The resonance mechanism of the designed structure is attributed to the overlapping of four resonance frequencies corresponding to the four metallic bars with different lengths. Hence, the perfect absorber can be dynamically controlled from four-band to dual-band.

Key words materials; terahertz; perfect absorber; metamaterials; multi-band; optical control

OCIS codes 160.3918; 120.2440; 260.5740; 260.5430

1 引言

太赫兹波 (Terahertz Wave) 通常是指 0.1~

10 THz (3000~30 μm) 范围内的电磁波^[1-2], 介于微波与红外波之间, 因而太赫兹波兼有微波和光波的特性^[3], 具有广泛的应用前景。随着现代科

收稿日期: 2018-11-11; 修回日期: 2018-12-05; 录用日期: 2018-12-13

基金项目: 国家自然科学基金 (61505036)、贵州省科技厅基金项目 (黔科合 J 字 [2015]2009 号)、博士科研启动经费 (GYU-ZRD (2018)-012)

* E-mail: Eileen_zy001@sohu.com; ** E-mail: scumql@163.com

技术的飞速发展,太赫兹辐射源技术和探测技术均取得了突破性的进展,但是太赫兹功能器件的缺乏,尤其是可控多功能器件的匮乏限制了太赫兹系统的性能及其进一步实用化。纵观国内外关于太赫兹功能器件的研究,虽然已经取得了一定的进步^[4-5],但现有的太赫兹功能器件在工作带宽、调制深度、调制速率、可调谐性和调控手段等诸多方面尚不能完全满足未来太赫兹技术的应用需求。导致太赫兹功能器件发展缓慢的根本原因是大多数自然界材料与太赫兹波相互作用时只能呈现微弱的电磁响应。这种微弱的电磁响应使得由常规材料构成的器件对太赫兹波的吸收非常微弱。然而,对太赫兹波的吸收特别是对太赫兹波的完全吸收在电磁隐身、热辐射、热成像和辐射热仪等方面具有非常潜在的应用价值。因此,探索新的太赫兹波吸收机理,设计新的器件结构,进而实现在室温下稳定运转的可调谐多功能的太赫兹吸收器件是当今太赫兹领域面临的亟待解决的实际问题之一。近年来,基于超材料的太赫兹吸收器受到人们的广泛关注,成为太赫兹领域的热点之一^[6-10]。已有的研究表明,基于超材料设计的太赫兹吸收器件很好地实现了对特定波段太赫兹波的完美吸收^[11-12]。然而,对光控可调谐多频带太赫兹超材料吸收器的研究鲜有报道。

本文给出了磁共振理论和光控理论,分析了仅由单个金属条构成的超材料吸收器对太赫兹波的吸收特性,并将4个不同长度的金属条组合构成一种多频带的超材料吸收器,实现了从单频带到四频带的完美吸收;最后,通过抽运光照射填充在两片金属条中间的光敏介质,实现了从四频带到双频带的完美吸收。

2 理论模型

2.1 磁共振理论

由金属条构成的太赫兹超材料吸收器结构对入射光完全吸收的主要机理源自于结构的磁共振^[13],且吸收器的吸收性能主要取决于结构中中介质层的厚度。同时,由金属条构成的太赫兹超材料吸收器的共振频率可以定性表示为^[14-15]

$$f_m = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC/2}}, \quad (1)$$

式中: L 和 C 分别为整个吸收器结构的等效电感和等效电容。其表达式分别为

$$\begin{cases} L \propto \frac{lT}{w} \\ C \propto \frac{wl}{2T} \end{cases}, \quad (2)$$

式中: l 和 w 分别表示金属条的长度和宽度; T 表示中介质层的厚度。

因此,进一步推导可得太赫兹超材料吸收器的共振频率为

$$f_m \propto \frac{1}{l}. \quad (3)$$

由此可见,太赫兹超材料吸收器的共振频率仅仅与金属条的长度成反比,而与中介质层的厚度无关。

2.2 光控理论

设计并实现实时可调谐的太赫兹超材料吸收器是实际工作中亟待解决的关键问题之一,因而需要对半导体材料中的光生载流子浓度进行实时控制。由半导体物理知识可知,在抽运激光作用下半导体材料中光生载流子的连续性方程可表示为

$$\frac{\partial N}{\partial t} = D_a \frac{\partial^2 N}{\partial x^2} + g(x, t) - \frac{N}{\tau_f}, \quad (4)$$

式中: N 为光生载流子浓度; $g(x, t)$ 为光生载流子产生速率; x 为载流子在半导体材料中的传播距离; $\tau_f = 1/[B_r(n_0 + p_0 + N)]$ 表示光生载流子寿命, B_r 为复合系数, n_0 和 p_0 分别为半导体材料的本征自由电子和空穴; D_a 为扩散系数。

假设抽运激光为高斯脉冲,其时间分布为

$$I(t) = \frac{2\sqrt{\ln 2} E_0}{\sqrt{\pi} \tau S} \exp\left[-4\ln 2 \left(\frac{t-t_0}{\tau}\right)^2\right], \quad (5)$$

式中: E_0 为抽运激光能量; S 为激光光斑面积; τ 为激光脉冲的脉宽。

光生载流子的产生率 $g(x, t)$ 可表示为

$$g(x, t) = \frac{2\sqrt{\ln 2} E_0 (1-R)\alpha\beta}{\sqrt{\pi} \tau S h v} \times \exp\left[-4\ln 2 \left(\frac{t-t_0}{\tau}\right)^2 - \alpha x\right], \quad (6)$$

式中: $R = [(1-n)/(1+n)]^2$ 为半导体材料的反射系数, n 为半导体材料的折射率; β 为量子效率; $\alpha = 4\pi k/\lambda$ 为半导体材料的吸收系数, k 为消光系数, λ 为抽运激光的波长; h 为普朗克常数; v 为抽运激光的频率。

边界条件和初始条件为

$$\begin{cases} N(0, t) = \frac{D_a \partial N}{s \partial x} \Big|_{x=0} \\ N(\infty, t) = 0, N(x, 0) = 0 \end{cases}, \quad (7)$$

式中: s 为表面复合速率。

当半导体材料中的载流子浓度发生变化时, 半导体材料的光学常数(介电常数、电导率等)将会发生改变, 而半导体材料的色散关系可以由多种物理模型描述, 其中, Drude 模型是最为经典的也是最为常见的一种模型^[16-17], 该模型将半导体材料中的载流子看作等离子体(即自由电子气体), 即

$$\begin{cases} \epsilon(\omega) = \epsilon_\infty + i\sigma/(\epsilon_0\omega) \\ \sigma(\omega) = \epsilon_0\omega_p^2/(\gamma - i\omega) \end{cases}, \quad (8)$$

式中: ω 为抽运激光的角频率; ϵ_∞ 为高频介电常数; ϵ_0 为真空介电常数; $\gamma = e/(m^* \mu)$ 为阻尼常数, 其中 e 是自由电子的电荷量, m^* 和 μ 分别表示自由载流子有效质量和迁移率; ω_p 为与光生载流子浓度有关的等离子体频率, 可表示为

$$\omega_p = \sqrt{\frac{Ne^2}{\epsilon_0 m^*}}. \quad (9)$$

由此可见, 在构成太赫兹超材料吸收器的两对金属条之间填充半导体材料时, 其电导率随着抽运

激光强度的增大而增大, 进而其金属性会增强, 可以实现两个金属条的短路。因此, 通过在两个金属条之间填充半导体材料, 有利于抽运激光对太赫兹超材料吸收器的调控。

2.3 结构模型

在设计构成超材料吸收器的金属条时, 通过设计不同长度的金属条以及不同厚度的中间介质层, 进而选择最佳的长度和厚度, 并且通过组合不同长度的金属条, 可以实现多频带的太赫兹波吸收特性。

设计的光控可调谐多频带超材料吸收器结构如图 1 所示。图 1(a) 为光控可调谐超材料吸收器原理图, 图 1(b) 为超材料吸收器结构单元, 图 1(c) 为超材料吸收器结构单元的侧视图。每个结构单元均由两对金属条-中间介质-金属平板这 3 层结构组成, 中间介质的材料为聚酰亚胺(Polyimide), 金属条和金属平板的材料为金(Au), 两对金属条之间填充的介质为砷化镓(GaAs)。

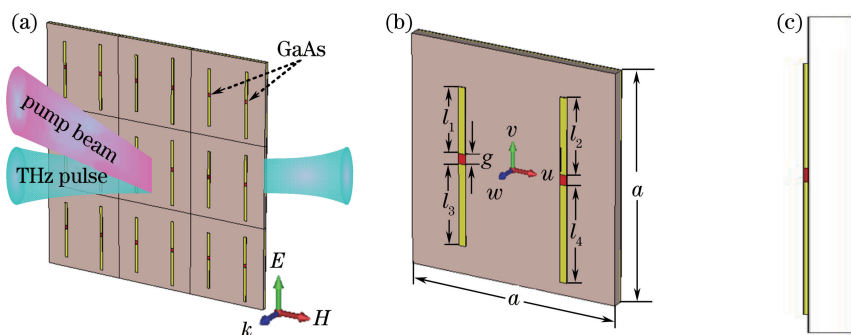


图 1 超材料吸收器结构示意图。(a) 调谐原理; (b) 吸收器结构单元; (c) 单元结构侧视图

Fig. 1 Structural diagram of metamaterial absorber. (a) Tuning principle; (b) unit cell of absorber; (c) side view of unit cell

利用 CST Microwave Studio 2014 软件及时域有限差分(FDTD)法进行数值模拟, 太赫兹波(k)垂直入射到超材料吸收器结构表面, 电场(E)方向与金属条方向平行, 磁场(H)方向与金属条方向垂直。超材料吸收器结构单元的中间介质层 Polyimide 的介电常数 $\epsilon = 3.5$, 厚度为 $4.5 \mu\text{m}$; 金属条和金属平板的电导率 $\sigma = 4.561 \times 10^7 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$, 厚度均为 $d = 0.4 \mu\text{m}$; 金属条的宽度 $w = 1 \mu\text{m}$ 。结构单元的其他尺寸参数为 $a = 90 \mu\text{m}$, $g = 2 \mu\text{m}$, $l_1 = 26 \mu\text{m}$, $l_2 = 30 \mu\text{m}$, $l_3 = 32 \mu\text{m}$, $l_4 = 38 \mu\text{m}$ 。

3 结果与分析

3.1 抽运光强对 GaAs 材料电导率的影响

基于光控理论模型, 分析了抽运激光强度对 GaAs 半导体材料电导率的影响。采用波长为 800 nm , 脉宽为 100 fs 的入射激光进行模拟计算可得到 GaAs 半导体材料内部电导率在时间和空间上的分布, 如图 2 所示。表 1 给出了模拟仿真中 GaAs 半导体材料的参数。

由图 2 可以看出, 当抽运激光照射到半导体材料 GaAs 表面时, 半导体材料 GaAs 中的电导率迅

表 1 GaAs 半导体材料的参数^[18]

Table 1 Parameters of GaAs semiconductor material

Material	$\mu / (\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1})$	β	m^*	D_a	$s / (\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	$B_r / (\text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	k
GaAs	3.3×10^4	1	$0.064m_0$	18.3	1.6×10^5	5×10^{-11}	0.068

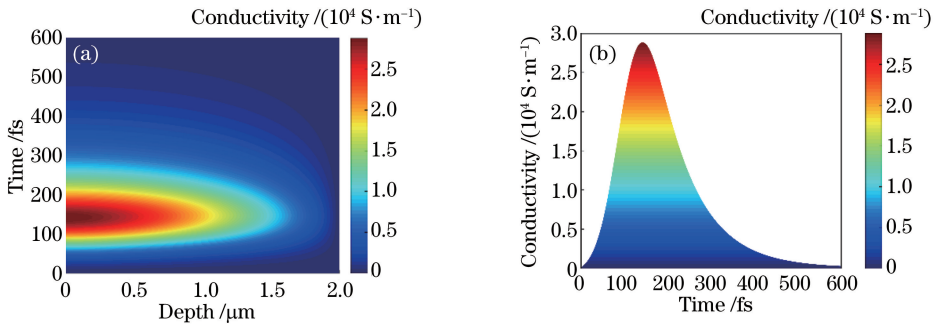


图 2 GaAs 半导体材料中电导率分布。(a)二维分布;(b)一维分布

Fig. 2 Conductivity distribution in GaAs semiconductor material. (a) Two-dimensional distribution; (b) one-dimensional distribution

速增加,且主要集中在表面区域。图 3 进一步给出了半导体材料 GaAs 中的电导率随着抽运激光强度的变化规律。可以看出,半导体材料 GaAs 中的电导率随着抽运激光通量的增大而增大,当电导率增大到一定程度时,半导体材料表现出金属性。

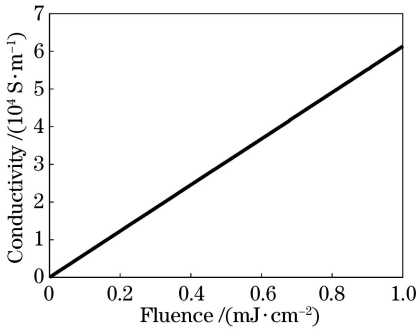


图 3 电导率随抽运激光通量的变化

Fig. 3 Variation of conductivity versus pump laser fluence

3.2 金属条长度对太赫兹波吸收的影响

为了确定超材料结构对太赫兹波吸收的影响,当中介质层厚度为确定值时,图 4 给出了仅由单个金属条构成的超材料吸收器的吸收谱线与金属条长度的变化规律,其中金属条长度分别为 $l_1 = 26 \mu\text{m}$, $l_2 = 30 \mu\text{m}$, $l_3 = 32 \mu\text{m}$, $l_4 = 38 \mu\text{m}$ 。可以看出,太赫兹波吸收谱所对应的共振频率 f 随着金属条长度 l 的增大而减小,由 $f_1 = 2.96 \text{ THz}$ 减小到 $f_4 = 2.15 \text{ THz}$,且吸收率均超过了 95%,进而验证(3)式表明的结论:超材料吸收器的共振频率与金属条的长度成反比。

同时,为了实现具有多个吸收频带的太赫兹超材料吸收器,进一步将 4 种不同长度的金属条组合在一起构成了多频带的太赫兹超材料吸收器结构。图 5 给出了由 4 个不同长度的金属条组合而成的超材料吸收器的吸收谱线。

从图 5 可以看出,由 4 种不同长度的金属条组

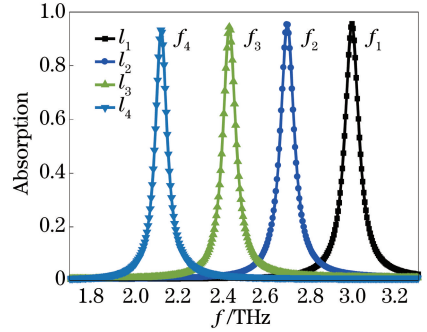


图 4 仅由单个金属条构成的超材料吸收器的吸收谱线
Fig. 4 Absorption spectra of metamaterial absorber composed of only single metallic bar

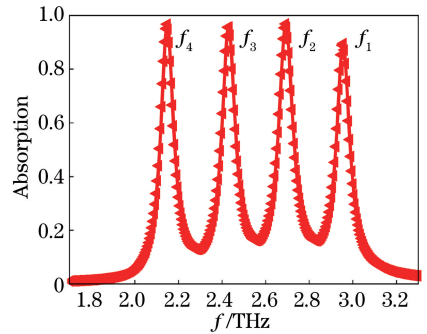


图 5 由 4 个不同长度的金属条组合而成的超材料吸收器的吸收谱线
Fig. 5 Absorption spectra of metamaterial absorber composed of four metallic bars with different lengths

合而成的太赫兹超材料吸收器同时具有 4 个吸收峰,其所对应的共振频率分别为: $f_1 = 2.96 \text{ THz}$, $f_2 = 2.69 \text{ THz}$, $f_3 = 2.43 \text{ THz}$, $f_4 = 2.15 \text{ THz}$,与 4 种仅由单个金属条构成的超材料吸收器结构所对应的共振频率几乎一样。另外,除了第一个共振频率 f_1 所对应的吸收峰值相对较小外,其余 4 个吸收峰的吸收率均超过了 95%,导致第一个共振频率所对应的吸收峰值相对较小的原因是增加了金属条以后单个金属条在整个周期中的占空比变小。为了更明

显地对比由 4 种不同长度的金属条组合而成的太赫兹超材料吸收器的吸收特性与 4 种仅由单个金属条构成的赫兹波吸收器的吸收特性,图 6 给出了由 4 种不同长度的金属条组合而成的超材料吸收器 (R1、R2、R3、R4) 以及 4 种仅由单个不同长度的吸收器 (R5) 结构的吸收谱线。从图 6 可以看出,4 个共振频率所对应的吸收峰几乎重合。

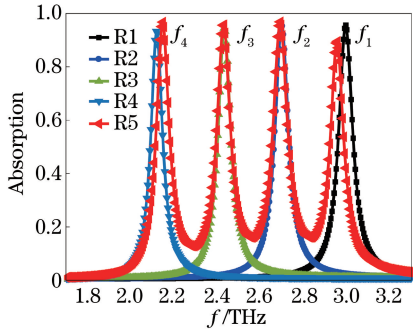


图 6 不同超材料吸收器的吸收谱线对比

Fig. 6 Comparison of absorption spectra of different metamaterial absorbers

为了更好地说明多频带超材料吸收器的共振机理,图 7 分别给出了由 4 种不同长度的金属条组合而成的太赫兹超材料吸收器中 4 个共振频率处所对应的电场 ($|E|$) 分布。

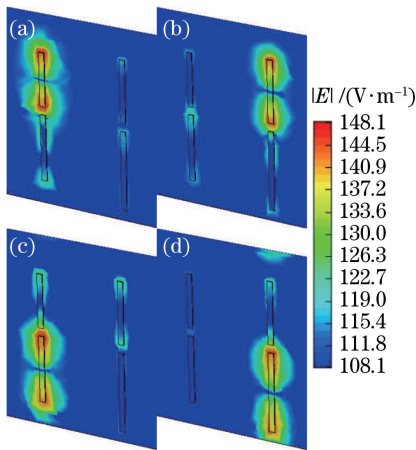


图 7 不同共振频率下超材料吸收器中的电场分布。

(a) $f_1 = 2.96$ THz; (b) $f_2 = 2.69$ THz; (c) $f_3 = 2.43$ THz; (d) $f_4 = 2.15$ THz

Fig. 7 Electric field distributions of metamaterial absorber at different resonance frequencies.

(a) $f_1 = 2.96$ THz; (b) $f_2 = 2.69$ THz; (c) $f_3 = 2.43$ THz; (d) $f_4 = 2.15$ THz

从图 7 可以很明显地看出,共振频率 $f_1 = 2.96$ THz 所对应的电场主要集中在长度为 l_1 的金属条上。共振频率 $f_2 = 2.69$ THz 处所对应的电场

主要集中在长度为 l_2 的金属条上,然而共振频率 $f_3 = 2.43$ THz 和 $f_4 = 2.15$ THz 处所对应的电场主要集中在长度为 l_3 和 l_4 的金属条上。更进一步地,由(3)式和图 4 可知,超材料吸收器的共振频率与金属条的长度成反比,图 1(b)中金属条的长度 (l_1, l_2, l_3, l_4) 逐渐增大,而它们所对应的共振频率逐渐减小。因此,设计的四频带超材料吸收器的吸收机理主要源自于 4 个不同长度的金属条所对应共振频率的线性叠加。

3.3 抽运光强对太赫兹波吸收特性的影响

在超材料吸收器中,通过组合 4 种不同长度的金属条,实现了从单频带完美吸收到多频带完美吸收的被动调控,而这种被动可调的方法在实际应用中具有明显的缺陷。因此,进一步在两对金属条的缺口处填充光敏介质 (GaAs),目的是实现超材料吸收器的主动调控。图 8 给出了在两对金属条的缺口处填充光敏介质后的超材料吸收器的吸收谱线随填充介质的电导率的变化规律。

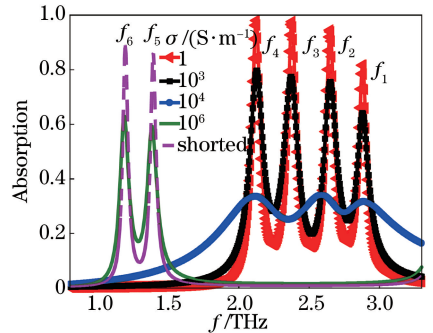


图 8 超材料吸收器的归一化吸收谱线随填充介质的电导率的变化

Fig. 8 Normalized absorption spectra of metamaterial absorber as function of conductivity of filling dielectric

从图 8 可以看出,当填充介质半导体材料 GaAs 的电导率相对较小时,超材料吸收器的共振频率所对应的吸收率随着填充介质的电导率的增大而减小。然而,随着填充介质电导率的进一步增大,吸收器的共振频率由原来的 4 个频带 ($f_1 = 2.96$ THz, $f_2 = 2.69$ THz, $f_3 = 2.43$ THz, $f_4 = 2.15$ THz) 逐渐减小为 2 个频带 ($f_5 = 1.39$ THz, $f_6 = 1.19$ THz), 进而实现从四频带到双频带的调控。

4 结 论

由磁共振理论得出由金属条构成的太赫兹超材料吸收器的共振频率仅仅与金属条的长度成反比,

而与中介质层的厚度无关的结论。同时,由光控理论得出光敏介质材料的电导率随着抽运激光强度的增大而增大,即金属性增强的结论。在此基础上,将4个不同长度的金属条组合构成了一种多频带的超材料吸收器,实现了从单频带到四频带的完美吸收,其吸收机理主要源自于4个不同长度的金属条所对应共振频率的线性叠加。最后,通过抽运光照填充在两对金属条中间的光敏介质,实现了从四频带到双频带的完美吸收。本文设计的光控可调谐多频带超材料吸收器在探测技术、成像技术以及隐身技术等领域中具有潜在的应用前景。

参 考 文 献

- [1] Tonouchi M. Cutting-edge terahertz technology[J]. Nature Photonics, 2007, 1(2): 97-105.
- [2] Siegel P H. Terahertz technology [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2002, 50(3): 910-928.
- [3] Xu J Z, Zhang X C. Terahertz science technology and application [M]. Beijing: Peking University Press, 2006: 1-5.
许景周, 张希成. 太赫兹科学技术和应用 [M]. 北京: 北京大学出版社, 2006: 1-5.
- [4] Wang J L, Zhang B Z, Duan J P, *et al.* Flexible dual-stopband terahertz metamaterial filter[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(10): 1016001.
王俊林, 张斌珍, 段俊萍, 等. 柔性双阻带太赫兹超材料滤波器[J]. 光学学报, 2017, 37(10): 1016001.
- [5] Arik K, AbdollahRamezani S, Khavasi A. Polarization insensitive and broadband terahertz absorber using graphene disks [J]. Plasmonics, 2017, 12(2): 393-398.
- [6] Lü J, Yuan R Y, Song X M, *et al.* Broadband polarization-insensitive terahertz absorber based on heavily doped silicon surface relief structures [J]. Journal of Applied Physics, 2015, 117(1): 013101.
- [7] Fardoost A, Vanani F G, Amirhosseini A, *et al.* Design of a multilayer graphene-based ultrawideband terahertz absorber [J]. IEEE Transactions on Nanotechnology, 2017, 16(1): 68-74.
- [8] 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.
- [9] Gao H, Yan F P, Tan S Y, *et al.* Design of ultrathin broadband terahertz metamaterial absorber based on patterned graphene[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(7): 0703024.
高红, 延凤平, 谭思宇, 等. 基于有图案石墨烯的超薄宽带太赫兹超材料吸收体的设计[J]. 中国激光, 2017, 44(7): 0703024.
- [10] Hao H G, Ding T Y, Luo W, *et al.* Design of novel broadband microwave absorber based on metamaterials [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(6): 061604.
郝宏刚, 丁天玉, 罗伟, 等. 基于超材料的新型宽带微波吸波器设计[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(6): 061604.
- [11] Liu S, Chen H B, Cui T J. A broadband terahertz absorber using multi-layer stacked bars[J]. Applied Physics Letters, 2015, 106(15): 151601.
- [12] Wang B X, Zhai X, Wang G Z, *et al.* Design of a four-band and polarization-insensitive terahertz metamaterial absorber[J]. IEEE Photonics Journal, 2015, 7(1): 1-8.
- [13] Ye Y Q, Jin Y, He S L. Omnidirectional, polarization-insensitive and broadband thin absorber in the terahertz regime [J]. Journal of the Optical Society of America B, 2010, 27(3): 498.
- [14] Zhou J F, Zhang L, Tuttle G, *et al.* Negative index materials using simple short wire pairs[J]. Physical Review B, 2006, 73(4): 041101.
- [15] Zhou J F, Economon E N, Koschny T, *et al.* Unifying approach to left-handed material design[J]. Optics Letters, 2006, 31(24): 3620-3622.
- [16] Manceau J M, Shen N H, Kafesaki M, *et al.* Dynamic response of metamaterials in the terahertz regime: blueshift tunability and broadband phase modulation[J]. Applied Physics Letters, 2010, 96(2): 021111.
- [17] Dai X Y, Xiang Y J, Wen S C, *et al.* Thermally tunable and omnidirectional terahertz photonic bandgap in the one-dimensional photonic crystals containing semiconductor InSb[J]. Journal of Applied Physics, 2011, 109(5): 053104.
- [18] Jiang X Q, Yang J Y, Zhan H Z, *et al.* Photon-induced total-internal-reflection all-optical switches [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2004, 16(2): 443-445.