

太赫兹波超材料吸波体的特性分析

王 花,孙晓红,王 真,齐永乐,王毅乐

(郑州大学 信息工程学院 河南省激光与光电信息技术重点实验室,河南 郑州 450052)

摘要: 超材料吸波体通常是由一些在介质基底表面上周期分布的亚波长开口环谐振器 (SRRs) 组成,它们的吸收率在很大程度上取决于顶层 SRRs 的结构细节及介质的材料性质。利用时域有限积分法(FITD)对太赫兹波的超材料吸波体进行传输特性研究,分析了 PI 介质厚度、单元尺寸、开口环谐振器宽度、顶层 silicon 的电导率和 PI 介质的介电常数对太赫兹波超材料吸波体吸收峰位置和吸收率大小的影响。此超材料吸波体的特性研究对太赫兹波调制器、滤波器、吸收器及偏振器等器件设计和制备具有一定的指导意义。

关键词: 超材料吸波体; 吸收特性; 太赫兹波; 开口环谐振器

中图分类号: TN214 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201645.1225003

Characteristic analysis of metamaterial absorber in terahertz wavelength

Wang Hua, Sun Xiaohong, Wang Zhen, Qi Yongle, Wang Yile

(Henan Provincial Key Laboratory of Laser and Opto-electronic Information Technology, School of Information Engineering,
Zhengzhou University, Zhengzhou 450052, China)

Abstract: Metamaterial absorbers are typically comprised by subwavelength split-ring resonators (SRRs) periodically distributed on the surface of some dielectric boarding substrates. Their absorptive rates are largely determined by the properties of the top SRRs and the material properties of the substrates. The transmission characteristics of metamaterial absorbers in terahertz wave were studied and the effect of PI thickness, cell size, width of the split ring resonator, conductivity of the top silicon and the dielectric constant of the PI medium on the position of absorption peak and absorption rate were analyzed by using the finite integration time domain (FITD) method. The characteristics of metamaterial absorber were expected to provide important reference for the design of terahertz modulator, filters, absorbers and polarizers.

Key words: metamaterial absorber; absorber characteristic; terahertz wave; split-ring resonators

收稿日期: 2016-04-11; 修订日期: 2016-05-15

基金项目: 河南省基础与前沿研究计划项目(152300410023)

作者简介: 王花(1982-), 女, 硕士生, 主要从事太赫兹超材料方面的研究。Email: zzuwanghua@163.com

导师简介: 孙晓红(1971-), 女, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事光子晶体、太赫兹以及超材料等方面的研究。

Email: iexhsun@zzu.edu.cn

0 引言

太赫兹(0.1~10 THz)波介于微波与红外之间,处于电子学与光子学的过渡区域^[1],在生物医学、探测成像、无损检测等领域具有重要的应用^[2-4]。在太赫兹领域,限制太赫兹技术广泛应用瓶颈之一就是缺乏各种高灵敏度的探测器,尤其缺乏对整个太赫兹频段内具有宽带响应的高灵敏探测器。为了提高这些探测器的灵敏度,人们通常会在探头表层加上一层特定的吸收层来增大对太赫兹波的吸收效果,这层吸收层在太赫兹波段的响应特性和吸收效率将直接影响这些探测器的灵敏度和探测带宽。超材料(Metamaterial)是将具有特定几何形状的亚波长宏观基本单元周期性或非周期性地排列所构成的人工材料。它用宏观尺寸单元代替了原来微观尺寸的原子或分子,具有负折射、超透镜、隐身斗篷等自然介质所不具备的特性,引起人们研究的热潮^[5-7]。超材料的特性取决于其基本单元结构,可以通过人为地设计单元结构来控制材料属性,构成自然界不存在的特殊结构材料。在太赫兹波段下超材料具有优异的可调谐性质,可做成调谐器、交换器、滤波器和传感器等太赫兹器件^[8-10]。

文中利用时域有限积分法(Finite Integration Time Domain, FITD),对一个基于太赫兹波的超材料吸波体进行了特性分析,研究了 TE 波极化正入射条件下的开口环谐振器(SRRs)的物理尺寸以及材料参数对入射到吸波体的特定的电磁波的吸收率的影响,并采用 CST microwave studio 时域求解器模拟了不同参数条件下的吸收率曲线图。

1 结构设计

典型的超材料吸波体具有三层结构:其顶层为周期性图案的金属结构,底层是不透明的金属平面,中间是一层非金属介质材料。通过调整单元结构的形状/尺寸、厚度、金属材料 and 中间介质层材料,可以改变共振频率的位置以及吸收率的大小^[11]。

文中对一种太赫兹波超材料吸波体^[12-13]的特性进行了详细分析。该吸波体包括两个被介质层分离的金属层,其结构图如图 1 所示。图 1(a)是 SRRs 单元结构示意图,图 1(b)是 SRRs 阵列原理图。设电磁

波沿 Z 轴方向垂直入射,电场和磁场偏振方向分别沿 Y 轴和 X 轴方向。在垂直入射电磁波激励下提取了 S 参数, S_{11} 为反射系数, S_{21} 为透射系数,根据吸收率 $A=1-|S_{11}|^2-|S_{21}|^2$ 计算其吸收率^[14]。该超材料吸波体的顶层材料是金,其电导率 σ 为常数 4.09×10^7 S/m,厚度是 $0.2 \mu\text{m}$,单元周期 $p=61 \mu\text{m}$,对应的开口环谐振器的尺寸为 $b=53 \mu\text{m}$, $c=14 \mu\text{m}$, $\omega=3 \mu\text{m}$, $g=4 \mu\text{m}$ 。其中顶层开口处是光电导 silicon,介电常数 ϵ 为 11.7,电导率为 1 S/m。中间介质层的材料是聚酰亚胺(polymide, PI),其介电常数 ϵ 为 2.9,电损耗正切为 0.02,厚度为 $12.3 \mu\text{m}$ 。底层材料也是金,厚度为 $0.2 \mu\text{m}$ 。

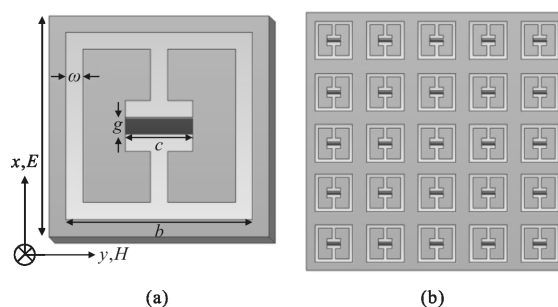


图 1 开口谐振环单元结构示意图(a)和平面排列的吸波体的俯视图(b)

Fig.1 Scheme of the structure of the SRRs unit cell (a) and schematic of SRRs array (b)

2 结果与讨论

2.1 PI 介质厚度对吸收率的影响

按照上述参数,首先模拟 PI 介质厚度对吸收率的影响。讨论在电磁波 TE 极化正入射时,PI 介质的厚度不同时对该超材料吸波体的吸收率的影响。超材料一般应该由制作在电介质衬底上的亚波长金属结构组成。这里,PI 介质的厚度依次等差取 4.5 、 7.1 、 9.7 和 $12.3 \mu\text{m}$ 。利用 FDTD 法对以上参数进行仿真模拟,结果如图 2 所示。从仿真结果可以看出:在 $0.5 \sim 2.5$ THz 之间出现两个共振峰:第一个吸收峰出现在 0.68 THz 附近,且随着 PI 介质厚度的逐渐增加,吸收峰的位置保持不变,但吸收率由 50% 逐渐增大到接近 100%。这是因为此吸收峰是由超材料吸波体的 LC 谐振产生的($\omega_{LC} \propto \frac{1}{\sqrt{LC}}$)。电感 L 和电容 C 的值主要由超材料的几何参数决定,此时超材料结构保持不变,因此,吸收峰的位置不变;随着 PI 介质

厚度的增大, 吸收率增大; 第二个吸收峰出现在 1.41~1.65 THz 之间, 随着 PI 介质厚度的增大, 吸收峰等间距的向低频方向移动, 移动间隔为 0.08 THz。同时, 吸收率由 98% 逐渐减小到 50% 左右。这是因为此吸收峰是由超材料吸波体的偶极子谐振产生的, 吸收峰是由入射波的磁分量穿透顶层和底层, 导致磁耦合而产生的, 而顶层和底层之间的电磁共振耦合主要依赖于 PI 介质的厚度, 两者之间的距离越大, 耦合越弱, 反向电流越弱, 共振频率向低频移动, 吸收率越小。

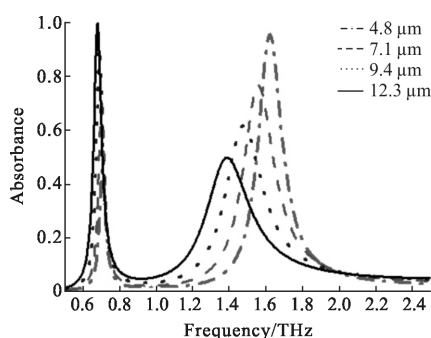


图 2 不同 PI 介质厚度下的吸收率曲线

Fig.2 Absorptive spectrum under different values of dielectric thickness

2.2 单元尺寸 b 对吸收率的影响

讨论开口环谐振器的单元尺寸对吸收率的影响。单元尺寸 b 依次取等差的 44、47、50 和 53 μm 时对超材料吸波体吸收率的影响, 结果如图 3 所示。从图中可以看出, 随着开口环谐振器单元尺寸 b 的逐

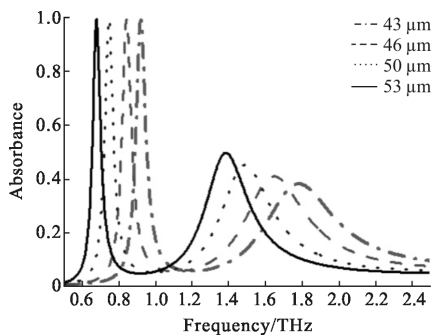


图 3 不同单元尺寸下的吸收率曲线

Fig.3 Absorptive spectrum under different unit circles

渐增大, 两个吸收峰的位置都等间距的向低频方向移动, 但是第一个吸收峰的吸收率的大小没有变化, 第二个吸收峰的吸收率小幅提高。这是因为随着单

元尺寸 b 的逐渐增大, 电感系数 L 也逐渐变大, 从而共振频率 ω 逐渐变小, 吸收峰向低频方向移动。

2.3 开口环谐振器宽度 ω 对吸收率的影响

讨论开口环谐振器宽度 ω 依此取 1、3、5、7 μm 时对超材料吸波体的吸收率的影响, 结果如图 4 所示。从图中可以看出, 当宽度 $\omega=1 \mu\text{m}$ 时, 吸收率在第二个吸收峰处接近 82%, 在第一个吸收峰处接近 62%, 此后随着 ω 的逐渐增大, 吸收率的大小变化不大, 但是两个吸收峰的位置都向高频方向移动。这是因为随着开口环谐振器宽度 ω 的逐渐增大, 电感系数 L 也逐渐变大, 从而共振频率 ω 逐渐变小, 吸收峰向低频方向移动。

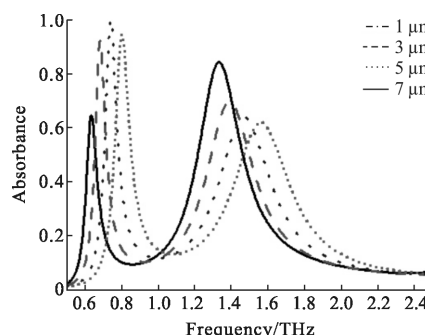


图 4 不同线宽下的吸收率曲线

Fig.4 Absorptive spectrum under different values of line width

2.4 顶层 silicon 的电导率 σ 对吸收率的影响

为了实现对超材料吸波体的调制, 常在开口环的开口部分添加调制材料, 对电容 C 或者电感 L 进行调制, 进而实现对吸波体吸收率的调制。选择的调制材料为光电导 silicon, silicon 的电导率随着注入光的变化而改变, 电容 C 也将随之发生变化, 实现了对吸波体的调制。当单元周期 $p=61 \mu\text{m}$, 单元尺寸 $b=53 \mu\text{m}$ 时, silicon 的电导率 σ 依次取 1 、 1×10^3 、 5×10^3 、 1×10^4 、 1×10^5 和 $1 \times 10^6 \text{ S/m}$ 时, 吸收率结果如图 5 所示。从图中可以看出, 当 silicon 电导率比较小 ($< 5 \times 10^3 \text{ S/m}$) 时, 由于 LC 谐振和偶极子谐振, 吸波体分别在 0.68 THz 和 1.41 THz 附近出现两个吸收峰, 与图 2 一致。随着 silicon 电导率的增加, 第一个吸收峰吸收率逐渐减小, 第二个吸收峰逐渐增大, 且两个吸收峰开始向中间靠拢, 半高宽逐渐变大。当 silicon 的电导率增大到 $5 \times 10^3 \text{ S/m}$ 时, 第一个吸收峰已经不明显。随着 silicon 电导率的进一步增大, 第一个吸收峰将逐渐消失, 这是因为 silicon 的电导率极大 (金属化)

时,电容 C 结构消失, LC 谐振条件被破坏。产生的新吸收峰是由新的超材料结构中左右两个小环以及整个外围大环的共同的偶极子谐振产生的,且新吸收峰的位置也将随着 silicon 电导率的增大而逐渐“红移”,吸收率进一步减小。

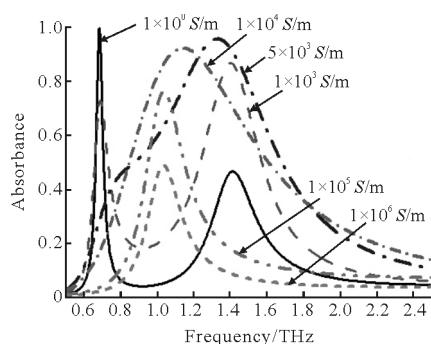


图 5 不同电导率下的吸收率曲线

Fig.5 Absorptive spectrum under different values of silicon conductivity

2.5 PI 介质层材料的介电常数 ϵ 对吸收率的影响

讨论单元周期 $p=61 \mu\text{m}$, 单元尺寸 $b=53 \mu\text{m}$ 时, PI 介质层材料的相对介电常数 ϵ 依次取 1、2、3、4 时对吸收率的影响, 结果如图 6 所示。从图中可以看出,随着介电常数的逐渐增大,两个吸收峰的位置都明显地向低频方向移动,且第一个吸收峰的吸收率变化不大,都接近 99%,第二个吸收峰的吸收率则由 25%增加到了 58%左右。这是因为随着 PI 介电常数 ϵ 的增大, LC 谐振和偶极子谐振均受影响。对于 LC 谐振,相当于增大了电感系数 L ,从而共振频率 ω 逐渐变小,吸收峰向低频方向移动;对于偶极子谐振,顶层和底层之间的电磁耦合减弱,反向电流越弱,共振频率向低频移动,吸收率越小。

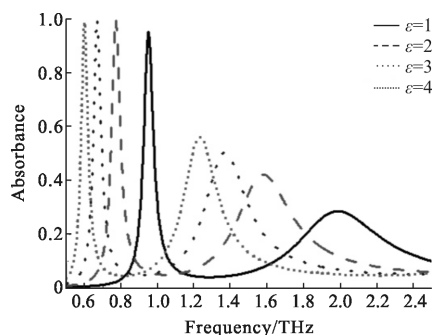


图 6 不同介电常数下的吸收率曲线

Fig.6 Absorptive spectrum under different dielectric constants of polyimide

3 结论

对一种太赫兹波超材料吸波体进行了研究,利用 CST 软件详细分析了各种物理尺寸及材料参数对其吸收率的影响。研究表明:太赫兹波超材料吸波体在 0.5~2.5 THz 范围内有两个吸收峰。PI 介质厚度、单元尺寸、开口环谐振器宽度、顶层 silicon 的电导率和 PI 介质的介电常数对太赫兹波超材料吸波体吸收峰的位置和吸收率都有显著的影响。选择特定参数的太赫兹波吸收器件,就需要对超材料的介质材料及其他参数进行优化设计。文中对于太赫兹波超材料吸波体的拓展研究具有一定的指导意义。

参考文献:

- [1] Lee Yun-Shik. Principles of Terahertz Science and Technology[M]. NY: Springer, 2008.
- [2] Ferguson B, Zhang X C. Materials for terahertz science and technology [J]. *Nature Materials*, 2002, 1(1): 26-33.
- [3] Nagel M, Bolivar P H, Brucherseifer M, et al. Integrated THz technology for label-free genetic diagnostics[J]. *Applied Physics Letters*, 2002, 80(1): 154-156.
- [4] Tonouchi M. Cutting-edge terahertz technology [J]. *Nature Photonics*, 2007, 1(2): 97-105.
- [5] Shelby R A, Smith D R, Schultz S. Experimental verification of a negative index of refraction [J]. *Science*, 2001, 292(5514): 77-79.
- [6] Schurig D, Mock J J, Justice B J, et al. Metamaterial electromagnetic cloak at microwave frequencies [J]. *Science*, 2006, 314(5801): 977-980.
- [7] Wang Jianbo, Chen Xinyi, Chen Guibo, et al. Characterization of terahertz metamaterials based on hexagonal split-ring resonators [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(3) 622-625. (in Chinese)
汪剑波, 陈新邑, 陈桂波, 等. 六边形开口谐振器的太赫兹特性[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(3): 622-625.
- [8] Padilla W J, Aronsson M T, Highstrete C, et al. Highly flexible wide angle of incidence terahertz metamaterial absorber: design, fabrication, and characterization [J]. *Phys Rev B*, 2007, 78: 241103.
- [9] Soukoulis C M, Linden S, Wegener M. Negative refractive index at optical wavelengths [J]. *Science*, 2007, 315(5808): 47-49.
- [10] Peralta Xomalin G, Smirnova Evgenya I, Azad Abul K, et

- al. Metamaterials for THz polarimetric devices [J]. *Optics Express*, 2009, 17: 773.
- [11] Landy N I, Sajuyigbe S, Mock J J, et al. Perfect metamaterial absorber [J]. *Physical Review Letters*, 2008, 100 (20): 207402.
- [12] Tao H, Landy N I, Bingham C M, et al. A metamaterial absorber for the terahertz regime: Design, fabrication and characterization[J]. *Optics Express*, 2008, 16(10): 7181–7188.
- [13] Xu Z C, Gao R M, Ding C F, et al. Photoexcited broadband blueshift tunable perfect terahertz metamaterial absorber [J]. *Optical Materials*, 2015, 42: 148–151.
- [14] Cao Xiaolong, Yao Jianquan, Che Yongli. Transmission characteristic of asymmetric double-split ring resonator in terahertz wavelength [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(11): 3854–3858. (in Chinese)
曹小龙, 姚建铨, 车永莉. 应用于 THz 波的非对称双开口环传输特性研究 [J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(11): 3854–3858.