

介质夹层对四扇环超常材料电磁吸收的影响研究

许 婉 闫长春 史俊贤 江 夏 朱 青 张文超 李冬冬

江苏省先进激光材料与器件重点实验室 物理与电子工程学院
江苏师范大学, 江苏 徐州 221116

摘要 设计了一种新型电磁共振吸收超常材料。这种材料具有金属-绝缘体-金属结构特性,其顶部的金属层由四瓣扇形金块构成。模拟发现,此结构在可见光和紫外频段具有良好的电磁吸收能力,且位于四瓣扇形金块下的介质层的形状、尺寸和介电常数的变化对该材料的吸波能力具有很大的影响。当四瓣扇形金块下的介质层为同等半径的圆柱形状,材料为氧化铝,厚度一定时,结构的吸收率高于 90% 的相对吸收线宽达到 0.76,吸收范围从可见光波段延伸至紫外光波段。该研究为电磁吸波器件的设计和制造提供了一定的理论依据。

关键词 材料;计算电磁学;超常材料;数值模拟;介质层;四扇环;吸收

中图分类号 O441.6 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201535.s116003

Great Impacts of the Dielectriclayer in a Four-Fan-Rings-Shaped Metamaterial on the Absorption of Electromagnetic Waves

Xu Wan Yan Changchun Shi Junxian

Jiang Xia Zhu Qing Zhang Wenchao Li Dongdong

Jiangsu Key Laboratory of Advanced Laser Materials and Devices, College of Physics and Electronic Engineering, Jiangsu Normal University, Xuzhou, Jiangsu 221116, China

Abstract A metamaterial that acts as a strongly resonant absorber with a periodic structure in which each unit cell consists of a metal-insulator-metal structure is presented. The top metal layer consists of four-fan-rings-shaped gold blocks. Simulating electromagnetic responses of the structure, the structure achieves a good absorption at visible and ultraviolet frequencies is demonstrated. Furthermore, when change the shape, size and permittivity of the dielectriclayer under the four-fan-rings-shaped gold layer, the dielectriclayer has a great influence on the absorption of the metamaterial. Simulations show that the resonant frequency of the resonator ranges from visible region to ultraviolet region when the dielectriclayer set to Al_2O_3 , four-fan-rings-shaped, and appropriate size. The great absorption of the structure over 90% has the relative absorption line width of 0.76. The proposed structure provides theoretical basis for the design and fabrication of the electromagnetic absorbers.

Key words materials; computational electromagnetic methods; metamaterial; simulation; dielectriclayer; four-fan-rings-shaped; absorption

OCIS codes 160.3918; 050.1755; 260.2110

1 引 言

自超常材料^[1-2]被提出以后,它一直吸引研究者的广泛关注。超常材料是一种亚波长“原子”阵列的人工合成材料,显现出天然介质不具有的独特物理特性并具有广泛的应用前景,如负折射^[3]、隐形^[2,4-8]、超分辨成像^[9]、滤波^[10]、传感器^[11]等,这些特性通常发生在电磁振荡频率附近。一方面,在振荡结构附近,材料往往显示出较大的损耗,为了保证电磁波的顺利传播,需要尽量降低损耗。另一方面,可以利用这种复合材料的

收稿日期: 2015-01-27; **收到修改稿日期:** 2015-03-31

基金项目: 国家自然科学基金(61401182)、国家级大学生创新工程项目(12ssjcxdd01)和江苏省优势学科项目

作者简介: 许 婉(1993—),女,本科,主要从事微纳结构方面的研究。E-mail: 948292075@qq.com

导师简介: 闫长春(1972—),男,博士,教授,主要从事微纳结构光学方面的研究。E-mail: yancc@jnsu.edu.cn(通信联系人)

高损耗现象,设计一种新型电磁波吸收器^[12-22],这种吸波器件的优点在于它具有近乎完美的吸收电磁波的能力。为了使得超常材料具有好的吸波能力,需要同时减小电磁波的反射和透射。要减小反射,需要设计超常材料的有效介电常数和有效磁导率以保证材料的阻抗和外部环境的阻抗相匹配^[23],从而抑制电磁波在入射界面上反射。为了减小透射,所设计的超常材料的有效介电常数和有效磁导率的虚部需要大些,因为虚部越大意味着材料的损耗越大,在电磁波传输过程中,对电磁波的吸收本领就越强,所以在材料设计过程中,需要引入损耗性较强的金属振荡单元。

本文设计了一种新型四瓣扇形金属电磁吸收超常材料。模拟显示,该结构在可见光和紫外频段具有良好的电磁吸收能力。位于四瓣扇形金属层下的介质层的形状、尺寸和介电常数的变化对结构材料的吸波能力具有很大的影响。研究表明,选择合适的介质层形状、尺寸和介电常数,可以在更宽范围内实现良好的电磁吸收。

2 结 构

如图 1(a)所示,超常材料结构由二维周期性阵列组成。图 1(b)显示的是一个结构单元的示意图,它是由顶部的一个四瓣扇形结构的金属层与下面的金属层构成,其间以一介质层将其分开。金属层的材料为金,介质层为氧化铝。结构单元的尺寸标注在图 1 的图注中。平面波垂直入射到该结构上,其电场 E 、磁场 H 和波矢 K 的方向分别沿着 x 、 y 和 z 的方向。

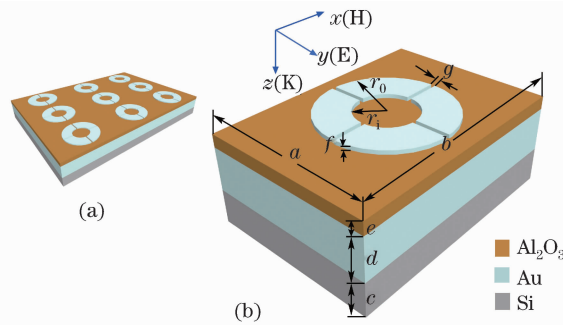


图 1 (a)超常材料的结构示意图;(b)结构单元示意图,具体尺寸为: $a=390$ nm, $b=550$ nm,

$$c=80$$
 nm, $d=100$ nm, $e=48$ nm, $f=10$ nm, $r_1=70$ nm, $r_0=150$ nm, $g=10$ nm

Fig. 1 (a) Schematic of the structure of the metamaterial; (b) schematic of one unit cell with the dimensions of $a=390$ nm, $b=550$ nm, $c=80$ nm, $d=100$ nm, $e=48$ nm, $f=10$ nm, $r_1=70$ nm, $r_0=150$ nm, and $g=10$ nm

3 模 拟

使用 HFSS 软件对结构单元进行仿真。为了模拟这种周期结构,与 x 和 y 轴垂直的两对端面设置为周期性边界条件。电磁波入射和出射的两个端口面设置为波端口边界。金和氧化铝的介电常数取自文献^[24]。结构的 S 参数可以直接从软件中得到, S_{11} 表示反射比, S_{21} 表示透射比,则结构的反射率 $R=|S_{11}|^2$,透射率 $T=|S_{21}|^2$ 和吸收率 $A=1-T-R$ 。图 2 给出了该结构的计算结果求得的反射率、透射率及吸收率随频率的变化关系。

理论上来说,只要吸波材料与自由空间的阻抗相匹配,则可降低电磁波的反射;另外,在底层使用厚度大于穿透深度的金属层,可使电磁波的透射很低,超常材料结构则可实现对电磁波的高吸收。模拟结果显示,结构在 670 THz 频率附近具有近乎为 1 的完美吸收峰,且从 600 THz 到 870 THz,结构的吸收率高于 90% 的相对吸收宽度为 0.27(此处的相对吸收宽度为吸收率大于 90% 的频率宽度与中心频率之比),这表明此结构在此频带内具有良好的吸波效果。

4 讨 论

4.1 介质层的形状变化

为了获得吸收效果好,吸收带宽的吸收结构,讨论结构介质层的形状变化对电磁波吸收能力的影响,介质层形状变化后的结构如图 3 所示。

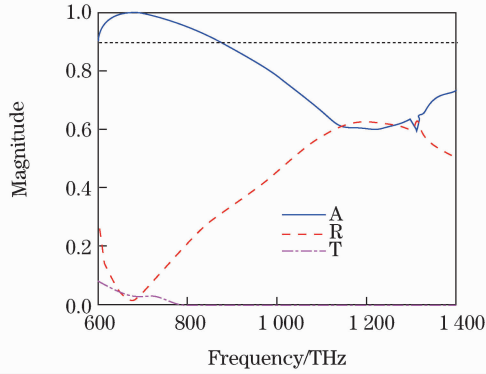


图 2 结构的反射率(R)、透射率(T)和吸收率(A)随频率的关系曲线

Fig. 2 Reflectance (R), transmittance (T), and absorption (A) as a function of frequency

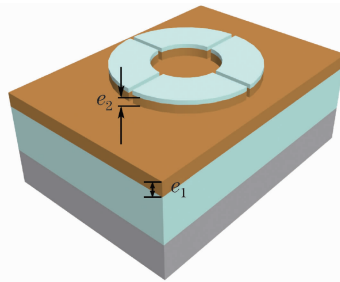


图 3 介质层变化后的结构图。本结构是在图 1 结构中加入一层四瓣扇形氧化铝介质层,厚度为 e_2 , 同时,下平板介质层厚度表示为 e_1 ,并满足介质层总厚度 $e = e_1 + e_2$ 值不变,为 48 nm

Fig. 3 Schematic of the structure with the dielectric layer changed. A four-fan-rings-shaped alumina dielectric layer is added under the same shape gold layer in Fig. 1, the thickness of the whole alumina dielectric layer is fixed with $e = e_1 + e_2 = 48$ nm, where e_1 is the thicknesses of the rectangle dielectric layer and e_2 is the thickness of four-fan-rings-shaped alumina dielectric layer

在保持介质层总厚度不变前提下,选取 5 种不同的 e_2 值,并模拟不同的情况的吸收。模拟结果如图 4 所示。该图显示随着 e_2 增加,高吸收位置向高频方向移动,并且相对吸收宽度具有变宽的趋势,但是最强吸收的幅值却具有减小的趋势。当 $e_2 = 33$ nm 时,相对吸收宽度在计算的频率范围内达到 0.73(当频率超过 1400 THz 时,几乎超过文献提供金的介电常数参数范围)。

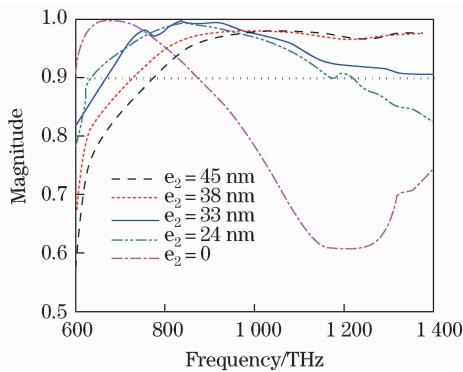


图 4 不同厚度四瓣扇形氧化铝介质层时结构的吸收曲线

Fig. 4 Absorption as a function of frequency with different thicknesses of the four-fan-rings-shaped alumina dielectric layer

4.2 介质层的介电常数变化

为进一步优化吸收结果,在图 3 结构中保持 $e_2 = 33 \text{ nm}$,进一步改变介质层的介电常数值,模拟得到相应的吸收曲线。模拟结果如图 5 所示。从图中可以看出在介质层的介电常数变化时,结构的吸收变化趋势。当介质层的介电常数 ϵ 较小($\epsilon < 3$)和较大($\epsilon > 4.2$)时,结构无论是吸收宽度还是吸收率都出现了下降,这表明通过选取合适的介质层的介电常数,可以获得更佳的结果。

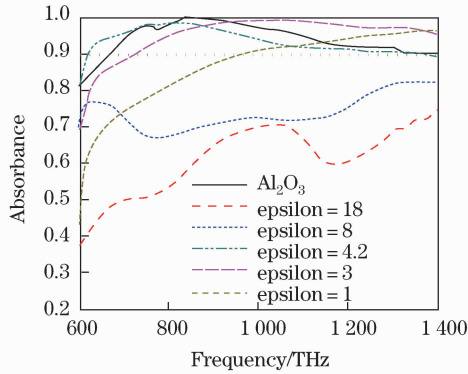


图 5 介质层介电常数变化的结构吸收曲线

Fig. 5 Absorption as a function of frequency with different permittivities of the four-fan-rings-shaped dielectriclayer

4.3 介质层变为圆盘

下面将图 3 中四瓣扇形介质层设置为氧化铝,圆环结构改成圆盘形结构,进一步研究圆盘半径对结构吸收的影响。结构图如图 6 所示。模拟结果在图 7 中。随着圆盘半径的不断增大,对在紫外波段的吸收能力有下降的趋势,而对可见光波段的吸收能力影响不大。图中还画出了图 3 中四瓣扇形为氧化铝介质层的吸收曲线,对比可以发现当上部分介质层形状为圆盘形、半径 $r = 150 \text{ nm}$ 时,超常材料的相对吸收线宽最宽。

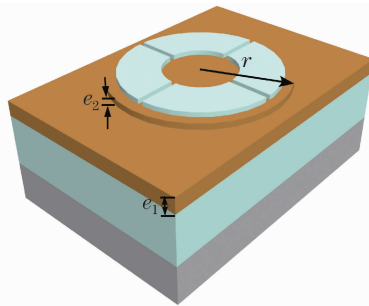


图 6 将图 3 中四瓣扇形介质层形状改为圆盘形,材料设置为氧化铝的示意图。介质层圆盘的高固定在 $e_2 = 33 \text{ nm}$,半径表示为 r ,介质层总厚度 $e = e_1 + e_2$ 为 48 nm 不变

Fig. 6 Schematic of the structure where the four-fan-rings-shaped alumina dielectriclayer is changed to an alumina disk with the thickness $e_2 = 33 \text{ nm}$. The thickness of the whole alumina dielectriclayer is fixed with $e = e_1 + e_2 = 48 \text{ nm}$, where e_1 is the thicknesses of the rectangle dielectric layer. r represents the radius of the disk

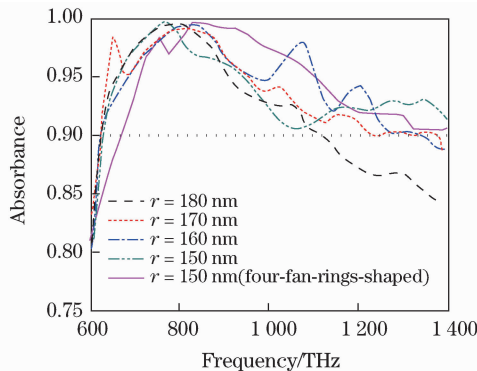


图 7 对应图 6 结构中不同圆盘半径的吸收曲线

Fig. 7 Absorption as a function of frequency with different radii of the alumina disk shown in Fig. 6

4.4 当介质层为圆盘时,介质层的介电常数变化对吸收的影响

当图 6 中圆盘半径 $r = 150 \text{ nm}$ 时,改变圆盘的介电常数 ϵ ,研究不同的介电常数对结构吸收的影响。模拟结果如图 8 所示。从图中可以看出当圆盘的介电常数变化时,结构的吸收曲线也相应发生变化。介电常数越小,吸收能力越强。比如,当圆盘的介电常数取较小的值 $\epsilon = 2.5$ 时,结构从 700 THz 到 1380 THz 频率范围内对电磁波的吸收率均高于 95%,这就是说,要保证结构具有良好的吸收能力,在选择圆盘的材料时,应选择低介电常数的材料。

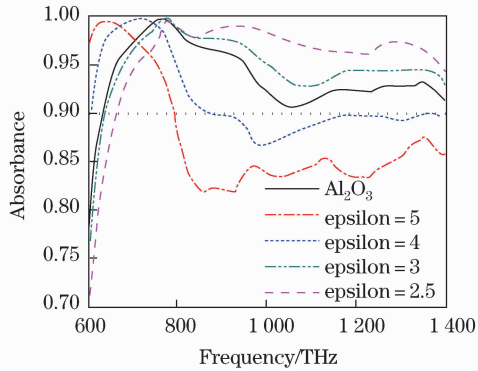


图 8 对应图 6 结构中圆盘的介电常数变化时的吸收曲线

Fig. 8 Absorption as a function of frequency with different permittivities of the cylinder shown in Fig. 6

5 结 论

提出了一种可以作为强电磁共振吸收的超常材料。此材料具有周期性结构且每个周期单元由金属-绝缘体-金属结构构成,其顶部的金属层是四瓣扇环形金块构成。通过模拟,证实了此结构对光频段的电磁波具有良好的吸收效果。此外,讨论了介质层形状、尺寸及介电常数对结构吸波能力的影响。模拟显示此结构吸收能力随这些参数的变化而显著变化。选择合适的结构参数和介质层的介电常数,可实现吸收能力更强的宽带吸收,这为电磁吸波器件的设计和制造提供了一定理论依据。

参 考 文 献

- Pendry J B, Holden A J, Robbins D J, *et al.*. Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena[J]. IEEE Trans Microwave Theory and Techniques, 1999, 47(11): 2075–2084.
- Smith D R, Padilla W J, Vier D C, *et al.*. Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity[J]. Phys Rev Lett, 2000, 84(18): 4184–4187.
- Veselago V G. The electrodynamics of substance with simultaneously negative values of ϵ and μ [J]. Sov Phys Usp, 1968, 10(4):509–514.
- Shelby R A, Smith D R, Schultz S. Experimental verification of a negative index of refraction[J]. Science, 2001, 292(5514): 77–79.
- Pendry J B, Schurig D, Smith D R. Controlling electromagnetic field[J]. Science, 2006, 312(5781): 1780–1782.
- Al 'u A, Engheta N. Achieving transparency with plasmonic and metamaterial coatings[J], Phys Rev E. 2005, 72(1): 016623.
- Smith D R, Pendry J B, Wiltshire M C K. Metamaterial and negative refractive index[J]. Science, 2004, 305(5685): 788–792.
- Leonhardt U. Optical conformal mapping[J]. Science, 2006, 312(5781): 1777–1780.
- Pendry J B. Negative refraction makes a perfect lens[J], Phys Rev Lett, 2000, 85(18): 3966–3969.
- Caloz C, Itoh T. Electromagnetic Metamaterial[M]. Wiley, Hoboken N J: IEEE Press, 2006.
- Melik R, Unal E, Perkoz N, *et al.*. Metamaterial-based wireless strain sensors[J], Appl Phys Lett, 2009, 95(1): 011106.
- Landy N I, Sajuyigbe S, Mork J J, *et al.*. Perfect metamaterial absorber[J]. Phys Rev Lett, 2008, 100(20): 207402.
- Landy N I, Bingham C M, Tyler T, *et al.*. Design, theory, and measurement of polarization-insensitive absorber for terahertz imaging[J]. Phys Rev B, 2009, 79(12): 125104.
- Hu T, Landy N I, Bingham C M, *et al.*. A metamaterial absorber for the terahertz regime: Design, fabrication and characterization[J]. Opt Express, 2008, 16(10): 7181–7188.
- Hu T, Bingham C M, Strikwerda A C, *et al.*. High flexible wide angle of incidence terahertz metamaterial absorber: Design, fabrication, and characterization[J]. Phys Rev B, 2008, 78(24): 241103.
- Diem M, Koschny T, Soukoulis C M. Wide-angle perfect absorber thermal emitter in the terahertz regime[J]. Phys Rev B, 2009, 79(3): 033101.
- Avitzour Y, Urzhumov Y A, Shvets G. Wide-angle infrared absorber based on a negative-index plasmonic metamaterial[J]. Phys Rev B, 2009, 79(4): 045131.
- Argyropoulos C, Kallos E, Zhao Y, *et al.*. Manipulating the loss in electromagnetic cloaks for perfect wave absorption[J]. Express, 2009, 17(10):8467-8475.

- 19 Jack N, Chen H Y, Chan C T. Metamaterial frequency-selective superabsorber [J]. *Opt Lett*, 2009, 34(5): 644–646.
- 20 Watts C M, Liu X, Padilla W J, Metamaterial electromagnetic wave absorbers[J]. *Adv Mater*, 2012, 24(23): 98–120.
- 21 Shi C, Zang X F, Wang Y Q, *et al.*. Apolarization-independent broadband terahertz absorber[J]. *Appl Phys Lett*, 2014, 105(3): 031104.
- 22 Ma J Z, Sun W, Ding F, *et al.*. Ultra-broadband terahertz metamaterial absorber[J]. *Appl Phys Lett*, 2014, 105(2): 021102.
- 23 Landy N I, Sajuyigbe S, Mock J J, Smith D R, *et al.*. Perfect metamaterial absorber[J]. *Phys Rev Lett*, 2008, 100(20): 207402.
- 24 Lynch D W, Hunter W R. Handbook of Optical Constants of Solids[M]. E. D. Palik, ed. London: Academic press, 1985: 275.

栏目编辑: 张浩佳