

文章编号: 2096-1618(2020)03-0271-04

# 基于圆环谐振器红外超材料吸波器

符文林, 马文英, 周苗, 张惠棋

(成都信息工程大学通信工程学院, 四川 成都 610225)

**摘要:**设计一种基于闭口圆环的多波段超材料吸波器,该结构由圆环基本构成。分析了不同同心圆环的个数,以及同时依次减小圆环的宽度对结构吸收电磁波的影响。结果表明,随着圆环个数的增加,该结构多个吸收峰的吸收率也增加,在4个同心圆环结构中,有2个吸收峰的吸收率达到了86.6%,并且在波长为3532 nm及4206 nm处,吸收率分别达到了94.3%和98.6%。该结构可以应用于红外波段的多频段吸收。

**关键词:**超材料;红外波段;吸波器;多频段;圆环谐振器

**中图分类号:**TN219

**文献标志码:**A

**doi:**10.16836/j.cnki.jcuit.2020.03.004

## 0 引言

超材料是一种人造的周期性电磁材料,可以通过设计超材料的单元结构,实现针对性强的超材料吸波器<sup>[1-2]</sup>。研究表明,超材料吸波谐振器可以实现吸收电磁波,主要依赖于电磁谐振特性。通过调节吸波器的结构参数,让吸波器的等效介电常数和等效磁导率在某一频率处近似相等,使吸波器的输入阻抗与自由空间阻抗匹配,实现入射电磁波的完美吸收<sup>[3]</sup>。超材料的这一特性使它在吸收电磁波方面有着很大发展,如现代设备的隐身技术,热成像,光谱检测等<sup>[3-4]</sup>。

Landy等<sup>[5]</sup>最早提出超材料吸波结构:一种方形开口环与金属短导线的复合结构,实现了在微波频段单一频点处近乎100%的完美吸收。2010年,美国波士顿大学Liu等<sup>[6]</sup>设计了一种三层结构的超材料吸波器,在吸收波长为6 μm处达到了高吸收率,说明光波也可以被超材料吸收。随着超材料吸波器提出后,国内外都开始研究超材料吸波器,研究波段也从微波扩展到红外、可见光等波段,吸收频段也从原来的单一频段到多频段<sup>[7-9]</sup>再到宽频带。

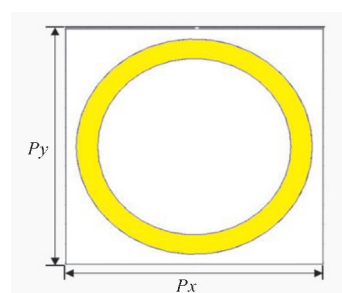
以达到多波段超材料吸收电磁波为目的,设计一种基于圆环谐振器的红外超材料吸波器。在仿真过程中,通过增加同心圆环的个数,与改变圆环的宽度获得多频段高吸收率的红外超材料吸波器。

## 1 单元结构设计

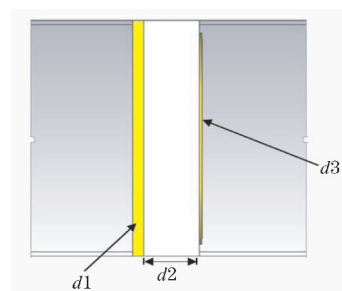
设计一种闭口圆环的超材料谐振器。其中单元周期 $P_x = P_y = 2.4 \mu\text{m}$ ,连续金属薄膜的厚度为 $d_1 = 0.1 \mu\text{m}$ ,介质厚度为 $d_2 = 0.5 \mu\text{m}$ ,金属圆环的厚度为

$d_3 = 0.03 \mu\text{m}$ ;金属圆环的宽度为 $0.2 \mu\text{m}$ ,金属圆环的几何尺寸 $R_{\text{外}} = 1.1 \mu\text{m}$ , $R_{\text{内}} = 0.9 \mu\text{m}$ 。

单元结构的俯视图与侧视图如图1所示。



(a) 俯视图



(b) 侧视图

图1 单元结构图

## 2 仿真结果及分析

### 2.1 单元结构的吸收率、透射率和反射率

对上述单元结构使用CST频域求解器,在频率为30~120 THz进行求解。基板背面为连续的金属膜,选用电导率为 $6.3012 \times 10^7 \text{ S/m}$ 的银;介质选用环氧玻璃纤维(FR4)材料;金属圆环选用银,其电导率为 $6.3012 \times 10^7 \text{ S/m}$ 。仿真结果如图2所示。

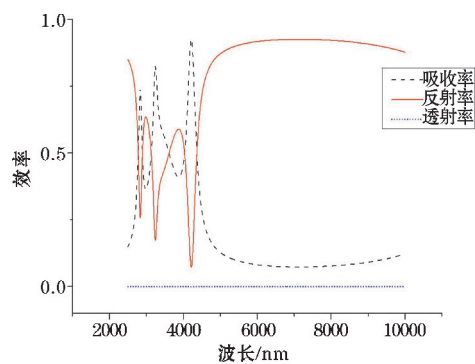


图2 单元结构的吸收、反射、透射曲线

由图2 仿真结果可以看出入射的TE 波只存在被吸收和反射两种情况,透射一直近乎为0。图2 中有3 个吸收峰,只有一个峰值超过了90%,即在波长为4211 nm 处,吸收率达到了92.3%;在波长2835 nm处,吸收率为73.8%;波长为3240 nm处,吸收率为82.2%。

2.2 结构优化

为了提高吸收率,增加吸收峰的个数,对结构进行修改。结构其他参数不变,改变圆环的个数和宽度,如图3 所示。

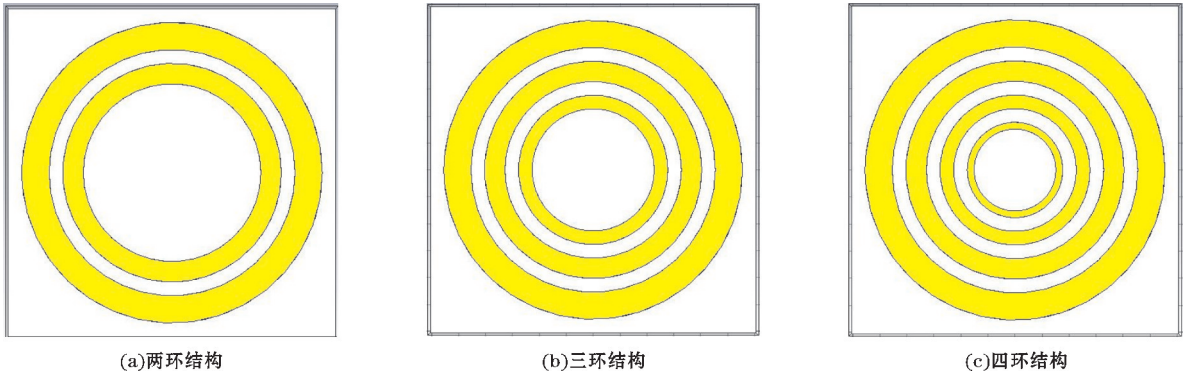


图3 改进结构图

通过依次增加圆环的个数,并且圆环的宽度从外至内依次减少0.05  $\mu\text{m}$ ,圆环之间的间隔固定为0.1  $\mu\text{m}$ ,即由外向内4 个圆环的宽度依次为0.2  $\mu\text{m}$ 、0.15  $\mu\text{m}$ 、0.10  $\mu\text{m}$ 和0.05  $\mu\text{m}$ 。

使用 CST 频域求解器,在频率为 30 ~ 120 THz 进行求解得到的吸收率结果对比图(图4)。

7880 nm处,吸收率都约为86.6%。综上所述,在此单元结构中,按这种增加圆环个数以及同时缩小圆环宽度的方式,有4 个圆环时的吸收效果较好,4 个峰吸收率均较高,而且吸收峰相距较近。

3 机理分析

以4 个圆环结构为基础,超材料的吸收率、透射率和反射率之和为1,因此想要超材料结构的吸收率越高,就要减小透射率和反射率。在超材料吸波器的设计中,选用了“金属-介质-金属”的三层结构,底层金属是连续的金属薄膜,电磁波透不过去,所以可以近乎认为透射率为0<sup>[10-11]</sup>。在谐振频率处吸波器的输入阻抗与自由空间阻抗匹配,使此处的反射率尽最大可能降低。所得到的4 个圆环的吸收率、反射率和透射率曲线如图5 所示。

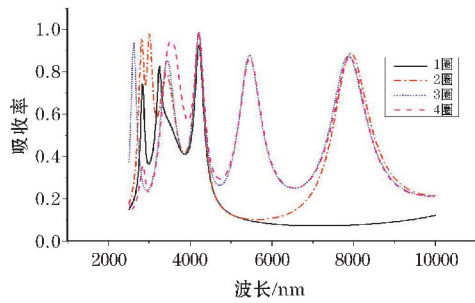


图4 不同圆环个数结构的吸收率对比

由图4 可以看出:在增加圆环个数时,吸收峰的个数有所增加,但可以看出吸收峰的个数与圆环个数并没有线性关系。1 个圆环谐振器,有3 个吸收峰;而有2、3、4 个圆环谐振器时,都有5 个吸收峰。随着圆环谐振器个数增加,吸收峰的峰值有所增加。当为1 个圆环时,只有1 个吸收峰超过了90%;当有2 个圆环时,有3 个吸收峰的峰值都超过了95%;当为3 个圆环时,有2 个吸收峰的吸收率超过了90%;当为4 个圆环谐振器时,在波长为3532 nm和波长为4206 nm处吸收率分别为94.3% 和98.6%;在波长为5453 nm和

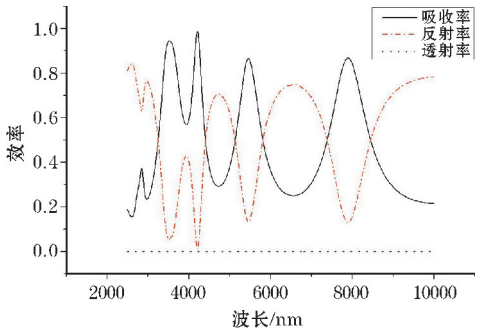
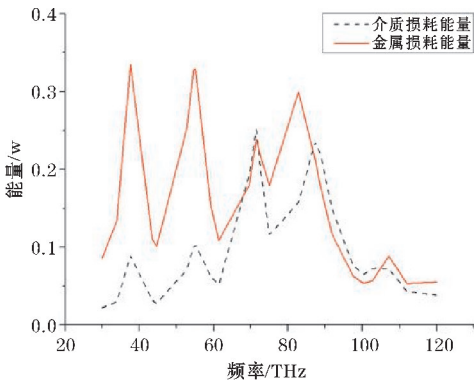


图5 4 个圆环结构吸收、反射和透射结果

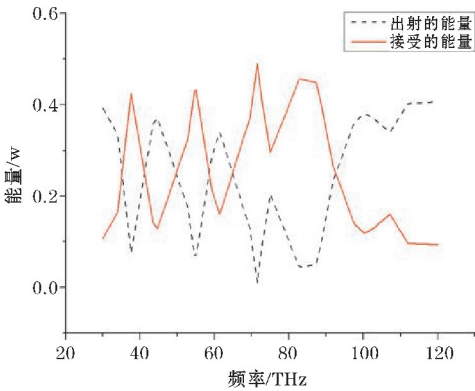
由图 5 可以看到透射率一直近乎为 0,吸收率与反射率的和为 1。在谐振频率处吸收率很高的时候,反射就很小,电磁波被大部分吸收。

3.1 4 个圆环结构的能量损耗

4 环结构(图 3c)的能量损耗结果如图 6 所示。



(a) 在介质和金属上损耗的能量



(b) 4 个圆环结构吸收和出射的能量

图 6 4 环结构能量损耗结果图

由图 6(a)可以看出结构对于入射电磁波的能量在金属材料上面和介质材料上都有损耗。所选用的介质材料是损耗型材料,而且各个谐振频率处,金属材料对于入射电磁波能量的损耗更大一些。

由图 6(b)可以得出,在谐振点通过单元结构吸收的能量与出射的能量等于电磁波入射的能量 $0.5 w$ ,进一步说明了在谐振频率处入射电磁波的能量大部分被吸波结构耗散,如果吸收的能量为 $0.5 w$ ,则在该频率处,电磁波被完美吸收。

3.2 4 个圆环结构表面电流分析

4 个圆环形超材料吸波器在谐振频率 $38.1\text{ THz}$ 、 $55\text{ THz}$ 、 $71.3\text{ THz}$ 、 $84.9\text{ THz}$ 处的表面电流分布如图 7 所示。

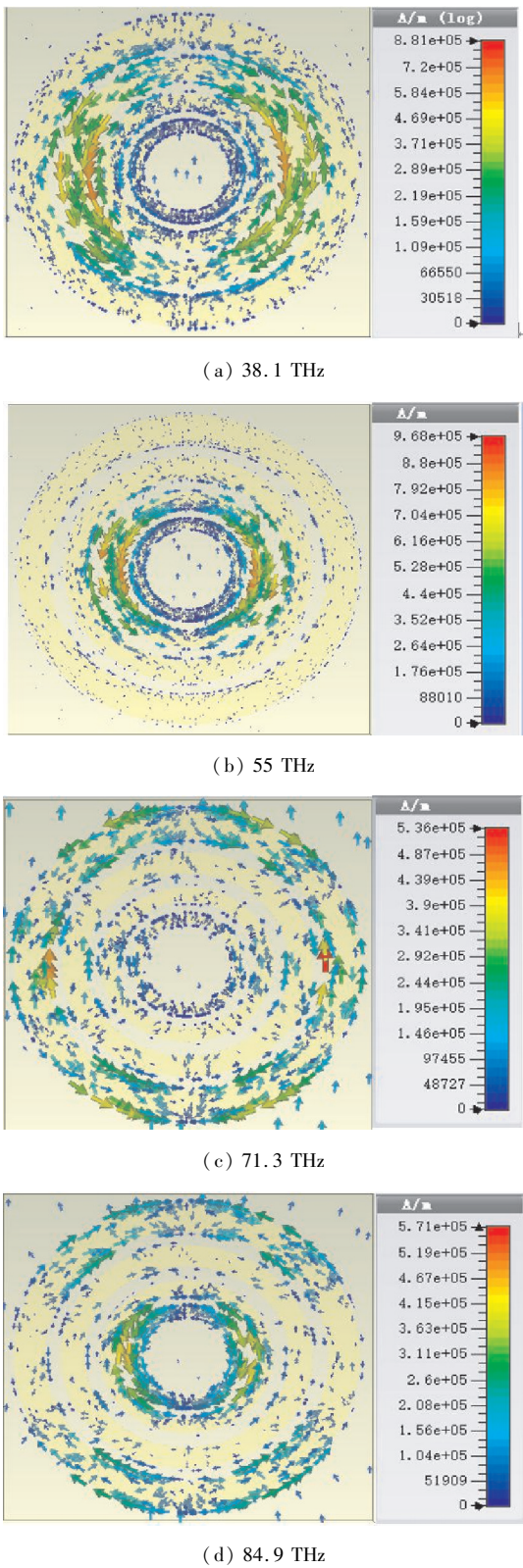


图 7 4 个圆环结构在不同谐振频点处的表面电流分布

由图 7 可以观测到不同谐振频率点处,金属圆环表面电流集中分布的位置不一致。在谐振频率为 $38.1\text{ THz}$ 时,表面电流主要集中在从左至右第 2 个圆环处;谐振频率为 $55\text{ THz}$ 时,表面电流主要集中在从左至右第 3 个圆环处;谐振频率为 $71.3\text{ THz}$ 时,表面电流主要集中在从左至右第 1 个圆环处;谐振频率为



84.9 THz时,表面电流主要集中在从左至右第4个圆环处。虽然不同谐振频率处表面电流分布位置不同,但是相同的是圆环上的电流主要分布在圆环的边缘,边缘的电流值更大一些,而且电荷在圆环上下两端积累,引发电偶极子共振。在谐振频率为38.1 THz时,第2个圆环的边缘表面电流与相邻圆环边缘电流方向相反,形成电流回路,产生磁谐振。在谐振频率处,因为同时存在电谐振和磁共振,所以实现了电磁波的吸收。

## 4 结束语

设计了一种“金属-介质-金属”三层结构的闭口圆环超材料谐振器,在波长为3532 nm和波长为4206 nm处吸收率分别为94.3%和98.6%;在波长为5453 nm和7880 nm处,吸收率都约为86.6%。因为红外线的波长范围为770 nm~1 mm,而设计的谐振器的谐振频率范围在30~120 THz,对应波长范围为2500~10000 nm,所以该结构可以为设计红外吸波器提供一种思路。从文中对超材料结构优化设计的结果来看,在结构有4个宽度依次递减的同心圆环时,该红外吸波器在4个频点处达到了较好的吸收,然而另一个吸收峰特别小,可能原因是圆环的个数太多,存在着影响曲率的可疑元素,具体影响因素还待研究。文中对于结构优化设计只针对了圆环个数结合圆环宽度的方向,而且圆环个数的增加,圆环宽度每次减少0.05  $\mu\text{m}$ ,致使此单元结构最终4个圆环的吸收效果比较优,此种方式也限制了圆环的个数最多只有4个。但是设想每次增加圆环个数,圆环宽度不变,那么随着圆环个数尽可能增多可能会有更好的结果,所以还要进一步研究其他更好的参数优化。通过增加圆环个数的方式对增加吸波器的吸收峰个数做了一个初步探索,还需要更多的研究。

## 参考文献:

- [1] 何宁业,王瑾,汪星辰,等.双波段超材料吸波器的研究进展[J].电子世界,2019,4(35):56-57.
- [2] 张晗,王东红,张泽奎,等.可调谐超材料吸波体的研究现状和发展趋势[J].功能材料,2018,49(2).
- [3] 胡丹,王可心,张洁.宽频带超材料吸波器的研究进展[J].科技风,2018,28:141.
- [4] 高海涛,王建江,许宝才,等.“三明治”型超材料吸波体及其设计优化的研究现状[J].材料导报A:综述篇,2017,31(2):15-20.
- [5] Landy N L, Sajuyigbe S, Mock J J, et al. Perfect metamaterial absorber [J]. Physical Review Letters, 2008, 100(20):1-4.
- [6] Xianliang Liu, Tatiana Starr, Anthony F. Starr, et al. Infrared Spatial and Frequency Selective Metamaterial with Near-Unity Absorbance [J]. Phys. Rev. Lett, 2010:207403-4.
- [7] Shen X P, Yang Y, Zang Y Z, et al. Triple Band Terahertz Metamaterial Absorber: Design, Experiment and Physical Interpretation [J]. Applied Physics Letters, 2012, 101(15):154102.
- [8] Li H, Yuan L H, Zhou B, et al. Ultrathin Multiband Gigahertz Metamaterial Absorbers [J]. Journal of Applied Physics, 2011, 110(1):014909.
- [9] 杜怡然,申靖轩,聂子晴,等.基于金属多环的多频段超材料吸波器[J].电子器件,2018,41(3).
- [10] 张丹丹.宽频中红外完美吸波器的研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2014.
- [11] 赵晓鹏,刘亚红.微波超材料与超表面中波的行为[M].北京:科技出版社,2018:365-369.

## Infrared Metamaterial Wave Absorber based on Ring Resonator

FU Wenlin, MA Wenying, ZHOU Miao, ZHANG Huiqi

(College of Communication Engineering, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China)

**Abstract:** A multi-band ultrafine material absorbing device based on closed-mouth ring is designed. The structure is composed of the basic composition of the ring, and the number of different concentric rings is analyzed, and the influence caused by the width of the ring on the absorption of electromagnetic waves in the structure is reduced in turn. The results show that with the increase of the number of rings, the absorption rate of multiple absorption peaks of the structure is also increasing, and in four concentric ring structures, the absorption rate of two absorption peaks reaches 86.6%, and at the wavelength of 3532 nm and 4206 nm, the absorption rate reaches 94.3% and 98.6% respectively. The structure can be applied to multi-band absorption in the infrared band.

**Keywords:** metamaterial; infrared band; microwave absorber; multi-band; ring resonator