

DOI:10.16356/j.1005-2615.2016.01.011

基于金属多环结构的多频段电磁超材料吸收器

文永刁 尹小刚

(南京航空航天大学理学院,南京,211106)

摘要:设计了一种工作在微波频段的多频段超材料吸收器。该吸收器是典型的 3 层结构:顶层是由竖直站立的金屬共面同心多环结构单元构成的二维周期阵列,中间层是 1 层介质板,底层是 1 层连续金属板。利用电磁场数值模拟方法,模拟了顶层结构单元包含不同数目金属环时该超材料的吸收谱。结果表明,当顶层结构单元有 n 个环时,吸收谱上就会出现 n 个吸收峰。进一步的研究表明最高频率的吸收峰与顶层结构单元中多环结构整体具有的电偶极子模式的激发有关,而其他较低频率的吸收峰则与顶层结构单元中相邻两环具有的捕获模式的激发有关。

关键词:超材料吸收器;电偶极子模式;捕获模式

中图分类号:O441.4;O441.6

文献标志码:A

文章编号:1005-2615(2016)01-0067-07

Multiband Metamaterial Absorber Based on Metallic Multi-ring Structure

Wen Yongdiao, Yin Xiaogang

(College of Science, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 211106, China)

Abstract: A multiband metamaterial absorber with typical sandwich structure in microwave region is proposed. The top layer is a square array with unit-cell of standing upright metallic concentric circular multi-ring structure, the middle layer is a dielectric slab, and the bottom layer is a continuous metallic slab. Using the fullwave simulation method, the absorption spectra of the metamaterial for different numbers of the rings in the unit-cell of the top layer are simulated. The results show that n absorption peaks appear when the unit-cell of the top layer owns n metallic rings. Detailed studies exhibit that the highest frequency absorption peak is related to the excitation of the electric dipole mode of the whole multi-ring unit-cell structure in the top layer, while other absorption peaks with lower frequencies are related to the excitation of the trapped-modes localized in the two corresponding neighbouring rings.

Key words: metamaterial absorber; electric dipole mode; trapped-mode

电磁超材料是由用来模拟电/磁偶极子的亚波长结构单元排列而成的等效介质。它的介电常数和磁导率^[1-3]可以通过设计结构单元及其排列方式来调控。利用超材料,人们可以实现对电磁波传播的有效操控;可以模拟现有的物理效应,比如电磁

诱导透明效应^[4]、克尔效应^[5-6];也可以设计自然界原本不存在的物理效应,比如负折射效应^[7-8];同时,也可以获得具有特殊效应的电磁波器件,比如超棱镜^[9-10]、隐身斗篷^[11-12]等。这些新的物理效应、新的电磁波器件在民用或军事上都有重要的

基金项目:中央高校基本科研业务费专项基金(NS2015077)资助项目。

收稿日期:2015-01-21;**修订日期:**2015-03-07

通信作者:尹小刚,男,副教授,硕士生导师,E-mail:xygin@nuaa.edu.cn。

引用格式:文永刁,尹小刚.基于金属多环结构的多频段电磁超材料吸收器[J].南京航空航天大学学报,2016,48(1):67-73. Wen Yongdiao, Yin Xiaogang. Multiband metamaterial absorber based on metallic multi-ring structure[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2016, 48(1): 67-73.

价值。

同时,可以实现对入射电磁波接近 100% 吸收的超材料吸收器^[13]也引起了人们浓厚的研究兴趣。它是典型的 3 层结构:顶层是由具有电磁共振特点的金属微结构单元排列而成的二维周期阵列,中间层是 1 层介质平板,底层是由窄金属带构成的二维周期阵列。顶层金属结构单元与其下方的底层窄金属带构成 1 个电磁共振结构单元。它的共振模式与入射的电磁波耦合将导致电磁波的吸收。利用等效介质理论,精心设计该超材料的结构单元,使得材料的波阻抗与自由空间匹配,从而易于实现对电磁波的吸收。为了方便样品制备和更易于实现对电磁波的完美吸收,人们将 3 层结构的底层窄金属带阵列用完整的金属板来代替,设计出了单频段^[13-17]、多频段^[18-25]及宽频^[26-28]吸收器。

以上这些吸收器为平面 3 层结构,其顶层结构单元均平躺在中间层介质板上。在以往的设计中,也有使用多环结构作为多频段吸收器的结构单元^[22];但是,他们是将多环结构平躺在中间介质板上,利用每个环上的电偶极子模式和底层金属板的强烈耦合来实现对入射电磁波的吸收。这种设计需要避免或抑制相邻两环之间的耦合效应。目前采取的 1 种可行的方法就是增大环间距。这样将大大增加单胞结构的尺寸,这对设计亚波长的超材料来说极为不利。近年来,一些研究者将顶层结构单元由平躺改为竖直站立在中间介质板上,设计了单频段的立体结构超材料吸收器^[29-31]。这样做尽管增加了 3 层结构的总厚度,但是拓展了吸收器的设计思路。

本文利用这种立体结构超材料设计思路,选择多金属环结构作为电磁响应单元,设计了一种工作在微波频段的多频段立体结构超材料吸收器。它的顶层是由竖直站立的同心共面金属多环结构单元构成的二维正方阵列。通过充分利用而不是抑制相邻两环之间的耦合效应来实现对入射电磁波

的吸收。本文将环间距设计得非常近,这样在 1 个较小面积的单胞内可以方便地安放更多的金属环,从而获得更多频段的吸收峰。利用电磁场数值模拟方法,本文从理论上研究了该超材料吸收器的吸收特点,在多个频段实现了对电磁波的理想吸收,并初步探讨了吸收效应的物理机制。

1 结构设计

图 1(a,b)是本文设计的多频段吸收器结构单元的两个侧面图。图 1(c)是结构单元的二维正方阵列结构的一部分。该结构单元由顶层竖直站立的金属多环结构、底层的完整金属板以及水平的中间介质板组成。其中,顶层的金属多环结构依附于竖直介质板的 1 个侧面上,并且环的中心与该介质板侧面的中心重合。最小环的内半径 $r = 2.3 \text{ mm}$,每个环的厚度均为 $t = 0.035 \text{ mm}$,宽度均为 $w = 0.4 \text{ mm}$,相邻环间距均为 $s = 0.4 \text{ mm}$ 。这些环从小到大依次称作环-1,环-2,环-3,……,一直到环-6。作为示例,图中只给出了 3 个金属环。竖直介质板的高度和厚度分别为 $h = 15 \text{ mm}$ 和 $d_1 = 0.8 \text{ mm}$ 。中间层介质板的厚度为 $d_2 = 0.8 \text{ mm}$ 。底层金属板的厚度也为 0.035 mm 。结构单元的周期为 $p = 15 \text{ mm}$ 。在电磁场数值模拟中,本文选择基于有限元的全波模拟方法。极化的电磁波沿着 $-z$ 方向垂直入射到超材料表面,其电场分量平行于 y 轴;在 x 和 y 方向上应用周期性边界条件,在 z 方向上选择开放性边界条件。通过数值模拟,本文可以得到该超材料的反射率 R ;底层为完整的金属板,因此透射率 $T = 0$;所以可以得到吸收率 $A = 1 - R$ 。考虑斜入射的情况,电磁波入射方向可绕 y 轴旋转,如图 1(c)的插图所示。在开始的模拟中,竖直介质板和中间层介质板均选择介质 FR4,其介电常数 $\epsilon = 4.5 + 0.09i$ 。多环结构和底层金属板均选择金属铜,其电导率 $\sigma = 5.8 \times 10^7 \text{ s/m}$ 。

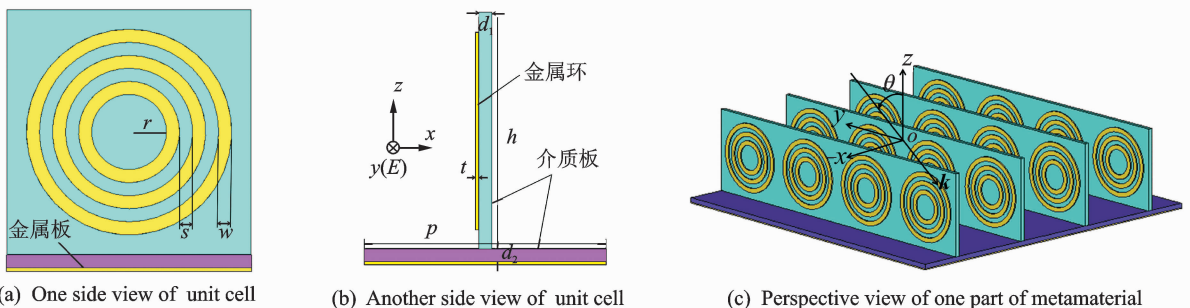


图 1 多频段超材料吸收器的结构示意图

Fig. 1 Schematic of multiband metamaterial absorber

2 结果与分析

图2是顶层结构单元中有不同数目的金属环时超材料的吸收谱(这里只考虑垂直入射)。当顶层结构单元中只有1个环(环-1)时,只在14.72 GHz处出现一个强吸收峰(1 ring-1),其吸收率接近100%,如图2(a)所示。从图2(b)中可以看出,当顶层结构单元中有2个环(环-1和环-2)时,与图2(a)相比,高频处的强吸收峰(2 rings-1)依然存在,只是位置变为14.81 GHz;同时,在低频11.50 GHz处又出现一个强吸收峰(2 rings-2)。从图2(c)中可以看出,当顶层结构单元中有3个环(环-1、环-2和环-3)时,与图

2(b)相比,除了原来的2个强吸收峰(3 rings-1和3 rings-2,位置分别为14.87 GHz和11.56 GHz)依然存在外,在更低的频率9.97 GHz处又出现了一个强吸收峰(3 rings-3)。依此类推,如图2(d,e,f)所示,当顶层结构单元中依次增加1个较大的金属环时,吸收谱上就会相应地在更低频率处增加一个强吸收峰。在本文设计的这个结构中,顶层结构单元中已给出了6个金属环,因此可以出现6个吸收峰。结果表明,如果选择合适的尺寸,使得顶层结构单元中有 n 个大小不同的金属环,吸收谱就会有 n 个频率不同的吸收峰。这就为多频段吸收器的设计提供了1个可行方案。

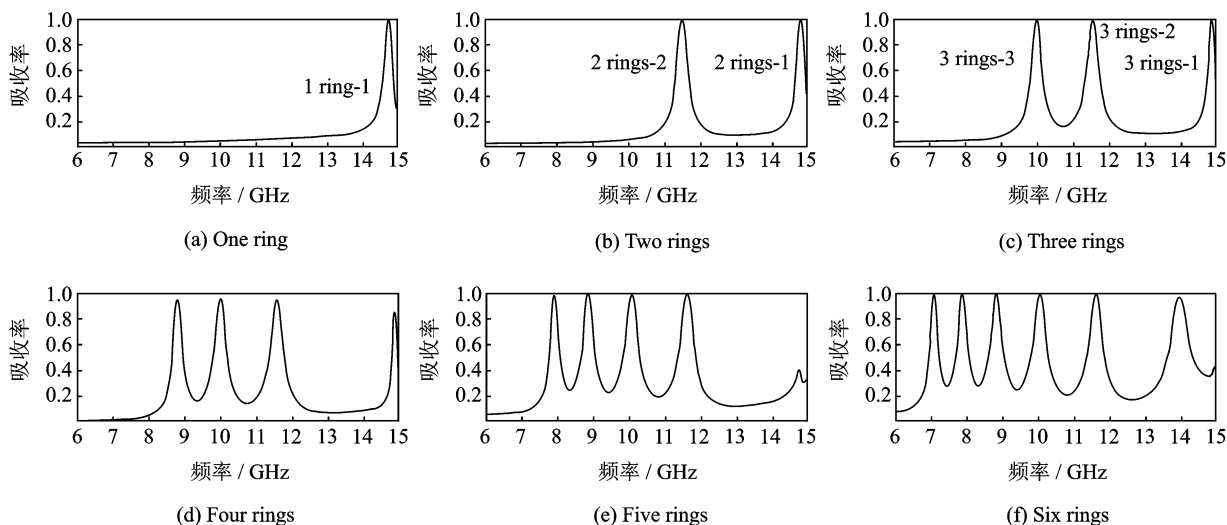


图2 顶层结构单元中有不同数目的金属环时超材料的吸收谱

Fig. 2 Absorption spectra of metamaterial for different numbers of rings in unit-cell of top layer

为了研究吸收效应的物理机制,本文以顶层结构单元中分别含有1个、2个和3个金属环时的超材料为例,模拟了它们的各吸收峰中心频率处的表面电流密度分布,如图3所示。从图3(a)中可以看出,顶层结构单元中只有1个环(环-1)时,唯一出现的吸收峰1ring-1对应的表面电流分居在金属环的上、下两半上,且同相流动。这些电流整体对应一个电偶极子,它的激发导致了入射电磁波的吸收。图3(b,c)分别对应图2(b)中的吸收峰2 rings-1和2 rings-2。从图3(b)中可以看出,吸收峰2 rings-1对应的表面电流也都分居在两环(环-1和环-2)的上、下两半上,且同相流动。这两个金属环上的电流整体也对应1个电偶极子,它的激发导致了吸收峰2 rings-1的出现。从图3(c)中可以看出,吸收峰2 rings-2对应的表面电流也分居在两环的上、下两半上;在单个环上,上、下两部分的电流同相流动;但是两环上的电流反相流动。双环

结构上的这种特殊的电流构型实际上对应着一种被大家广泛研究的局域电磁模式——捕获模式^[32]。该模式的响应频率主要与双环的尺寸有关:环越大则响应频率越小。正是这个捕获模式的激发导致了吸收峰2 rings-2的出现。图3(d,e,f)分别对应图2(c)中的吸收峰3 rings-1,3 rings-2和3 rings-3。从图3(d)中可以看出,吸收峰3 rings-1对应的表面电流也都分居在3个环(环-1、环-2和环-3)的上、下两半上,同相流动。这些电流整体也对应1个电偶极子,它的激发导致了吸收峰3 rings-1的出现。从图3(e)中可以看出,吸收峰3 rings-2对应的表面电流主要分居在相邻的环-1和环-2的上、下两半上。在单个环上,上、下两部分的电流同相流动,但是两环上的电流反相流动。很显然,这种电流构型也对应1个捕获模式。类似地,从图3(f)中可以看出,吸收峰3 rings-3对应的表面电流主要分居在相邻的环-2和环-3的

上、下两半上,这种电流构型也对应1个捕获模式。正是分别局域于相邻的环-1和环-2,相邻的环-2和环-3上的两个捕获模式的激发分别导致了吸收峰 3 rings-2和 3 rings-3 的出现。对于顶层结构单元中有更多环的超材料,其各吸收峰对应的电流分布规律与之相似。同时也可以看到,随着环数目的增加,在最高频处出现的吸收峰的变化不规则,比如当环数目变为5时,如图2(e)所示,最高频的吸收峰变的很弱。这可能是因为最高频的吸收峰对应

于多环整体的电偶极子模式,由于环之间的耦合比较复杂,因此该模式会受到环数目的极大影响;同时电偶极子模式与底层金属板的近场耦合也会对该模式产生很大的影响。因此得出结论:顶层结构单元中有 n 个大小不同的金属环时,超材料的吸收谱上就会有 n 个吸收峰出现;最高频吸收峰与多环结构整体的电偶极子模式的激发相关,其余 $n-1$ 个低频吸收峰则是与相应的相邻两环之间的捕获模式的激发相关。

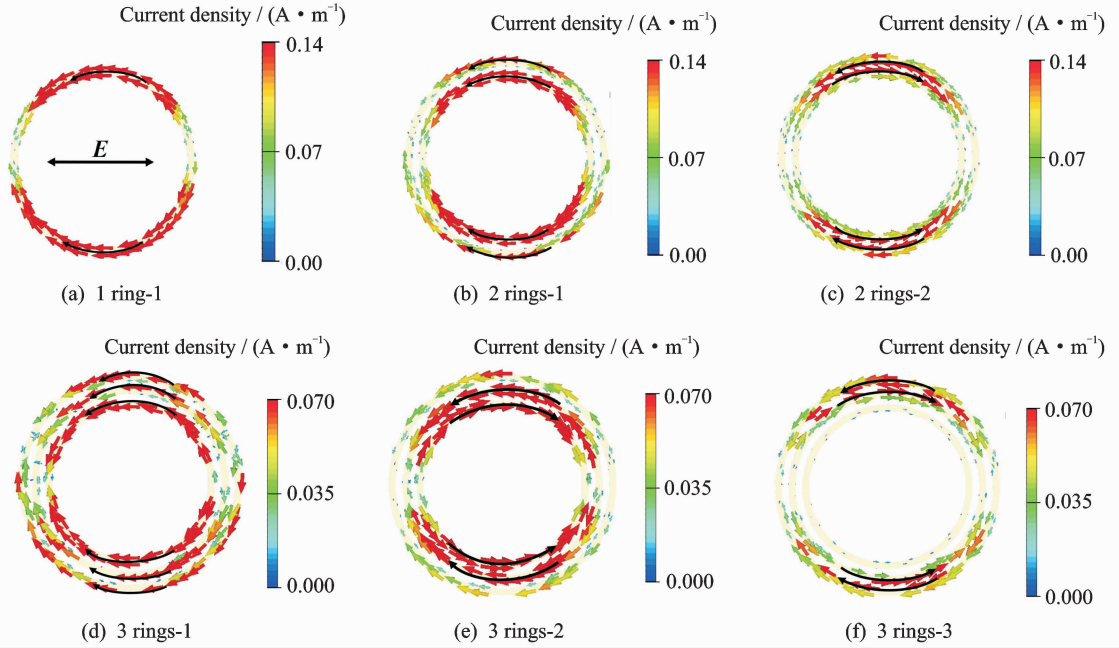


图3 对应图2中标记的各个吸收峰中心频率处的表面电流密度分布图

Fig. 3 Distributions of surface current density at center frequencies of absorption peaks marked in Fig. 2

图4是改变介质板的介电常数的实部 ϵ_{Re} 和损耗正切值 $\tan \delta$ 时超材料的吸收谱(这里只考虑垂直入射,顶层结构单元中有6个金属环)。在数值模拟中,超材料的几何结构参数与图2(f)中的一样。图4(a)给出的是保持中间层介质板的介电常数为 $4.5+0.09i$ 不变,仅改变垂直介质板的损耗正切值 $\tan \delta$ (其介电常数的实部保持4.5不变)时超材料的吸收谱。从图中可以看出,增加垂直介质板的损耗正切值,各吸收峰的强度轻微波动(先增大,后减小),在 $\tan \delta=0.02$ 时,吸收最强。图4(b)是仅改变垂直介质板的介电常数的实部(其损耗正切值 $\tan \delta=0.02$ 保持不变)时超材料的吸收谱。从图中可以看出,增加垂直介质板的介电常数的实部时,各吸收峰均发生了明显的红移,但是各吸收峰的强度依然未发生明显的变化。图4(c,d)几何结构参数、介电特性均与图2(f)中的一样。

分别给出的是在保持垂直介质板的介电常数为 $4.5+0.09i$ 不变的情况下,改变中间层介质板的损耗正切值 $\tan \delta$ (其介电常数的实部保持4.5不变)和介电常数的实部(其损耗正切值 $\tan \delta=0.02$ 保持不变)时超材料的吸收谱。从图中可以看出,介电常数的实部和损耗正切值改变时各吸收峰的位置和强度均未发生变化。这些结果表明,远离金属多环结构的中间层介质板的介电特性对各吸收峰几乎没有影响,而紧贴着金属多环结构的垂直介质板的介电特性的微小改变却能够对各吸收峰产生很大的影响,充分证明这些吸收峰对应的电磁响应模式(电偶极子模式和捕获模式)具有明显的局域特点。

图5是改变入射角时超材料的吸收谱(顶层结构单元中有6个金属环)。数值模拟中,超材料的如图1(c)中的插图所示,电磁波的入射方向绕着 y

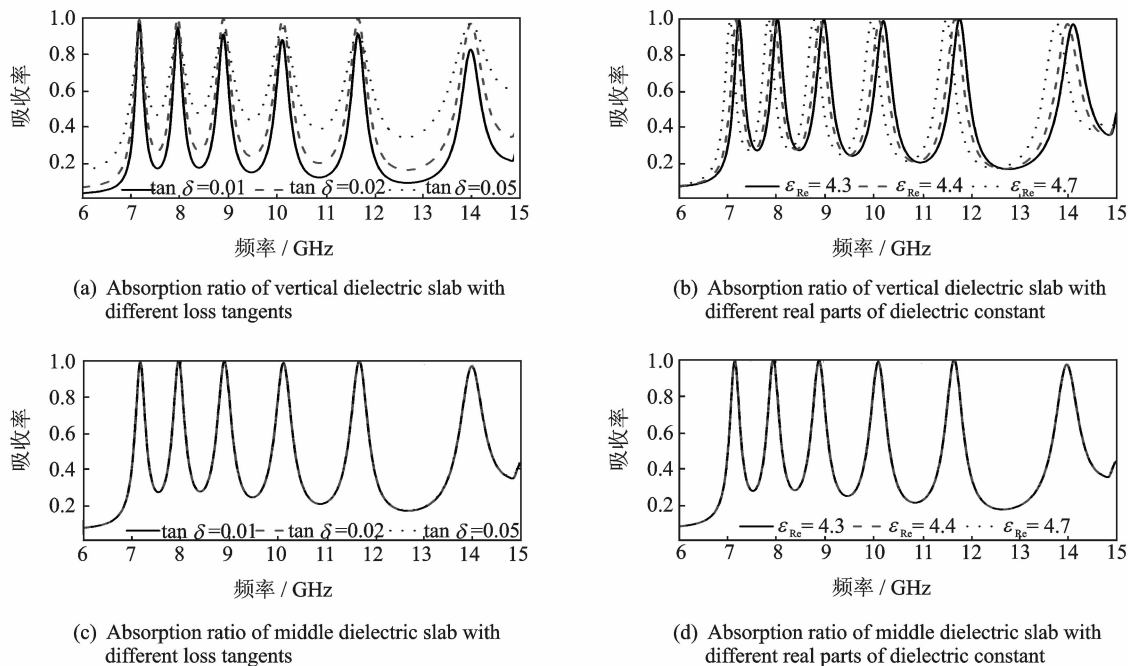


图 4 介质板的介电常数的实部和损耗正切值改变时超材料的吸收谱

Fig. 4 Absorption spectra of metamaterial with different real parts of dielectric constant and loss tangent of dielectric slabs

轴旋转来改变入射角(入射波的极化方向总是平行于金属环面,沿 y 轴方向)。从图中可以看出,入射角从 0° 增加到 30° 的过程中,与捕获模式相关的 5 个吸收峰的位置几乎不发生变化,而且吸收率都保持在 95% 以上;只有与电偶极子模式有关的最高频吸收峰分裂成两个峰,其中的低频吸收峰的吸收率仍然保持在 95% 以上。该吸收峰的分裂效应可以这样来理解:(1) 由于多个环所对应的电偶极子模式与底板之间的耦合较为复杂,尤其是在较大入射角时,这个耦合效应更加复杂;(2) 更重要的是由于周期结构的衍射波与金属表面相切时会发生 Wood 异常效应^[33]。这个效应将导致电磁波能量的损失,因此在吸收谱上会出现吸收峰。在斜入射时,衍射波波矢的水平分量为 $(2\pi/\lambda) \times \sin \theta + 2m\pi/p$, 其中 m 为整数, λ 为入射波的波长, p 为周期结构的周期。因此随着入射角 θ 的增加,对应的 Wood 异常效应将发生红移。在本文结构中,当 Wood 异常效应对应的电磁模式与电偶极子模式相遇会发生耦合,这可能是高频吸收峰分裂的原因。从本文模拟结果来看,分裂出来的两个吸收峰随着 θ 的增大而发生明显的红移,这与 Wood 异常的红移规律一致。5 个低频吸收峰的位置、强度几乎不发生变化,这是因为这些吸收峰与双环的捕获

模式相关,这些模式主要局域于相邻的双环之间,与底层金属板的耦合较弱。同时,由于 Wood 异常效应处在高频区域,远离这些捕获模式,因此这些低频吸收峰并未发生明显的变化。

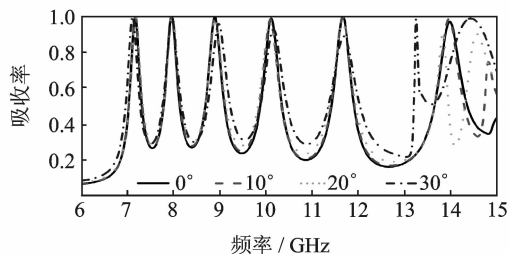


图 5 入射角改变时超材料的吸收谱

Fig. 5 Absorption spectra of metamaterial with different angles of incidence

3 结束语

本文利用电磁场数值模拟方法,在理论上设计了一种基于金属多环结构的多频段超材料吸收器。模拟结果表明,该吸收器顶层结构单元中有几个金属环,吸收谱上就会出现几个吸收峰。初步的研究表明,最高频率的吸收峰与顶层结构单元中的多环结构整体具有的电偶极子模式的激发相关,其余的吸收峰则与相邻两环具有的捕获模式的激发相关。本文研究为设计多频段吸收器提供了另一个可行

方案。这种设计还可以推广到其他频段,比如太赫兹频段。

参考文献:

- [1] Pendry J B, Holden A J, Robbins D J, et al. Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1999, 47(11): 2075-2084.
- [2] Smith D R, Padilla W J, Vier D C, et al. Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity[J]. *Physical Review Letters*, 2000, 84(18): 4184-4187.
- [3] Smith D R, Schurig D. Electromagnetic wave propagation in media with indefinite permittivity and permeability tensors[J]. *Physical Review Letters*, 2003, 90(7): 077405.
- [4] Jaeyoun K, Richard S, Walter R B. Multi-peak electromagnetically induced transparency (EIT)-like transmission from bull's-eye-shaped metamaterial[J]. *Optics Express*, 2010, 18(17): 17997-18002.
- [5] Alexander A Z, Vladislav V K. Giant resonant magneto-optic Kerr effect in nanostructured ferromagnetic metamaterials[J]. *Journal of Applied Physics*, 2007, 102(12): 123514.
- [6] Hu Y H, Wen S C, Zhuo H, et al. Focusing properties of Gaussian beams by a slab of Kerr-type left-handed metamaterial[J]. *Optics Express*, 2008, 16(7): 4774-4784.
- [7] Veselago V G. The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ [J]. *Soviet Physics Uspekhi*, 1968, 10(4): 509-514.
- [8] Shelby R A, Smith D R, Schultz S. Experimental verification of a negative index of refraction[J]. *Science*, 2001, 292 (5514): 77-79.
- [9] Pendry J B. Negative refraction makes a perfect lens [J]. *Physical Review Letters*, 2000, 85 (18): 3966-3969.
- [10] Fang N, Lee H, Sun C, et al. Sub-diffraction-limited optical imaging with a silver superlens[J]. *Science*, 2005, 308(5721): 534-537.
- [11] Schurig D, Mock J J, Justice B J, et al. Metamaterial electromagnetic cloak at microwave frequencies[J]. *Science*, 2006, 314(5801): 977-980.
- [12] Liu Youwen, Wang Xiaohua, Dong Zedong, et al. Tunable electromagnetic cloaking by external field [J]. *Transactions of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2014, 31(3): 241-248.
- [13] Landy N I, Sajuyigbe S, Mock J J, et al. Perfect metamaterial absorber[J]. *Physical Review Letters*, 2008, 100 (20): 207402.
- [14] Tao H, Bingham C M, Strikwerda A C, et al. Highly flexible wide angle of incidence terahertz metamaterial absorber: Design, fabrication, and characterization[J]. *Physical Review B*, 2008, 78 (24): 241103.
- [15] 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.
- [16] Huang L, Chowdhury D R, Ramani S, et al. Impact of resonator geometry and its coupling with ground plane on ultrathin metamaterial perfect absorbers[J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 101(10): 101102.
- [17] Kong H, Li G F, Jin Z M, et al. Polarization-independent metamaterial absorber for terahertz frequency[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2012, 33(6): 649-656.
- [18] Wen Q Y, Zhang H W, Xie Y S, et al. Dual band terahertz metamaterial absorber: Design, fabrication, and characterization[J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 95(24): 241111.
- [19] Shen X P, Cui T J, Zhao J M, et al. Polarization-independent wide-angle triple-band metamaterial absorber [J]. *Optics Express*, 2011, 19 (10): 9401-9407.
- [20] Li H, Yuan L H, Zhou B, et al. Ultrathin multiband gigahertz metamaterial absorbers [J]. *Journal of Applied Physics*, 2011, 110(1): 014909.
- [21] Brown J R, Hibbins A P, Lawrence C R, et al. Microwave resonances of ultrathin hexagonally symmetric microcavity arrays[J]. *Journal of Applied Physics*, 2012, 112(1): 014904.
- [22] 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.
- [23] Xu H X, Wang G M, Qi M Q, et al. Triple-band polarization-insensitive wide-angle ultra-miniature metamaterial transmission line absorber[J]. *Physical Review B*, 2012, 86(20): 205104.
- [24] Huang X J, Yang H L, Yu S Q, et al. Triple-band polarization-insensitive wide-angle ultra-thin planar

- spiral metamaterial absorber[J]. *Journal of Applied Physics*, 2013, 113(21): 213516.
- [25] Bhattacharyya S, Srivastava K V. Triple band polarization-independent ultra-thin metamaterial absorber using electric field-driven LC resonator[J]. *Journal of Applied Physics*, 2014, 115(6): 064508.
- [26] Huang L, Chowdhury D R, Ramani S, et al. Experimental demonstration of terahertz metamaterial absorbers with a broad and flat high absorption band [J]. *Optics Letters*, 2012, 37 (2): 154-156.
- [27] Cheng Y Z, Wang Y, Nie Y, et al. Design, fabrication and measurement of a broadband polarization-insensitive metamaterial absorber based on lumped elements[J]. *Journal of Applied Physics*, 2012, 111(4): 044902.
- [28] Yang G H, Liu X X, Lv Y L, et al. Broadband polarization-insensitive absorber based on gradient structure metamaterial [J]. *Journal of Applied Physics*, 2014, 115(17): 17E523.
- [29] Wang B N, Koschny T, Soukoulis C M. Wide-angle and polarization-independent chiral metamaterial absorber [J]. *Physical Review B*, 2009, 80 (3): 033108.
- [30] Gu S, Barrett J P, Hand T H, et al. A broadband low-reflection metamaterial absorber[J]. *Journal of Applied Physics*, 2010, 108(6): 064913.
- [31] Zhong S M, He S L. Ultrathin and lightweight microwave absorbers made of mu-near-zero metamaterials [J]. *Scientific Reports*, 2013, 3: 2083.
- [32] Papasimakis N, Fu Y H, Fedotov V A, et al. Metamaterial with polarization and direction insensitive resonant transmission response mimicking electromagnetically induced transparency [J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 94(21): 211902.
- [33] Wood R W. Anomalous diffraction gratings [J]. *Physical Review*, 1935, 48: 928.

