

【工程与技术研究】

极化不敏感超材料的类电磁诱导透明特性研究

李 荣^{1,2,3}, 谷倩倩^{1,2,3}, 程浩宇¹

(1. 滨州学院 航空工程学院; 2. 滨州学院 山东省航空材料与器件工程技术研究中心;
3. 滨州学院 滨州市航空光电材料与器件重点实验室, 山东 滨州 256603)

摘 要:设计了一种由两个金属圆环构成的类电磁诱导透明超材料,该超材料具有极化不敏感的特性。利用 CST Microwave Studio 软件仿真得到了该超材料的电磁波透射曲线,在原本不透明的传输窗口得到了透射率为 90% 的传输峰,证明所设计的超材料具有类电磁诱导透明特性。研究了基板厚度、介电常数以及金属圆环宽度对该超材料传输特性的影响,并进一步研究了三圆环超材料的电磁特性。结果表明,该结构可以产生双透射峰的类电磁诱导透明现象,且对入射电磁波仍然具有极化不敏感特性。

关键词:类电磁诱导透明现象;超材料;极化不敏感特性;透射率

中图分类号: O 441 **文献标识码:** A **DOI:** 10.13486/j.cnki.1673-2618.2023.02.013

电磁诱导透明现象是一种在三能级原子系统中极其重要的量子干涉现象^[1],由于显著的共振特性,三能级原子系统在非常广泛的领域内具有应用价值。然而,观测原子系统中的电磁诱导透明现象需要极其严苛的实验条件,比如低温环境、高强度的激光等,这些条件限制了人们对电磁诱导透明现象更加深入的研究。近些年来,研究者们利用超材料来代替三能级原子系统进行电磁诱导透明现象的研究^[2-4]。超材料是人工设计的具有亚波长尺寸结构单元的复合型材料,利用超材料所得到的电磁诱导透明现象,称为类电磁诱导透明现象^[5]。2008 年,Zhang 等^[6]首次用电磁超材料模拟出了原来仅在原子系统中实现的电磁诱导透明现象,该超材料的单元结构由明模(横切线)和暗模(开口环)组成,该模型被当作类电磁诱导透明经典明暗模耦合的谐振模型。当电磁波垂直入射到超材料表面时,明模与入射电磁波相互耦合,产生谐振。而暗模不能与入射电磁波直接耦合,只有通过明模,将能量近场耦合给暗模。明模与暗模之间相互影响,最终导致类电磁诱导透明现象的发生。此后数年,众多电磁超材料模型被设计出来并用于研究类电磁诱导透明现象。孙雅茹等^[7]设计了一种太赫兹波段的超材料,该超材料可用于制作折射率传感器,及生物化学领域的特异性传感检测。Han 等^[8]设计了一种由六条折叠金属棒组成的三维开口环谐振器,由于该谐振器结构对称而对入射电磁波具有极化不敏感特性。Yue 等^[9]设计了一种双层太赫兹波段的超材料结构,该结构具有加大的电磁波透射率,可用于高 Q 值谐振腔以及慢光器件的设计。如今,基于超材料的太赫兹器件的设计及研究逐渐增多。但是,大多数基于类电磁诱导透明现象的研究需要固定入射电磁波的极化方向,即一旦入射波的极化方向发生变化,类电磁诱导透明现象将会消失或者受到限制。因此,设计一种具有电磁波极化不敏感的超材料结构将为在太赫兹领域研究类电磁诱导透明现象提供便利。

收稿日期:2022-06-17

基金项目:滨州学院科研基金项目(BZXLYG1928)

第一作者简介:李 荣(1981—),女,山东东营人,讲师,硕士,主要从事电磁超材料特性研究。

E-mail:lirong19810810@163.com

本文设计了一种由两个金属圆环构成的类电磁诱导透明超材料, 该超材料对垂直入射的太赫兹电磁波具有极化不敏感特性。文章还研究了基板厚度、介电常数以及金属圆环宽度等参数对超材料结构的影响。进一步设计了由三圆环构成的类电磁诱导透明超材料结构, 可实现双透射峰的类电磁诱导透明现象, 且对入射电磁波具有极化不敏感特性。

1 结构设计

所设计的超材料结构单元如图 1 所示, 两个金属(铜)圆环的半径 $r_1 = 30 \mu\text{m}$, $r_2 = 42.5 \mu\text{m}$, 宽度 $w = 4 \mu\text{m}$, 厚度 $t_1 = 2 \mu\text{m}$, 电导率 $\sigma = 5.96 \times 10^7 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$ 。基板采用高阻硅, 介电常数 $\epsilon_1 = 11.7$, 损耗正切 $\tan \delta = 0.01$, 边长 $a = 110 \mu\text{m}$, 厚度 $t_2 = 8 \mu\text{m}$ 。为了研究双圆环超材料的类电磁诱导透明谐振特性, 本文利用 CST Microwave Studio 软件进行了仿真计算。当太赫兹电磁波垂直入射(Z 方向)到超材料表面时, 其电极化方向沿 Y 方向, 磁极化方向沿 X 方向。

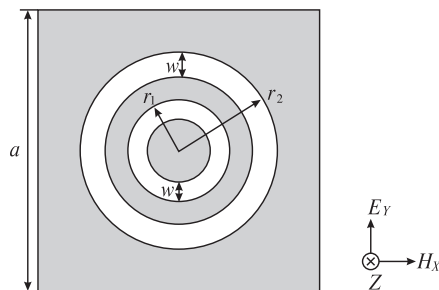


图 1 双圆环超材料结构单元

2 结果和讨论

图 2(a) 中的三条传输曲线分别对应三种不同的结构单元。虚线表示当超材料结构只有外环存在时的透射曲线, 点线是超材料结构只有内环时的透射曲线, 实线是外环和内环共同存在时的透射曲线。从图中可清晰看到, 外环及内环分别单独存在时, 超材料都可以被电磁波直接激发从而产生传输谷(频点分别对应 0.710 THz 和 1.090 THz)。当外环和内环同时存在时, 电磁波垂直入射到超材料表面, 两种结构之间产生了破坏性干涉, 传输曲线中出现了传输峰(频点约在 0.674 THz), 峰值达到了约 90%, 说明该材料产生了强烈的类电磁诱导透明现象。为了证实文中所设计结构具有极化不敏感特性, 进一步仿真计算了图 1 结构的 Y 极化和 X 极化透射曲线, 如图 2(b) 所示。图中 Y 极化和 X 极化透射曲线完全重合, 说明所设计的超材料对入射电磁波具有极化不敏感特性。

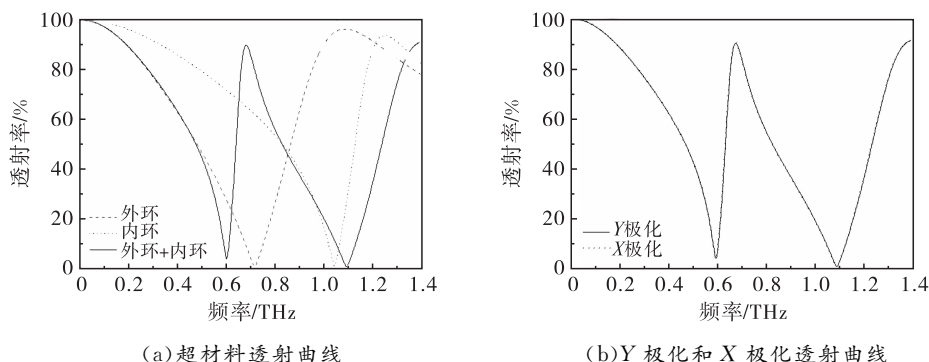


图 2 透射曲线

另外, 超材料结构由圆环构成, 具有中心对称性, 不仅对 Y 极化波和 X 极化波不敏感, 还应该对任何极化角的垂直入射电磁波都具有不敏感的特性, 图 3 证实了该设想。图 3 为电磁波垂直入射, 极化角分别为 0° 、 15° 、 30° 、 45° 、 90° 时的透射曲线。由图可知, 不同极化角所对应的透射曲线几乎完全重合。在实际应用中, 超材料对入射电磁波的极化稳定性有利于更好地调控太赫兹波。即当入射波模式变化时, 超材料对电磁波有更加稳定的频率响应。该超材料结构的对称性, 使得超材料的性能更加稳定。

为了进一步研究超材料产生类电磁诱导透明现象的原因, 本文仿真了超材料表面电场分布情况。图 4(a) 和 4(c) 为 Y 极化时两个传输谷($f_1 = 0.599 \text{ THz}$, $f_3 = 1.088 \text{ THz}$) 的电场分布图, 图 4(b) 为 Y 极

化时传输峰($f_2=0.674$ THz)的电场分布图。从图 4(a)~(c)可看出,当电磁波为 Y 极化时,在 $f_1=0.599$ THz 处,电场能量主要分布在圆环的上、下两部分,且外圆环能量略高于内圆环;在 $f_3=1.088$ THz 处,电场能量主要分布在圆环的上、下两部分,且内圆环能量明显高于外圆环;在 $f_2=0.674$ THz 处,电场能量仍然分布在圆环的上、下两部分,但能量显著高于前述两种情况,由此可知在 $f_2=0.674$ THz 频点处,电磁场与超材料发生了强烈的耦合作用,产生了类电磁诱导透明现象。图 4(d)和 4(f)为 X 极化时两个传输谷($f_1=0.599$ THz, $f_3=1.088$ THz)的电场分布图,图 4(e)为 X 极化时传输峰($f_2=0.674$ THz)的电场分布图。

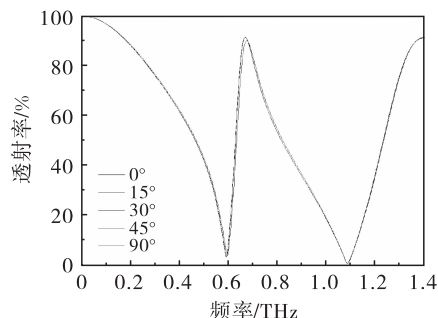


图 3 不同极化角下的透射曲线

从图 4(d)~(f)可看出,当电磁波为 X 极化时,在 $f_1=0.599$ THz 处,电场能量主要分布在圆环的左、右两部分,且外圆环能量略高于内圆环;在 $f_3=1.088$ THz 处,电场能量主要分布在圆环的左、右两部分,且内圆环能量明显高于外圆环;在 $f_2=0.674$ THz 处,电场能量仍然分布在圆环的左、右两部分,但能量显著高于前述两种情况,此时,电磁场与超材料发生了强烈的耦合作用,产生了类电磁诱导透明现象。

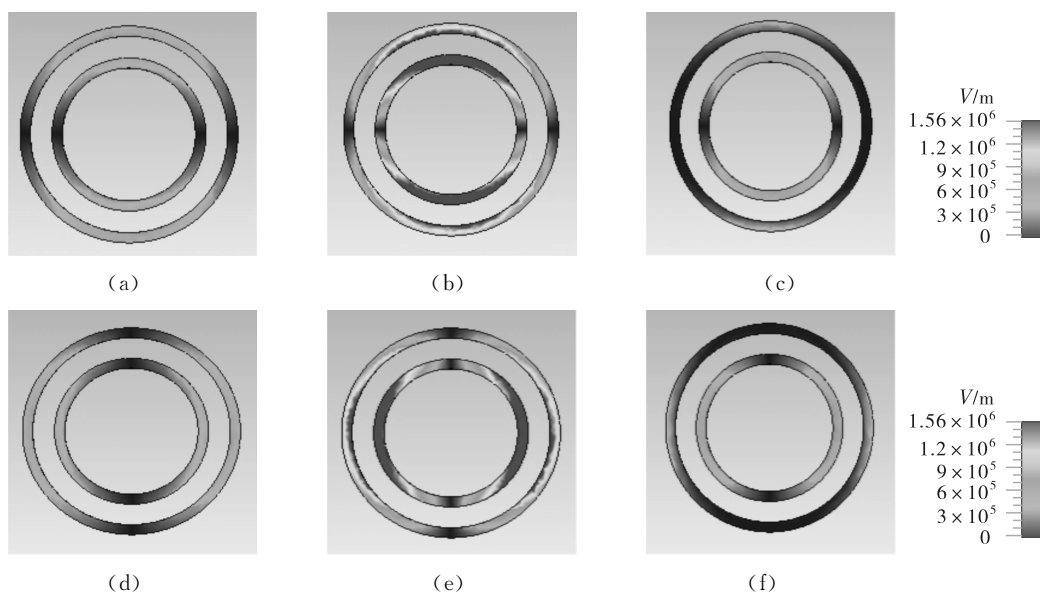


图 4 Y 极化(a~c)和 X 极化(d~f)时的电场分布图

本文还研究了超材料不同参数对传输特性的影响。图 5(a)为基板厚度对透射曲线的影响。随着基板厚度的增加,传输峰的峰值变化不明显,但是其频点出现了红移现象,并随着厚度逐渐增大,频点移动的趋势在逐渐变缓,说明基板厚度越大,对频点的红移影响越小。另外,基板厚度对传输谷也有影响。随着基板厚度增加,传输谷的频点也出现了红移,但两个谷的移动趋势不一样。高频处的传输谷红移现象明显,低频处的传输谷红移趋势略缓。这说明基板厚度的变化对金属内圆环与电磁波之间的谐振影响大,对金属外圆环与电磁波之间的谐振影响较小。图 5(b)是基板不同介电常数所对应的传输曲线。当介电常数逐渐变大时,传输峰的峰值没有明显变化,但传输峰的频点出现了红移现象。同时两个传输谷的频点也向低频方向移动,两者的移动趋势基本一致。图 5(c)是两个金属圆环的宽度对传输曲线的影响。当圆环宽度变大时,传输峰的峰值变化不大,峰值所对应的频点基本没有变化,低频处的传输谷频点几乎没有移动,但高频处的传输谷频点有显著的蓝移现象,说明圆环宽度对内圆环与电磁波之间的谐振影响较大。

双圆环超材料的传输曲线在频率为 0.674 THz 处出现了透明窗口,实现了类电磁诱导透明现象。这是由于在电磁场激励下,内外圆环相互耦合,相互作用,最终导致了透明窗口的出现。在此设计思路的基

础上,设想存在第三个圆环,在电磁场作用下,第三个圆环将与双圆环发生耦合作用,则可能再次出现一个透明窗口。接下来,仿真三圆环超材料,以验证上述设想的正确性。

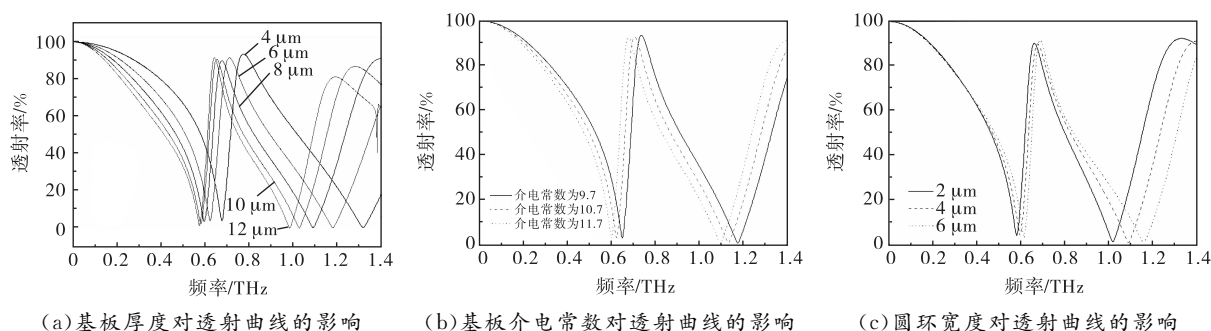


图5 基板厚度、介电常数以及圆环宽度对透射曲线的影响

图6(a)为三圆环单元结构,在图1结构的基础上,在内环内部又增加了一个圆环3(图1中的外圆环简称为圆环2,内圆环简称为圆环1),所用金属材料相同,圆环宽度与图1圆环宽度一致,圆环3的外半径为 $22.5\ \mu\text{m}$ 。当电磁波垂直入射到三圆环超材料表面时,得到的透射谱如图6(b)所示。从图中可以看到有两个透射峰,其中低频处的透射峰是圆环1和圆环2相互作用的结果,高频处的透射峰是圆环1和圆环3相互作用的结果,这说明三个圆环之间产生了类电磁诱导透明现象。从图中还可看到,低频处的透射峰峰值明显高于高频处的透射峰峰值,且透射峰更加尖锐,这说明圆环1和圆环2的耦合作用更加强烈。另外,由于所设计结构为具有中心对称性,该超材料对入射电磁波仍然具有极化不敏感特性,从图6(b)可以看出入射电磁波为Y极化和X极化时的透射曲线是完全重合的。

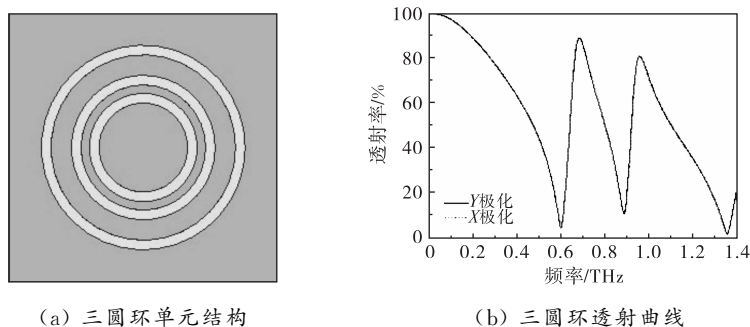


图6 三圆环单元结构和透射曲线

3 结论

本文设计了由两个金属环所构成的具有中心对称结构的超材料,可以与太赫兹波产生强烈耦合,且对入射波具有极化不敏感特性。当太赫兹波垂直入射到超材料表面时,传输曲线在 $0.674\ \text{THz}$ 附近出现了透射率达 90% 的传输峰,说明超材料能够产生明显的类电磁诱导透明现象。该超材料结构具有中心对称性,当入射波垂直入射时,无论极化角为多少度,所得到的透射曲线几乎不变,透射峰的频点和峰值都没有明显变化。本文还研究了三圆环结构的透射曲线,结果表明,该结构可以产生双透射峰的类电磁诱导透明现象,且对入射电磁波仍然具有极化不敏感特性。本文所设计研究的两种中心对称性的超材料结构,均具有高透射率、极化不敏感特性,可用于传感器件、慢光器件等领域。

参 考 文 献:

- [1] HU S, LIU D, LIN H, et al. Analogue of ultra-broadband and polarization-independent electromagnetic induced transparency using planar metamaterial[J]. Journal of applied physics, 2017(12): 123103.

- [2] ZHANG Y, LI Y, CAO Y, et al. Graphene induced tunable and polarization-insensitive broadband metamaterial absorber[J]. Optics communications, 2017, 382: 281 – 287.
- [3] ZHONG M, HAN G M, LIU S J, et al. Absorption enhancement of a dual-band metamaterial absorber[J]. Physica E: low-dimensional systems and nanostructures, 2017, 86: 158 – 163.
- [4] YIN X, FENG T, YIP S P, et al. Tailoring electromagnetically induced transparency for terahertz metamaterials: from diatomic to triatomic structural molecules[J]. Applied physics letters, 2013, 103(2): 021115.
- [5] MARANGOS J P. Electromagnetically induced transparency[J]. Journal of modern optics, 1998, 2(3): 377 – 384.
- [6] ZHANG X, GENOV D A, WANG Y, et al. Plasmon-induced transparency in metamaterials[J]. Physical review letters, 2008, 101(4): 238 – 242.
- [7] 孙雅茹, 史同璐, 刘建军, 等. 太赫兹超材料类 EIT 谐振无标记生物传感[J]. 光学学报, 2016, 36(3): 261 – 266.
- [8] HAN S, CONG L Q, LIN H, et al. Tunable electromagnetically induced transparency in coupled three-dimensional split-ring-resonator metamaterials[J]. Scientific reports, 2016, 6: 20801.
- [9] YUE Y, HE F, CHEN L, et al. Analogue of electromagnetically induced transparency in a metal-dielectric bilayer terahertz metamaterial[J]. Optics express, 2021, 29(14): 21810 – 21819.

Study on Analog of Electromagnetically Induced Transparency of Polarization-insensitive Meta-material

LI Rong^{1,2,3}, GU Qian-qian^{1,2,3}, CHENG Hao-yu¹

(1. School of Aeronautical Engineering, Binzhou University;

2. Shandong Engineering Research Center of Aeronautical Materials and Devices, Binzhou University;

3. Binzhou Key Laboratory of Aeronautical Optoelectronic Materials and Devices,
Binzhou University, Binzhou 256603, China)

Abstract: A meta-material composed of two metal rings is designed. When the terahertz electromagnetic wave is perpendicular to the surface of the meta-material, it is insensitive to polarization. The transmission curve is simulated by CST Microwave Studio software, and the transmission peak with a transmittance of 90% is obtained. It proves that the designed meta-material has the characteristics of electromagnetically induced transparency. The effects of substrate thickness, dielectric constant and metal ring width on the structure of meta-materials are studied. The electromagnetic properties of the three ring meta-material are studied as well. The results show that the structure can produce electromagnetically induced transparency with double transmission peaks, and is insensitive to the incident electromagnetic waves.

Keywords: electromagnetically induced transparency-like phenomenon; meta-materials; polarization insensitive characteristics; transmittance

(责任编辑:王新亮)