



双明模耦合的双波段类电磁诱导透明研究

宁仁霞 黄旺 王菲 孙剑 焦铮

Electromagnetic induction-like transparency in dual-band with dual-bright mode coupling

Ning Ren-Xia Huang Wang Wang Fei Sun Jian Jiao Zheng

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 71, 014201 (2022) DOI: 10.7498/aps.71.20211312

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211312>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

双明模耦合的双波段类电磁诱导透明研究^{*}宁仁霞^{1)2)3)†} 黄旺¹⁾ 王菲¹⁾ 孙剑¹⁾ 焦铮¹⁾¹⁾ (黄山学院信息工程学院, 黄山 245041)²⁾ (南京航空航天大学, 雷达成像与微波光子技术教育部重点实验室, 南京 211106)³⁾ (智能微系统安徽省工程技术研究中心, 黄山 245041)

(2021 年 7 月 15 日收到; 2021 年 9 月 22 日收到修改稿)

本文设计了一种双层开口方环和双 C 型结构的超材料结构, 在太赫兹波段具有双波段的类电磁诱导透明效应. 该结构在 1.438 THz 和 1.699 THz 处出现透射峰. 通过电磁场分布分析讨论产生双频带电磁诱导透明的原因, 利用等效电路分析方法进一步解释了超材料中的类电磁诱导透明效应. 研究了超材料开口方环的开口大小和双 C 型结构距离以及改变入射角度时对透射窗口的影响, 结果发现在改变入射角度时, 所设计材料透射谱线变化较大, 表现出对角度的高敏感性. 同时, 改变环境的介电常数可以得到该结构的透射谱产生明显的红移. 以上研究结果表明该结构在角度滤波器, 折射率传感器等器件中有潜在的应用.

关键词: 超材料, 类电磁诱导透明, 双波段, 等效电路**PACS:** 42.25.Bs, 42.81.Dp, 42.79.Gn**DOI:** 10.7498/aps.71.20211312

1 引言

近几十年来, 人们在人工电磁材料 (也称为超材料, metamaterials) 领域开展了大量的研究 [1–3]. 这主要是因为超材料具有非自然的电磁特性和物理特性, 如负折射率、完美吸收 [4]、电磁波隐身和电磁诱导透明 (electromagnetically induced transparency, EIT) [5,6]. EIT 效应是由多路激发引起, 干涉效应所导致的, 使介质对入射的电磁波透明而引起的一种量子现象 [7]. 这种现象最早在原子系统里被发现. 然而, 在最初研究的三原子系统中要实现 EIT 现象需要严格的实验条件, 如较高强度泵浦源和合适的原子能级系统以及较低的温度, 因此极大地限制了其性能应用和进一步的研究 [8]. 近年来, 人们在热原子系统 [9]、电路系统、超材料等中

发现了类 EIT 效应 [10], 尤其是在超材料中发现类 EIT 以来, 它一直受到广泛关注, 例如非线性器件、光存储、以及传感器等领域有潜在的应用 [11–13].

与原子系统里实现的 EIT 效应所不同的是无需非常苛刻的实验条件就可以在超材料中实现 EIT 效应 [10,14]. 研究者在设计超材料结构时通常是通过改变上层金属结构或者材料 [15–20], 从而得到相应的明模式或者暗模式. 一般情况下明模式的辐射损耗较大, 故 Q 值会较低而暗模式的辐射损耗较小故 Q 值会较高, 当明模与暗模耦合时, 在谐振点附近就会产生较为尖锐的透射峰 [21–24].

本文主要研究了在太赫兹波段下的双明模耦合结构的类 EIT 效应, 对所设计结构的参数进行分析, 结合电场和磁场分布, 解释了该 EIT 效应是通过双明模结构进行耦合的物理机制. 通过研究入射角和背景环境的介电常数, 发现该结构对入射电磁波角度敏感, 同时具有折射率传感特性. 该结果

^{*} 全国大学生创新创业训练项目 (批准号: 202010375030)、安徽省高校自然科学基金项目 (批准号: KJHS2020B07, KJ2020A0684) 和雷达成像与微波光子技术教育部重点实验室开放课题 (批准号: NJ20210006) 资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: nrxxiner@163.com

在太赫兹角度开关、折射率传感等方面有潜在的应用。

2 单元结构设计

如图 1 所示, 基本单元结构为双层结构, 顶层为金属层, 基板为二氧化硅. 本单元为 $p \times p$ 的周期单元, 结构单元参数如下: $p = 150 \mu\text{m}$, 基板厚度 $d = 20 \mu\text{m}$, 基板的介电常数 $\varepsilon = 3.75$. 上层金属由一个双 C 结构和一个开口方环耦合而成, 金属的电导率为 $\sigma = 5.8 \times 10^7 \text{ S/m}$, 金属的双 C 的外宽为 $120 \mu\text{m}$, 内宽为 $110 \mu\text{m}$, 金属的开口方环的外宽为 $74 \mu\text{m}$, 内宽为 $64 \mu\text{m}$, 金属层厚度为 $5 \mu\text{m}$, 外部金属双 C 开口的大小和内部金属开口方环的水平开口的大小, 垂直开口大小都为 $4 \mu\text{m}$. 本设计采用时域有限差分法 (finite difference time domain, FDTD) 对透射率进行计算. 其中, 金属层的几何参数为 $L_1 = 120 \mu\text{m}$, $L_2 = 110 \mu\text{m}$, $L_3 = 74 \mu\text{m}$, $L_4 = 64 \mu\text{m}$, $t = 5 \mu\text{m}$, $g = 4 \mu\text{m}$, $g_1 = 4 \mu\text{m}$, $g_2 = 4 \mu\text{m}$, $a = 16 \mu\text{m}$, $b = 14 \mu\text{m}$, 边界条件在 x 方向和 y 方向上设置的是周期性边界条件, 在 z 方向上设置的是开放性边界条件, 入射电磁波为横电波模式 (transverse wave, TE mode), 入射角为 θ .

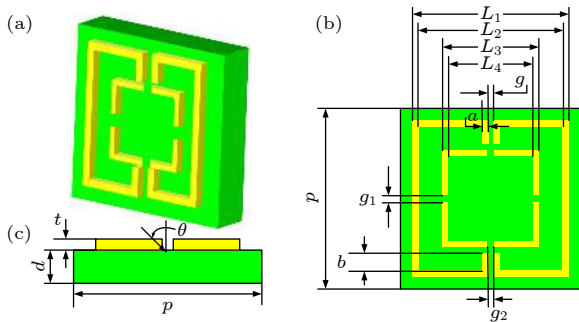


图 1 双明模耦合的单元结构图 (a) 由顶层金属层和底层非金属层构成的超材料结构的三维视图; (b) 所设计超材料结构的正视图; (c) 所设计超材料的侧视图

Fig. 1. Unit structure diagram of bright-bright mode coupling: (a) 3D view of metamaterial structure consisting of top metal layer and bottom nonmetal layer; (b) view of the designed metamaterial structure; (c) side view of the designed metamaterial structure.

3 计算结果与讨论

为分析本文设计的 EIT 超材料结构在太赫兹波段对入射电磁波的响应情况及产生机理, 对结构图所示的完整结构去掉最外层的双 C 结构只保留

内部开口方环即结构 I, 去掉内部方环仅保留最外层双 C 结构即结构 II, 分别对这 3 种结构在入射电磁波垂直入射情况下进行计算分析得到透射率随频率变化的情况, 如图 2 中结构 I 所示. 红色线表示的是开口方环结构的透射谱, 其透射峰在 1.531 THz 处, 透射谷分别在 1.509 THz 和 1.603 THz 处, 根据图 3(b) 中各谐振点的电场分布可以看出中即在透射谷点产生了谐振, 此时, 在 TE 模式下, 开口方环的产生了类 EIT 现象, 从电场分布来看, 在低频透射谷的电场主要集中在方环开口处, 此时开口环可以等效为 LC 谐振回路, 开口处等效为电容, 方环等效为电感, 此时水平开口等效为 LC 回路 1, 垂直开口处等效为 LC 回路 2, 如图 4(a) 中蓝色虚框内电路所示. 黑色线表示的 II 是双 C 结构的透射率变化情况, 其透射峰在 1.462 THz 处, 透射谷分别在 1.423 THz 和 1.725 THz 处, 其中 1.423 THz 处为基波, 高频处 1.25 THz 处为二次谐波. 结构 I 和 II 作为明模形式存在互相耦合, 产生多频带的类 EIT 现象 [25–28]. 其中黑色线的仿真对象是在 1.0 到 1.8 THz 波段的超材料完整结构, 仿真结果出现 2 个透射峰频点, 以及 3 个尖锐的透射谷点, 2 个透射峰分别在 1.438 THz 和 1.699 THz 处, 3 个透射谷分别在 1.405 THz , 1.543 THz , 1.735 THz

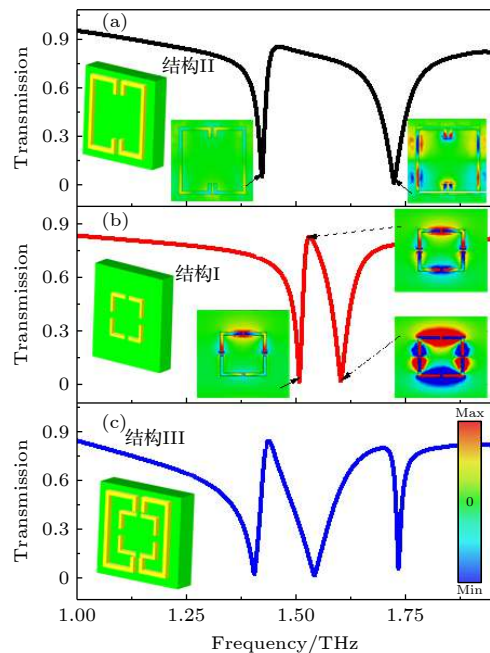


图 2 3 种结构 (a) I, (b) II 和 (c) III 的透射频谱图对比及结构 I, II 的对应频点电场分布

Fig. 2. Comparison of transmission spectra of three structures (a) I, (b) II and (c) III, and corresponding frequency point electric field distribution of structures I and II.

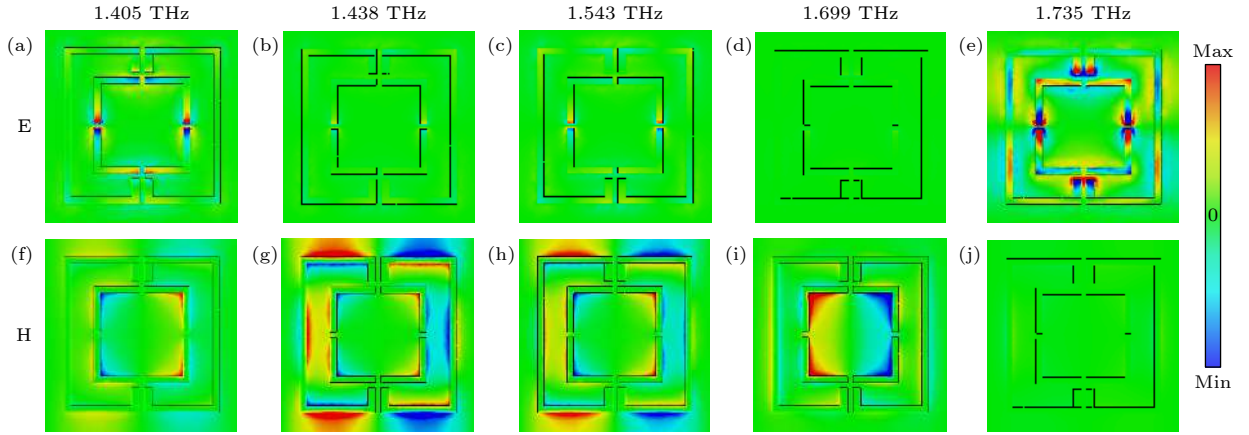


图 3 结构 III 条件下各透射峰和透射谷处电磁场分布图 (a)–(e) 为电场分布; (f)–(j) 为磁场分布图

Fig. 3. Electromagnetic field distribution on transmission peaks and transmission valleys of the structure III. (a)–(e) are electric field distribution; (f)–(j) is the magnetic field distribution.

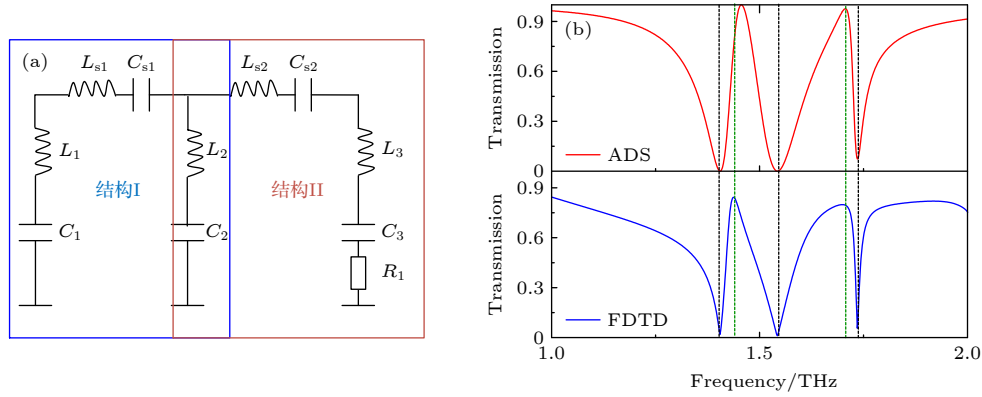


图 4 (a) 电磁诱导透明的等效电路模型; (b) 两种不同方法得到电磁诱导透明效应

Fig. 4. (a) Equivalent circuit model of electromagnetically induced transparency; (b) electromagnetically induced transparency effect is obtained by two different methods of ADS and FDTD.

处. 透射峰的峰值分别为 0.843 和 0.799, 透射谷的谷值分别为 0.019, 0.011, 0.056.

为了进一步分析上述结构产生类 EIT 的物理机理, 图 3 分析了图 2 结构 III 分别在 1.405 THz, 1.438 THz, 1.543 THz, 1.699 THz 与 1.733 THz 这 5 个频点处的电场和磁场分布, 如图 3 所示. 从图 3(a) 可以看出, 在第 1 个类 EIT 窗口, 1.405 THz 处, 电场主要集中在双 C 型结构的开口处, 这与图 2 中透射谱结果一致, 即低频处的谐振主要由结构 2 的双 C 型结构产生 1.438 THz 为透明频点, 因此电场分布较弱. 在 1.543 THz 处, 能量从外环耦合到内环结构 1 的开口处. 在第 2 个 EIT 窗口的情况刚好相反, 能量从内环结构 I 耦合到外环双 C 型结构 II 处的开口位置处. 图 3(f)–3(j) 分别为磁场分布的结果, 与电场分布的情况刚好相反, 在 1.438 THz 和 1.699 THz 产生了电诱导透明 [29].

为了较为清楚地理解 EIT 效应的机理, 采用

等效电路的方法进行分析. 如图 4(a) 所示, 该结构 I 可等效为蓝色虚线框内电路, 其中 $L_1 C_1$, $L_{S1} C_{S1}$, $L_2 C_2$ 回路分别谐振在结构 I 的低频和高频谐振点, $L_2 C_2$, $L_{S2} C_{S2}$, $L_3 C_3$ 回路分别谐振在结构 II 的低频和高频谐振点, 整个超材料结构可以用完整的电路等效, 如图 4(b) 所示, 红色线为根据图 4(a) 等效电路通过射频电路设计工具 ADS 仿真得到, 蓝色线为利用 FDTD 仿真得到, 对比仿真结果可得到利用等效电路解释多波段电磁诱导透明机理. 在这个电路模型中, $L_1 C_1$, $L_{S1} C_{S1}$, $L_2 C_2$ 回路和 $L_2 C_2$, $L_{S2} C_{S2}$, $L_3 C_3$ 回路都作为明模存在, 中间的 $L_{S1} C_{S1}$, $L_{S2} C_{S2}$ 则表示两个明模之间的耦合 [30–33].

4 超材料 EIT 结构参数与特性分析

4.1 改变外部双 C 的距离

通过改变外部双 C 型结构之间的距离, 可得

到图 5 所示结果. 从图 5 可以看出, 改变外部双 C 的距离主要会影响低频透射谷, 且变化较小, 当双 C 距离 g 从 $0 \mu\text{m}$ 增大到 $12 \mu\text{m}$ 之间时, 对第一个透射谷几乎没有影响, 在 $12 \mu\text{m}$ 之后低频点的透射谷会产生蓝移. 当 g 增大时, 1.438 THz 左右的频点的频偏较大, 根据图 3 的磁场分布能够发现 1.438 THz 处磁场主要集中在双 C 型结构上.

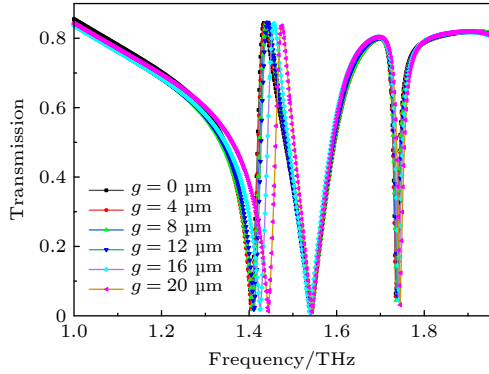


图 5 改变空气槽的宽度 g 时透射率随频率变化情况
Fig. 5. Variation of transmission with gap width g of the structure II.

4.2 改变方环水平开口 g_1 对 EIT 效应的影响

为了进一步研究 EIT 受超材料结构参数影响情况, 如图 6 所示通过调节内层方环的水平开口距离大小 g_1 , 得到 g_1 对 EIT 窗口的影响. 在图 6 中, 红线表示的是在 $g_1 = 4.0 \mu\text{m}$ 时的情况. 当 g_1 增大时, 中间谐振频点会产生蓝移, 这是因为中间的谐振频点主要是内环结构 I 产生, 从图 3 的电场分布来看, 在 1.543 THz 和 1.735 THz 处的电场分布主要集中在内环结构 I 上, 因此改变 g_1 会产生较大

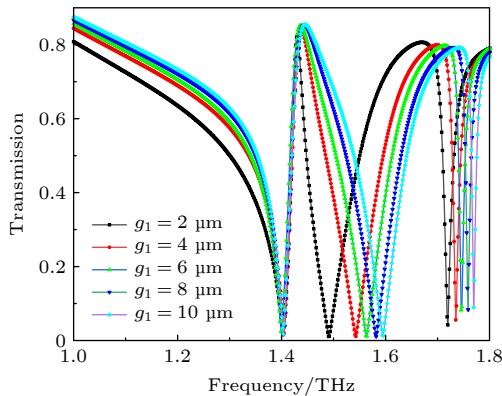


图 6 内环结构水平开口大小 g_1 对 EIT 效应的影响
Fig. 6. Influence of width g_1 of the horizontal gap of the structure I on EIT effect.

的影响. 当然, 由于高频点与中间谐振频点会存在能量耦合, 因此中间谐振频点变化会引起高频谐振点的稍微的蓝移, 变化范围较小.

4.3 改变方环垂直开口大小 g_2 对 EIT 效应的影响

同样的, 通过调节内层方环的垂直开口距离大小 g_2 , 得到 g_2 对 EIT 效应的影响. 从图 7 可以看出, 随着 g_2 的增大, 中间谐振频点依旧会发生蓝移, 产生的原因和改变方环水平方向开口大小原因相同, 但是此时随着 g_2 的增大高频点与中间谐振频点没有产生能量上的耦合, 因此中间谐振频点的变化对高频点几乎不产生影响.

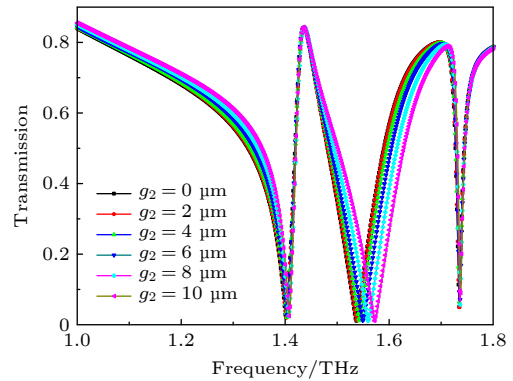


图 7 内环结构垂直开口大小 g_2 对 EIT 效应的影响
Fig. 7. Influence of width g_2 of the vertical gap of the structure I on EIT effect.

4.4 改变入射角度

为进一步研究该 EIT 效应对入射角度的敏感性, 图 8 为改变入射角对 EIT 效应的影响. 从图 8 可以看到, 入射角增大时产生了明显的红移现象, 即当入射角改变很小的角度透射谱的变化却很大. 因此本结构产生的 EIT 效应对入射角度比较敏感. 这是由于透射率 T 在斜入射时与入射角的关系为 $T = T_i \cos \theta$, 当入射电磁波角度发生变化时, 其透射率也随之变化, 因此本结构可作为检测角度变化的传感器使用 [34–35].

4.5 改变背景环境的介电常数

超材料结构通常具有对周围环境介电性质敏感的特性. 因此可以作为传感器检测介电特性不同的生物化学样品. 在其他参数不变的情况下, 改变背景环境的介电常数, 不难看出所设计的超材料的谐振频点随着背景环境的介电常数的增加整体发

生了红移, 由于该结构具有高 Q 值特性, 在折射率传感器方面有潜在的应用 (见图 9).

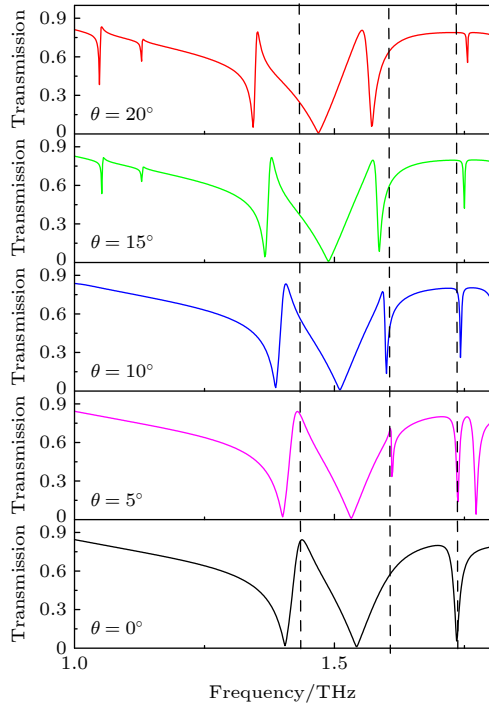


图 8 不同入射角度所对应透射谱的变化

Fig. 8. Variation of transmission spectrum of different incident angles.

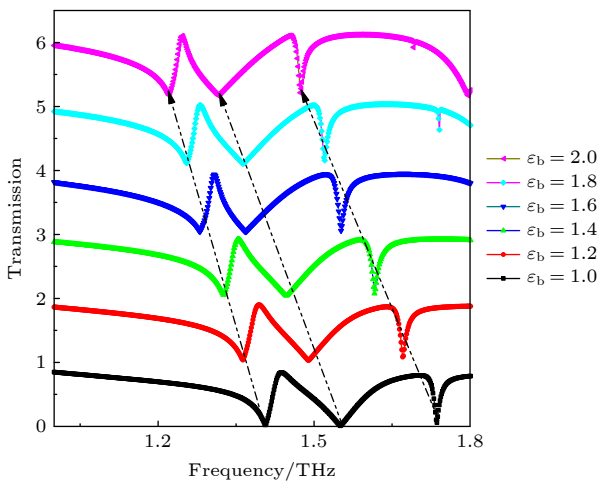


图 9 不同背景环境下透射窗的对比

Fig. 9. Comparison of transmission windows in different background environments permittivity.

5 结 论

本文研究了太赫兹波段的角度敏感类 EIT 效应. 设计了一个双 C 型和开口方环为基本单元的超材料结构, 所设计的超材料结构模型在 1.438 THz

和 1.699 THz 出现两个透射峰, 在 1.405 THz, 1.543 THz, 1.735 THz 出现 3 个透射谷, 通过比较完整结构和只有双 C 型结构, 只有开口方环结构分析了透射谱和电场、磁场的能量分布, 得到双明模耦合的多频带 EIT 效应. 利用等效电路分析方法进一步解释了超材料中的类 EIT 效应. 通过调节方环水平开口大小和方环的垂直的开口大小以及双 C 结构距离来讨论结构参数对类 EIT 窗口的影响. 研究表明, 所设计超材料结构产生的 EIT 效应对角度敏感且当背景环境介电常数发生变化时透射谱线的频点会发生明显的红移, 因此本结构在角度传感器、多频滤波器等领域有潜在的应用.

参考文献

- [1] Zuo Z W, Ling D B, Sheng, L. Xing, D. Y. 2013 *Phys. Lett. A* **377** 2909
- [2] Zhukovsky S V, Kidwai O, SIPE J E. 2013 *Opt. Express* **21** 14982
- [3] Yang X H, Chen Y C, Wang W S, Kang J, He X Z 2015 *Chin. J. Radio Sci.* **30** 834 (in Chinese) [杨曙辉, 陈迎潮, 王文松, 康劲, 贺学忠 2015 电波科学学报 **30** 834]
- [4] Landy N I, Sajuyigbe S, Mock J J, Smith D R, Padilla W J 2008 *Phys. Rev. Lett* **100** 207402
- [5] Fleischhauer M, Imamoglu A, Marangos J P 2005 *Rev. Mod. Phys.* **77** 633
- [6] Hu S, Yang H L, Han S, Huang X J, Xiao B X 2015 *J. Appl. Phys.* **117** 043107
- [7] Hu J, Lang T T, Hong Z, Shen C Y, Shi G H 2018 *J. Lightwave Technol* **36** 2083
- [8] Affolderbach C, Knappe S, Wynands R, Taichenachev A V, Yudin V I 2002 *Phys. Rev. A* **65** 043810
- [9] Zhang S, Hu Y, Lin G, Niu Y, Xia K, Gong J, Gong S 2018 *Nat. Photon* **12** 744
- [10] Papasimakis, N. Fedotov, V. A. Zheludev, N. I. Prosvirnin, S. L. 2008 *Phys. Rev. Lett.* **101** 253903
- [11] Na B, Shi J H, Guan C Y, Wang Z P 2013 *Chin. Opt. Lett.* **11** 111602
- [12] Zhu L, Li T C, Zhang Z D, Guo J, Liang D, Zhang D Q 2020 *Appl. Phys. A* **126** 308
- [13] Zhao Z, Gu Z, Ako R T, Zhao H, Sriram S 2020 *Opt. express* **28** 15573
- [14] Smith D R, Pendry J B, Wiltshire M C 2004 *Science* **305** 788
- [15] ehera S, Kim K 2019 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **52** 275106
- [16] Jia Z P, Huang L, Su J B, Tang B 2021 *J. Lightwave Technol.* **395** 1544
- [17] Shen S M, Liu Y L, Liu W Q, Tan Q L, Xiong J J, Zhang W D 2018 *Mater. Res. Express* **5** 125804
- [18] Srivastava Y K, Cong L, Singh R 2017 *Appl. Phys. Lett.* **111** 201101
- [19] Wu X J, Quan B G, Pan X C, Xu X L, Lu X C, Gu C Z, Wang L 2013 *Biosens. Bioelectron* **42** 626
- [20] Yan X, Yang M S, Zhang Z, Liang L J, Wei D Q, Wang M, Zhang M J, Wang T, Liu L H, Xie J H, Yao J Q 2019 *Biosens. Bioelectron.* **126** 485
- [21] Chen M M, Xiao Z Y, Lu X J, Lv F, Zhou Y J 2020 *Carbon*

- 159 273
- [22] Huo H, Yan F P, Wang W, Du X M, Hao M Z 2020 *Chin. J. Lasers* **47** 330 (in Chinese) [霍红, 延凤平, 王伟, 杜雪梅, 郝梦真 2020 中国激光 **47** 330]
- [23] Liu W, Liang L J, Yan X, Yang Q L 2020 *Laser J.* **41** 53 (in Chinese) [刘伟, 梁兰菊, 闫昕, 杨其利 2020 激光杂志 **41** 53]
- [24] Wang X, Wang J L 2020 *Acta Phys. Sin.* **70** 038102 (in Chinese) [王鑫, 王俊林 2020 物理学报 **70** 038102]
- [25] Zhong M. 2020 *Opt. Mater.* **106** 110019
- [26] Ma Y, Li D, Chen Z, Qian H W, Ning R X 2020 *J. Opt.* **22** 055101
- [27] Li G F, Yang J B, Zhang Z J, Wen K, Tao Y Y, Han Y X, Zhang Z R 2020 *Appl. Sci.* **10** 3033
- [28] Zhu L, Zhao X, Miao F J, Bablu K Ghosh, Dong L, Tao B R, Meng F Y, Li W N 2019 *Opt. Express* **27** 12163
- [29] Li H M 2016 *Ph. D. Dissertation* (Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics) (in Chinese) [李海明 2016 博士学位论文 (南京: 南京航空航天大学)]
- [30] Chen X 2018 *Ph. D. Dissertation* (Xi'an: University of Chinese Academy of Sciences (Xi'an Institute of Optics and Fine Mechanics, CAS)) (in Chinese) [陈徐 2018 博士学位论文 (西安: 中国科学院大学(中国科学院西安光学精密机械研究所))]
- [31] Liu C X 2019 *Ph. D. Dissertation* (Changsha: National University of Defense Technology) (in Chinese) [刘晨曦 2019 博士学位论文 (长沙: 国防科技大学)]
- [32] Zhang Y G 2016 *Ph. D. Dissertation* (Nanjing: Nanjing University) (in Chinese) [张永刚 2016 博士学位论文 (南京: 南京大学)]
- [33] Wang X Z, Gao J S, Xu N X 2013 *Acta Phys. Sin.* **64** 147307 (in Chinese) [王秀芝, 高劲松, 徐念喜 2013 物理学报 **64** 147307]
- [34] Abdulkarim Y I, Deng L, Luo H, Huang S, Karaaslan M, Altıntaş O, Bakır M, Muhammadsharif F F, Awi H N, Sabah C, Al-badri K S L 2020 *J. Mater. Res. Technol.* **9** 10291
- [35] Lim D, Lee D, Lim S 2016 *Sci. Rep.* **6** 39686

Electromagnetic induction-like transparency in dual-band with dual-bright mode coupling*

Ning Ren-Xia^{1)2)3)†} Huang Wang¹⁾ Wang Fei¹⁾ Sun Jian¹⁾ Jiao Zheng¹⁾

1) (School of Information Engineering, Huangshan University, Huangshan 245041, China)

2) (Key Laboratory of Radar Imaging and Microwave Photonics of Ministry of Education, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China)

3) (Engineering Technology Research Center of Intelligent Microsystems of Anhui Province, Huangshan 245041, China)

(Received 15 July 2021; revised manuscript received 22 September 2021)

Abstract

In this paper, a metamaterial structure with a double-layer split square ring and a double C-shaped structure is designed, which has dual-band electromagnetically induced transparency effects in the terahertz band. This structure has transmission peaks at 1.438 THz and 1.699 THz. Through the analysis of the surface current distribution, the reasons for the dual-band electromagnetically induced transparency are discussed. The effect of the designed metamaterial on the transmission window is studied when the opening size of the open square ring and the distance of the double C-shaped structure and the incident angle are changed. At an incident angle, the transmission spectrum of the designed material changes greatly, implying that it is highly sensitive to angle. The research results show that the structure has potential applications in sensors and angle filters.

Keywords: metamaterial, electromagnetic induction-like transparency, dual band, equivalent circuit

PACS: 42.25.Bs, 42.81.Dp, 42.79.Gn

DOI: 10.7498/aps.71.20211312

* Project supported by the Innovation and Entrepreneurship Training Program for College Students (Grant No. 202010375030), the Natural Science Research Project of Anhui Province Education Department (Grant Nos. KJHS2020B07, KJ2020A0684), and the Project of Key Laboratory of Radar Imaging and Microwave Photonics (Nanjing University of Aeronautics and Astronautics), Ministry of Education, China (Grant No. NJ20210006).

† Corresponding author. E-mail: nrxxiner@163.com