

文章编号: 2095-4980(2018)02-0191-04

基于磁束缚模式相消干涉的类 EIT 超材料

唐雨竹¹, 马文英^{*1,2}, 魏耀华¹, 汪为民³

(1.成都信息工程大学 通信工程学院, 四川 成都 610225; 2.电子科技大学 光电信息学院, 四川 成都 610054;
3.中国科学院 光电技术研究所, 四川 成都 610209)

摘要: 提出一种具有电磁诱导透明(EIT)效应的太赫兹超材料。该结构单元由非对称排布的2对双金属线(aCWs)组成。当入射电场为垂直极化时, 所提结构在0.580 8 THz附近产生磁束缚模式的相消干涉, 形成一个 Q 值较高的异常透明峰。在单元中加入开口谐振环(SRR), SRRs与非对称双金属线对之间产生干涉, 形成新的透明峰。加入SRRs后, 2对双金属线干涉产生的透明峰的传感特性得到改善。仿真表明, aCWs以及其与SRRs组合而成的结构(aCWs/SRRs)可用于太赫兹的单频带通滤波、双频滤波以及传感。

关键词: 电磁诱导透明; 超材料; 太赫兹; 磁束缚模式; Q 值; 双频滤波

中图分类号: TN04

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201802.0191

A novel EIT-like metamaterial based on destructive interference between magnetic trapped modes

TANG Yuzhu¹, MA Wenyong^{*1,2}, WEI Yaohua¹, WANG Weimin³

(1.School of Communication Engineering, Chengdu University of Information Technology, Chengdu Sichuan 610225, China;
2.School of Optoelectronic and Information, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu Sichuan 610054, China;
3.Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu Sichuan 610209, China)

Abstract: A novel Electromagnetically Induced Transparency(EIT)-like metamaterial of terahertz domain is presented. The unit cell consists of a couple of asymmetric Cut Wires(aCWs). When the incident electric field is perpendicularly polarized, the destructive interference between two magnetic trapped modes is observed at 0.580 8 THz, which produces an exotic transparent peak with high Q factor. A Split Ring Resonators(SRR) is added in aCWs, and a new resonant peak emerges due to the destructive interference of the SRRs and aCWs. The sensing performance of the transparent peak produced by aCWs is improved. Numerical simulations indicate that the aCWs and the structure composed by aCWs and SRRs(aCWs/SRRs) can be applied as single band and dual band bandpass filter in terahertz domain. The proposed structures provide new insight into designing EIT-like metamaterial.

Keywords: electromagnetically induced transparency; metamaterial; terahertz; magnetic trapped mode; Q factor; dual band filter

电磁诱导透明(EIT)是一种在特定条件下, 不透明的原子系统产生透明窗的现象^[1]。EIT效应具有低损耗、慢光特性以及对周围介质折射率敏感的特性, 这使得EIT效应被广泛研究。随后, 平面周期结构也被证明可以产生类EIT效应^[2-4]。这种平面结构的出现使得EIT可用于折射率传感器设计^[5-7]以及带通滤波器的设计。超材料EIT一般通过能被外加场激发的明模式与不能直接激发的暗模式干涉产生^[8]。同时, 一些研究指出, 在结构中引入非对称性会激发出特殊的谐振模式, 如简并模、Fano谐振模式以及束缚模式等^[9-11]。这些模式的出现也可以产生EIT效应, 但目前尚没有基于磁束缚模式相消干涉的类EIT超材料。

收稿日期: 2017-05-27; 修回日期: 2017-07-28

基金项目: 四川省科技厅应用基础研究资助项目(2017JY0332); 中国博士后基金资助项目(2015M572456); 成都信息工程大学科研基金资助项目(J201505)

*通信作者: 马文英 email:wyingma@qq.com

提出基于磁束缚模式相消干涉的太赫兹类 EIT 谐振器。该谐振器由非对称排布的 2 对双金属线(aCWs)构成。在该谐振器结构单元中加入 4 个开口谐振环(SRR), 进而产生新的透明窗。利用 CST Studio 的频域有限积分求解器对 2 个结构进行仿真, 分析谐振峰产生的机理以及结构的传感特性。

1 仿真与结构设计

图 1 为所提谐振器的单元结构示意图。图 1(a)为 aCWs, 由垂直排布的非对称双金属线(aCWs)组成, 图 1(b)为 aCWs/SRRs, 由 aCWs 与 4 个开口谐振环(SRR)组成。

所设计的 2 种谐振器均由结构单元在 x, y 轴方向上周期排列而成。谐振器的衬底均为聚酰亚胺(PI), 结构材料为铜。图 1(a)中的 2 对双金属线的中轴的间距为 S , 图 1(b)中的开口谐振环的中轴与金属线顶点间距为 d_1 。单元周期分别为 p_x 与 p_y , w 为金属线宽, l 为金属线长, d 为 2 对双金属线之间的垂直距离, S_1 为每个双金属线中 2 个金属线的间距。图 1(b)中 SRR 的边长分别为 a, b , 开口大小为 g , 金属线与 SRR 的间距为 d_2 。

利用有限差分法分别对 2 个结构进行仿真分析。仿真中, 设定衬底的相对介电常数为 3.0, 厚度为 $50 \mu\text{m}$, 不考虑损耗, 铜的厚度设置为 $0.3 \mu\text{m}$, 电导率 $\sigma=5.8 \times 10^7 \text{ S/m}$ 。其中, aCWs 选取的尺寸参数为: $p_x=300 \mu\text{m}$, $p_y=400 \mu\text{m}$, $l=160 \mu\text{m}$, $w=20 \mu\text{m}$, $d=20 \mu\text{m}$, $S=30 \mu\text{m}$, $S_1=40 \mu\text{m}$ 。aCWs/SRRs 选取的尺寸参数为: $a=70 \mu\text{m}$, $b=90 \mu\text{m}$, $g=10 \mu\text{m}$, $d=20 \mu\text{m}$, $d_1=50 \mu\text{m}$, $d_2=10 \mu\text{m}$, 其余参数值与 aCWs 相同。

对对称的双金属线对与非对称的 aCWs 结构的透射性能进行仿真。如图 2(a)所示, 对称的双金属线结构没有产生 EIT 效应, 而非对称排布的 aCWs 结构在 0.5808 THz 处产生了透明峰。定义该透明峰为谐振峰 1, 所在频率为频率 1, 该透明峰的 3 dB 带宽为 13.93 GHz , Q 值为 41.69。对 aCWs/SRRs 结构进行仿真, 结果如图 2(b)所示, 可以看出加入开口谐振环后, 结构在透射谱上具有 2 个透明峰, 分别在 $0.5252 \text{ THz}, 0.5892 \text{ THz}$ 。

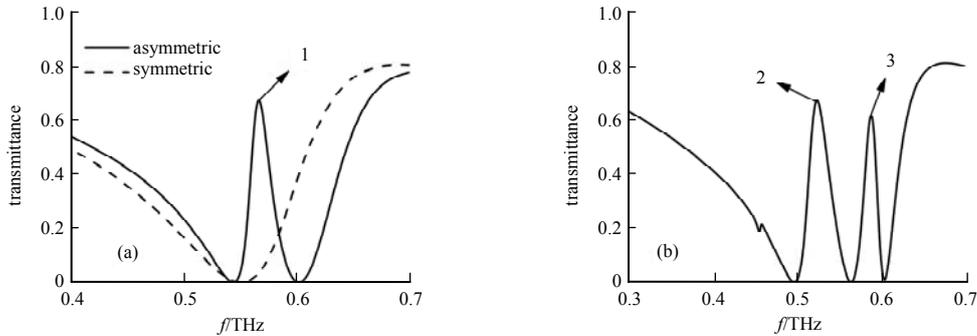


Fig.2 Simulated transmittance spectra of aCWs(a) and aCWs/SRRs(b)

图 2 aCWs(a)与 aCWs/SRRs(b)的透射谱

定义 aCWs/SRRs 结构中低频透明峰为谐振峰 2, 所在频率为频率 2, 高频透明峰为谐振峰 3, 所在频率为频率 3。2 个谐振峰的 3 dB 带宽分别为 $27.98 \text{ GHz}, 16.73 \text{ GHz}$, Q 值分别为 18.77, 35.22。

2 类 EIT 透明峰机理分析

为分析 2 种谐振器产生类 EIT 效应的机理, 首先对 aCWs 结构在频率 1 处的表面电流分布以及磁场分布进行仿真, 结果如图 3 所示。由图 3(a)可见, 电流在双金属线中的 2 条金属线上方向相

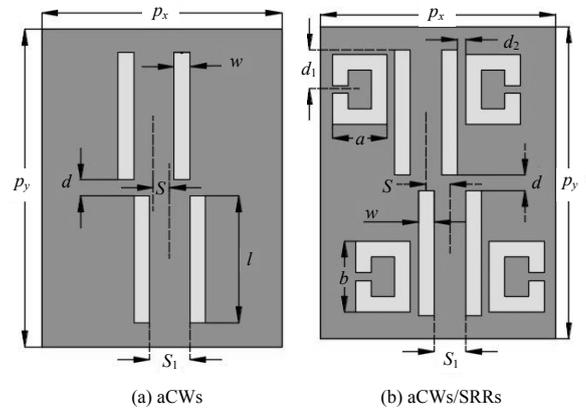


Fig.1 Schematic of the unit cell

图 1 谐振单元结构示意图

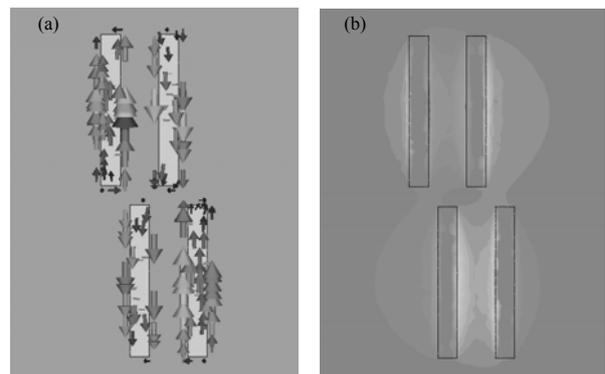


Fig.3 Simulated surface current distribution and magnetic distribution of aCWs

图 3 aCWs 结构在谐振频率 1 表面电流分布和磁场分布

反, 因此电流在上下 2 对非对称的双金属线中都激发出磁束缚模式。

再对 aCWs/SRRs 结构在谐振峰的谐振频率 2 与谐振频率 3 处的表面电流分布与磁场分布进行模拟, 如图 4 所示。图 4(a)表示在频率 2 处, 表面电流分布在金属线与开口谐振环上, 两者均与外加电磁场形成较强的耦合, 处于明模式。金属线产生偶极子谐振而开口谐振环产生了 LC 谐振, 两者产生了明-明模式的干涉, 从而引起了类 EIT 效应, 形成了谐振峰 2。图 4(b)为频率 2 处对应的磁场分布。在频率 3 处, 表面电流基本分布于金属线以及左上与右下的开口谐振环上(如图 4(c)所示)。为了更好地揭示谐振峰 3 产生的机理, 对频率 3 处的磁场分布进行仿真, 结果如图 4(d)所示。与 aCWs 结构相同, 非对称的双金属线对仍然产生了磁干涉, 而左上与右下的开口谐振环产生了方向相反, 大小相同的磁场, 两者干涉相消, 进而产生了透明峰。

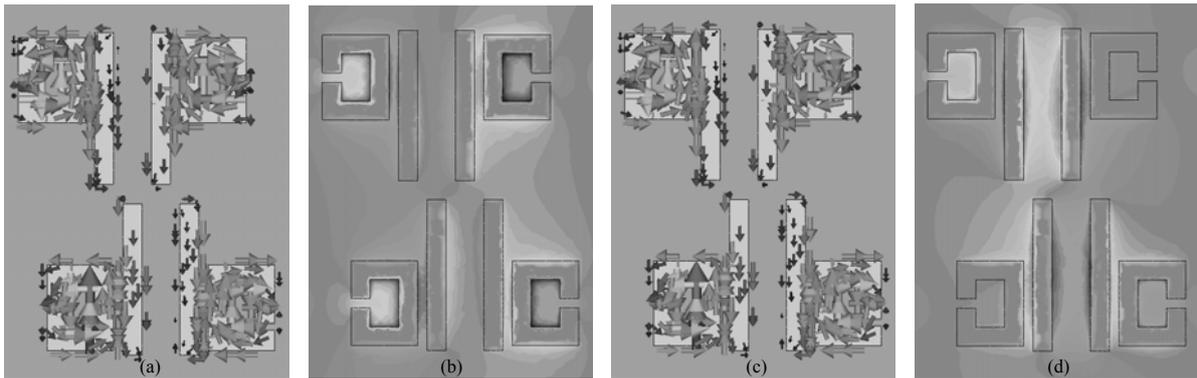


Fig.4 Simulated surface current distribution and magnetic distribution of aCWs/SRRs
图 4 aCWs/SRRs 结构的表面电流分布和磁场分布

此外, 在图 2(b)中, aCWs/SRRs 结构在 0.46 THz 附近产生了一个幅值很小的透明尖峰。通过仿真(如图 5 所示)可以看出, 其中 2 个开口谐振环产生了较强的谐振, 具有较大的电流分布, 且其磁场方向相反, 因此相消干涉产生了透明峰, 但 2 个开口谐振环并没有与金属线形成相消干涉, 因此, 该透明峰幅值很小, 无法用于传感。

3 传感特性与仿真分析

根据已有研究成果, 类 EIT 超材料可用于折射率传感。对 aCWs 结构与 aCWs/SRRs 结构进行仿真, 仿真中设定结构表面的待测物质厚度为 3 μm , 折射率为 1.0~2.0(如图 6 所示)。

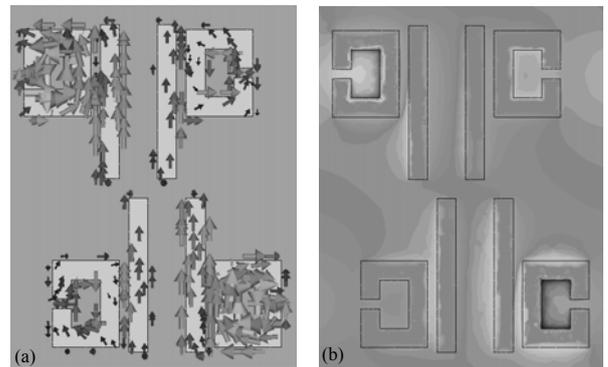


Fig.5 Simulated surface current distribution and magnetic distribution of aCWs/SRRs at 0.46 THz
图 5 aCWs/SRRs 结构在 0.46 THz 的表面电流分布和磁场分布

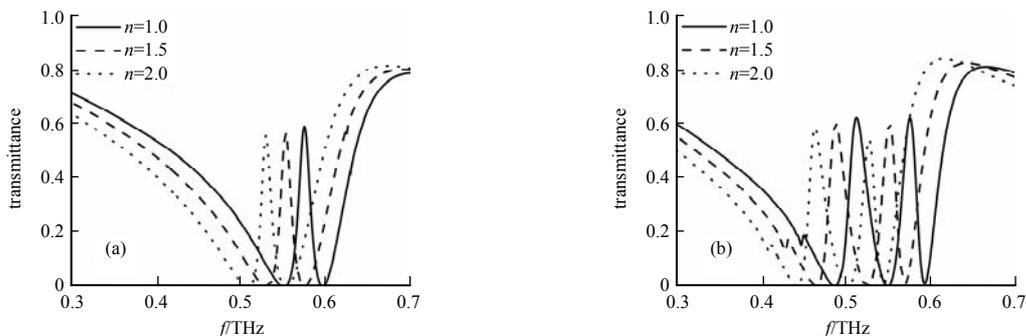


Fig.6 Simulated transmittance spectra under different refractive indices of analyte (a) for aCWs and (b) for aCWs/SRRs
图 6 不同待测物折射率下的 aCWs 结构(a)与 aCWs/SRRs 结构(b)的透射谱

图 6 表明待测物折射率变化导致谐振峰 1,2,3 的频率线性红移。计算可得, 谐振峰 1,2,3 的折射率敏感度分

别为 44.88 GHz, 51.18 GHz, 48.4 GHz (如图 7 所示)。可见, 谐振峰 2 具有较好的传感特性, 谐振峰 1 和 3 虽然都是由于磁场干涉而产生, 但谐振峰 3 的折射率灵敏度好于谐振峰 1。品质因数(Figure Of Merit, FOM)值是常用的评价传感器性能的参数, 其定义为待测物单位折射率变化引起的谐振峰波长的变化与谐振峰 3 dB 带宽的比值。进一步对 3 个谐振峰的 FOM 值进行计算, 以衡量 3 个谐振峰的传感性能。计算可得, 3 个谐振峰的 FOM 值分别为 3.02, 2.10, 2.89。

4 结论

提出一种基于非对称排布的双金属线的太赫兹 EIT 超材料以及一种由该结构与开口谐振环组合而成的结构。所提出的太赫兹超材料可用于太赫兹滤波器、折射率传感器, 具有较好的参考价值, 并对类 EIT 超材料的设计提供新的思路。

参考文献:

- [1] FLEISCHHAUER M, MARANGOS J P. Electromagnetically induced transparency: optics in coherent media[J]. *Review of Modern Physics*, 2005, 77(2): 633–673.
- [2] PAPASIMAKIS N, FEDOTOV V A, ZHELUDEV N I. Metamaterial analog of electromagnetically induced transparency[J]. *Physical Review Letters*, 2008, 101(25): 253903.
- [3] GU J, SINGH R, LIU X, et al. Active control of electromagnetically induced transparency analogue in terahertz metamaterials[J]. *Nature Communications*, 2012, 3(4): 1151.
- [4] LIU H, CHEN F, YANG Q, et al. Electromagnetically induced transparency in terahertz plasmonic metamaterials via dual excitation pathways of the dark mode[J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 100(13): 131101.
- [5] 李化月, 刘建军, 韩张华, 等. 基于类电磁诱导透明效应的太赫兹折射率传感器[J]. *光学学报*, 2014, 34(2): 230–234. (LI Huayue, LIU Jianjun, HAN Zhanghua, et al. Terahertz metamaterial analog of electromagnetically induced transparency for a refractive-index-based sensor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(2): 230–234.)
- [6] HE X, WANG L, WANG J, et al. Electromagnetically induced transparency in planar complementary metamaterial for refractive index sensing applications[J]. *Journal of Physics D Applied Physics*, 2013, 46(36): 365302.
- [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. (SUN Yaru, SHI Tonglu, LIU Jianjun, et al. Terahertz label-free bio-sensing with EIT-like metamaterials[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(3): 261–266.)
- [8] 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): 211902-1–211902-3.
- [9] CAO W, SINGH R, ALNAIB I A I, et al. Low-loss ultra-high-Q dark mode plasmonic Fano metamaterials[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(16): 3366.
- [10] TAMAYAMA Y, YASUI K, NAKANISHI T, et al. Electromagnetically induced transparency like transmission in a metamaterial composed of cut-wire pairs with indirect coupling[J]. *Physical Review B*, 2014, 89(7): 075120.
- [11] DONG Z G, LIU H, XU M X, et al. Plasmonically induced transparent magnetic resonance in a metallic metamaterial composed of asymmetric double bars[J]. *Optics Express*, 2010, 18(17): 18229–18234.

作者简介:



唐雨竹(1990–), 男, 四川省德阳市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为天线与超材料设计. email: tyznature@163.com.

马文英(1984–), 女, 山东省菏泽市人, 教授, 主要研究方向为传感器与微纳系统.

魏耀华(1990–), 男, 河南省禹州市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为传感器与超材料设计.

汪为民(1981–), 男, 安徽省安庆市人, 博士, 副研究员, 主要研究方向为 MEMS 器件及其应用.

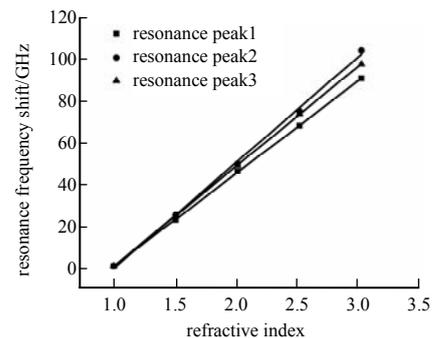


Fig.7 Resonance frequency shift under different refractive indices

图 7 3 个谐振的频率变化与待测物折射率关系