一种太赫兹类电磁诱导透明超材料谐振器

韩 昊 武东伟 刘建军 洪 治

(中国计量学院太赫兹技术与应用研究所,浙江杭州 310018)

摘要 理论和实验研究了一种由开口谐振环(SR)和双金属线(CW)组合的具有类电磁诱导透明(EIT)效应的 SR/ CW 太赫兹谐振器。分别对由单侧开口和双侧开口谐振环的 SR/CW 谐振器特性进行了仿真,并分析了开口环在 结构单元中位置的变化对谐振峰强度和品质因子Q的影响。结果表明,两个谐振器在0.7 THz 附近的谐振峰是由 开口环 LC 谐振和双金属线偶极谐振干涉相消引起的。开口环位置变化对单侧开口环的 SR/CW 结构谐振峰强度 和Q值影响较大,而对双侧开口环的 SR/CW 谐振器的影响很小。利用激光诱导与化学镀铜技术制备了 SR/CW 谐振器样品,并利用太赫兹时域光谱(THz-TDS)对样品进行了透射性能测试,测试结果与仿真分析基本相符。 关键词 光学器件;超材料;电磁诱导透明;太赫兹谐振器

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201434.0423003

A Terahertz Metamaterial Analog of Electromagnetically Induced Transparency

Han Hao Wu Dongwei Liu Jianjun Hong Zhi

(Centre for Teraherz Research, China Jiliang University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China)

Abstract One kind of terahertz resonator consisting of split-ring resonator (SR) and cut wires (CW), which has electromagnetically induced transparency (EIT), is studied theoretically and experimentally. The transmission characteristics of the resonators containing one or two gaps for the split ring are numerically simulated, and the impact of the relative position of the split ring on their resonant peaks intensity and *Q*-factor are analyzed. The resonant peaks of EIT spectra of SR/CW resonators are found around 0.7 THz due to destructive interference between the LC resonance of the split-ring resonator and the dipole resonance of the cut wires. Both the amplitude and *Q*-factor of the EIT resonance are very sensitive to the position shift of the split ring for the SR/CW resonator with one gap, and are insensitive for the two gaps. Finally, the SR/CW resonators are fabricated on polyimide substrate using laser-induced and chemical non-electrolytic plating with copper, the transmission properties of which characterized by THz time domain spectroscopy are in good agreement with simulations.

Key words optical devices; metamaterial; electromagnetically induced transparency; teraherz resonator **OCIS codes** 300.6495; 230.5750; 160.3918; 190.4710

1 引 言

电磁诱导透明(EIT)是一种在特定共振电磁场 条件下,原本不透明的介质变成透明的现象,可应用 于非线性光学、慢光和光存储等领域^[1]。近年来,利 用超材料在微波^[2]、太赫兹(THz)波^[3]及光波段^[4] 实现类 EIT 效应引起了广泛关注。超材料类 EIT 效应一般是通过被称为明模式和暗模式的两类本征 模的干涉作用来实现的^[5]。在太赫兹波段的超材料 类 EIT 效应研究中,开口谐振环(SR)因其独特的谐 振特性常作为明模式或暗模式单元用于实现类 EIT 效应^[6-9]。双金属线(CW)与其他结构(如开口谐振 环等)组合也可用于构建太赫兹超材料 EIT 谐振 器^[10-12]。此外,对于一些超材料 EIT 谐振器,结构 中的明模式或暗模式单元的相对位置变化会对 EIT

导师简介:洪 治(1964—),男,研究员,博士,主要从事太赫兹技术方面的研究。E-mail: hongzhi@cjlu.edu.cn (通信联系人)

收稿日期: 2013-10-31; 收到修改稿日期: 2013-12-04

基金项目:国家自然科学基金(61377108,60977066)

作者简介: 韩 吴(1989—),男,硕士研究生,主要从事太赫兹器件方面的研究。E-mail. hanhao2008@yeah. net

透射峰产生一定的影响^[7],这给实际应用提供了更 多灵活性。

本文提出了一种由开口谐振环和平行双金属线 组合而成的太赫兹类 EIT 谐振器,简称为 SR/CW 谐振器。利用时域有限元差分法分析了类 EIT 透 射峰产生的机理,讨论了开口环在结构单元中的相 对位置变化对谐振器透射峰幅值和宽度(或品质因 子 Q)的影响,并进行了实验验证。

2 SR/CW 结构单元设计

提出的两个 SR/CW 谐振单元结构如图 1 所



示,一个是由单侧开口谐振环(SSR)和双金属线组 合而成,称之为SSR/CW[图1(a)]。另一个是由双 侧开口谐振环(DSR)和双金属线组合而成,称之为 DSR/CW[图1(b)]。谐振器是由谐振单元在*x*、y方 向上周期性排列而成的,两种结构单元中的衬底材 料选用聚酰亚胺(PI),金属线材料选为铜。图1中, 开口环相对于单元中轴有一定的偏移,s为其偏移量, 定义开口环位于单元中心时*s*=0,向左偏移为负,向 右偏移为正。g为开口大小,*d*为金属线与单元中轴的 距离,w为金属线宽,*p*为单元周期。a为金属线长,*b* 和*c*分别为为单侧开口环和双侧开口环边长。



图 1 (a) SSR/CW 和(b) DSR/CW 结构单元简略图 Fig. 1 Sketch of (a) SSR/CW and (b) DSR/CW unit cell

一般地,超材料实现类 EIT 效应需要明模式和 暗模式单元的谐振频率相同。在上述两种 SR/CW 谐振器设计中,在保持双金属线几何参数不变的情 况下,根据双金属线的谐振频率,来选定两种 SR 的 参数。

3 谐振器仿真分析

3.1 类 EIT 透射特性

通过时域有限差分法对两个结构器件进行了数 值分析。仿真中,设定衬底材料无损耗,厚度44 μ m, 介电常数设为2.9,金属铜的厚度设为2 μ m,电导率 为5.8×10⁷ S/m。THz 波的传播方向垂直于样品平 面,*x* 方向和 *y* 方向分别设定为磁场边界和电场边界 (如图1所示)。选定的谐振器单元尺寸为 *a* = 149 μ m,*b*=51 μ m,*c*=59 μ m,*g*=10 μ m,*d*=70 μ m, w=10 μ m,*p*=200 μ m。

首先分别对独立开口环谐振器、双金属线谐振器和 *s* = 0 时的两种组合单元结构 SSR/CW 和 DSR/CW 谐振器的透射性能进行了仿真,结果如

图 2所示。从图 2(a)中可以看出,独立双金属线谐 振器和单侧开口环谐振器皆在 0.745 THz 处产生 了谐振,两者谐振频率相同,谐振峰的 Q 值(Q 值定 义为谐振峰中心频率与 3 dB 带宽的比值)分别为 4.8 和 46.5,且双金属线谐振峰强度比单开口环高。 而它们的组合结构 SSR/CW 谐振器,在中心频率为 0.714 THz 处观测到了类 EIT 透射峰,谐振峰 Q 值 为 15。与两独立单元(SSR 和 CW)谐振器相比,其 Q 值居于两独立单元结构谐振峰相应值之间。同样,对 于 DSR/CW 组合结构谐振器来说,其独立双侧开口 环谐振频率和双金属线保持一致,仍为 0.745 THz, 双侧开口环的 Q 值为 26.3,谐振峰强度也比双金属 线低。DSR/CW 组合结构在 0.703 THz 处也同样具 有类 EIT 效应,谐振峰 Q 值为 7.8。

将两个独立单侧开口环谐振器与双侧开口环谐 振器相比较,可得出后者的谐振强度较高,谐振峰较 宽(Q值低)。相应地,对比 SSR/CW 结构和 DSR/ CW 结构谐振器的 EIT 透射峰,DSR/CW 谐振器的 谐振强度也较高,Q值较低。





Fig. 2 Transmission spectra of (a) SSR/CW and (b) DSR/CW structure

3.2 类 EIT 谐振峰机理分析

为了分析两种谐振器的 EIT 谐振峰产生的机理,分别对双金属线、开口谐振环 SSR 和 DSR、

SSR/CW 结构和 DSR/CW 结构谐振频率处的表面 电流分布进行了模拟,如图 3 所示。下面分别分析 两种谐振器的 EIT 效应产生的机理。



图 3 两种谐振器表面电流分布图。(a) 双金属线;(b) SSR;(c) SSR/CW;(d) 双金属线;(e) DSR;(f) DSR/CW。 其中(a)~(c)和(d)~(f)强度范围分别为 0~7000 A/m 和 0~12000 A/m

Fig. 3 Distribution of surface current for the two resonators. (a) CW; (b) SSR; (c) SSR/CW; (d) cut wires; (e) DSR; (f) DSR/CW. While the intensity ranges of (a) \sim (c) and (d) \sim (f) are 0 \sim 7000 A/m and 0 \sim 12000 A/m, respectively

从图 3(a)~(c)可以看出,对于 SSR/CW 谐振器,在外电磁波的作用下,单侧开口环在谐振频率处产生环流,可称之为 LC 谐振,没有形成明显的电偶极矩,只能与入射场形成很弱的耦合,属暗模式^[8];双金属线在谐振频率处产生较强的对称的偶极电流,为电偶谐振,可与入射场形成强耦合,属明模式;SSR/CW 单元结构在 EIT 谐振频率处,双金属线上和开口环上表面电流都明显减弱,表明偶极谐振与LC 谐振因相互干涉都被大幅抑制,明模式和暗模式的干涉引起了窄带透射峰^[7]。同样地,由图 3(d)~

(f)可以看出,对于 DSR/CW 谐振器,在外电磁波的 作用下,双侧开口环和双金属线上分别产生 LC 谐 振和偶极谐振,分别属暗模式和明模式,DSR/CW 单元结构在 EIT 谐振频率处,开口环和金属线上的 谐振强度都大幅减弱,EIT 透射也是由明模式和暗 模式的干涉引起的。

3.3 开口环相对位置变化对谐振特性的影响

保持双金属线位置不变,分别改变 SSR 和 DSR 在组合结构单元中的相对位置,即参数 s 变化,分别 仿真 SSR/CW 结构和 DSR/CW 结构 EIT 谐振峰 的变化,结果如图 4 所示。对于 SSR/CW 谐振器, 当 *s* 从一30 μm 变化至 0 的过程中,谐振峰强度和 宽度缓慢减小,谐振频率发生蓝移,谐振峰 Q 值从 2.9 增大至 15;在 *s* 从 0 变化至 30 μm 的过程中,谐 振峰强度和宽度皆急剧减小,频率蓝移程度逐渐增 大,透射峰 Q 值也从 15 急剧增至 150 以上。而对 于 DSR/CW 谐振器,在 s 从一30 μm 变化至 0(由于 对称结构,与 s 从 30 μm 变化至 0一致)的过程中,谐 振器的中心频率、强度及 Q 值基本保持不变,即该结 构对开口环与双金属线的相对位置变化不敏感。



图 4 (a) SSR/CW 和(b) DSR/CW 谐振器随 s 变化的透射谱 Fig. 4 Transmission spectral of (a) SSR/CW and (b) DSR/CW resonators vary with parameter s

4 谐振器实验结果

为验证 SSR/CW 结构和 DSR/CW 结构的 EIT 效应,并分析参数 s 对两种谐振器性能的影响,利用 激光诱导和化学镀铜的方法在 44 μm 厚的聚酰亚 胺薄膜上制备了谐振器实验样品(详细制备过程见



文献[13-14])。制备了三个 SSR/CW 谐振器(s分 别为-20 μ m、0、20 μ m)和两个 DSR/CW 谐振器(s 分别为-15 μ m、0)样品,其他参数与仿真相同。制 备的器件尺寸均为1 cm×1 cm, SSR/CW 和 DSR/ CW 谐振器样品的显微镜照片见图 5。



图 5 s=0 时两种谐振器显微镜照片。(a) SSR/CW; (b) DSR/CW

Fig. 5 Microscopic graph of the two resonators at s=0. (a) SSR /CW; (b) DSR/CW

利用太赫兹时域光谱(THz-TDS)系统对两种 谐振器进行了透射性能测试。太赫兹波的入射方向 垂直于器件表面,电场方向平行于金属线。测试过 程中,样品处于室温下的干燥氮气环境中,相对湿度 低于 1%,这样,可大大降低环境中水蒸气对测试结 果的影响。选用相同条件下无样品时的透射谱作为 参考信号。TDS系统的时域单次采样时间窗口超 过 100 ps,对应频域分辨率约为 10 GHz,SSR/CW 结构测试结果如图 6(a)~(c)。对于 DSR/CW 谐 振器,实验结果显示该结构在 s=0 与 s=-15 μ m 时透射谱基本一致,因此仅给出了 $s = -15 \mu m$ 时的 测试结果,如图 7 中实线所示。而对于 SSR/CW 谐 振器,从实验结果可看出,与 $s = -20 \mu m$ 时相比,s 为 0 时谐振器 EIT 透射峰幅值和峰宽仅有较小的 变化,谐振频率向高频移动;当 $s \downarrow 0$ 变化至 $20 \mu m$ 时,EIT 透射峰的强度和宽度则大幅减小,谐振频率 向高频移动幅度更大。上述测试结果与图 4 中无损 基底材料情况下的仿真变化趋势一致,但实验中透 射峰的强度明显弱于仿真结果。



图 6 SSR/CW 谐振器实验与仿真透射谱对比。(a) s=-20 µm; (b) s=0; (c) s=20 µm Fig. 6 Comparison of experimental and simulated transmission spectra of the SSR/CW resonators. (a) s=-20 µm;





Fig. 7 Comparison of experimental and simulated transmission spectra of the DSR/CW resonator at $s\!=\!-15~\mu{\rm m}$

在考虑衬底材料实际损耗情况下(介电常数设为2.9+0.2i)又对两种结构进行了仿真,SSR/CW和DSR/CW谐振器仿真结果分别如图6(a)~(c)和图7中虚线所示,实验结果与仿真结果基本相符。存在的一定偏差主要是由于材料(包括金属及衬底材料)仿真设置与实际参数不一致及样品制备尺寸误差造成的。上述结果表明衬底材料的损耗对SR/CW结构的类EIT透射特性有很大的影响,使其谐振峰强度大大降低,后续工作中器件衬底应选择损耗更小的材料。

(b) s=0; (c) $s=20 \ \mu m$

5

结 论

提出并设计了一种由开口环和双金属线构成的 太赫兹谐振器。仿真和实验结果表明该谐振器具有 类电磁诱导透明效应,该效应是由开口环 LC 谐振 和双金属线偶极谐振干涉相消引起的。分析了开口 环相对位置变化对谐振器类 EIT 透射峰强度和 Q 值的影响,结果表明单侧开口环与双金属线组合谐 振器对位置变化很敏感,而双侧开口环与双金属线 组合谐振器对位置变化不敏感。另外,衬底材料的 损耗对会使谐振峰强度大大降低。研究结果为该类 谐振器在生化传感方面的应用提供了一定的参考。

参考文献

- M Fleischhauer, A Imamoglu, J P Marangos. Electromagnetically induced transparency: optics in coherent media [J]. Rev Mod Phys, 2005, 77(2): 633-673.
- 2 N Papasimakis, V A Fedotov, N I Zheludev, et al.. Metamaterial analog of electromagnetically induced transparency [J]. Phys Rev Lett, 2008, 101(25): 253903.
- 3 R Singh, C Rockstuhl, F Lederer, *et al.*. Coupling between a dark and a bright eigenmode in a terahertz metamaterial [J]. Phys Rev B, 2009, 79(8): 085111.
- 4 N Liu, L Langguth, T Weiss, *et al.*. Plasmonic analogue of electromagnetically induced transparency at the Drude damping limit [J]. Nat Mater, 8(9): 758-762.
- 5 S Zhang, D A Genov, Y Wang, *et al.*. Plasmon-induced transparency in metamaterials [J]. Phys Rev Lett, 2008, 101 (4): 047401.

- 6 R Singh, I A I Al-Naib, Y Yang, *et al.*. Observing metamaterial induced transparency in individual Fano resonators with broken symmetry [J]. Appl Phys Lett, 2011, 99(20): 201107.
- 7 Z Li, Y Ma, R Huang, *et al.*. Manipulating the plasmon-induced transparency in terahertz metamaterials [J]. Opt Express, 2011, 19(9): 8912-8919.
- 8 S Y Chiam, R Singh, C Rockstuhl, et al.. Analogue of electromagnetically induced transparency in a terahertz metamaterial [J]. Phys Rev B, 2009, 80(15); 153103.
- 9 B Jin, J Wu, C Zhang, *et al.*. Enhanced slow light in superconducting electromagnetically induced transparency metamaterials [J]. Supercond Sci Technol, 2013, 26 (7): 074004.
- 10 J Gu, R Singh, X Liu, *et al.*. Active control of electromagnetically induced transparency analogue in terahertz metamaterials [J]. Nat Commun, 2012, 3: 1153.
- 11 Z Zhu, X Yang, J Gu, *et al.*. Broadband plasmon induced transparency in terahertz metamaterials [J]. Nano, 2013, 24

(21): 214003.

- 12 H Liu, F Chen, Q Yang, *et al.*. Electromagnetically induced transparency in terahertz plasmonic metamaterials via dual excitation pathways of the dark mode [J]. Appl Phys Lett, 2012, 100(13): 131101.
- 13 Wang Wentao, Liu Jianjun, Li Xiangjun, *et al.*. Direct fabrication of terahertz polarizer and filter by laser induced and non-electrolytic plating with copper [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(12): 1231002. 王文涛,刘建军,李向军,等. 激光诱导和化学镀铜制备太赫兹

线栅偏振器和滤波器[J]. 光学学报, 2012, 32(12): 1231002.

14 Wu Dongwei, Liu Jianjun, Li Huayue, et al.. Fabrication of metamaterial terahertz device by laser induced and non-electrolytic plating with copper using semiconductor laser [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(12): 1223002.

武东伟,刘建军,李化月,等.半导体激光诱导化学镀制备超材料太赫兹器件[J].光学学报,2013,33(12):1223002.

栏目编辑:韩 峰