### **Article** 2017年,第44卷,第4期

## 一种旋转可调的太赫兹超材料 及其传感特性

唐雨竹<sup>1\*</sup>,马文英<sup>1,2</sup>,魏耀华<sup>1</sup>,汪为民<sup>3</sup> <sup>1</sup>成都信息工程大学通信工程学院,成都 610225; <sup>2</sup>电子科技大学光电信息学院,成都 610054; <sup>3</sup>中国科学院光电技术研究所微细加工光学技术国家重点实验室, 成都 610209



摘要:本文设计了一种具有电磁诱导透明(EIT)效应的太赫兹超材料,其单元结构由水平放置的单金属线以及垂直放置 的双金属线组成。仿真结果表明,通过单金属线绕其自身中心旋转,可以激发出电磁诱导透明效应。金属线的旋转角 度逐渐变大,透明峰的幅度也随之增大,当旋转角度为 60°时达到最大值;旋转角度进一步增大,透明峰的幅度逐渐 降低;旋转角度为 90°时,透明峰消失。仿真说明该结构可以通过单金属线的旋转调控透明峰的出现。最后,对旋转 角度为 60°时结构的传感特性进行了分析。该结构设计简单,具有可调性、较高的 Q 值以及良好的传感特性。 关键词:太赫兹;超材料;电磁诱导透明;可调性;高 Q 值;传感特性 中图分类号: O436; TB33

# A tunable terahertz metamaterial and its sensing performance

Yuzhu Tang<sup>1\*</sup>, Wenying Ma<sup>1,2</sup>, Yaohua Wei<sup>1</sup> and Weimin Wang<sup>3</sup>

<sup>1</sup> School of Communication Engineering, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China; <sup>2</sup> School of Optoelectronic and Information, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China; <sup>3</sup> Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China

**Abstract:** A novel electromagnetically induced transparency (EIT)-like metamaterial of terahertz domain is proposed. The metamaterial is composed of a single metal wire and a couple metal wires above it. Numerical simulations demonstrate that by rotating the single metal wire around its center, EIT phenomenon is created. The amplitude of the transparent peak increases as the rotation angle increases. When the rotation angle is 60°, the amplitude of the transparent peak reaches its maximum. However, as the rotation angle keeps increasing, the amplitude of the transparent peak gets lower and the peak finally vanishes as the rotation angle equals 90°. We also analyze the sensing performance of the metamaterial with the rotation angle of 60°. The proposed structure is simple and adjustable, with high *Q*-factor value and good sensing performance.

**Keywords:** terahertz; metamaterial; electromagnetically induced transparency; tunability; high Q factor; sensing performance

**DOI:** 10.3969/j.issn.1003-501X.2017.04.010

Citation: Opto-Elec Eng, 2017, 44(4): 453-457

收稿日期:2016–11–04; 收到修改稿日期:2016–12–24 \*E-mail: tyznature@163.com

#### 1 引 言

电磁诱导透明 (Electromagnetically induced transparency, EIT)效应最早被发现于原子系统中。这种效应是指:由于系统的原子之间的量子干涉的存在,使得被探测的介质对于探测场透明<sup>[1]</sup>。值得一提的是,在 EIT 效应中,除了介质的异常透明,一般还赋予介质强烈的色散效应,这使得 EIT 效应可以被应用在各种慢光应用中<sup>[2-6]</sup>。近年来,随着研究的不断深入,能实现 EIT 效应且不需要复杂实验条件的 EIT 超材料已经成为了新的研究热点。

2008 年, Zhang 等人首次提出了利用超材料结构 模拟 EIT 效应,并指出 EIT 超材料可以通过不能直接 响应外加场的暗态谐振单元以及可响应外加场的亮态 谐振单元构成<sup>[7]</sup>。此后,研究者发现,亮态谐振单元 之间的干涉也可以形成 EIT 效应<sup>[8]</sup>。此外,通过构造 相消干涉的金属互补结构<sup>[9]</sup>以及纳米谐振腔<sup>[10]</sup>,在超 材料中引入非对称性同样能实现 EIT 效应<sup>[11-13]</sup>。

此外,由于可调谐的 EIT 超材料具有更加广泛的 应用前景,因此成为了 EIT 超材料设计的一个重要内 容。目前,可调谐 EIT 超材料主要采用改变各谐振单 元之间的相对位置[14-15],将某些谐振单元旋转一定的 角度[16-17],改变材料温度[18-19]、加入石墨烯[20-21]、光敏 材料[22]或者液晶[23]以及改变入射波角度[24]等方式实 现。在上述的方案中,加入石墨烯等其他材料的方法 虽然实现了较好的可调性,但其加工成本较高。而通 过改变材料温度实现可调性的方案需要额外的温控系 统。因此,通过改变谐振单元之间的相对位置,将谐 振单元旋转一定角度或将是实现可调超材料的较为有 效而经济的方案。改变谐振单元之间的相对位置等效 于改变了谐振单元间的耦合程度,因此可以实现透明 峰的可调。将谐振单元旋转一定角度可以激发出谐振 结构的简并模,从而产生透明峰。改变入射波的角度 可以激发出相位耦合,得到垂直入射条件下无法得到 的透明峰。然而,这些可调超材料实现的透明峰带宽 较宽,无法满足需要实现窄带的应用,如窄带可调滤 波、传感等。本文针对窄带应用,设计了一种利用谐 振单元旋转实现透明峰可调的太赫兹超材料,并对其 透明峰形成机理以及传感特性进行了仿真和分析。

#### 2 结构设计与仿真

设计的超材料单元结构如图 1 所示。结构单元由 水平放置的单金属线以及垂直放置的双金属线组成。 所设计的超材料由结构单元在 x, y轴方向上周期排列 组成。通过 CST Microwave Studio 软件中的频域有限 积分求解器对结构特性进行了数值分析。仿真中,衬 底选用石英晶体,相对介电常数为 3.75,厚度为 50 µm, 不考虑损耗;金属线材料选择铜,电导率  $\sigma$ =5.8×10<sup>7</sup> s/m,厚度为 0.3 µm。单元尺寸  $p_x$ =200 µm, $p_y$ =250 µm, 金属线尺寸分别为 w=20 µm, L=60 µm,  $\Lambda$ =110 µm,间 距 d=40 µm, d=60 µm, S=110 µm,旋转角度为  $\theta_{\circ}$ 太赫兹波垂直入射材料,电场方向平行于双金属线, 如图 1 所示。



图 1 谐振单元结构示意图. Fig. 1 Schematic of the unit cell.

对于单金属线旋转不同角度的情况进行仿真,得 到结构的透射性能,结果如图2所示。

从图 2 可以看出, 在角度为 0°时, 没有透明峰出现, 当旋转角度为 30°时, 可以看到一个幅值较低、 不太明显的透明峰。进一步增大旋转角度 θ, 可以看 到,透明峰的幅值随着旋转角度的增大而增加, 当 θ=60°时, 幅值达到最大, 谐振频率大约为 0.844 THz, 透明峰的 Q值(Q值定义为谐振峰中心频率与 3 dB 带 宽的比值)约为 538, 3 dB 带宽仅约为 1.57 GHz, 具有 良好的选频特性。需要指出的是, 在实际加工中可以 加入 MEMS 以控制单金属线的旋转, 进而达到调控透 明窗的目的。 另外,基底的介电损耗对于器件的性能影响较大, 直接影响透明峰幅值的大小。对 *θ*=60°的器件进行了 仿真,其中设定基底损耗角正切为 0.001 至 0.1,结果 如图 3 所示。

结果表明,基底损耗越大,透明峰的幅值越小, 且谐振峰的 Q值也逐减小。当基底的损耗角正切值达 到 0.01 时,透明峰基本消失。





Fig. 2 Simulated transmittance spectra with different values of rotation angle  $\theta$ .





#### 3 类 EIT 透明峰机理分析

定义 ←0°的结构为结构 1, ←60°的结构为结构 2。 为了分析当 θ≠0°情况下结构出现透明峰的机理,分 别对结构 1 和结构 2 的透射谱以及表面电流分布进行 了仿真和分析。

其中,图 4(a)为结构 1 的透射谱,其中谐振频率 约为 a=0.8366 THz。结构 1 的表面电流分布如图 4(b) 所示。当结构 1 谐振于频率点 a 时,表面电流主要分 布在双金属线上,形成了明显的偶极电流,说明此时 双金属线属于明模式。而单金属线上表面电流分布明 显较弱,属于暗模式。但由于结构的对称性,两个明 暗模式单元并没有形成干涉。

当旋转角度为 0-60°时,出现了明显的透明峰,

#### OEE | Advances

如图5所示。

图 6(a)~6(c)分别对应图 5 中的频率点 a、b、c(分 别约为 0.831 THz、0.8444 THz、0.8464 THz)的表面 电流分布情况。在谐振频率点 a、c处,电流基本分布 于双金属线上,形成了不透明的频带。而在频率点 b 处,则形成了尖锐的透明峰。这是由于旋转角度 *θ*=60° 时,电场方向与单金属线并不完全垂直,电场在单金 属线上具有一定的分量,此时,可以将单金属线看作 准明模式。这种准明模式的单金属线和明模式的双金 属线会由于结构的非对称性而在谐振频率处产生干 涉,进而形成尖锐的透明峰。不同于一般 EIT 超材料, 这种干涉不会减弱表面电流,但会改变表面电流的分 布,在金属线上形成方向相反、大小基本相等的表面 电流,其辐射效应相互抵消,从而产生透明峰。





Fig. 4 Surface current distribution and the transmittance spectrum of structure 1.



Fig. 5 Transmittance spectrum of the structure 2.

#### **OEE | Advances**



图 6 结构 2 在(a) 0.831 THz, (b) 0.8444 THz, (c) 0.8464 THz 的表面电流分布. Fig. 6 Current distributions on the structure 2 at (a) 0.831 THz, (b) 0.8444 THz and (c) 0.8464 THz.

#### 4 传感特性仿真与设计

设器件周围物质的折射率为 n,且 n从 1.0 变化到 1.1,对结构 1 和结构 2 的传感特性进行仿真。结果如 图 7 所示,其中图 7(a)、7(b)分别是结构 1 和结构 2 关于折射率变化的透射谱。

随着周围物质折射率增大,谐振频率明显红移。

图 8 是透明峰移动与周围物质折射率变化之间的关系 曲线。经计算得,结构 1 和结构 2 的谐振峰折射率敏 感度分别约为 185.3 GHz/RIU, 228.9 GHz/RIU(RIU 为 单位折射率)。

为了进一步衡量结构的传感性能,对 FOM 值进 行了计算。经过计算,结构 1 的 FOM 值仅约为 1.2, 而结构 2 的 FOM 值为 145.8,大大优于结构 1。此外,





Fig. 7 Influence of refractive index on transmittance spectra of structures 1 and 2.







图 9 折射率对结构 3 的透射谱的影响. Fig. 9 Influence of refractive index on transmittance

spectra of structure 3.

#### DOI: 10.3969/j.issn.1003-501X.2017.04.010

定义石英基底的损耗角正切为 0.01, *0*=60°的结构为结构 3, 仿真得到的结构 3 关于折射率变化的透射谱, 结果如图 9 所示。

尽管透明峰十分微弱,但 EIT 效应仍然存在。此时,谐振峰的透射率敏感度约为 228.9 GHz/RIU,与基底无损耗情况下得到的仿真结果一致。可见,只要EIT 效应不消失,就算微弱的谐振峰也具有较好的折射率敏感度。综上,具有 EIT 效应的结构明显比没有产生 EIT 透射峰的结构对折射率更敏感,也更加适用于折射率传感器。

#### 5 总 结

本文提出了一种由水平放置的单金属线以及垂直 放置的双金属线组成的太赫兹超材料。通过旋转单金 属线可以使其转变为准明模式,并与明模式的双金属 线干涉产生 EIT 效应。仿真指出,旋转角度 *θ*=60°的 结构具有较好的传感特性。本文提出的太赫兹超材料 对可控窄带滤波、传感具有较好的参考价值。

#### 基金项目

国家自然科学基金创新研究群体(61421002);中国 博士后基金(2015M572456);成都信息工程大学科研基 金(J201505)。

#### 参考文献

- Liu C, Dutton Z, Behroozi C H, et al. Observation of coherent optical information storage in an atomic medium using halted light pulses[J]. Nature, 2001, 409(6819): 490–493.
- 2 Longdell J J, Fraval E, Sellars M J, et al. Stopped light with storage times greater than one second using electromagnetically induced transparency in a solid[J]. *Physical Review Letters*, 2005, **95**(6): 063601.
- 3 Yannopapas V, Paspalakis E, Vitanov N V. Electromagnetically induced transparency and slow light in an array of metallic nanoparticles[J]. *Physical Review B*, 2009, **80**(3):1132–1136.
- 4 Camacho R M, Broadbent C J, Ali-Khan I, et al. All-optical delay of images using slow light[J]. Physical Review Letters, 2007, 98(4): 043902.
- 5 Panahpour A, Latifi H. Electromagnetic transparency and slow light in an isotropic 3D optical metamaterial, due to Fano-like coupling of Mie resonances in excitonic nano-sphere inclusions[J]. Optics Communications, 2010, 284(6): 1701–1710.
- 6 Hau L V, Harris S E, Dutton Z, et al. Light speed reduction to 17 metres per second in an ultracold atomic gas[J]. Nature, 1999, 3(6720): 594–598.
- 7 Zhang Shuang, Genov D A, Wang Yuan, *et al.* Plasmon-induced transparency in metamaterials[J]. *Physical Review Letters*, 2008, **101**(4): 047401.
- 8 Jin Xingri, Park J, Zheng Haiyu, et al. Highly-dispersive transparency at optical frequencies in planar metamaterials based on

#### OEE | Advances

two-bright-mode coupling[J]. *Optics Express*, 2011, **19**(22): 21652–21657.

- 9 Guo Yinghui, Yan Lianshan, Pan Wei, *et al.* Electromagnetically induced transparency (EIT)-like transmission in side-coupled complementary split-ring resonators[J]. *Optics Express*, 2012, 20(22): 24348–24355.
- 10 Han Zhanghua, Bozhevolnyi S I. Plasmon-induced transparency with detuned ultracompact Fabry-Perot resonators in integrated plasmonic devices[J]. Optics Express, 2011, 19(4): 3251–3257.
- 11 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.
- 12 Cao Wei, Singh R, Al-Naib I A, *et al.* Low-loss ultra-high-Q dark mode plasmonic Fano metamaterials[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(16): 3366–3368.
- 13 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.
- 14 Qiao Shen, Zhang Yaxin, Zhao Yuncheng, et al. Mode coupling in terahertz metamaterials using sub-radiative and super-radiative resonators[J]. Journal of Applied Physics, 2015, 118(19): 193104.
- 15 He Xun, Ma Qi, Jia Peng, *et al.* Dynamic manipulation of electromagnetically induced transparency with MEMS metamaterials[J]. *Integrated Ferroelectrics*, 2015, **161**(1): 85–91.
- 16 Ma Yingfang, Li Zhongyang, Yang Yuanmu, *et al.* Plasmoninduced transparency in twisted Fano terahertz metamaterials[J]. *Optical Materials Express*, 2011, **1**(3): 391–399.
- 17 Shao Jian, Li Jiaqi, Li Jie, *et al.* Analogue of electromagnetically induced transparency by doubly degenerate modes in a U-shaped metamaterial[J]. *Applied Physics Letters*, 2013, **102**(3): 034106.
- 18 Cao Wei, Singh R, Zhang Caihong, et al. Plasmon-induced transparency in metamaterials: active near field coupling between bright superconducting and dark metallic mode resonators[J]. Applied Physics Letters, 2013, **103**(10): 101106.
- 19 Kurter C, Tassin P, Zhang Lei, et al. Classical analogue of electromagnetically induced transparency with a metal-superconductor hybrid metamaterial[J]. *Physical Review Letters*, 2011, **107**(4): 043901.
- 20 Ding Jun, Arigong B, Ren Han, *et al.* Dynamically tunable Fano metamaterials through the coupling of graphene grating and square closed ring resonator[J]. *Plasmonics*, 2015, **10**(6): 1833– 1839.
- 21 Yao Gang, Ling Furi, Yue Jin, et al. Dynamically tunable graphene Plasmon-induced transparency in the terahertz region [J]. Journal of Lightwave Technology, 2016, 34(16): 3937–3942.
- 22 Sui Jiawei, Feng Ls. Optically and thermally controlled terahertz metamaterial via transition between direct and indirect electromagnetically induced transparency[J]. *AIP Advances*, 2014, 4(12): 127122.
- 23 Yang Lei, Fan Fei, Chen Meng, et al. Active terahertz metamaterials based on liquid-crystal induced transparency and absorption[J]. Optics Communications, 2017, 382: 42–48.
- 24 Jin Xingri, Lu Yuehui, Park J, *et al.* Manipulation of electromagnetically-induced transparency in planar metamaterials based on phase coupling[J]. *Journal of Applied Physics*, 2012, **111**(7): 073101.