

极化无关类电磁感应透明现象超表面研究

丁亚琼, 刘喆超, 付新铭, 许征, 童元伟

(上海理工大学理学院, 上海 200093)

摘要: 为克服传统类电磁感应透明(EIT)结构对入射光极化状态的高度依赖问题, 利用电磁场仿真软件和耦合模理论设计了一种具备极化无关特性的类电磁感应透明结构的超表面, 实现了在任意极化方向上稳定的透射谱响应。该超表面由 4 个金属三角环和 4 根金属棒组成, 呈四重旋转对称排列于介电基板上。金属三角环和金属棒 2 个亮共振的相消干涉引起了与极化无关的类电磁感应透明现象。数值模拟结果表明, 该超表面在 10.55 GHz 左右呈现一个类电磁感应透明窗口, 慢波群延迟时间为 0.46 ns。通过调节超表面的几何参数, 可以灵活地调节类电磁感应透明频率和相应的慢波群延迟。该设计为类电磁感应透明现象在多场景下的光学传感、慢光器件及光通信系统中的实际应用奠定了坚实基础, 并可扩展至其他频段, 具有极化无关滤波、传感及非线性效应应用的潜力。

关键词: 电磁感应透明; 超表面; 慢波; 极化无关; 可调谐

中图分类号: O 43

文献标志码: A

Polarization-independent electromagnetically induced transparency-like effects in metasurface

DING Yaqiong, LIU Zhechao, FU Xinming, XU Zheng, TONG Yuanwei

(College of Science, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: To address the issue that the traditional electromagnetically induced transparency (EIT)-like structure is highly dependent on the polarization state of incident light, a polarization-independent EIT-like metasurface structure was designed using electromagnetic field simulation software and coupled mode theory, achieving stable transmission spectral responses for arbitrary polarization directions. The metasurface was composed of four metallic triangular rings and four metallic strips, arranged on a dielectric substrate with fourfold rotational symmetry. The polarization-independent EIT-like phenomenon was caused by the destructive interference of two bright resonances from the metallic

收稿日期: 2024-03-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (12474316, 11504236)

通信作者: 丁亚琼 (1986—), 女, 讲师。研究方向: 人工微结构材料的制备和研究。E-mail: dyq@usst.edu.cn

引文格式: 丁亚琼, 刘喆超, 付新铭, 等. 极化无关类电磁感应透明现象超表面研究[J]. 上海理工大学学报, 2025, 47(3): 317-323.

Citation: DING Yaqiong, LIU Zhechao, FU Xinming, et al. Polarization-independent electromagnetically induced transparency-like effects in metasurface[J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2025, 47(3): 317-323.

triangular rings and metallic strips. Numerical simulation results show that the metasurface exhibits an EIT-like window around 10.55 GHz with a slow-wave group delay time of 0.46 ns. By adjusting the geometric parameters of the metasurface, the EIT-like frequency and corresponding slow-wave group delay can be flexibly tuned. This design lays a solid foundation for the practical applications of EIT-like phenomena in optical sensing, slow-light devices, and optical communication systems across multiple scenarios. Additionally, it can also be extended to other frequency bands, holding potential for polarization-independent filtering, sensing, and nonlinear effect applications.

Keywords: *electromagnetically induced transparency; metasurface; slow-wave; polarization-independent; tunable*

超材料是人工设计的结构材料^[1-2]。近 20 年来,超材料凭借其独特的电磁场调控能力(如负折射^[3-4]和隐形斗篷^[5]等),已成为科研领域的研究热点,受到广泛关注。同时,在凝聚态物理和量子光学新概念的启发下,超材料为研究波与物质的相互作用提供了新的思路。比如光子拓扑绝缘体激光器的实现^[6]、谷光子路由器^[7]以及基于电磁诱导透明的波延迟和存储^[8-9]等。

电磁感应透明 (electromagnetically induced transparency, EIT) 现象是一种经典原子量子干涉现象,可实现低损耗传输和强色散效应^[10-12]。这种强色散特性可以显著降低群速度和增强非线性效应^[13]。然而,量子电磁感应透明现象的实现需要特殊且复杂的实验条件,如低温和高强度激光。最近,在微波、太赫兹和光学频段,基于超材料实现了类电磁感应透明现象。其中,超表面因其易于加工和便于使用而备受关注^[14-20]。

最早流行的类电磁感应透明现象由相同频率的亮共振和暗共振直接近场耦合形成^[21-22],其物理原理是经典系统中不同等效“原子”路径之间的相消干涉效应。另一种方法是利用 2 个间接远场耦合的亮共振来实现电磁感应透明现象。实验原理是将电磁感应透明现象的谱线视为由 2 个紧密间隔的共振态共同构成^[23]。值得注意的是,无论采用哪种方案,早期报道的类电磁感应透明现象通常都高度依赖于入射波的极化态,这些结构中的共振模式与极化有关^[24-25],极大地限制了实际应用。

近年来,多种平面超构晶格结构被设计出来,如五环结构^[26]、分裂环结构^[27]和风车状结构^[28]。这些晶格结构成功实现了与极化无关的类电磁感应透明现象,并在现实场景中展现出广泛的应用前景。例如在信号源极化状态完全未知的

情况下,或在需要适应不同线性极化波的圆形波导系统中,该类结构均显示出重要应用价值。

基于上述研究,设计了一种新型超表面结构,用于实现与极化无关的类电磁感应透明现象。该超表面由 4 个相同的金属三角环和 4 根金属棒构成,通过合理设计几何参数,2 个不同的亮模(分别由三角环和金属棒激发)之间发生相消干涉,产生类电磁感应透明现象。由于该结构具有四重旋转对称性,其响应几乎不受入射波极化的影响,从而实现极化无关的透明效应。

数值模拟结果显示,该结构在 10.55 GHz 处出现明显透明窗口,此时群延迟时间为 0.46 ns,对应有群折射率为 138。进一步分析表明,调节三角环与金属棒之间的耦合距离可实现透明频率和慢光效应的灵活调控。相比于已有文献中仅依赖单一金属结构(如环或横条)构建的亮模器件^[26-28],本结构中由多个离散金属棒组成的亮模具备更强的调谐能力。鉴于类电磁感应透明现象对亮模间距的高度敏感性,该设计不仅能够扩展至其他频段,还展现出在滤波、传感、非线性增强等极化无关应用场景中的巨大潜力。此外,它有望在光脉冲存储、量子计算等前沿技术领域得到应用^[29-32]。

1 超表面的设计

类电磁感应透明现象超表面的单元结构如图 1 所示,它由 4 个等腰直角金属三角环和 4 根相同的金属棒组成。整个结构以四重旋转对称的方式排列在介电基板衬底上,基板由介电常数为 4.3、厚度为 1 mm、尺寸为 20 mm×20 mm 的玻璃纤维布 (FR-4) 制成。金属结构由铜制成,厚度为 0.035 mm,

宽度 $w=0.3\text{ mm}$ 。超表面的几何参数如图 1 (b) 所示。金属三角环直角边长 $b=6.0\text{ mm}$, 相邻金属三角形的距离 $l=1.0\text{ mm}$, 金属棒长度为 $\sqrt{2}c=7.92\text{ mm}$, c 为金属棒两端的水平距离, 相邻金属棒两端的水

平距离 $c'=2.6\text{ mm}$ 。本文使用 CST Microwave Studio 软件, 利用周期性边界条件对超表面的特性进行研究。图 1 中: K_z 表示入射方向; E 表示电场方向; H 表示磁场方向; θ 表示极化角。

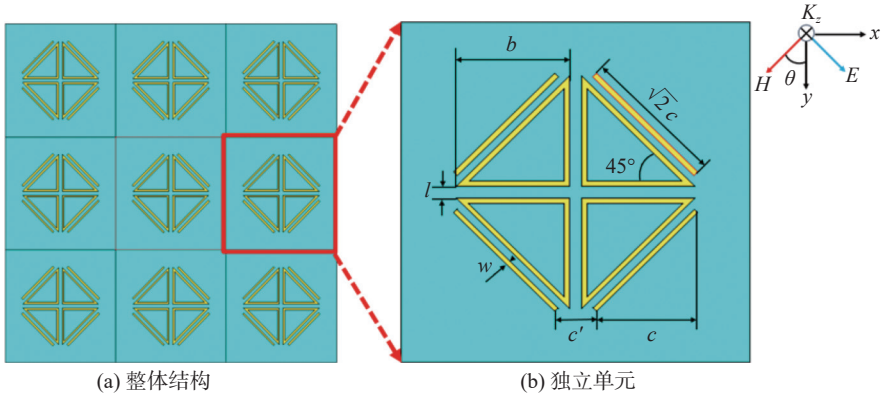


图 1 类 EIT 超表面结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of the EIT-like metasurface structure

2 耦合模理论

金属三角环、金属棒和类电磁感应透明现象超表面的透射光谱如图 2(a) 所示。三角环在

10.36 GHz 处出现了一个透射谷, 金属棒则在 11.46 GHz 处出现共振。当它们结合在一起时, 透射光谱在 10.55 GHz 处出现透明窗口。这个透明窗口意味着发生了类电磁感应透明现象, 这与原子

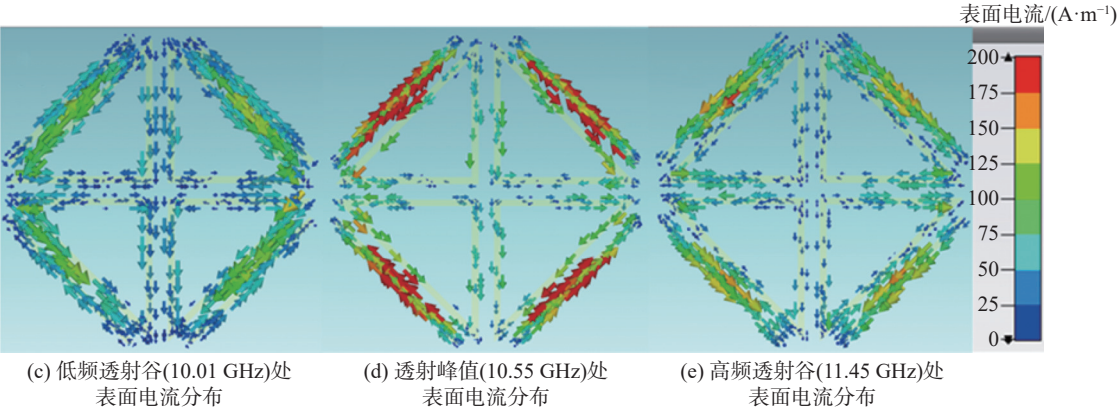
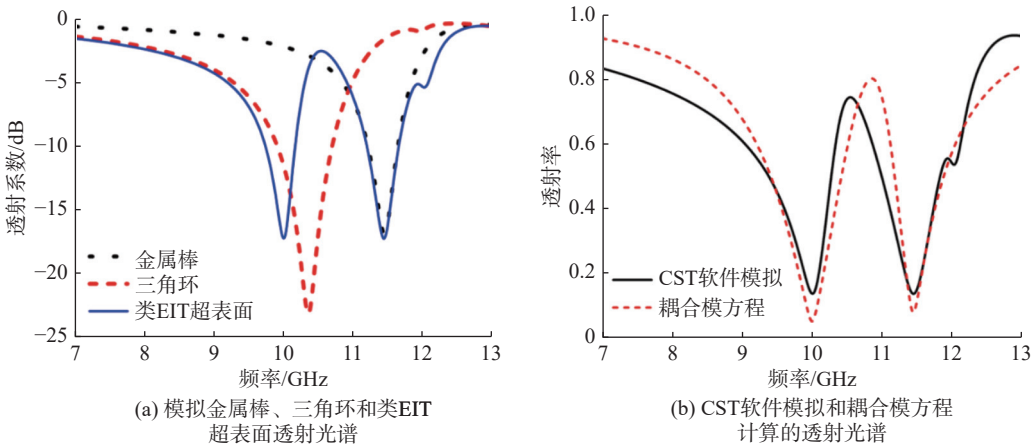


图 2 透射光谱和超表面电流分布

Fig.2 Transmission spectra and metasurface current distributions

系统中的电磁感应透明现象相似^[33]。此外，还有两个中心频率分别为 10.01、11.45 GHz 的透射谷。其中，三角环和金属棒都与入射波发生了强耦合，这与之前入射波只与一个谐振器发生强耦合的情况不同。因此，该结构的类电磁感应透明现象是由 2 个亮态之间的耦合引起的。

“双谐振子”耦合模型^[34]从理论上可以解释类电磁感应透明现象。金属三角环 ($\tilde{a}_1$) 和金属棒 ($\tilde{a}_2$) 是 2 个耦合谐振子，满足以下公式：

$$\frac{d\tilde{a}_1}{dt} = (i\omega_1 - \gamma_1 - \Gamma_1)\tilde{a}_1 + i\sqrt{\gamma_1}(\tilde{s}_+ + i\sqrt{\gamma_2}\tilde{a}_2) \quad (1)$$

$$\tilde{a}_1 = \frac{\sqrt{\gamma_1}\tilde{s}_+(i\Gamma_2 - \omega + \omega_2)}{\gamma_2[\Gamma_1 + i(\omega - \omega_1)] + [\gamma_1 + \Gamma_1 + i(\omega - \omega_1)][\Gamma_2 + i(\omega - \omega_2)]} \quad (4)$$

$$\tilde{a}_2 = \frac{\sqrt{\gamma_2}\tilde{s}_+(i\Gamma_1 - \omega + \omega_1)}{\gamma_2[\Gamma_1 + i(\omega - \omega_1)] + [\gamma_1 + \Gamma_1 + i(\omega - \omega_1)][\Gamma_2 + i(\omega - \omega_2)]} \quad (5)$$

式中， ω 表示入射波的频率。

基于此耦合模方程，将 $\tilde{a}_1$ 和 $\tilde{a}_2$ 的表达式代入式(3)，应用 Mathematica 计算软件对透射光谱进行数值拟合，结果如图 2(b) 中红色虚线所示。为验证理论模型的准确性，利用 CST Microwave Studio 仿真软件对图 1 所示的超表面结构进行全波电磁仿真，获得的透射光谱如图 2(b) 中黑色实线所示。两者在谐振频率特性上表现出良好的一致性，该结果证实所建立的等效模型能够有效表征超表面的电磁传输行为。

图 2(c)~(e) 展示了共振频率处超表面结构的表面电流分布，揭示了类电磁感应透明现象中传输机制的物理本质。在低频透射谷处，三角环和金属棒上产生反向平行电流，金属结构的电磁场会产生相消干涉，从而形成微弱的电磁辐射。在

$$\frac{d\tilde{a}_2}{dt} = (i\omega_2 - \gamma_2 - \Gamma_2)\tilde{a}_2 + i\sqrt{\gamma_2}(\tilde{s}_+ + i\sqrt{\gamma_1}\tilde{a}_1) \quad (2)$$

式中： ω_1 和 ω_2 分别表示 2 个谐振子的中心频率； Γ_1 和 γ_1 分别表示金属三角环的耗散损耗和辐射损耗； Γ_2 和 γ_2 分别表示金属棒的耗散损耗和辐射损耗； $\tilde{s}_+$ 为入射波； i 为虚数。

系统的透射率为

$$t = 1 + i(\sqrt{\gamma_1}\tilde{a}_1 + \sqrt{\gamma_2}\tilde{a}_2)/\tilde{s}_+ \quad (3)$$

通过计算式(1)和(2)，可以得出 $\tilde{a}_1$ 和 $\tilde{a}_2$ 的表达式为

高频透射谷处，可以看到电流更多分布在金属棒上，反向平行电流的强度分布也对比明显。在传输峰值处，金属棒上的电流强度显著增强，反向平行电流的强度分布更加明显。两个亮共振之间出现了散射场的相消干涉，超表面的辐射损耗降低，透射增强，这激发了类电磁感应透明现象。

3 极化无关特性

图 3 所示为不同极化角入射波照射下的透射光谱和群延迟谱。极化角是极化方向的入射波与 y 轴之间的夹角。由图可见，透射传输光谱的传输峰值和共振频率几乎不受极化角的影响，群延迟仍为 0.46 ns，也不受入射波极化角的影响。因此，这种结构具有与极化无关的特性。

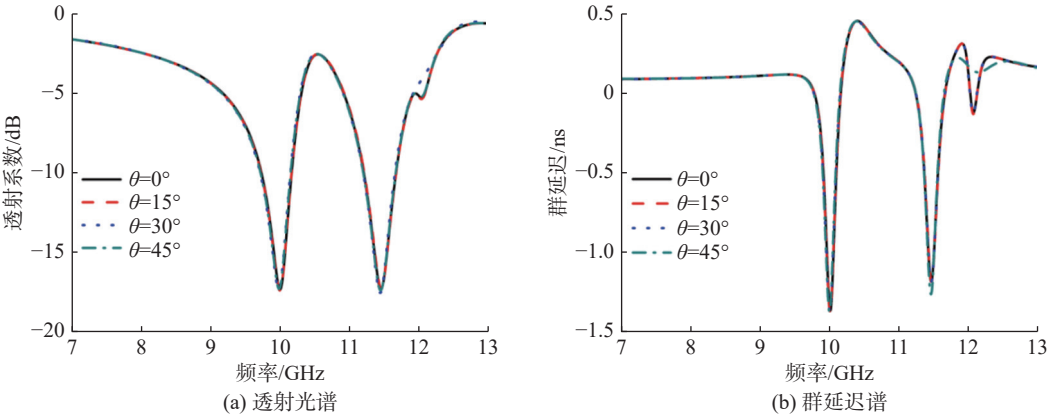


图 3 不同极化角的透射光谱和群延迟谱

Fig.3 Transmission spectra and group delay spectra at different polarization angles

光缓冲是慢波效应的一个重要应用, 缓冲容量是光缓冲器的一个重要参数。它表示光缓冲器中存储的比特数, 代表光缓冲器的存储容量。缓冲容量用品质因数带宽延迟积 (delay bandwidth product, DBP) 表示, 其定义为

$$D_{\text{DBP}} = \tau_g \times \Delta f$$

(6)

式中: τ_g 为群延迟; Δf 为带宽。

该结构的最大群延迟为 0.46 ns, Δf 为 0.67 GHz, 计算得出 D_{DBP} 为 0.308。

图 4 展示了在透射峰频率处, 不同极化角 (0° 、 15° 、 30° 和 45°) 入射波激励下的超表面电流分布。反向平行电流分布在与入射波极化方向平行的两根金属棒和三角环上。不同极化角下电流分布模式整体保持一致, 呈现出对称性良好的局域流动特征, 电流强度和分布区域变化较小。这表明超表面所激发的共振模式对入射极化方向不敏感, 进一步说明其优良的极化无关透射特性来源于稳健的共振机制与合理的对称性设计。

4 可调谐特性

耦合距离是调控超表面特性的关键参数。在

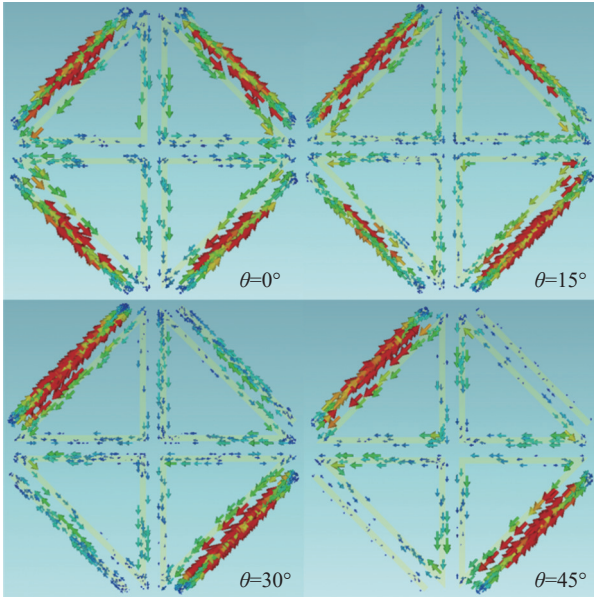
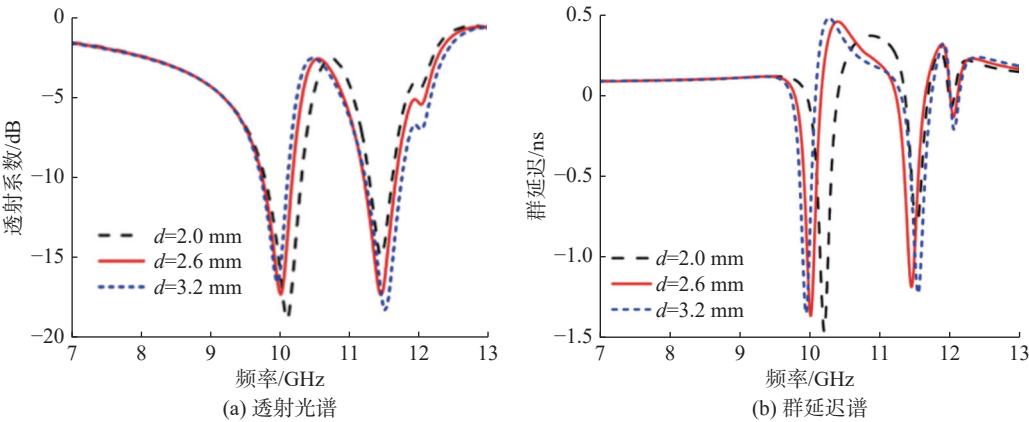


图 4 不同极化角的超表面电流分布

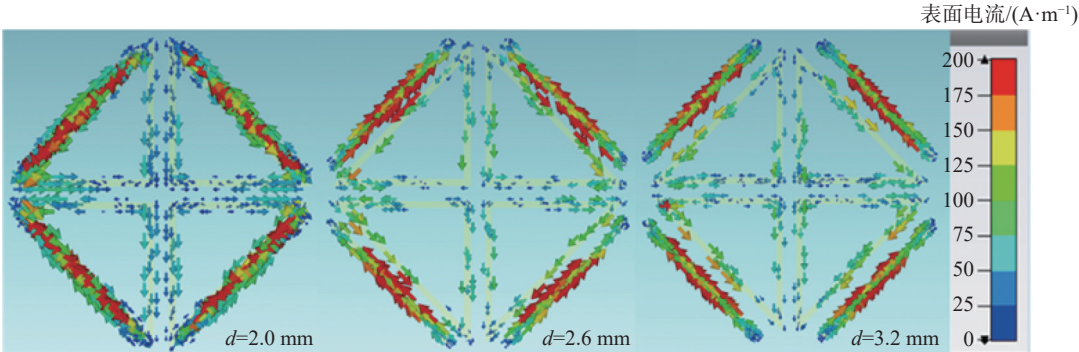
Fig.4 Metasurface current distributions at different polarization angles

保持超表面其他几何参数不变的前提下, 本文系统研究了三角环与金属棒之间距离 d 对类电磁感应透明现象及群延迟特性的影响。如图 5(a)~(b) 所示, 透射光谱和群延迟谱随 d 的变化表现出明显的可调谐特性。随着 d 从 2.0 mm 增加到 3.2 mm,



(a) 透射光谱

(b) 群延迟谱



(c) 不同耦合距离的表面电流分布

图 5 不同耦合距离的透射光谱、群延迟谱和表面电流分布

Fig.5 Transmission spectra, group delay spectra and surface current distributions for different coupling distances

透射谱中透明窗口(即峰值处)的透射率几乎没有发生变化,但是透明窗口频率从 10.95 GHz 移动至 10.44 GHz。低频透射谷从 10.20 GHz 移动至 9.94 GHz,高频透射谷从 11.54 GHz 移动至 11.60 GHz,半高宽略微减小了一些。耦合距离的减小增强了模式间的相互作用,从而提高了频率调谐灵敏度。群延迟也从 0.37 ns 增加到了 0.48 ns,这使得该结构的慢波性能得到了提升。进一步比较透射光谱和群延迟谱可以发现,最大群延迟的频率对应于透射峰的位置, D_{DBP} 也从 0.239 增加到了 0.355。为了探究这一现象的物理本质,本研究还模拟了 d 为 2.0、2.6、3.2 mm 时,透射传输峰值处的电流分布,如图 5(c) 所示。结果表明,随着耦合距离的增大,表面电流逐渐集中于金属棒,金属棒和三角环之间的耦合强度变弱,进而实现了透射特性的连续可调。

5 结 论

通过合适的参数设计了与极化无关的类电磁感应透明现象的超表面。该结构由 4 个金属三角环和 4 根金属棒构成,呈四重旋转对称方式排列于介电基板上。利用电磁场仿真软件(CST Microwave Studio)和耦合模理论,揭示了由三角环与金属棒分别激发的 2 个亮模之间通过相消干涉产生类电磁感应现象的物理机制。仿真结果显示,该超表面在约 10.55 GHz 处产生明显的透明窗口,并实现了 0.46 ns 的慢波群延迟。通过改变耦合距离来灵活调节电磁感应透明现象透明窗口的共振频率和群延迟。随着耦合距离的减小,透射率基本没有变化,透射频率逐渐向低频移动。群延迟增大,慢波性能提高。这种对极化无关特性的类电磁感应透明现象超表面还具备可扩展性和应用多样性,在极化无关滤波、传感、慢光调控及非线性光学增强等领域具有广阔的应用前景,并有望服务于光脉冲存储、量子信息处理等前沿技术的研究。

参考文献:

- [1] DOLLING G, ENKRICH C, WEGENER M, et al. Simultaneous negative phase and group velocity of light in a metamaterial[J]. *Science*, 2006, 312(5775): 892–894.
- [2] SCHURIG D, MOCK J J, JUSTICE B J, et al. Metamaterial electromagnetic cloak at microwave frequencies[J]. *Science*, 2006, 314(5801): 977–980.
- [3] HOFFMAN A J, ALEKSEYEV L, HOWARD S S, et al. Negative refraction in semiconductor metamaterials[J]. *Nature Materials*, 2007, 6(12): 946–950.
- [4] TONG S S, REN C Y, TANG W P. High-transmission negative refraction in the gradient space-coiling metamaterials[J]. *Applied Physics Letters*, 2019, 114(20): 204101.
- [5] WONG Z J, WANG Y, O'BRIEN K, et al. Optical and acoustic metamaterials: superlens, negative refractive index and invisibility cloak[J]. *Journal of Optics*, 2017, 19(8): 084007.
- [6] YANG Y H, GAO Z, XUE H R, et al. Realization of a three-dimensional photonic topological insulator[J]. *Nature*, 2019, 565(7741): 622–626.
- [7] YAN C H, LI Y, YUAN H D, et al. Targeted photonic routers with chiral photon-atom interactions[J]. *Physical Review A*, 2018, 97(2): 023821.
- [8] CHEN Y Q, DONG L J, XU X H, et al. Electromagnetic diode based on photonic crystal cavity with embedded highly dispersive meta-interface[J]. *Journal of Applied Physics*, 2017, 122(24): 244507.
- [9] CHEN Y Q, LI Y H, ZHU K J, et al. Nonlinear properties of light-tunneling heterostructures embedded with a highly dispersive meta-molecule[J]. *Optical Materials Express*, 2018, 8(11): 3583–3592.
- [10] HARRIS S E. Electromagnetically induced transparency[J]. *Physics Today*, 1997, 50(7): 36–42.
- [11] FLEISCHHAUER M, IMAMOGLU A, MARANGOS J P. Electromagnetically induced transparency: optics in coherent media[J]. *Reviews of Modern Physics*, 2005, 77(2): 633–673.
- [12] KRAUSS T F. Why do we need slow light?[J]. *Nature Photonics*, 2008, 2(8): 448–450.
- [13] ZHU L, MENG F Y, DONG L, et al. Polarization manipulation based on electromagnetically induced transparency-like (EIT-like) effect[J]. *Optics Express*, 2013, 21(26): 32099–32110.
- [14] MENG F Y, WU Q, ERNI D, et al. Polarization-independent metamaterial analog of electromagnetically induced transparency for a refractive-index-based sensor[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2012, 60(10): 3013–3022.
- [15] ZHU L, MENG F Y, FU J H, et al. Multi-band slow light metamaterial[J]. *Optics Express*, 2012, 20(4): 4494–4502.
- [16] HE X J, HUANG Y M, YANG X Y, et al. Tunable electromagnetically induced transparency based on terahertz graphene metamaterial[J]. *RSC Advances*, 2017, 7(64): 40321–40326.

- [17] WANG Y, LI Z, HU F R. Analog of electromagnetically induced transparency at terahertz frequency based on a bilayer-double-H-metamaterial[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2018, 51(2): 025103.
- [18] SHI X, HAN D Z, DAI Y Y, et al. Plasmonic analog of electromagnetically induced transparency in nanostructure graphene[J]. *Optics Express*, 2013, 21(23): 28438–28443.
- [19] ZANG T C, CHEN Y Q, DING Y Q, et al. Broadband electromagnetically induced transparency in metamaterials based on hybridization bandgap[J]. *AIP Advances*, 2020, 10(11): 115002.
- [20] ZHANG S, GENOV D A, WANG Y, et al. Plasmon-induced transparency in metamaterials[J]. *Physical Review Letters*, 2008, 101(4): 047401.
- [21] CHEN Y Q, DONG L J, FANG Y, et al. Bistable switching in electromagnetically induced-transparency-like metamolecule[J]. *Applied Physics A*, 2019, 125(1): 22.
- [22] BOLLER K J, IMAMOĞLU A, HARRIS S E. Observation of electromagnetically induced transparency[J]. *Physical Review Letters*, 1991, 66(20): 2593–2596.
- [23] HE Y H, TANG C, NIU Q S, et al. Dual resonance effects of electromagnetically induced transparency-like and Fano-like using terahertz metamaterial resonator[J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2020, 52(2): 58.
- [24] HU S, LIU D, LIN H, et al. Analogue of ultra-broadband and polarization-independent electromagnetically induced transparency using planar metamaterial[J]. *Journal of Applied Physics*, 2017, 121(12): 123103.
- [25] WU C, KHANIKAEV A B, SHVETS G. Broadband slow light metamaterial based on a double-continuum Fano resonance[J]. *Physical Review Letters*, 2011, 106(10): 107403.
- [26] ZHU L, DONG L, MENG F Y, et al. Wide-angle and polarization-independent electromagnetically induced transparency-like effect based on pentacyclic structure[J]. *Journal of Optics*, 2014, 16(1): 015103.
- [27] BAGCI F, AKAOGLU B. A polarization independent electromagnetically induced transparency-like metamaterial with large group delay and delay-bandwidth product[J]. *Journal of Applied Physics*, 2018, 123(17): 173101.
- [28] ZHU L, DONG L, GUO J, et al. Polarization-independent transparent effect in windmill-like metasurface[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2018, 51(26): 265101.
- [29] ISHIKURA N, HOSOI R, HAYAKAWA R, et al. Photonic crystal tunable slow light device integrated with multi-heaters[J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 100(22): 221110.
- [30] YAO T, ZHU K J, CHEN Y Q, et al. Meta-interface enhanced light tunneling effect and related electromagnetic diode action[J]. *Journal of Applied Physics*, 2019, 126(16): 165303.
- [31] HE X J, WANG L, WANG J M, 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.
- [32] PAPASIMAKIS N, FEDOTOV V A, ZHELUDEV N I, et al. Metamaterial analog of electromagnetically induced transparency[J]. *Physical Review Letters*, 2008, 101(25): 253903.
- [33] GARRIDO ALZAR C L, MARTINEZ M A G, NUSSENZVEIG P. Classical analog of electromagnetically induced transparency[J]. *American Journal of Physics*, 2002, 70(1): 37–41.
- [34] LIU N, LANGGUTH L, WEISS T, et al. Plasmonic analogue of electromagnetically induced transparency at the Drude damping limit[J]. *Nature Materials*, 2009, 8(9): 758–762.

(编辑: 丁红艺)