

基于全介质超材料的高 Q 电磁诱导透明现象研究王子煜^{1,3}, 邵健^{2**}, 胡亚新¹, 朱佳璐¹, 张晓蕊¹, 白磊³, 董正高^{1*}¹东南大学物理学院, 江苏 南京 211189;²徐州工程学院物理与新能源学院, 江苏 徐州 221018;³东南大学成贤学院, 江苏 南京 210088

摘要 高透射、低损耗、高品质因子的电磁诱导透明现象是超材料领域重要的研究方向之一。设计了一种全介质十字空腔结构超材料, 十字空腔由两个相互垂直的硅空腔组成。当十字空腔超材料完全对称时, 没有电磁诱导透明现象产生。通过在特定方向上打破结构的对称性, 引入了暗模式, 并出现了显著的电磁诱导透明现象。在透射峰中可以同时实现 93% 的透射率和 1064 的品质因子。利用该超材料的电磁共振模式, 分析了电磁诱导透明现象的物理机制。进一步研究了不同方向的非对称偏移量、几何结构及折射率对透射谱的影响, 并通过相位变化分析了透射峰处的高群折射率现象。这些特性使得该超材料结构有可能应用于慢光器件、传感器和光开关中。

关键词 材料; 超材料; 电磁诱导透明; 全介质; 传感器

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1116001

Electromagnetically Induced Transparency Based on All-Dielectric Metamaterial with High Q FactorWang Ziyu^{1,3}, Shao Jian^{2**}, Hu Yaxin¹, Zhu Jialu¹, Zhang Xiaorui¹,
Bai Lei³, Dong Zhenggao^{1*}¹ School of Physics, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 211189, China;² School of Physics and New Energy, Xuzhou University of Technology, Xuzhou, Jiangsu 221018, China;³ Chengxian College, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210088, China

Abstract High quality-factor, low-loss and high-transmission electromagnetically induced transparency is one of the important research directions of metamaterials. In this paper, a cross-shaped all-dielectric metamaterial structure is designed, which is composed of two mutually orthogonal silicon empty cavities. When the cross-shaped structure is fully symmetrical, there is no electromagnetically induced transparency. However, when the symmetry of the structure is broken in a specific direction, the dark mode is introduced and the electromagnetically induced transparency can be observed. The transmission peaks with 93% transmissivity and 1064 quality factor can be realized simultaneously. The physical mechanism of the electromagnetically induced transparency is analyzed using the electromagnetic resonance modes, the influences of asymmetric offsets under different directions, geometric structure and refractive index on the transmission spectrum are further investigated, and the high group refractive index phenomenon at transmission peaks is analyzed using phase change. These characteristics make the proposed metamaterial structure possible to be applied in slow-light devices, sensors and optical switches.

Key words materials; metamaterial; electromagnetically induced transparency; all-dielectric; sensors

OCIS codes 160.3918; 230.5750; 280.4788; 300.6340

收稿日期: 2020-11-20; 修回日期: 2020-12-21; 录用日期: 2020-12-30

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB1106100)、国家自然科学基金(11774053)、江苏省自然科学基金(BK20170247)

* E-mail: zgdong@seu.edu.cn; ** E-mail: shaojian0403@126.com

1 引言

电磁诱导透明 (Electromagnetically induced transparency, 简记为 EIT) 现象最早发现于量子系统中, 指的是多能级原子系统与外加电磁场之间的量子相消干涉效应使得材料对电磁波的透射系数发生改变的现象^[1]。2008 年, EIT 现象被扩展到超材料系统中^[2]。由于超材料的独特性质及电磁波与超材料的相互作用, 在可见光波段^[3]、太赫兹波段^[4-6]和微波波段^[7]均可用超材料实现 EIT 现象。超材料中的 EIT 现象可以在常温中实现, 并且更加稳定, 这显著提高了其应用性^[8]。此外, 人们还实现了 EIT 现象的动态调控^[9-12]。超材料中的 EIT 现象对于实现低损耗慢光器件^[13-14]、非线性光学器件^[15]以及光学传感器^[16-17]至关重要。

基于超材料实现 EIT 现象的结构大部分采用金属结构, 因为金属结构可以实现表面等离激元共振 (surface plasmon resonance, 简记为 SPR) 和 Fano 共振^[8, 14, 18]。然而, 金属结构超材料中的 SPR 只集中在金属表面, 由于欧姆损耗的存在, 不可避免地有严重的能量损失, 这限制了金属超材料实现高透射率和高品质因子。金属超材料 EIT 透射峰的品质因子很难达到百的数量级^[19]。近年来人们发现全介质 (如硅、石英等) 超材料也可以实现 EIT 现象, 这为解决金属超材料能量损失问题提供了可能^[20-30]。由于没有欧姆损耗, 全介质超材料 EIT 透射峰的品质因子在实验中达到了 600^[18], 在数值仿真中甚至可以达到更高。

与传统的棒结构相比, 在传感器应用中, 利用金属空腔超材料实现 EIT 现象更有优势, 因为传感介质容易填充空隙, 有助于检测折射率的变化^[4, 17]。但关于全介质空腔超材料实现 EIT 现象的研究鲜有报道。本文设计了一个全介质十字空腔超材料, 该超材料包括两个相互垂直的长方形空腔, 通过在特定方向上打破结构的对称性, 可以实现 EIT 现象。相对于金属超材料的高损耗, 该全介质超材料可以实现高透射率和高品质因子。

2 结构与仿真

首先设计了一个空腔型共振腔, 在一层硅介质材料 (介电常数 $\epsilon = 11.9$) 中挖出十字形空腔。为了研究共振结构的电磁响应, 本文利用时域有限差分 (Finite-Difference Time-Domain, 简记为 FDTD) 法进行仿真计算。x、y 方向均采用周期边界条件

来仿真实验中周期排列的超材料样品。图 1 所示为沉积在石英基底 ($\epsilon = 2.25$) 上的完全对称十字空腔超材料的几何结构, 每个超材料单元包含两个相互垂直的硅空腔。几何参数如下: 水平方向周期 $a = 580$ nm, 竖直方向周期 $b = 620$ nm, 硅空腔宽度 $e = 125$ nm, 硅空腔厚度 $h_1 = 36$ nm, 基底厚度 $h_2 = 200$ nm, 硅水平空腔长度 $g = 395$ nm, 硅竖直空腔长度 $f = 345$ nm。当电磁波传输方向沿着 z 轴负方向, 电场方向沿 y 轴, 磁场方向沿 x 轴时, 在透射谱上可以清楚地观察到共振模式。完全对称十字空腔的透射谱线如图 2 所示, 可以发现, 该对称十字空腔超材料的共振频率为 329.8 THz, 为亮模式, 没有产生 EIT 现象。

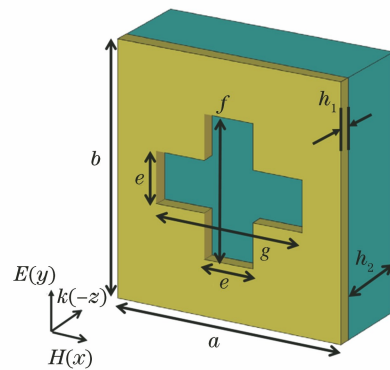


图 1 对称十字空腔超材料的单元结构示意图
Fig. 1 Structural diagram of unit cell of symmetric cross-shaped cavity metamaterial

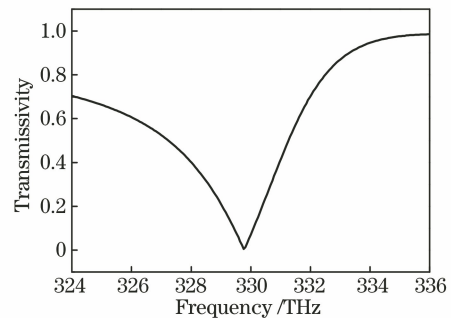


图 2 对称十字空腔超材料的透射谱线
Fig. 2 Transmission spectrum of symmetric cross-shaped cavity metamaterial

为了实现超材料 EIT 现象, 需要激发亮、暗两种模式, 且两种模式的共振频率相同。通常有两种方案, 第一种是由超材料中的不同部分分别提供亮、暗两种模式^[2, 27], 第二种是打破结构对称性以引入所需要的暗模式^[18-19, 29]。在第一种方案中, 两个相互垂直的空腔独立存在且共振频率一致, 合成对称十字空腔后并不能形成 EIT 现象。原因是空腔中

间的重叠部分必然会对共振产生影响^[29]。所以只能采用第二种方案,通过打破结构对称性,引入暗模式,产生 EIT 现象。图 3 是在图 1 的基础上引入偏移量 S_1 、 S_2 ,偏移量 S_1 表示竖直空腔整体在水平方向上移动的距离,偏移量 S_2 表示水平空腔整体在竖直方向上移动的距离。当 S_1 、 S_2 均为 0 时,全介质超材料为图 1 所示的完全对称十字空腔结构。

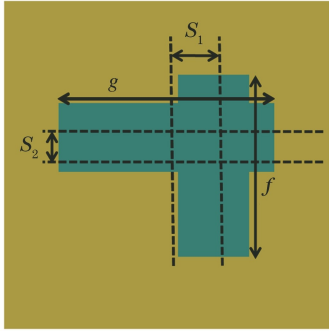


图 3 非对称十字空腔超材料的单元结构示意图
Fig. 3 Structural diagram of unit cell of asymmetric cross-shaped cavity metamaterial

如图 4 所示,只有在特定方向上打破结构对称性才能产生 EIT 现象。当竖直空腔整体在水平方向上移动 10 nm 且水平空腔不动($S_2=0$)时,两个透射谷之间出现了一个窄的透射峰,即出现了 EIT 现象。两个透射谷频率分别为 329.28 THz 和 330.36 THz,所设计的超材料 EIT 透射峰(共振峰)在 329.82 THz 处,透射率达到 93%。半峰之间的频率宽度 $\Delta f = 0.31$ THz,所以品质因子 $Q = 1064$ 。高品质因子 EIT 光谱线型在与光学吸收相关的生物传感以及全光控制的光吸收开关等方面有潜在的应用价值^[9]。当水平空腔整体在竖直方向上移动 10 nm 且竖直空腔不动($S_1=0$)时,共振频率为 329.9 THz,与十字对称结构相比,共振频率几乎没有变化。由于只改变偏移量 S_2 ,因此没有 EIT 现

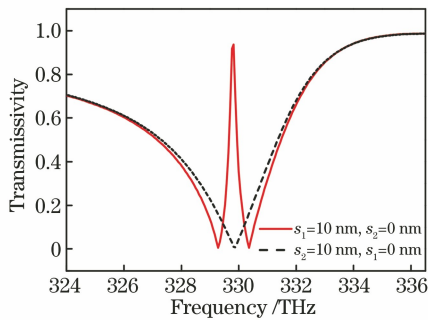


图 4 十字空腔超材料的透射谱线
Fig. 4 Transmission spectra of cross-shaped cavity metamaterial

象产生。故在下文的分析中,如果没有特别指出,均默认偏移量 S_2 为 0。

3 分析与讨论

通过上文分析可知,当非对称十字空腔的结构对称性被打破时,偏移量 S_1 是影响 EIT 现象的主要因素^[19]。图 5 所示为随着偏移量 S_1 变化的超材料透射谱线。可以看出,结构对称性被打破后,开始出现 EIT 现象,并且当偏移量 S_1 越来越大时,EIT 透射峰变得越来越宽;当偏移量 S_1 较大(如 $S_1 = 60$ nm)时,两透射谷之间出现了一段宽的透射峰,此时透射谱是由两个分立的共振谱构成,没有发生干涉现象。

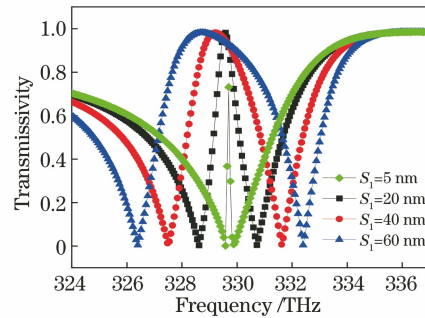


图 5 随 S_1 变化的超材料透射谱线
Fig. 5 Transmission spectra of metamaterial for different S_1

EIT 透射峰处的透射率和品质因子随 S_1 的变化如图 6 所示,可以看出,当偏移量 S_1 增加时,透射峰处的透射率增大并在 $S_1 = 20$ nm 时趋于饱和,但是随着偏移量 S_1 的增加,透射峰处共振峰的品质因子却一直在降低。综合透射峰处的品质因子和透射强度,我们分析可知,在偏移量 $S_1 = 10$ nm 时,所设计的不对称十字空腔超材料的 EIT 现象最佳。

当偏移量 $S_1 = 10$ nm 时,超材料几何结构对

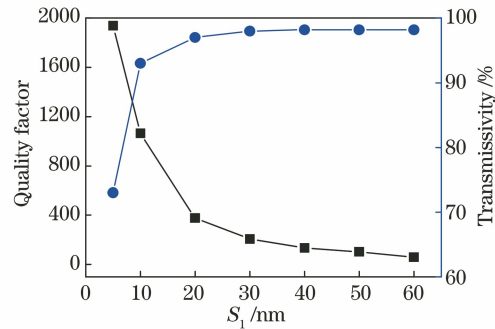


图 6 EIT 透射峰处的透射率和品质因子随 S_1 的变化
Fig. 6 Transmissivity and quality factor at EIT transmission peak versus S_1

EIT 透射谱线的调控特性如图 7 所示。可以看出, 随着水平空腔长度 g 、垂直空腔长度 f 和空腔宽度 e 的增加, 透射峰会向高频移动; 而随着空腔厚度 h_1 的增加, 透射峰会向低频移动。如图 4~7 所示, 透射谱线由半峰较宽的亮模式和半峰较窄的暗模式构成。当亮、暗模式的共振频率相同时, 亮模式和暗模式发生干涉, 进而产生 EIT 现象。此时, 所设计的

超材料选择 $g=395\text{ nm}$, $f=345\text{ nm}$, $e=125\text{ nm}$ 和 $h_1=36\text{ nm}$ 。当亮、暗模式的共振频率不同时, 在亮、暗模式共振频率之间出现一段透射峰, 出现了类似 EIT 现象。结合图 5、7 可知, 通过改变结构的几何参数和偏移量, 系统会形成类 EIT 现象。在实际器件制备中, 误差不可避免, 所得结论为结构的实际应用提供了参考。

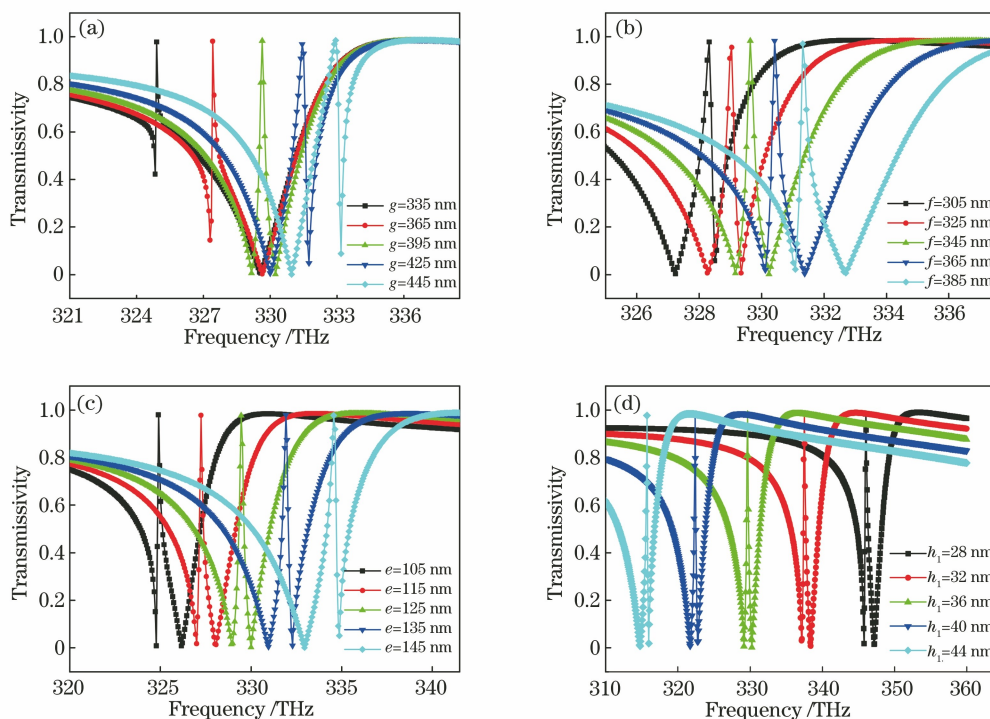


图 7 当 $S_1=10\text{ nm}$ 时超材料几何结构对透射谱线的调控特性。(a) g ; (b) f ; (c) e ; (d) h_1

Fig. 7 Regulation of metamaterial geometry on transmission spectrum when $S_1=10\text{ nm}$.

(a) g ; (b) f ; (c) e ; (d) h_1

进一步分析改变 S_1 时会出现 EIT 现象而改变 S_2 时不会出现 EIT 现象的物理机理。本文采用的是全介质材料, 相对于金属超材料, 虽然避免了欧姆损耗, 但无法用表面电流来解释 EIT 现象的物理机理^[25, 30]。文献[25, 30]指出, 介质超材料结构中的 EIT 现象是由 Mie 共振产生的, 可用电磁场分布图进行解释。首先分析亮模式的电磁模式, 图 8 给出了 $S_2=10\text{ nm}$, $S_1=0$, 共振频率为 329.9 THz 时 x - y 平面的电场分布。图 8 中的电场局域在上下两端, 对应着电偶极共振, 是亮模式。水平空腔在竖直方向上的移动虽然打破了结构的对称性, 但不会对电场分布产生较大影响, 从而无法产生暗模式, 进而不会出现 EIT 现象。所以图 4 中 $S_2=10\text{ nm}$, $S_1=0$ 时的超材料的共振频率、透射谱线与图 2 中的完全对称超材料基本一致。

其次分析暗模式的电磁模式, 图 9 给出了 $S_1=$

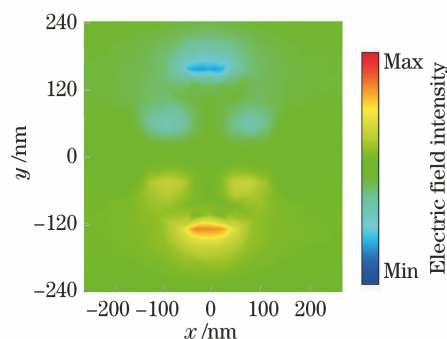


图 8 当 $S_2=10\text{ nm}$, $S_1=0$, 共振频率为 329.9 THz 时 x - y 平面的电场分布

Fig. 8 Electric field distribution in x - y plane at resonant frequency of 329.9 THz when $S_2=10\text{ nm}$ and $S_1=0$

10 nm , $S_2=0$, EIT 透射峰频率为 329.82 THz 时 x - y 平面的电场分布。当垂直空腔的水平移动引起结构在水平方向上不对称时, 会激发出新模式, 即暗

模式。如图 9 所示,该暗模式为电四极共振。当亮模式(电偶极共振)与暗模式(电四极共振)的频率重合时,发生 EIT 现象,如图 4 所示。根据旋转对称性可知,若将入射光的偏振方向旋转 90° 并调整几何结构尺寸,当仅改变水平空腔(即 $S_1=0, S_2 \neq 0$) 时,该十字结构也会出现 EIT 现象。

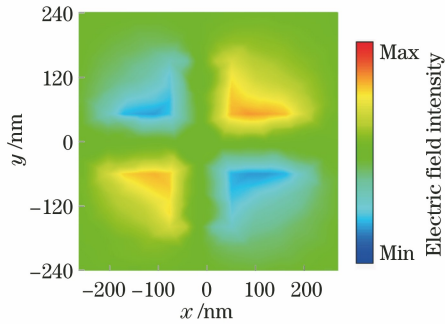


图 9 当 $S_1=10 \text{ nm}, S_2=0$, EIT 透射峰频率为 329.82 THz 时 x - y 平面的电场分布

Fig. 9 Electric field distribution in x - y plane at EIT transmission peak frequency of 329.82 THz when $S_1=10 \text{ nm}$ and $S_2=0$

不同背景折射率($n=1.00 \sim 1.09$)下超材料的透射谱线如图 10 所示。通过模拟不同背景折射率下超材料 EIT 结构的透射谱线,研究该 EIT 现象的偏移情况。尽管折射率的变化很小,但 EIT 透射峰的位置仍然发生了明显的偏移。这表明该 EIT 现象在光学传感方面具有潜在的应用价值。

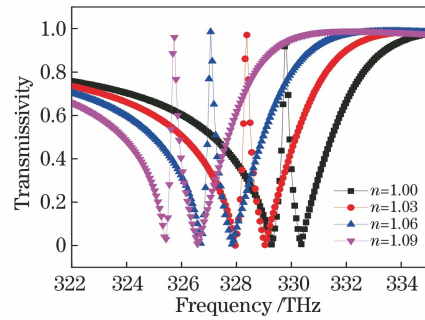


图 10 不同背景折射率下超材料的透射谱线

Fig. 10 Transmission spectra of metamaterial under different background refractive indexes

在超材料的 EIT 现象中,会出现一个尖锐的透射峰,如图 4 所示。计算了该超材料透射峰附近的相位,如图 11(a)所示,可以看出,相位变化是非连续的。相位变化与群折射率(n')之间的关系^[31-32]为

$$n' = \frac{c_0}{l} \frac{d\varphi}{d\omega}, \quad (1)$$

式中: φ 为相位; ω 为角频率; c_0 为真空中的光速; l 为电磁波沿着入射方向通过超材料的宽度。相位非连续变化会使群折射率发生变化,如图 11(b)所示。可以观察到,在 329.82 THz 附近(对应着 EIT 透射峰),群折射率值达到最大即 1302。大的群折射率代表着电磁波穿过整个超材料所需要的时间较长,这表明所设计的非对称十字空腔超材料会引发慢光效应,因此该新型超材料结构在超快开关或慢光器件方面具有潜在的应用价值。

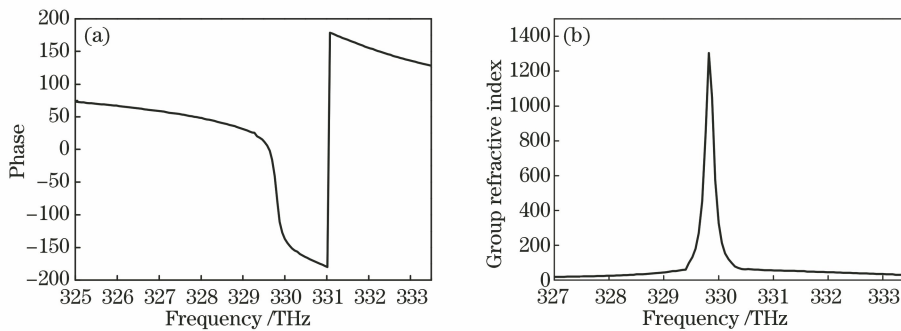


图 11 超材料 EIT 共振的奇异响应。(a)相位;(b)群折射率

Fig. 11 Unusual responses of metamaterial under EIT resonance. (a) Phase; (b) group refractive index

4 结 论

设计了一个低损耗全介质非对称十字空腔超材料并研究了 EIT 现象的特性。与目前报道的其他结构相比,该超材料结构的突出特点是每一个结构单元都由介质空腔组成。相对金属超材料,该超材料没有欧姆损耗,可以获得较高的透射率和品质因

子。该超材料的透射谱线表明,在特定方向上打破结构对称性后会出现 EIT 现象。研究了几个参数和非对称偏移量对 EIT 透射谱的调控特性,为实验制备打下了基础。此外,通过研究该超材料的电磁共振模式,分析了产生 EIT 现象的机理,讨论了不同背景折射率下超材料 EIT 现象的偏移特性,并通过研究相位变化和群折射率,讨论了慢光特性。结

果表明,该超结构的 EIT 现象在全光控制的光开关、慢光器件和传感器等方面有潜在的应用价值。

参 考 文 献

- [1] Harris S E. Electromagnetically induced transparency [J]. *Physics Today*, 1997, 50(7): 36-42.
- [2] Zhang S, Genov D A, Wang Y, et al. Plasmon-induced transparency in metamaterials [J]. *Physical Review Letters*, 2008, 101(4): 047401.
- [3] Xu H, Lu Y H, Lee Y, et al. Studies of electromagnetically induced transparency in metamaterials [J]. *Optics Express*, 2010, 18(17): 17736-17747.
- [4] 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.
- [5] Zhang M, Yan F P, Du X M, et al. Design and analysis of electromagnetically induced transparency in THz multiband [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(3): 0314001.
张敏, 延凤平, 杜雪梅, 等. 太赫兹多波段的电磁诱导透明设计与分析 [J]. *中国激光*, 2021, 48(3): 0314001.
- [6] Sun Y R, Shi T L, Liu J J, et al. Terahertz label-free bio-sensing with EIT-like metamaterials [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(3): 0328001.
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): 0328001.
- [7] Li H M, Liu S B, Liu S Y, et al. Low-loss metamaterial electromagnetically induced transparency based on electric toroidal dipolar response [J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 106(8): 083511.
- [8] Luk'yanchuk B, Zheludev N I, Maier S A, et al. The Fano resonance in plasmonic nanostructures and metamaterials [J]. *Nature Materials*, 2010, 9(9): 707-715.
- [9] Jin L, Zhou J, Lai P X, et al. Tunable absorption characteristics in multilayered structures with graphene for biosensing [J]. *Journal of Innovative Optical Health Sciences*, 2020, 13(4): 2050017.
- [10] Zhang Y P, Li Y, Cao Y Y, et al. Graphene induced tunable and polarization-insensitive broadband metamaterial absorber [J]. *Optics Communications*, 2017, 382: 281-287.
- [11] Wang Y R, Liang L J, Yang M S, et al. Terahertz metamaterial based on controllable electromagnetic induced transparency structure [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(4): 041603.
王娅茹, 梁兰菊, 杨茂生, 等. 一种光控的电磁诱导透明太赫兹超材料 [J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(4): 041603.
- [12] Li G S, Yan F P, Wang W, et al. Analysis of photosensitive tunable multiband electromagnetically induced transparency metamaterials [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(1): 0114002.
李广森, 延凤平, 王伟, 等. 光敏可调的多波段电磁诱导透明超材料分析 [J]. *中国激光*, 2019, 46(1): 0114002.
- [13] Papasimakis N, Fedotov V A, Prosvirnin S L, et al. Metamaterial analog of electromagnetically induced transparency [C] // *Photonic Metamaterials: From Random to Periodic 2007*, June 4-7, 2007, Jackson Hole, Wyoming United States. Washington, D. C. : OSA, 2007: ThBPDP6.
- [14] Gu J Q, Singh R, Liu X J, et al. Active control of electromagnetically induced transparency analogue in terahertz metamaterials [J]. *Nature Communications*, 2012, 3: 1151.
- [15] Sun Y, Tong Y W, Xue C H, et al. Electromagnetic diode based on nonlinear electromagnetically induced transparency in metamaterials [J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 103(9): 091904.
- [16] Dong Z G, Liu H, Cao J X, et al. Enhanced sensing performance by the plasmonic analog of electromagnetically induced transparency in active metamaterials [J]. *Applied Physics Letters*, 2010, 97(11): 114101.
- [17] Liu N, Weiss T, Mesch M, et al. Planar metamaterial analogue of electromagnetically induced transparency for plasmonic sensing [J]. *Nano Letters*, 2010, 10(4): 1103-1107.
- [18] Campione S, Liu S, Basilio L I, et al. Broken symmetry dielectric resonators for high quality factor Fano metasurfaces [J]. *ACS Photonics*, 2016, 3(12): 2362-2367.
- [19] Vafapour Z, Alaei H. Achieving a high Q-factor and tunable slow-light via classical electromagnetically induced transparency (CI-EIT) in metamaterials [J]. *Plasmonics*, 2017, 12(2): 479-488.
- [20] Yang W H, Xiao S M, Song Q H, et al. All-dielectric metasurface for high-performance structural color [J]. *Nature Communications*, 2020, 11: 1864.
- [21] Wang Q, Yu L, Gao H X, et al. Electromagnetically induced transparency in an all-dielectric nano-metamaterial for slow light application [J]. *Optics Express*, 2019, 27(24): 35012-35026.
- [22] Diao J Y, Han B X, Yin J, et al. Analogue of

- electromagnetically induced transparency in an S-shaped all-dielectric metasurface[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2019, 11(3): 1-10.
- [23] Cai W Q, Fan Y C, Huang X C, et al. Electromagnetically induced transparency in all-dielectric metamaterials: coupling between magnetic Mie resonance and substrate resonance[J]. *Physical Review A*, 2019, 100(5): 053804.
- [24] Qin M Y, Pan C D, Chen Y, et al. Electromagnetically induced transparency in all-dielectric U-shaped silicon metamaterials[J]. *Applied Sciences*, 2018, 8(10): 1799-1807.
- [25] Sui C S, Han B X, Lang T T, et al. Electromagnetically induced transparency in an all-dielectric metamaterial-waveguide with large group index[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2017, 9(5): 1-8.
- [26] Zhang J F, Liu W, Yuan X D, et al. Electromagnetically induced transparency-like optical responses in all-dielectric metamaterials[J]. *Journal of Optics*, 2014, 16(12): 125102.
- [27] Yang Y, Kravchenko I I, Briggs D P, et al. All-dielectric metasurface analogue of electromagnetically induced transparency [J]. *Nature Communications*, 2014, 5: 5753.
- [28] Yang Y M, Wang W Y, Moitra P, et al. Dielectric meta-reflectarray for broadband linear polarization conversion and optical vortex generation [J]. *Nano Letters*, 2014, 14(3): 1394-1399.
- [29] Wei Z C, Li X P, Zhong N F, et al. Analogue electromagnetically induced transparency based on low-loss metamaterial and its application in nanosensor and slow-light device [J]. *Plasmonics*, 2017, 12(3): 641-647.
- [30] Wang X Y, Wang Q M, Dong G Y, et al. Multi-band terahertz metasurface absorber [J]. *Modern Physics Letters B*, 2017, 31(36): 1750354.
- [31] Tang B, Dai L, Jiang C, et al. Electromagnetically induced transparency in hybrid plasmonic-dielectric system[J]. *Optics Express*, 2011, 19(2): 628-637.
- [32] Fedotov V A, Rose M, Prosvirnin S L, et al. Sharp trapped-mode resonances in planar metamaterials with a broken structural symmetry [J]. *Physical Review Letters*, 2007, 99(14): 147401.