

激光与光电子学进展

基于铟化锡太赫兹超材料可调谐的
电磁感应透明李洪阳^{1,2}, 黄巍^{1,2}, 张玉婷^{1,2}, 银珊^{1,2**}, 张文涛^{1,2*}, 杜浩^{1,2}¹桂林电子科技大学电子工程与自动化学院, 广西 桂林 541004;²广西光电信息处理重点实验室, 广西 桂林 541004

摘要 提出了由一个竖直的铟化锡(InSb)棒和两个水平的 InSb 棒组成的 F 型电磁感应透明结构。利用时域有限积分法计算了该结构的电磁特性, 计算后得知, 竖直 InSb 棒为电磁感应透明中的明模, 两个水平 InSb 棒为暗模。本文通过改变两个水平 InSb 棒的距离以及竖直 InSb 棒与水平 InSb 棒的间距研究了电磁感应透明窗口的变化趋势, 结果发现, 电磁感应透明窗口的透射振幅出现了从开到关的状态调制。同时, 由于 InSb 具有温度敏感特性, 因此升高 InSb 的温度, 可使电磁感应透明窗口的中心频率向高频移动, 实现了对太赫兹波的主动调谐。该研究结果在光信号处理、光存储和慢光器件等方面具有潜在的应用前景。

关键词 光谱学; 太赫兹; 电磁感应透明; 铟化锡; 主动调制

中图分类号 TB383

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.0530002

Tunable Electromagnetically Induced Transparency Based on Indium
Antimonide Terahertz MetamaterialLi Hongyang^{1,2}, Huang Wei^{1,2}, Zhang Yuting^{1,2}, Yin Shan^{1,2**}, Zhang Wentao^{1,2*}, Du Hao^{1,2}¹*School of Electronic Engineering and Automation, Guilin University of Electronic Technology,
Guilin, Guangxi 541004, China;*²*Guangxi Key Laboratory of Optoelectronic Information Processing, Guilin, Guangxi 541004, China*

Abstract In this paper, an F-shape electromagnetically induced transparency structure composed of one vertical indium antimonide (InSb) bar and two horizontal InSb bars is proposed. The electromagnetic properties of the model were calculated using the time-domain finite integration method. The calculation show that the vertical InSb bar functioned as the bright mode resonator in the electromagnetically induced transparency structure, while the two horizontal InSb bars functioned as dark mode resonators. To study the variation in the electromagnetically induced transparency window, we varied the distance between the two horizontal InSb bars and the distance between the vertical InSb bar and the horizontal InSb bars. We found that the electromagnetically induced transparency window changes from on to off. Meanwhile, on varying the temperature of InSb that is highly temperature-sensitive, the center frequency of the electromagnetically induced transparent window moved toward high frequencies to achieve active tuning of terahertz waves. This study has significant application prospects in optical signal processing, optical storage, and slow light devices.

收稿日期: 2020-07-11; 修回日期: 2020-08-12; 录用日期: 2020-08-18

基金项目: 国家科技重大专项课题(2017ZX02101007-003)、国家自然科学基金(61965005)、广西自然科学基金(2019GXNSFDA185010)

*E-mail: glietzw@163.com; **E-mail: syin@guet.edu.cn

Key words spectroscopy; terahertz; electromagnetically induced transparency; indium antimonide; active modulation

OCIS codes 300.6495; 160.3918; 230.4170

1 引言

太赫兹波是一种频率在 0.1~10 THz 之间的电磁波,位于红外波和微波之间。20 世纪 80 年代以前,由于技术和材料的限制,研究人员很难获得太赫兹波,因此,太赫兹波的研究和应用一度呈现出“太赫兹空窗”^[1-4]。近年来,随着科学技术的发展,太赫兹技术在通信、成像、生物医学等领域扮演着重要角色,填补了“太赫兹空窗”^[5-7]。然而,现有的技术手段和材料限制了太赫兹波主动调制的应用和发展,因此,开发全新的技术手段和新材料,对太赫兹波实现快速、高效的主动调控是目前急需解决的问题。超材料是一种由人工结构组成的复合材料,具有自然材料所不具备的物理性质,它的出现解决了太赫兹波主动调控的难题^[8-13]。

电磁感应透明(EIT)是一种三能级原子系统中的干涉效应,该效应会使光在共振频率处的吸收减小,甚至变成透明^[14-17]。由于实验条件的限制,基于量子系统的 EIT 现象难以实现。近年来,研究人员基于超材料提出了许多类 EIT 结构。Zhang 等^[18]提出了由一个竖向金属棒和两个横向金属棒组成的复合结构,其中:竖向金属棒沿着电场方向,其直接与入射电场相互作用,出现了一个明显的共振吸收谱线,因此作为明模;两个横向金属棒与电场方向垂直,不能与入射电磁波作用,因此作为暗模。两者的相互作用在透射谱中形成一个透明峰。Gu 等^[19]设计出了由一个金属棒(CW)和两个开口环(SRRs)组成的超材料单元结构,他们将硅(Si)集成到超材料单元结构中,通过增加泵浦光的激励功率,实现了 EIT 开关的主动控制。Chen 等^[20]提出了由 4 根金属丝和一个正方形金属框架组成的超表面,实现了类 EIT 效应;他们发现,改变基底(VO_2)的电导率可使类 EIT 效应逐渐减弱,从而达到了动态调节类 EIT 效应的目的。He 等^[21]在 SiO_2/Si 衬底上生长了两个石墨烯开口环(SRRs),并将他们分别作为类 EIT 中的明模和暗模;他们发现,通过改变石墨烯的费米能级,可以主动调节类 EIT 的振幅和位置。可见,之前关于类 EIT 调控的研究,大多通过光控、 VO_2 温控以及改变石墨烯费米能级的电控手段,来达到主动控制类 EIT 的目的,而利用温度

控制 EIT 窗口实现可调谐特性的相关研究很少有公开报道。碲化铟(InSb)电子迁移率高,是优良的温控材料,已被广泛应用于吸收器件和探测器件,本文拟利用其温控特性实现 EIT 窗口开关的主动调制^[22-23]。

本文对基于 InSb 太赫兹超材料的 EIT 进行研究。本文展示了一种 F 型 EIT 结构,并对其中的 EIT 现象进行了分析。通过分析 EIT 结构的电场分布,进一步了解了该结构的物理根源和耦合效应。本文研究结果表明:通过改变两个水平 InSb 棒之间的距离以及竖直 InSb 棒与水平 InSb 棒的间隔,可以实现 F 型 EIT 结构透射幅值的调制;通过改变 InSb 的温度,可以实现透明窗口的调谐。发生电磁感应时介质的折射率会发生突变,光的群速度会减小,甚至减小为 0。本文的研究在光存储、光调制和慢光器件等方面具有广阔的应用前景。

2 结构与仿真

图 1 为本设计的结构示意图。图 1(a)为所设计结构的三维示意图,在硅基底上分布着一个竖直 InSb 棒和两个水平 InSb 棒,三个棒组成“F”形,电场沿着 y 方向,磁场沿着 x 方向,电磁波的传播方向为 k 。图 1(b)为结构的二维平面图。对参数进行优化,优化后的结构参数具体如下:所设计结构沿 x 方向的周期 $P_x=70 \mu\text{m}$,沿 y 方向的周期 $P_y=80 \mu\text{m}$,竖直 InSb 棒的长度为 $H=60 \mu\text{m}$,宽度为 $w=7 \mu\text{m}$,

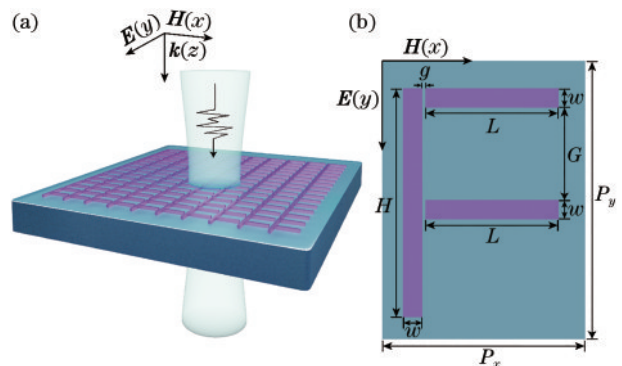


图 1 F 型 EIT 超材料的结构示意图。(a) 结构三维示意图;
(b) 单元结构的二维平面图

Fig. 1 Schematics of F-shape EIT metamaterial structure.
(a) Three-dimensional schematic of the structure;
(b) two-dimensional plane of the unit structure

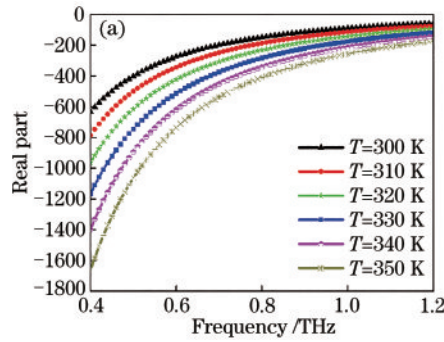
水平 InSb 棒的长度为 $L=45 \mu\text{m}$, 两个水平 InSb 棒的间距为 $G=33 \mu\text{m}$, 竖直 InSb 棒与水平 InSb 棒的间距 $g=2 \mu\text{m}$ 。竖直 InSb 棒和水平 InSb 棒的厚度相同, 都为 $20 \mu\text{m}$ 。基底硅的厚度为 $500 \mu\text{m}$, 折射率 $n=3.7^{[24]}$ 。利用数值仿真软件对结构进行仿真。

在太赫兹波段, InSb 的相对介电常数可以用 Drude 模型描述^[25-27], 即:

$$\epsilon(\omega) = \epsilon_{\infty} - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + i\gamma\omega}, \quad (1)$$

其中,

$$\omega_p = \sqrt{Ne^2/(\epsilon_0 m^*)}, \quad (2)$$



式中: ω 为角频率; ϵ_{∞} 为高频介电常数, $\epsilon_{\infty} = 15.68$; γ 为阻尼常数, $\gamma = 0.1\pi \text{ THz}$; ω_p 为等离子体频率; N 为本征载流子浓度; e 为电子电荷; ϵ_0 为真空介电常数; m^* 为自由载流子的有效质量, $m^* = 0.015 m_e$, m_e 为自由电子质量。

本征载流子浓度的计算公式为^[25-27]

$$N = 5.76 \times 10^{20} T^{1.5} \exp\left[-0.26/(2k_B T)\right], \quad (3)$$

式中: k_B 为波尔兹曼常量; T 为热力学温度。根据 (1) 式和 (3) 式, 分别绘制 InSb 相对介电常数的实部和虚部随温度 T 的变化曲线, 如图 2(a) 和图 2(b) 所示。

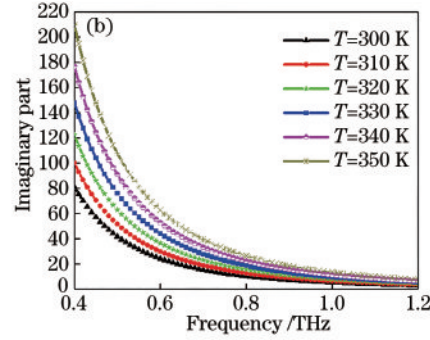


图 2 InSb 相对介电常数随温度的变化。(a) 相对介电常数实部随温度的变化; (b) 相对介电常数虚部随温度的变化
Fig. 2 Variation of relative dielectric constant of InSb with temperature. (a) Variation of real part of relative dielectric constant with temperature; (b) variation of imaginary part of relative dielectric constant with temperature

由图 2 可以看出: InSb 相对介电常数的实部随着频率的增大而增大; 在同一频率处, 相对介电常数的实部随温度的升高而降低, 虚部则随着温度的升高而增大。InSb 的相对介电常数在 300~350 K 之间显示出了很强的温度敏感性, 因此, InSb 是一种优良的温控半导体, 已被广泛应用于探测器、传感器以及滤波器器件的研究领域。

目前, InSb 薄膜的生长方法主要有分子束外延、物理气相沉积(真空蒸发和磁控溅射)和金属有机化学气相沉积等。本次设计以硅为衬底, 采用真空蒸发法在硅衬底上直接生长 InSb 薄膜。该方法具有厚度准确可控、成膜速度快和简单易操作等优点, 已被广泛应用于太赫兹器件衬底的沉积。具体过程如下: 先进行加热, 将固相 InSb 变为气相, InSb 气相粒子从蒸发源运输至硅衬底上, 完成沉积。

3 结果与分析

当平面电磁波正入射到超表面时, 因为电场沿着 y 方向, 竖直的 InSb 棒作为电偶极子, 直接被平面电磁波激发。竖直的 InSb 棒作为 EIT 中的明模, 而水

平的两个 InSb 棒作为四级子, 不能被平面电磁波激发, 作为 EIT 中的暗模。然而, 若将竖直的 InSb 棒和两个水平的 InSb 棒放在一起, 在平面电磁波入射时, 明模和暗模之间就会发生干涉相消效应, 在共振频率处出现一个透明窗口。为了验证所提超材料中明模和暗模中的耦合效应, 本文在温度为 300 K 的条件下, 分别对竖直的 InSb 棒、两个水平的 InSb 棒以及整体结构的透射谱进行了仿真, 结果如图 3 所示。

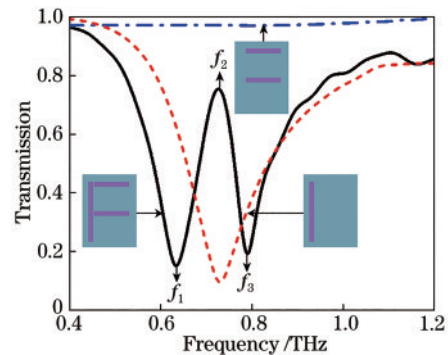


图 3 竖直 InSb 棒、两个水平 InSb 棒和整体结构的透射谱
Fig. 3 Transmission spectra of vertical InSb bar, two horizontal InSb bars, and the overall structure

为了解释说明 F 型 EIT 结构电磁感应透明现象中的耦合效应和物理机理, 本文分别在温度为 300 K 时, 对 F 型 EIT 结构透射谱中两个透射谷

($f_1 = 0.634$ THz, $f_3 = 0.791$ THz) 和透明窗口 ($f_2 = 0.726$ THz) 处的电场分布进行了仿真, 结果如图 4 所示。

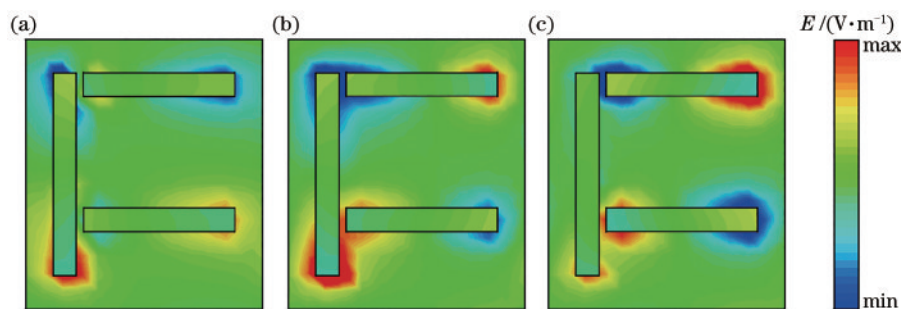


图 4 F 型 EIT 超材料结构在不同频率处的电场分布。(a) 在 f_1 处的电场分布; (b) 在 f_3 处的电场分布; (c) 在 f_2 处的电场分布
Fig. 4 Electric field distribution of F-shape EIT metamaterial structure at different frequencies. (a) Electric field distribution at frequency of f_1 ; (b) electric field distribution at frequency of f_3 ; (c) electric field distribution at frequency of f_2

图 4(a)、(b) 分别显示了 F 型 EIT 超材料结构在 f_1 和 f_3 两个透射谷处的电场分布。可以看出, 由于垂直 InSb 棒受到了入射电磁波的激发, 所以电场主要集中在垂直 InSb 棒上, 而两个水平 InSb 棒的电场分布较弱。由电场分布可知, 此时垂直 InSb 棒相当于一个电偶极子, 工作在明模式状态下, 而两个水平 InSb 棒为暗模。图 4(c) 显示了 F 型 EIT 超材料结构在频率点 f_2 (透明窗口) 处的电场分布, 可以看出, 电场主要集中在两个水平 InSb 棒上。这是由于明模谐振器上的能量通过近场耦合作用被耦合到了暗模谐振器上, 发生了相干相消, 形成了 EIT 透明窗口, 同时抑制了明模谐振器上偶极子的振荡。同时还可以发现, 垂直 InSb 棒的下半部分还存在部分电场, 这是由结构的不对称引起的。下面分析两个水平 InSb 棒之间的距离对结果的影响。

图 5 显示了在保持其他结构参数不变的情况下, 当两个水平 InSb 棒之间的距离 G 变化时, F 型 EIT 结构透明窗口的变化规律 (温度为 300 K)。由图 5 可知: 当 $G = 0 \mu\text{m}$ 时, 观察不到透明窗口, 仅有一个透射谷。这是因为当两个水平 InSb 棒合成一个宽的水平 InSb 棒时, 明模谐振器 (垂直 InSb 棒) 的偶极子共振可以被入射的电磁波激发, 而暗模谐振器 (水平 InSb 棒) 的共振不能被入射的电磁波激发, 从而导致 EIT 透明窗口消失。当 G 从 $0 \mu\text{m}$ 逐渐变化到 $46 \mu\text{m}$ 时, EIT 透明窗口逐渐变大, 透射率上升, 同时 EIT 透明窗口会向频率高处略微平移 (可以忽略不计)。

图 6 给出了在保持其他结构参数不变的情况下, 垂直 InSb 棒与水平 InSb 棒的间隔 g 发生变化时, F 型 EIT 结构透明窗口的变化规律 (温度为 300 K)。

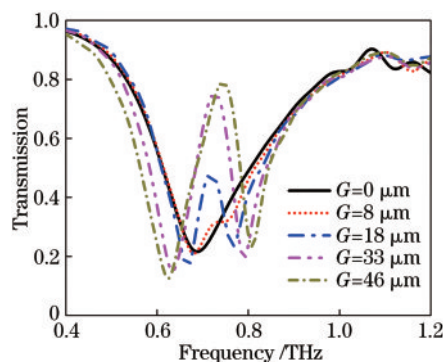


图 5 改变两个水平 InSb 棒距离 G 时的透射谱
Fig. 5 Transmission spectrum when changing the distance G between two horizontal InSb bars

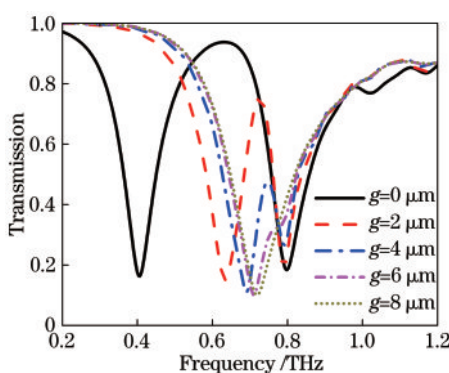


图 6 改变垂直 InSb 棒与水平 InSb 棒间隔 g 时的透射谱
Fig. 6 Transmission spectrum when changing the distance g between vertical InSb bar and horizontal InSb bars

当 $g = 0 \mu\text{m}$ 时, EIT 透明窗口的透射率比 g 为其他值时大, 同时透明窗口的半峰全宽最大。当 $g = 2 \mu\text{m}$ 时, 结构的半峰全宽变小。这是因为, 随着间距 g 增加, 明模和暗模之间的耦合系数减小, 损耗减小, 导

致半峰全宽变小。随着 g 继续增大, EIT 透明窗口的透射率逐渐减小, 当 $g=8 \mu\text{m}$ 时, 透明窗口消失, 只有一个透射谷。这是由于明模谐振器和暗模谐振器之间的距离过大, 导致明模和暗模之间的耦合强度不足, 无法维持双方的共振, 因此透明窗口消失。可见, 通过改变两个水平 InSb 棒之间的距离 G 以及竖直 InSb 棒与水平 InSb 棒之间的距离 g 都可以实现 F 型 EIT 结构透射振幅的可调性。

由(1)式和(3)式可知, InSb 的介电常数具有温度敏感特性。以上仿真分析都是在温度为 300 K 时进行的, 接下来本文通过仿真来研究温度对 EIT 透明窗口的影响。仿真结果如图 7 所示。

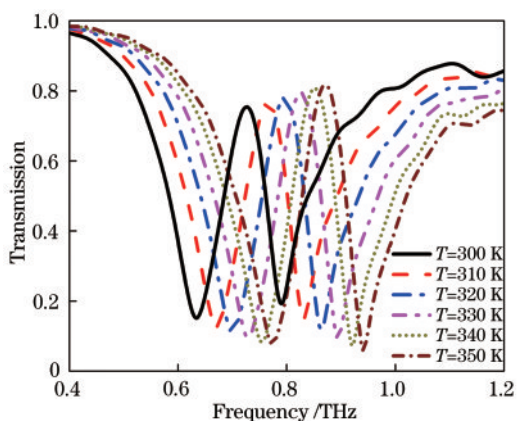


图 7 不同温度下的透射谱

Fig. 7 Transmission spectra at different temperatures

图 7 给出了在保持其他结构参数不变的情况下, 所设计的 F 型 EIT 结构在 300~350 K 温度区间的透射谱。由图 7 可知, 当温度不断升高时, EIT 透明窗口的中心频率向高频处移动。这是因为温度升高导致 InSb 的介电常数实部减小, 所以介质的折射率将会减小, 而结构的共振频率与折射率成反比关系。因此, 升高温度将会导致 EIT 透明窗口的中心频率向高频移动。

4 结 论

本文设计了一种 F 型 EIT 结构, 其单元结构由一个竖直的 InSb 棒和两个水平的 InSb 棒组成。本文分析了该 F 型 EIT 结构在不同频率点处的电场分布, 进一步分析了其中的物理机制。经过仿真可知: 分别改变明模谐振器与暗模谐振器的距离以及组成暗模谐振器的两个水平 InSb 棒的间距, 实现了 EIT 透明窗口振幅的可调性。最后, 鉴于 InSb 的温度敏感特性, 本文仿真了不同温度下 F 型 EIT 结构

的 EIT 透射谱, 结果表明, 随着温度逐渐升高, EIT 透明窗口向高频移动。本研究结果在光开关、光缓冲和热调谐器件等方面具有潜在的应用价值。

参 考 文 献

- [1] Sollner T C L G, Goodhue W D, Tannenwald P E, et al. Resonant tunneling through quantum wells at frequencies up to 2.5 THz[J]. Applied Physics Letters, 1983, 43(6): 588-590.
- [2] Tonouchi M. Cutting-edge terahertz technology[J]. Nature Photonics, 2007, 1(2): 97-105.
- [3] Tao H, Landy N I, Bingham C M, et al. A metamaterial absorber for the terahertz regime: design, fabrication and characterization[J]. Optics Express, 2008, 16(10): 7181-7188.
- [4] Yin S, Shi X T, Huang W, et al. Two-bit terahertz encoder realized by graphene-based metamaterials[J]. Electronics, 2019, 8(12): 1528.
- [5] Wu Q, Hewitt T D, Zhang X C. Two-dimensional electro-optic imaging of THz beams[J]. Applied Physics Letters, 1996, 69(8): 1026-1028.
- [6] Song H J, Nagatsuma T. Present and future of terahertz communications[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2011, 1(1): 256-263.
- [7] Ferguson B, Zhang X C, Zhang X C. Materials for terahertz science and technology[J]. Nature Materials, 2002, 1(1): 26-33.
- [8] Neu J, Krolla B, Paul O, et al. Metamaterial-based gradient index lens with strong focusing in the THz frequency range[J]. Optics Express, 2010, 18(26): 27748-27757.
- [9] Zhu W M, Liu A Q, Zhang W, et al. Polarization dependent state to polarization independent state change in THz metamaterials[J]. Applied Physics Letters, 2011, 99(22): 221102.
- [10] Williams C R, Andrews S R, Maier S A, et al. Highly confined guiding of terahertz surface plasmon polaritons on structured metal surfaces[J]. Nature Photonics, 2008, 2(3): 175-179.
- [11] Lee S H, Choi M, Kim T T, et al. Switching terahertz waves with gate-controlled active graphene metamaterials[J]. Nature Materials, 2012, 11(11): 936-941.
- [12] Yuan Y H, Chen X Y, Hu F R, et al. Terahertz amplitude modulator based on metasurface/ion-gel/graphene hybrid structure[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(6): 0614016.

袁莹辉, 陈懿宇, 胡放荣, 等. 基于人工超表面/离

- 子凝胶/石墨烯复合结构的太赫兹调幅器件[J]. 中国激光, 2019, 46(6): 0614016.
- [13] Gao H, Yan F P, Tan S Y, et al. Design of ultrathin broadband terahertz metamaterial absorber based on patterned graphene[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(7): 0703024.
高红, 延凤平, 谭思宇, 等. 基于有图案石墨烯的超薄宽带太赫兹超材料吸收体的设计[J]. 中国激光, 2017, 44(7): 0703024.
- [14] Hu B J, Huang M, Li P, et al. Multiband plasmon-induced transparency based on silver nanorods and nanodisk hybrid model[J]. Acta Physica Sinica, 2020, 69(13): 134202.
胡宝晶, 黄铭, 黎鹏, 等. 基于纳米盘棒耦合的多频段等离激元诱导透明研究[J]. 物理学报, 2020, 69(13): 134202.
- [15] Wang L, Guo X, Zhang Y, et al. Enhanced THz EIT resonance based on the coupled electric field dropping effect within the undulated meta-surface [J]. Nanophotonics, 2019, 8(6): 1071-1078.
- [16] Hamam R E, Karalis A, Joannopoulos J D, et al. Efficient weakly-radiative wireless energy transfer: an EIT-like approach[J]. Annals of Physics, 2009, 324(8): 1783-1795.
- [17] Zhang C, Wu J, Jin B, et al. Tunable electromagnetically induced transparency from a superconducting terahertz metamaterial [J]. Applied Physics Letters, 2017, 110(24): 241105.
- [18] Zhang S, Genov D A, Wang Y, et al. Plasmon-induced transparency in metamaterials [J]. Physical Review Letters, 2008, 101(4): 047401.
- [19] Gu J, Singh R, Liu X, et al. Active control of electromagnetically induced transparency analogue in terahertz metamaterials[J]. Nature Communications, 2012, 3(1): 1151.
- [20] Chen M M, Xiao Z Y, Lu X J, et al. Dynamically tunable multi-resonance and polarization-insensitive electromagnetically induced transparency-like based on vanadium dioxide film[J]. Optical Materials, 2020, 102: 109811.
- [21] He X, Huang Y, Yang X, et al. Tunable electromagnetically induced transparency based on terahertz graphene metamaterial [J]. RSC Advances, 2017, 7(64): 40321-40326.
- [22] Zhu J, Han J G, Tian Z, et al. Thermal broadband tunable terahertz metamaterials[J]. Optics Communications, 2011, 284(12): 3129-3133.
- [23] Luo H, Cheng Y Z. Thermally tunable terahertz metasurface absorber based on all dielectric indium antimonide resonator structure[J]. Optical Materials, 2020, 102: 109801.
- [24] Yang Y, Kravchenko I I, Briggs D P, et al. All-dielectric metasurface analogue of electromagnetically induced transparency[J]. Nature Communications, 2014, 5: 5753.
- [25] Nozhat N. Tunable terahertz plasmon-induced transparency with aperture-side-coupled disk resonators [J]. Optical Engineering, 2017, 56(5): 057101.
- [26] Liu H Q, Ren G B, Gao Y X, et al. Tunable subwavelength terahertz plasmon-induced transparency in the InSb slot waveguide side-coupled with two stub resonators[J]. Applied Optics, 2015, 54(13): 3918-3924.
- [27] Li Y, Su Y, Zhai X, et al. A novel modulation mechanism in plasmon-induced transparency waveguide [J]. EPL, 2019, 125(3): 34002.