

文章编号: 1672-8785(2023)01-0032-07

基于 EIT 超材料的太赫兹慢光效应研究进展

金嘉升 马成举* 李东明 张 焱 李 咪

鲍士仟 刘 洺 刘芊震 张贻歆

(西安石油大学理学院, 陕西 西安 710065)

摘 要: 太赫兹(Terahertz, THz)波在无线通信、生物医学、无损检测、军用雷达等领域具有潜在的应用前景。研究 THz 慢光效应对 THz 通信和检测技术具有非常重要的实际意义。目前已报道的 THz 慢光效应研究还面临一系列问题。由于具有结构设计灵活和电磁特性可设计的特点, 电磁诱导透明(Electromagnetically Induced Transparency, EIT)超材料为 THz 慢光效应提供了崭新的研究平台。介绍了基于 EIT 超材料的 THz 慢光效应的基本原理以及近年来的研究进展, 并对 THz 慢光效应的发展趋势进行了分析和展望。

关键词: 超材料; 太赫兹; 慢光效应; 电磁诱导透明

中图分类号: TB34;O436 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2023.01.005

Research Progress of Terahertz Slow-Light Effect Based on EIT Metamaterials

JIN Jia-sheng, MA Cheng-ju*, LI Dong-ming, ZHANG Yao, LI Mi,

BAO Shi-qian, LIU Ming, LIU Qian-zhen, ZHANG Yi-xin

(School of Science, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China)

Abstract: Terahertz (THz) waves have potential applications in wireless communication, biomedicine, nondestructive testing, military radar and other fields. It is of great practical significance to study THz slow light response to THz communication and detection technology. At present, the reported researches on the slow light effect of THz still face a series of problems. Because EIT metamaterial has a flexible structure and designable electromagnetic properties, it offers a new research platform for THz slow light effect. In this paper, the basic principle and research progress of THz slow light effect based on EIT metamaterials are introduced, and the development trend of THz slow light effect is analyzed and prospected.

Key words: metamaterials; terahertz; slow light effect; electromagnetically induced transparency

收稿日期: 2022-09-21

基金项目: 西安石油大学创新与实践能力的培养项目(YCS20213210)

作者简介: 金嘉升(1997-), 男, 陕西咸阳人, 硕士, 主要研究方向为基于超材料的太赫兹慢光效应。

***通讯作者:** E-mail: chengjuma@xsyu.edu.com

0 引言

THz 波通常是指频率为 0.1~10 THz(波长为 0.03~3 mm)的电磁波, 处于微波与红外光之间(见图 1)^[1]。由于在电磁波谱中所处位置特殊, THz 波具有安全性、瞬态性、宽带性、相干性、强穿透性等诸多优点, 因此在无线通信^[2]、生物医学^[3]、无损检测^[4]、军用雷达^[5]等

领域具有潜在的应用前景。在无线通信领域, 因为 THz 通信兼具微波通信和光通信的优点, 具有更高的频率和带宽、更强的穿透能力和抗干扰能力, 所以受到了研究人员的广泛关注。作为 THz 通信中的关键技术, 慢光技术可以用于制作光开关、光传感器、光缓存器等光学器件, 因此具有非常重要的研究价值。

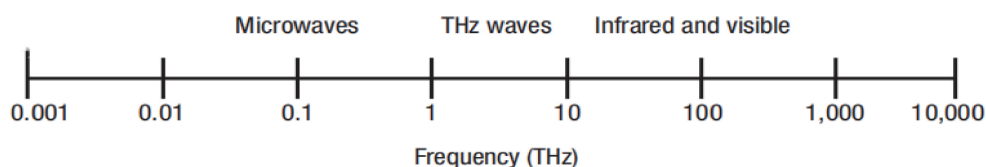


图 1 THz 波在电磁光谱中的位置^[1]

慢光效应是指光在通过高色散介质时群速度减慢的现象^[6]。在 THz 波段, 慢光效应可以通过光子晶体^[7]、光栅波导^[8]、半导体光学放大器^[9]、EIT 超材料^[10]等方式来实现。相比于其他方式, EIT 超材料可以通过人工设计来定制超材料的电磁特性, 具有易于集成、结构简单等优点。而且它产生的 THz 慢光可以主动调谐, 因此是实现 THz 慢光的一个重要途径。当 THz 脉冲入射 EIT 超材料时, 由于两种谐振模式的耦合会在两个谐振频率中间出现一个透射窗口, 所以在透射窗口处会产生大的正常色散, 使 THz 脉冲的群速度减慢而产生 THz 慢光。基于 EIT 超材料的 THz 慢光在光开关^[11]、光存储^[12]、非线性光学^[13]等方面具有潜在的应用价值。但是现有的技术还不太成熟, 导致 EIT 超材料的加工成本较高, 因此大多数研究仍在仿真模拟和实验测试阶段, 还未应用于实际生活。

为了系统阐述基于 EIT 超材料的太赫兹慢光效应最新的研究进展, 本文简要介绍了基于超材料的类 EIT 效应和 THz 慢光效应的基本原理, 分类说明了几种 EIT 超材料慢光的研究进展以及各自的优势和缺陷, 最后对基于 EIT 超材料的 THz 慢光效应的发展趋势进行了分析和展望。

1 基于 EIT 超材料的 THz 慢光效应基本原理

EIT 效应最早是在原子系统中提出的。该系统共有三个能级, 分别是处于基态的能级 $|0\rangle$ 、亚稳态的能级 $|1\rangle$ 和激发态的能级 $|2\rangle$ (见图 2)。激发态 $|2\rangle$ 中的原子来自于两个路径: 一个是由 $|0\rangle \rightarrow |2\rangle$; 另一个是由 $|0\rangle \rightarrow |2\rangle \rightarrow |1\rangle \rightarrow |2\rangle$ 。来自这两个不同路径的原子在激发态 $|2\rangle$ 上进行相消干涉, 使得处在谐振频率处的原子对探测光的吸收受到抑制, 从而出现一个透明窗口。因此原本不透明的介质在谐振频率处变得透明, 这就是“EIT”现象的由来^[14]。在 EIT 系统中, 最关键的就是这个亚稳态能级, 所以想在超材料中实现 EIT 效应, 必须类比原子系统中的跃迁, 人工制作一个类似亚稳态能级的结构。

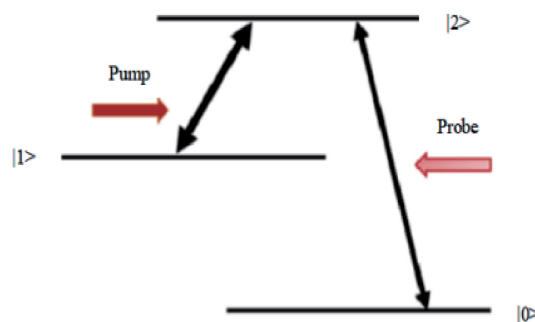


图 2 三能级原子图^[14]

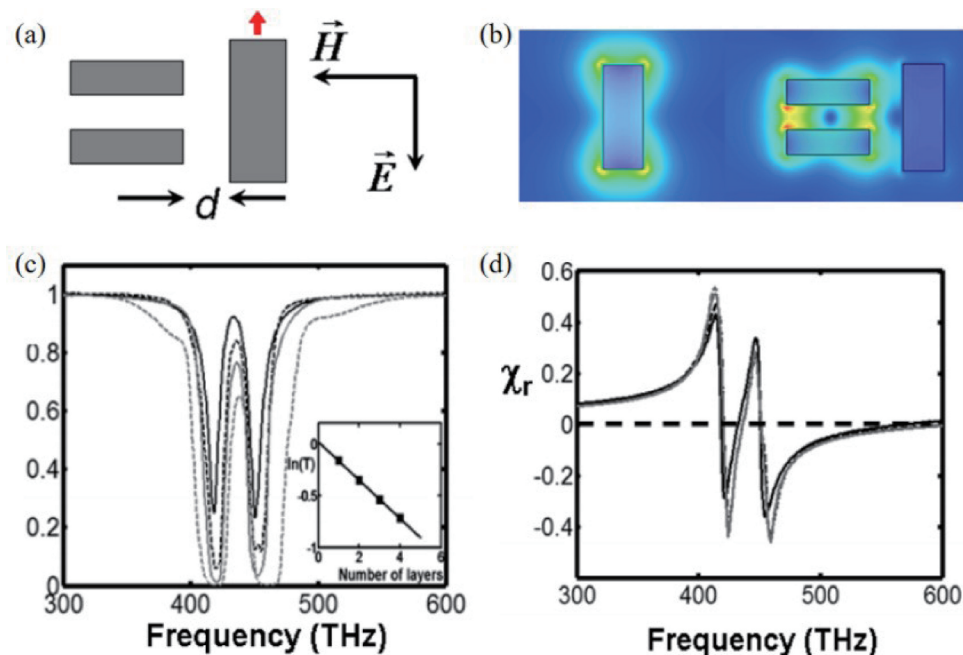


图 3 超材料结构和测试结果^[17]: (a) 结构图; (b) 438.4 THz 处超材料的电场图; (c) 不同层数 EIT 超材料的透射光谱; (d) 磁化率实部与频率的关系曲线

在超材料中, 谐振器是基本单元。超材料通过对各种谐振器进行组合来实现不同的功能。将 $|0\rangle \rightarrow |2\rangle$ 能级跃迁类比成超材料中的“明模”谐振器, “明模”可以由入射辐射直接激发; 将 $|0\rangle \rightarrow |2\rangle \rightarrow |1\rangle \rightarrow |2\rangle$ 能级跃迁类比成“暗模”谐振器, “暗模”由“明模”间接激发。将“明模”与“暗模”以一定的距离放置后, 它们相互耦合, 发生相消干涉, 从而实现 EIT 效应^[15-16]。图 3 所示为 Zhang S 等人提出的一个典型的超材料结构。他们将“暗模”与“明模”以一定的距离放置后, 电磁场在两个模式间产生相互耦合, “明模”的激发态被抑制, 电场变弱, 转而“暗模”展现出强电场, 耦合强弱由它们之间的距离决定。在传输谱上展现出透明峰, 极化率的实部也展现出明显的色散现象, 表明光脉冲在超材料结构中以更低的群速度传播^[17]。

当光脉冲入射超材料结构时, 会在透明窗口附近产生强色散, 同时相位会发生剧烈变化且光速减慢。这是类 EIT 效应的一个重要的特性。当入射光的群速度减慢时, 光与物质的作用时间会增加, 导致光损耗增大。入射光在超

材料结构中的群速度可以表示为^[18]

$$v_g = \frac{c}{n_g} \quad (1)$$

式中, v_g 为入射光的群速度; c 为光在真空中的传播速度; n_g 为群折射率。群折射率是反映慢光性能的一个重要物理量, 可通过以下公式计算^[19-20]:

$$\tau_g = \frac{d(\varphi_a - \varphi_b)}{d\omega} \quad (2)$$

$$n_g = \frac{c}{L} \tau_g \quad (3)$$

式中, τ_g 为群延迟; φ_a 和 φ_b 为入射光在通过超材料和衬底时的相位; ω 为角频率; L 为超材料的厚度。群折射率和群延迟越大, 光脉冲在超材料中的群速度越小, 慢光性能就越好。

2 基于 EIT 超材料的 THz 波慢光效应研究进展

基于超材料的 EIT 效应是 Zhang S 等人^[17]在 2008 年提出的, 之后 EIT 超材料得到了科研人员的极大关注, 利用 EIT 超材料实现慢光效应的研究方法被不断报道。通过改变超材料单元材料和结构, 研究人员分别在微波、THz

波和光波等波段实现了 EIT 效应。

2.1 不可调谐的 EIT 超材料慢光效应

近十几年来, 超材料在实现慢光效应方面得到了广泛的应用。在研究初期, 超材料慢光效应大多是不可主动调谐的。人们利用金、银、铝等金属材料设计超材料微结构, 并通过改变微结构参数来优化其慢光性能。Chiam S Y 等人^[21]采用质子束写入技术在硅衬底上加工 Au 金属超材料结构(见图 4(a))。该结构由闭口谐振环和开口谐振环组合而成。两者在 1.25 THz 处发生耦合, 出现了一个明显的透明窗口。从图 4(b)中可以看出, 透射窗口附近产生了很大的正色散, 群折射率最高可达到 75。由于金属超材料的损耗较大, 人们利用全介质硅设计了一种全介质超材料, 实现了 THz 脉冲的低损耗传输。Ma T 等人^[22]在聚二甲硅氧烷衬底上旋涂了一种硅片结构。该超材料结构由两个相同的以镜像对称方式排列的开口环形谐振器组成(见图 4(c))。结果表明, 他们提出的超材料在 0.78 THz 处的群延迟约为 28.9 ps。同时, 多频点的慢光效应受到了研究人员很大的关注。通过将“暗模”、“准暗模”和“明模”集成在同一结构中, 可以在多个频点处实现慢光效应。孙占硕等人^[23]提出了一种

由三组“明模”组成的超材料结构(见图 4(e))。结果表明, 该结构分别在 1.318 THz 和 1.459 THz 处实现了类 EIT 效应, 两个类 EIT 窗口的最大群时延分别为 9.98 ps 和 6.23 ps。

以上这些工作为在多频点实现慢光效应提供了一种研究思路。目前, 利用超材料在 THz 波段实现慢光效应的研究大多数都是偏振敏感的, 但是在实际应用中 THz 波的偏振态会在传播过程中发生改变, 因此设计一种偏振不敏感的超材料结构是非常有必要的。Zhao Z Y 等人^[24]设计了一种晶格对称结构, 通过旋转结构测出不同偏振态时的透射光谱。结果表明, 该研究可实现的最大群延迟为 38 ps。

综上所述, 早期的超材料慢光通过设计电磁参数来调控。研究人员将金属、半导体、全介质等材料应用于超材料结构, 设计出各种具有良好慢光特性的超材料结构。随着研究的深入和实际应用需求的提升, 多波段、偏振不敏感的超材料结构逐渐被提出。但是这种超材料大部分是通过设计结构参数来调控慢光性能。超材料制作完成后, 工作特性就会固定在特定频率内。一旦应用场景发生改变, 就必须重新对结构进行设计, 限制了超材料慢光在实际生活中的应用。

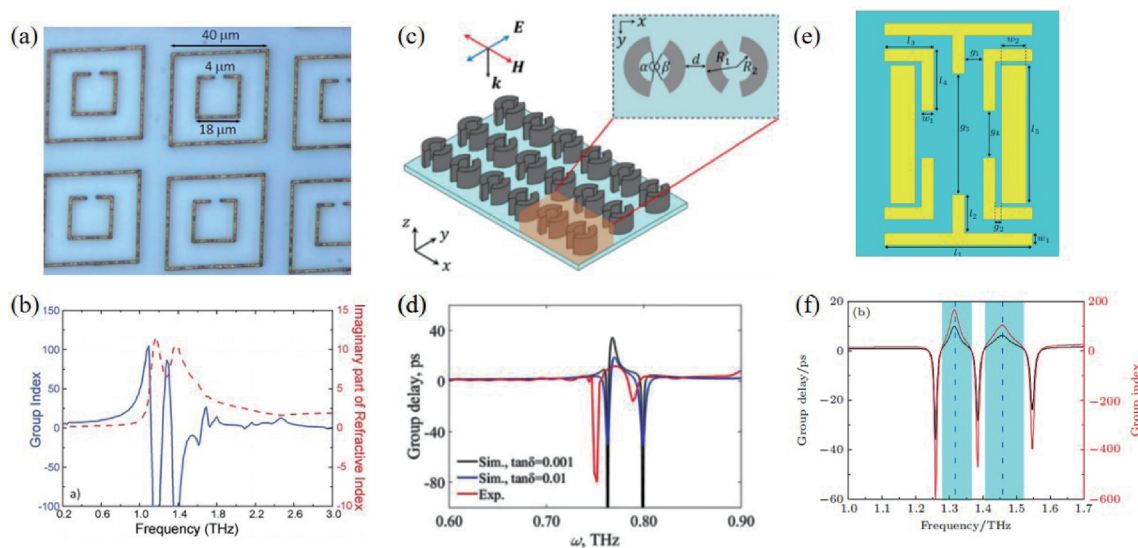


图 4 Chiam S Y 等人设计的超材料结构(a)及其群折射率(b); Ma T 等人设计的超材料结构(c)及其群延迟(d); 孙占硕等人设计的超材料结构(e)及其群折射率(f)

2.2 可调谐的 EIT 超材料慢光

在实际应用中,需要一种可主动调节慢光特性的超材料结构来适应各种复杂的环境。主动可调超材料的出现为实用型超材料慢光提供了新的技术途径。将对外部激励条件敏感的材料引入超材料结构中,再通过改变超材料外部激励条件(如温度、光、偏置电压等)就可以实现慢光效应的主动调谐。

2.2.1 温度调谐的 EIT 超材料慢光

温度调谐的慢光大多数都是通过相变材料(VO_2 、GST 等)来实现的。随着温度升高,相变材料会在相变温度处实现非晶态和晶态之间的转变,且相变材料的载流子密度和载流子迁移率也会增加,从而可以实现慢光效应的主动调谐。Li Q 等人^[25]设计了一种由弯曲线和 U 型谐振器组成的超材料结构(见图 5(a)和图 5(b))。由于 VO_2 的电导率可以随温度变化,通过将 VO_2 加入超材料结构能够实现温度调谐的慢光。当 VO_2 的电导率从 $1 \times 10^4 \text{ S/m}$ 变化到 $5 \times 10^5 \text{ S/m}$ 时,透射窗口的调制深度为 49%,相应的群延迟从 5.56 ps 逐渐增加到 7.18 ps。改变温度虽然可以实现慢光效应的主动调谐,但是实现方式较为困难且调谐速度较慢,不利于超材料慢光的实际应用。

2.2.2 电调谐的 EIT 超材料慢光

现阶段电调谐的慢光器件一般是将石墨烯、狄拉克半金属、超导体等作为原材料或涂覆层,进而实现慢光的主动调谐。石墨烯超材料具有结构简单、体积轻薄、损耗低等优点。通过将石墨烯与超材料结合,能够在 THz 波段实现电调谐的慢光效应。Wang Y X 等人^[26]提出了一种以 SiO_2 为基底的 n 型石墨烯超表面(见图 5(c)和图 5(d))。该结构可以通过改变费米能级和载流子迁移率来实现慢光效应的主动调谐。当费米能级为 1.1 eV 且载流子迁移率为 $5 \text{ m}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,最大群折射率为 2510。但是作为一种超薄的二维材料,石墨烯的制作工艺限制了其导电性能,并且石墨烯超

材料的损耗较大,在很大程度上限制了它在慢光方面的应用。而超导超材料由于极低的欧姆损耗引起了广泛的关注。Li C 等人^[27]利用超导材料氮化铌设计了一种电调谐的超材料结构。当电压从 0 V 增加到 3.6 V 时,EIT 窗口的调制深度为 86.8%,最大群延迟可以达到 25.4 ps。

2.2.3 光调谐的 EIT 超材料慢光

由于硅、锗、过渡金属硫化物(MoS_2 、 WSe_2 、 WS_2 等)、砷化镓、钙钛矿等材料的电导率可以通过改变照射光强来调控,可在超材料结构中引入这些光敏材料来调节泵浦光的光功率并改变材料的电导率,从而实现慢光效应的主动调谐。Zhou J H 等人^[28]设计了一种由硅和锗混合而成的超材料结构(见图 5(e)和图 5(f))。该结构由蓝宝石衬底、硅膜、金谐振器和锗膜构成。当硅或锗薄膜被超快光脉冲激发时,在 0.65 THz 处会出现一个 EIT 窗口。通过调节泵浦光功率,可以实现光可调群延迟(最大群延迟为 11 ps)。作为一种新型二维半导体材料,过渡金属硫化物对泵浦光的响应时间比传统光敏材料 Si 和 Ge 更短。Hu Y Z 等人^[29]将多层 WSe_2 薄膜转移到设计的超材料结构上,通过调节泵浦光功率实现了慢光效应的主动调谐。当泵浦光通量从 $0 \mu\text{J}/\text{cm}^2$ 增加到 $800 \mu\text{J}/\text{cm}^2$ 时,EIT 窗口的调制幅度为 43%,最大群延迟为 11 ps。光调谐的 EIT 超材料具有调谐速度快、可与当前微电子和光电器件技术平台集成的优势,是实现超快慢光调谐的一个重要研究方向。但是光调谐的 EIT 超材料加工成本较高,且加工工艺较为复杂。

综上所述,主动可调的超材料 THz 慢光可以通过温度调谐、电调谐、光调谐等方式实现。虽然现有的研究可以实现慢光效应的主动调谐,但是还存在诸多问题。为了适应未来多功能器件的发展,仍然需要更深入地研究主动可调的超材料慢光。

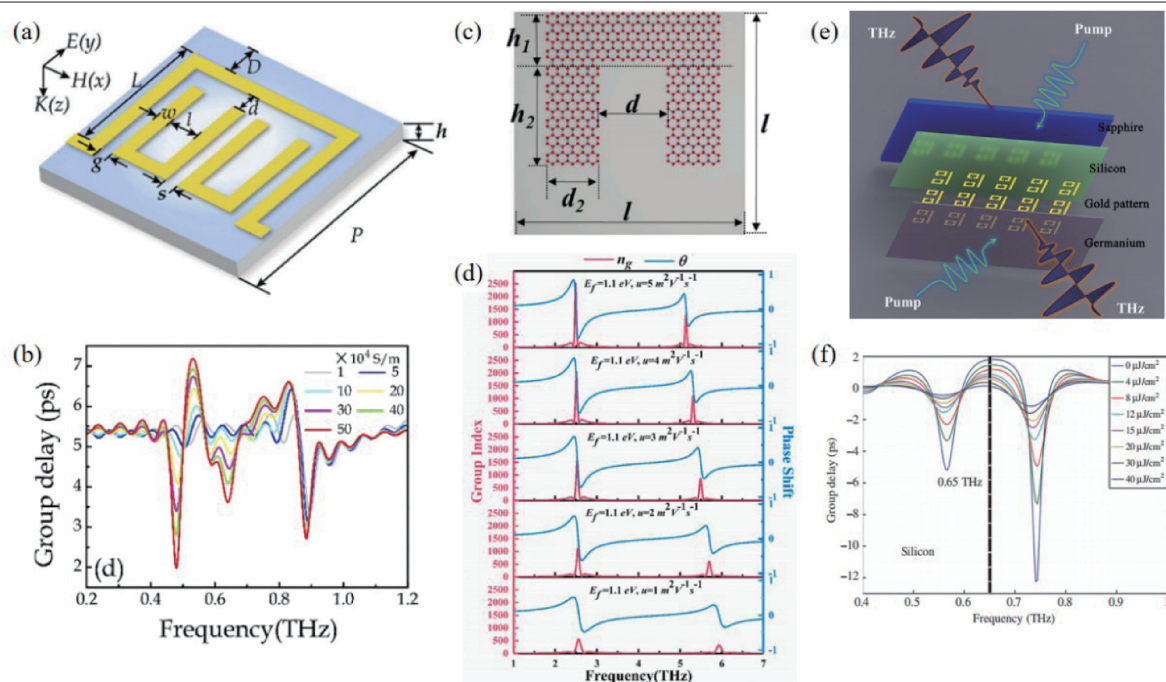


图 5 Li Q 等人设计的超材料结构(a)及其群折射率(b); Wang Y X 等人设计的超材料结构(c)及其群延迟(d); Zhou J H 等人设计的超材料结构(e)及其群折射率(f)

3 总结与展望

基于 EIT 超材料实现 THz 慢光效应是该领域的一个重要方向, 倍受国内外科研人员的关注。本文介绍了近年来基于 EIT 超材料的 THz 慢光效应的研究进展, 重点讨论了不可主动调谐和主动调谐的基于 EIT 超材料的 THz 慢光效应。THz 慢光可将 THz 信号减慢, 有利于实现 THz 信号的处理和存储, 并且能够促进光与物质的相互作用、增强物质的非线性效应, 因此在光开关、光传感、光缓存等方面有着广泛的应用前景。但是, 基于 EIT 超材料的 THz 慢光目前还面临着诸多问题(如 EIT 超材料加工工艺较为复杂、制作成本较高、THz 慢光带宽较窄等), 无疑限制了 THz 慢光的进一步发展。

基于 EIT 超材料的 THz 慢光效应未来有可能向以下几个方面发展: (1)随着微结构加工技术的不断进步, 超材料结构的精度会越来越高。(2)基于 EIT 超材料的 THz 慢光的带宽较窄, 不利于 THz 慢光的实际应用。通过不断改良材料和结构, THz 慢光的带宽将会不断拓宽。(3)现在基于 EIT 超材料的 THz 慢光

大多数是偏振敏感的, 但是在实际应用中偏振不敏感的 THz 慢光有更多的需求。经过科研人员的不断努力, 更多偏振不敏感的 THz 慢光器件将会被设计出来。随着 EIT 超材料研究的日益深入和制作工艺的不断进步, 未来基于 EIT 超材料的 THz 慢光将会向低成本、低损耗、多频点、高性能、偏振不敏感等方向发展, 以满足不同环境下对 THz 慢光的更高要求。

参考文献

- [1] Tonouchi M. Cutting-edge terahertz technology [J]. *Nature Photonics*, 2007, **1**: 97–105.
- [2] 杨雄伟, 赵峰. 基于开关控制调制的光载太赫兹正交相移键控信号产生 [J]. *光学学报*, 2022, **42**(8): 92–99.
- [3] 孙旭东, 刘俊彬. 茶叶夹杂昆虫异物 THz 光谱检测研究 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2021, **41**(9): 2723–2728.
- [4] 潘钊, 李宗亮, 张振伟, 等. 基于 THz-TDS 的陶瓷纤维复合材料缺陷检测分析 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2022, **42**(5): 1547–1552.
- [5] 张成鑫, 鄢扬, 傅文杰, 等. 基于 0.22 THz 高

- 功率回旋管的步进频率雷达系统设计与仿真 [J]. *红外与毫米波学报*, 2020, **39**(6): 728–734.
- [6] Krauss T F. Why do we need slow light [J]. *Nature Photonics*, 2008, **2**: 448–450.
- [7] Settle M D, Engelen R J P, Salib M, et al. Flat-band slow light in photonic crystals featuring spatial pulse compression and terahertz bandwidth [J]. *Optics Express*, 2007, **15**(1): 219–226.
- [8] Wang G X, Lu H, Liu X M. Trapping of surface plasmon waves in graded grating waveguide system [J]. *Applied physics letters*, 2010, **101**(1): 013111.
- [9] Sedgwick F G, Pesala B, Lin J Y, et al. THz-bandwidth tunable slow light in semiconductor optical amplifiers [J]. *Optics Express*, 2007, **15**(2): 747–753.
- [10] Cui W, Wang Y X, He Z H, et al. Strong slow-light effect for a hexagonal graphene coupled metasurface in terahertz [J]. *Results in Physics*, 2021, **26**(8): 104356.
- [11] Hu X Z, Zheng D Y, Lin Y S. Actively tunable terahertz metamaterial with singleband and dual-band switching characteristic [J]. *Applied Physics A*, 2020, **126**(2): 1–9.
- [12] Heinze G, Hubrich C, Halfmann T. Stopped light and image storage by electromagnetically induced transparency up to the regime of one minute [J]. *Physical Review Letters*, 2013, **111**(3): 033601.
- [13] Eisaman M D, André A, Massou F, et al. Electromagnetically induced transparency with tunable single-photon pulses [J]. *Nature*, 2006, **438**(7069): 837–841.
- [14] Yahiaoui R, Burrow J A, Mekonen S M, et al. Electromagnetically induced transparency control in terahertz metasurfaces based on bright-bright mode coupling [J]. *Physical Review B*, 2018, **97**(15): 155403.
- [15] Devi K M, Sarma A K, Chowdhury D R, et al. Plasmon induced transparency effect through alternately coupled resonators in terahertz metamaterial [J]. *Optics express*, 2017, **25**(9): 10484–10493.
- [16] Liu X J, Gu J Q, Singh R, et al. Electromagnetically induced transparency in terahertz plasmonic metamaterials via dual excitation pathways of the dark mode [J]. *Applied Physics Letters*, 2012, **100**(13): 131101.
- [17] Zhang S, Genov D A, Wang Y, et al. Plasmon-induced transparency in metamaterials [J]. *Physical Review Letters*, 2008, **101**(4): 047401.
- [18] Niakan N, Askari M, Zakery A. High Q-factor and large group delay at microwave wavelengths via electromagnetically induced transparency in metamaterials [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2012, **29**(9): 2329–2333.
- [19] Sun H, Hu Y Z, Tang Y H, et al. Ultrafast polarization-dependent all-optical switching of germanium-based metaphotonic devices [J]. *Photonics Research*, 2020, **8**(3): 263–270.
- [20] Bagcia 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.
- [21] Chiam S Y, Singh R, Rockstuhl C, et al. Analogue of electromagnetically induced transparency in a terahertz metamaterial [J]. *Physical Review B*, 2009, **80**(15): 153103.
- [22] Ma T, Huang Q P, He H C, et al. All-dielectric metamaterial analogue of electromagnetically induced transparency and its sensing application in terahertz range [J]. *Optics Express*, 2019, **27**(12): 16624–16634.
- [23] 孙占硕, 王鑫, 王俊林, 等. 基于类电磁诱导透明的双频段太赫兹超材料的传感和慢光特性 [J]. *物理学报*, 2022, **71**(13): 383–391.
- [24] Zhao Z Y, Zhao H, Ako R T, et al. Polarization-insensitive terahertz spoof localized surface plasmon-induced transparency based on lattice rotational symmetry [J]. *Applied Physics Letters*, 2020, **117**(1): 011105.
- [25] Li Q, Liu S S, Zhang X Q, et al. Electromagnetically induced transparency in terahertz metasurface composed of meanderline and U-shaped resonators [J]. *Optics Express*, 2020, **28**(6): 8792–8801.

(下转第 46 页)

- 2014, **63**(7): 077201.
- [2] 赵旋, 董新科, 李欢, 等. 太赫兹功率探测器高灵敏度调制解调系统设计 [J]. *光学仪器*, 2022, **44**(2): 15–21.
- [3] 范国清, 赵爱英, 刘金现, 等. 基于肖特基二极管的太赫兹功率探头研究 [J]. *微波学报*, 2015, **36**(S1): 65–68.
- [4] 董航荣, 曹乾涛, 张鹏, 等. 基于钽酸锂晶片的太赫兹热释电探测器 [J]. *红外*, 2020, **41**(4): 14–19.
- [5] 朱荣峰, 赵静, 张梦圆, 等. 单通道与补偿型 PIMNT 热释电红外探测器的性能比较 [J]. *红外*, 2021, **42**(4): 1–8.
- [6] 曲秋红. 实用太赫光谱仪信号锁相放大新技术研究 [D]. 天津: 天津大学, 2010.
- [7] 胡朋兵, 潘孙强, 崔晨晨, 等. 激光锁相放大技术在顶空分析中的应用 [J]. *激光与红外*, 2019, **49**(11): 1317–1322.
- [8] 陈希. 基于 AD630 锁相放大器的研究设计及其在光纤气体传感检测系统中的应用 [D]. 济南: 山东大学, 2017.
- [9] 郭亮, 陈宝明, 董有尔, 等. 基于 AD630 实现蓄电池内阻在线测量 [J]. *现代电子技术*, 2011, **34**(1): 128–132.
- (上接第 38 页)
- [26] Wang Y X, Cui W, Ma H Q, et al. Outstanding slow-light effect for graphene metasurface in terahertz [J]. *Results in Physics*, 2021, **23**: 104022.
- [27] Li C, Li W L, Duan S Y, et al. Electrically tunable electromagnetically induced transparency in superconducting terahertz metamaterials [J]. *Applied Physics Letters*, 2021, **119**(5): 052602.
- [28] Zhou J H, Zhang C X, Liu Q R, et al. Controllable all-optical modulation speed in hybrid silicon-germanium devices utilizing the electromagnetically induced transparency effect [J]. *Nanophotonics*, 2020, **9**(9): 2797–2807.
- [29] Hu Y Z, Jiang T, Zhou J H, et al. Ultrafast Terahertz Transmission/Group Delay Switching in Photoactive WSe₂-Functionalized Metaphotonic Devices [J]. *Nano Energy*, 2020, **68**: 104280.