

基于石墨烯超表面的宽带电磁诱导透明研究

宁仁霞 鲍婕 焦铮

Wide band electromagnetically induced transparency in graphene metasurface of composite structure

Ning Ren-Xia Bao Jie Jiao Zheng

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, **66**, 100202 (2017) DOI: 10.7498/aps.66.100202

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.100202>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2017/V66/I10>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

铜基底上双层至多层石墨烯常压化学气相沉积法制备与机理探讨

Preperetions of bi-layer and multi-layer graphene on copper substrates by atmospheric pressure chemical vapor deposition and their mechanisms

物理学报.2017, 66(5): 058101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.058101>

三终端非对称夹角石墨烯纳米结的弹道热整流

Ballistic thermal rectification in the three-terminal graphene nanojunction with asymmetric connection angles

物理学报.2016, 65(24): 248104 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.248104>

N/B 掺杂石墨烯的光学与电学性质

Optical and electronic properties of N/B doped graphene

物理学报.2016, 65(24): 248103 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.248103>

石墨烯/聚乙烯醇/聚偏氟乙烯基纳米复合薄膜的介电性能

Dielectric properties of graphene/poly(vinyl alcohol)/poly (vinylidene fluoride) nanocomposites films

物理学报.2016, 65(18): 188101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.188101>

THz 谐振腔型石墨烯光电探测器的设计

Design and performance analysis of THz microcavity-enhanced graphene photodetector

物理学报.2016, 65(16): 168101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.168101>

基于石墨烯超表面的宽带电磁诱导透明研究

宁仁霞^{1)†} 鲍婕²⁾ 焦铮¹⁾

1)(黄山学院信息工程学院, 黄山 245041)

2)(黄山学院机电工程学院, 黄山 245041)

(2017年1月15日收到; 2017年2月16日收到修改稿)

提出了一种新的基于石墨烯超表面的复合结构, 该结构由带有空气槽的石墨烯条、氮化镓、二氧化硅和二氧化钛组成. 通过时域有限差分法研究了该结构的电磁特性, 研究表明, 该结构具有更宽频带的电磁诱导透明特性. 从结构参数、电磁场分布等方面研究了电磁诱导透明的物理机理. 在该结构中, 石墨烯条作为明模存在, 耦合作为暗模的空气槽和氮化镓侧板, 即存在两种明暗模耦合的现象, 因此产生宽带的电磁诱导透明现象. 从研究结果发现该结构可以产生多个频点的慢光效应和传感效应, 因此在光存储、红外波段的传感器设计中具有一定的指导意义和潜在的应用.

关键词: 石墨烯超表面, 电磁诱导透明, 时域有限差分, 宽带

PACS: 02.10.Yn, 33.15.Vb, 98.52.Cf, 78.47.dc

DOI: 10.7498/aps.66.100202

1 引言

电磁诱导透明(EIT)^[1]是原子系统内由探测场激励两条路径之间的量子干涉相消的结果, 导致光在原子共振吸收频率处的吸收减弱甚至不吸收, 以至出现完全透明的现象. 这种相消干涉作用使得介质在一个较宽的吸收谱中产生了一个很窄的透明窗, 是不透明介质在某些共振电磁场下变得透明的现象, 属于量子光学现象, 在非线性光学^[2]、慢光和光学存储等^[3,4]方面都有应用. 近年来, 在微波^[5]、太赫兹 (THz)^[6]、红外^[7]以及光波段^[8]中使用超材料实现EIT效应引起了广泛关注. Raza和Bozhevolnyi^[9]研究了一维慢光超材料, 该材料能够产生宽带延迟的EIT现象, 且可以工作在不同波长范围. Shao等^[10]通过设计一U型叉状金属超材料在旋转不同角度时产生EIT现象, 该结构具有高Q值、结构简单等特点. Hwang等^[11]通过实验验证了双层结构的超材料的EIT现象, 研究表明, 该结构能够在特定的频段产生比较大的群速度, 存在明显的慢光效应, 在光存储及光通信中有

潜在的应用.

大部分有关EIT的研究中, 学者关注单频点EIT较多, 相对于单频点EIT现象, 实现宽带EIT更加困难. 研究发现, 通过多种明模(bright mode)或暗模(dark mode)相互耦合来获得宽带EIT效应. Hu等^[12]研究了金属微带和一个双开口谐振器的平面超材料的电磁传输特性. 研究表明, 如果两个金属微带具有相等的长度, 则金属带对仅显示单个谐振, 两个金属微带的长度不同可以导致微波区域的双频带EIT响应. Wan等^[13]研究了在平面太赫兹超材料中的宽带等离子体诱导透明效应, 在透射光谱中观察到在大于0.61 THz频率范围的宽透明窗. 该研究表明, 结构中的U型金属作为明模耦合了一对作为暗模的金属线, 进而产生了宽带效应. Ding等^[14]研究了基于石墨烯的可调谐超材料结构, 该结构是在基板上通过印刷的方法涂覆具有矩形槽的石墨烯层, 研究发现可以实现多重透明度窗口, 并且可以通过改变石墨烯层的电势而在宽频率范围动态地控制透射窗口的宽窄. 以上研究表明, 在研究宽带EIT效应时, 如何获得更宽

† 通信作者. E-mail: nrxxiner@hsu.edu.cn

频带的EIT效应,是研究者更为关注的焦点之一.

本文通过由带有半开口槽的石墨烯带(graphene ribbon)、二氧化钛(TiO₂)、二氧化硅(SiO₂)和氮化镓(GaN)构成的石墨烯超表面的复合结构实现宽带EIT效应;通过时域有限差分法(FDTD)研究并分析其产生的物理机理;通过改变石墨烯带上的半开口槽尺寸和氮化镓侧板的宽度来调节EIT的带宽. 研究表明,在-5 dB时能够产生带宽为3.6 THz的透射窗,能够获得更宽频带的EIT效应. 相较于文献[13]中83%的相对带宽,本文的复合结构可以产生89%的相对带宽.

2 基于石墨烯表面复合材料的电磁诱导透明机理

对于石墨烯薄片,其电磁特性可用表面电导率 σ 表示,考虑带间和带内的电子跃迁,其电导率可用Kubo电导率模型表示[15,16]

$$\sigma = \frac{ie^2k_B T}{\pi\hbar^2(\omega + i/\tau)} \left(\frac{\mu}{k_B T} + 2\ln(e^{-\frac{\mu}{k_B T}} + 1) \right) + \frac{ie^2}{4\pi\hbar} \ln \left| \frac{2\mu - \hbar(\omega + i/\tau)}{2\mu + \hbar(\omega + i/\tau)} \right|, \quad (1)$$

这里, ω 为角频率, h 为普朗克常量, k_B 为玻尔兹曼常数, e 为电子电荷量, T 为环境温度, μ 为化学电位势, τ 是弛豫时间. 石墨烯的相对介电系数 ϵ_g 可表示为[17]

$$\epsilon_g = 1 + \frac{i\sigma}{\epsilon_0\omega d_g}, \quad (2)$$

d_g 为石墨烯薄膜的厚度, ϵ_0 为真空中的介电常数.

本文设计一种多层复合式结构,从底部到顶部依次为二氧化硅-二氧化钛-石墨烯,氮化镓位于多层结构的两侧,如图1所示,在石墨烯条上刻蚀一空气槽. d_1, d_2, d_g 和 d ($d = d_1 + d_2$)分别是二氧化硅、二氧化钛、石墨烯和氮化镓的厚度, w, w_l 和 w_g 分别是二氧化硅、氮化镓和石墨烯的宽度;空气槽的宽度和长度分别为 w_a 和 h . 假设电磁波沿 z 方向传播,并使用FDTD方法对具有周期边界条件的电磁波的法向入射角($\theta = 0^\circ$),二氧化钛和氮化镓的介电常数可参考文献[18].

为了研究该结构中石墨烯超表面的EIT现象,我们分析了图1所示结构的透射率. 其二维尺寸选择如下: $w = 2 \mu\text{m}, d_1 = 0.5 \mu\text{m}, d_2 = 0.5 \mu\text{m},$

$d_g = 1 \text{ nm}, w_g = 0.2 \mu\text{m}, w_l = 0.5 \mu\text{m}.$ 石墨烯的物理参数选择如下: $u = 0.1 \text{ eV}, \tau = 10 \text{ ps}.$

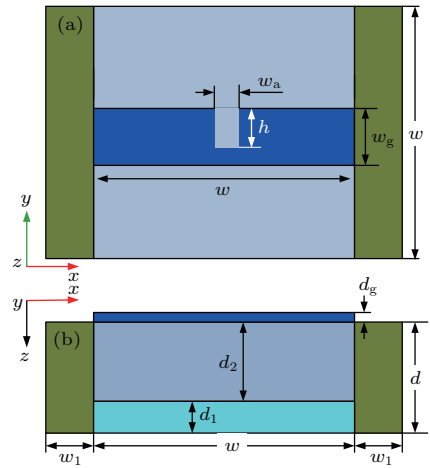


图1 (网刊彩色) 基于石墨烯超表面的复合结构 (a) 正视图; (b) 侧视图

Fig. 1. (color online) (a) Front view and (b) side view of unit cell of the composite multilayer metasurface.

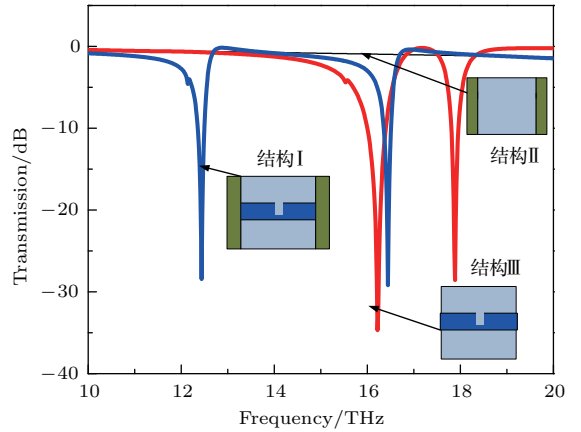


图2 (网刊彩色) 三种不同结构透射率对比

Fig. 2. (color online) The transmission of the structure I, II and III.

为了研究EIT现象,对比图1中的完整结构(图2中的结构I,即本文设计的结构)以及该结构中无石墨烯条(图2中的结构II)、无氮化镓侧板(图2中的结构III)的透射率,如图2所示,黑色、红色和蓝色线分别显示无石墨烯条、无氮化镓侧板和完整结构的透射率. 仿真结果显示,无石墨烯条时,在特定的频率范围内透射率变化非常小,接近0 dB,如图2中黑色实线显示,此时外加电场不能直接激发耦合,说明此时无EIT现象产生. 图2中红色线表示结构III的透射率与频率的变化关系,此时出现了2个透射率较大的透射峰,两个频率点相差1.85 THz,已经出现EIT现象. 图中蓝色线显示的是结构I的透射率与频率之间的变化关系,与

结构III的结果相比, 结构I频点左移, 且两频点之间相距近 4 THz, 出现了较明显的宽带EIT现象.

为了进一步研究宽带EIT现象出现的原因, 图3显示的是结构III的透射为零的频点(16.22, 17.89 THz)的电场分布图, 在16.22 THz处, 由于带有空气槽的石墨烯条存在, 外加电场能量被局域在空气槽内, 此时在该频点产生了全反射(见图4黑色线所示), 在17.89 THz处, 电场主要分布在空气槽开口处和石墨烯条的边缘处, 即外加电场能量被局域在石墨烯上的空气槽内和石墨烯条边缘处. 此时同样产生全反射. 结构I的透射为零的频点(12.43, 16.45 THz)的电场分布如图5所示. 高频点即16.45 THz处的电场主要分布在空气槽的开口处, 而低频点12.43 THz处电场主要分布在石墨烯带与氮化镓侧板交界处. 对比结构I和III的透射率变化, 可以看出, 石墨烯带与其上的空气槽产生电磁耦合, 能量被局域在空气槽的开口处, 同时石墨烯带与氮化镓侧板之间也存在电磁耦合, 能量被限制在两者的交界处. 从图5的电场分布以及对比现有的研究表明, 本结构中石墨烯条为明模形式出现, 空气槽和氮化镓侧板则以暗模形式存在.

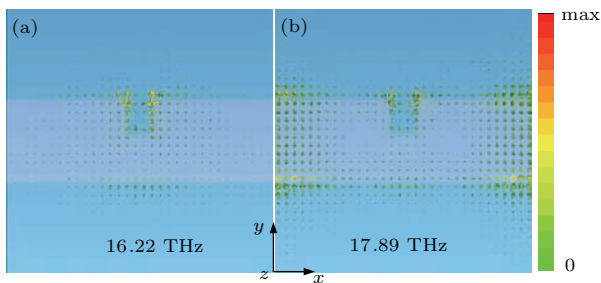


图3 (网刊彩色) 结构III条件下透射率为零的频点电场分布图

Fig. 3. (color online) The electric field distributions of (a) 16.22, (b) 17.89 THz of the structure III.

对比上述三种结构可以看出, 本文结构中石墨烯条作为明模, 与外加电场进行能量耦合, 石墨烯条上的空气槽作为暗模形式出现, 与石墨烯条进行了能量耦合, 因此产生了EIT现象, 而结构中的氮化镓侧板作为另外一种形式的暗模, 同时耦合作为明模的石墨烯条, 也产生了EIT现象, 由于两种形式的暗模耦合明模的频点接近, 因此拓宽了EIT透射窗的宽度, 进而实现了宽带EIT效应. 对比本文与文献[13]的研究成果, 实现EIT效应的原

理类似, 都是一个明模耦合两个暗模实现宽带EIT效应, 本结构的优势在于能够产生更宽频带的EIT效应.

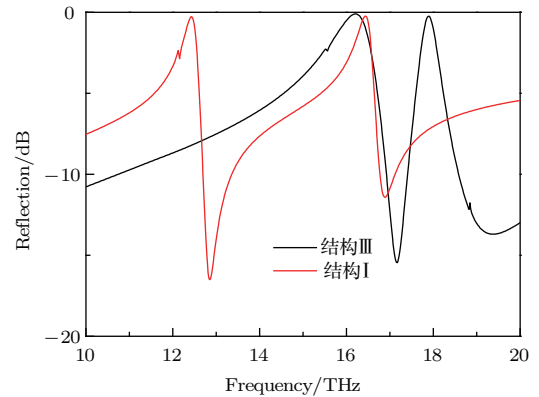


图4 (网刊彩色) 结构I和III的反射率变化

Fig. 4. (color online) The variation of reflection with the structure I and III.

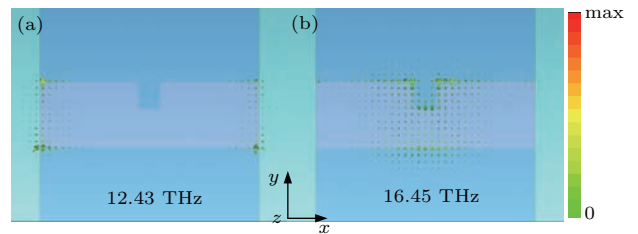


图5 (网刊彩色) 结构I条件下透射率为零的频点的电场分布图

Fig. 5. (color online) The electric field distributions of (a) 12.43, (b) 16.45 THz of the structure I.

3 宽带EIT效应研究

图6显示的是改变氮化镓侧板厚度 w_1 时透射率随频率的变化趋势, 可以看出, 减小 w_1 时, 透射率下降的频率点往高频段移动, 即产生了蓝移, 而高频段的频点变化非常小, 这一结论恰好说明了图5显示的电场分布中的结果, 即低频段的频点主要由石墨烯条与氮化镓侧板之间产生谐振, 而高频段的频点是由于石墨烯条与空气槽之间的耦合引起.

为了进一步研究该结构的EIT效应, 图7给出了空气槽长度 h 变化时透射谱随频率变化的情况, 选择 h 分别为0.8, 0.6, 0.5 μm , 发现在 $h = 0.8 \mu\text{m}$ 时EIT带宽为2.5 THz, 而在 $h = 0.5 \mu\text{m}$ 时, 带宽为3.6 THz. 从图7可以看出, 随空气槽长度 h 减小, 获得的EIT带宽越宽[19]; 低频段的反射频点基

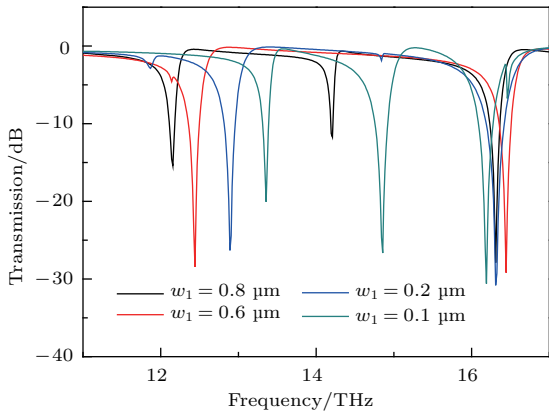


图6 (网刊彩色) 改变氮化镓侧板厚度 w_1 时透射率随频率变化的情况

Fig. 6. (color online) Variation of transmission with frequency of different w_1 .

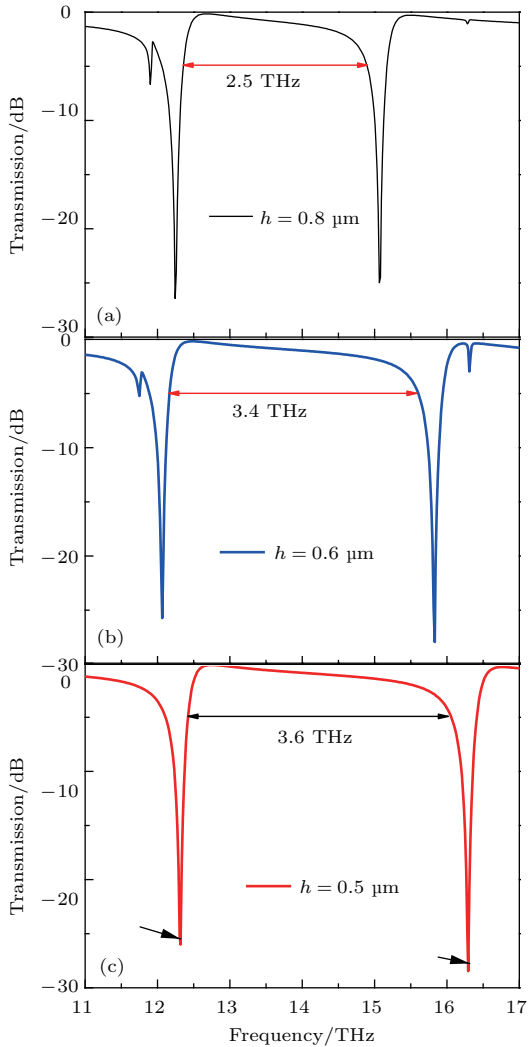


图7 (网刊彩色) 改变空气槽深度 h 的宽带 EIT 对比 ($w_l = 0.6 \mu\text{m}$, $w_a = 0.4 \mu\text{m}$)

Fig. 7. (color online) Variation of transmission with frequency of different h at $w_l = 0.6 \mu\text{m}$, $w_a = 0.4 \mu\text{m}$.

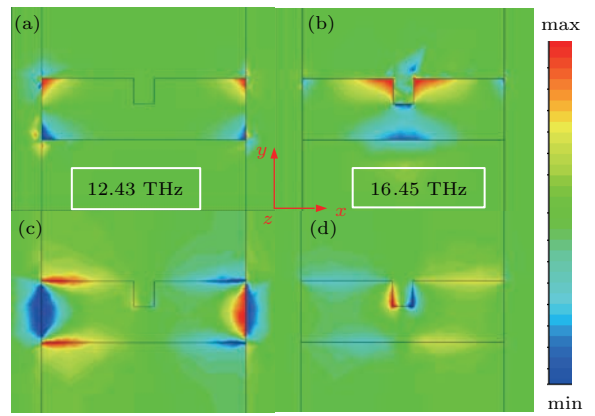


图8 (网刊彩色) 频点 12.43, 16.45 THz 的电场和磁场分布

Fig. 8. (color online) The (a), (b) electric and (c), (d) magnetic field distributions of 12.43, 16.45 THz for the composite structure with graphene metasurface at $h = 0.5 \mu\text{m}$, $w_a = 0.4 \mu\text{m}$.

本无变化, 高频段的反射频点随着 h 的减小向右移动, 即随着 h 增加, 透射率接近零的速率的峰值发生蓝移。

选择图 7(c) 的参数, 绘出 12.43, 16.45 THz 的电场和磁场分布, 如图 8 所示. 图 8(a), (b) 分别显示的是 12.43 和 16.45 THz 处透射为零的两个频点的电场分布, 可以看出 12.43 THz 处能量主要集中在石墨烯条和氮化镓侧板连接处, 即在此处产生了谐振. 同理, 在图 8(b) 和图 8(d) 中的 16.45 THz 处, 能量集中在空气槽处, 说明在空气槽和石墨烯条之间产生了谐振. 12.43 THz 处的透射下降点是由于石墨烯纳米条作为明模耦合氮化镓侧板, 此时氮化镓侧板作为暗模. 而 16.45 THz 处的透射下降点则是由于石墨烯条与空气槽之间的耦合, 此时空气槽作为另一种形式的暗模存在. 所以当空气槽的深度 h 变化, 导致高频段谐振频率产生变化, 而低频段则基本不变.

改变空气槽的宽度 w_a , 进一步分析宽带 EIT 效应, 选择 w_a 分别为 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 μm , 如图 9 所示. 仿真结果表明, 随着空气槽宽度 w_a 的增加, EIT 透射窗的宽度越来越小, 同时高频段的频点产生红移. 图 9 和图 7 的结果显示, 改变空气槽的长度 h 和宽度 w_a , 高频段频点影响较大, 低频范围频点几乎不变. 说明作为明模的石墨烯条与两种不同形式的暗模氮化镓侧板和空气槽之间发生耦合, 进而产生了宽带 EIT 现象.

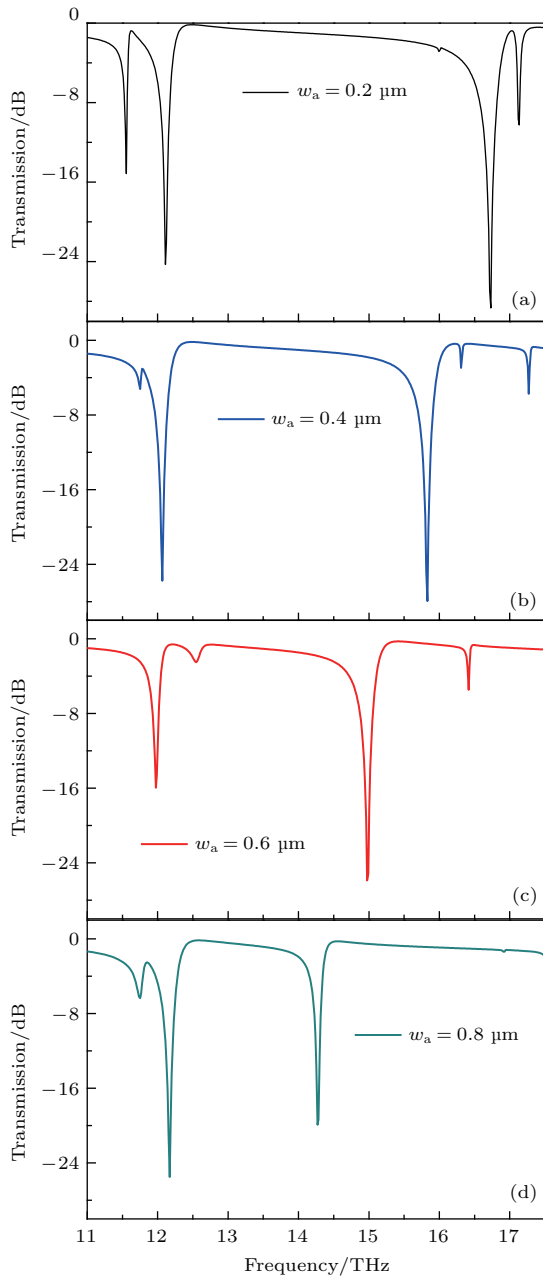


图9 (网刊彩色) 改变空气槽宽度 w_a 的宽带EIT对比 ($w_l = 0.6 \mu\text{m}$, $h = 0.6 \mu\text{m}$)

Fig. 9. (color online) Variation of transmission with frequency of different w_a at $h = 0.6 \mu\text{m}$, $w_l = 0.6 \mu\text{m}$.

4 宽带EIT的应用展望

4.1 慢光效应的应用

选择图9(a)的参数, 绘制群速度 n_g [19], 如图10所示. 可以看出, 在图中圆圈标注的3个频点处, n_g 均大于25, 说明在这3个频点处会产生慢光效应, 较之一般窄带或单频点的EIT效应, 宽带EIT更容易产生多频点慢光效应. 研究结果表明, 该结构可用于光通信和光存储等方面的

应用 [20,21].

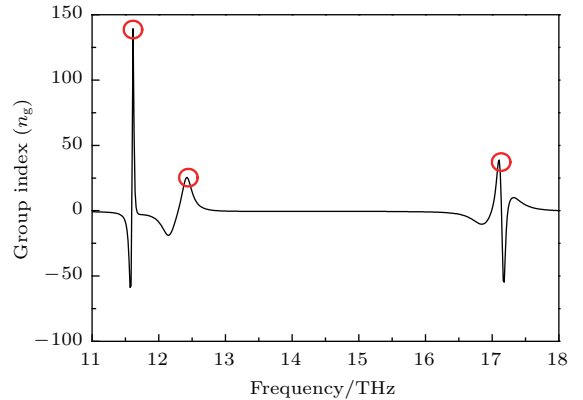


图10 (网刊彩色) 群速度与频率之间变化关系 $h = 0.6 \mu\text{m}$, $w_a = 0.2 \mu\text{m}$ (图9(a))

Fig. 10. (color online) The group index of the structure with parameters: $h = 0.6 \mu\text{m}$, $w_a = 0.2 \mu\text{m}$ (Fig. 9(a)).

4.2 传感效应的应用

宽带EIT效应还可应用于电磁传感器件的设计与研究. 本文改变被测环境, 即当背景介质的折射率发生变化时, 给出特定频率范围内的透射率与频率变化关系, 如图11和图12所示. 从图11中可以看出, 当被测介质发生变化时, EIT透射窗频点会随之变化. 进一步研究发现, 当被测介质折射率增加时, 高频段的频点发生左移, 随着折射率变化越大, 频点移动范围越小, 如图12(b)所示. 同时在低频段的频点也随着折射率增加而产生左移, 当折射率增加时, 频点左移现象十分明显, 如图12(a)所示. 以此作为人工电磁材料的传感器件设计, 相较于单频点或窄带EIT的传感器件, 本文设计的结构灵敏度更高, 且采用石墨烯和氮化镓等材料, 响应速度也较传统材料更快.

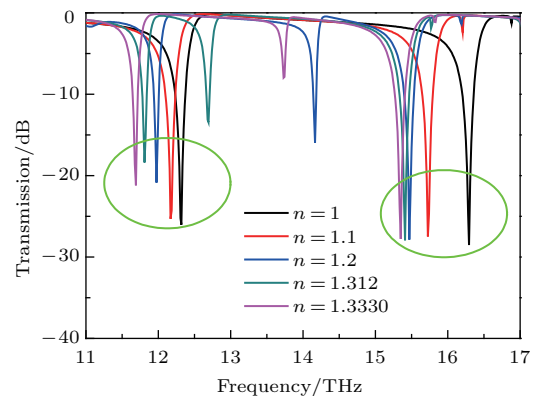


图11 (网刊彩色) 不同背景材料下的透射窗对比

Fig. 11. (color online) The variation of transmission windows with different background materials.

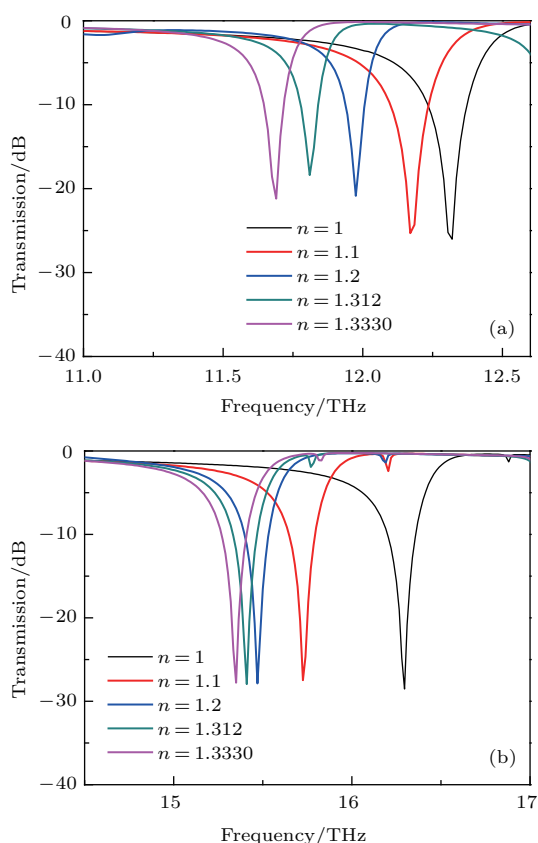


图 12 (网刊彩色) 图 11 低频段 (a), 高频段 (b) 透射率随频率的变化

Fig. 12. (color online) The variation of transmission with (a) low frequencies, (b) high frequencies (Fig. 11).

5 结 论

本文设计了一种石墨烯超表面的复合结构, 研究了宽带电磁诱导透明及其慢光效应和电磁传感特性. 通过改变结构参数调谐宽带电磁诱导透明的工作频点, 研究发现减小氮化镓侧板的厚度和石墨烯条上空气槽的宽度均可增加透明窗的带宽, 得到宽带电磁诱导透明现象. 通过电场的分布可以看出, 在该结构中, 石墨烯条作为明模存在, 耦合作为暗模的空气槽和氮化镓侧板. 研究表明, 多个

频点产生慢光效应和传感效应, 因此在光存储、红外波段的传感器及红外隐身等方面具有一定的潜在应用.

参考文献

- [1] Xia H, Sharpe S J, Merriam A J, Harris S E 1997 *Phys. Rev. A* **56** 315
- [2] Wang Z, Yu B 2013 *J. Appl. Phys.* **113** 113101
- [3] Liu C, Dutton Z, Behroozi C H, Hau L V 2001 *Nature* **409** 490
- [4] Qin L, Zhang K, Peng R W, Xiong X, Zhang W, Huang X R, Wang M 2013 *Phys. Rev. B* **87** 125136
- [5] Meng F Y, Zhang F, Zhang K, Wu Q, Kim J Y, Choi J J, Lee J C 2011 *IEEE Trans. Magn.* **47** 3347
- [6] Gu J, Singh R, Liu X, Zhang X, Ma Y, Zhang S, Taylor A J 2012 *Nat. Commun.* **3** 1151
- [7] Zhang J, Xiao S, Jeppesen C, Kristensen A, Mortensen N A 2010 *Opt. Express* **18** 17187
- [8] Zhang X, Fan Y, Qi L, Li H 2016 *Opt. Mat. Express* **6** 2448
- [9] Raza S, Bozhevolnyi S I 2015 *Opt. Lett.* **40** 4253
- [10] Shao J, Li J, Li J, Wang Y K, Dong Z G, Chen P, Zhai Y 2013 *Appl. Phys. Lett.* **102** 034106
- [11] Hwang J S, Yoo Y J, Kim Y J, Kim K W, Chen L Y, Lee Y P 2016 *Curr. Appl. Phys.* **16** 469
- [12] Hu S, Yang H, Han S, Huang X, Xiao B 2015 *J. Appl. Phys.* **117** 043107
- [13] Wan M, Song Y, Zhang L, Zhou F 2015 *Opt. Express* **23** 27361
- [14] Ding J, Arigong B, Ren H, Zhou M, Shao J, Lu M, Zhang H 2014 *Sci. Rep.* **4** 6128
- [15] Mikhailov S A, Ziegler K 2007 *Phys. Rev. Lett.* **99** 016803
- [16] Falkovsky L A 2008 *J. Phys.: Conf. Ser.* **129** 012004
- [17] Vakil A, Engheta N 2011 *Science* **332** 1291
- [18] Frederikse H P R 1998 *Handbook of Chemistry and Physics* **1999** 12
- [19] Lian Y, Ren G, Liu H, Gao Y, Zhu B, Wu B, Jian S 2016 *Opt. Commun.* **380** 267
- [20] He X J, Wang J M, Tian X H, Jiang J X, Geng Z X 2013 *Opt. Commun.* **291** 371
- [21] Bai Q, Liu C, Chen J, Cheng C, Kang M, Wang H T 2010 *J. Appl. Phys.* **107** 093104

Wide band electromagnetically induced transparency in graphene metasurface of composite structure

Ning Ren-Xia^{1)†} Bao Jie²⁾ Jiao Zheng¹⁾

1) (School of Information Engineering, Huangshan University, Huangshan 245041, China)

2) (School of Mechanical and Electrical Engineering, Huangshan University, Huangshan 245041, China)

(Received 15 January 2017; revised manuscript received 16 February 2017)

Abstract

The electromagnetic induction transparency (EIT) is a phenomenon in which the originally opaque medium becomes transparent under certain resonant electromagnetic fields. It has been seen in applications ranging from nonlinear optics, slow light and optical storage. From the viewpoint of single-frequency, researchers have paid much attention to the realization of broadband electromagnetic induction transparency in recent years. In this paper, a broadband electromagnetic induction transparency effect is investigated theoretically by the finite difference time-domain method. A composite structure based on graphene metasurface which consists of graphene strip with air groove, gallium nitride, silica and titanium dioxide is designed in infrared range. A broadband electromagnetically induced transparency effect could be found in the designed composite structure compared with those in several similar structure. The electromagnetically induced transparency window can be tuned gently by the width of air groove and gallium nitride dielectric slabs. The results show that a wideband electromagnetically induced transparency window of 4 terahertz is found in the infrared frequency range. By comparison with the existing research results, a wider band of electromagnetically induced transparency is found in our structure. We study the physical mechanism of broadband electromagnetically induced transparency from the aspects of structural parameters and electromagnetic field distribution. The thickness w_1 of gallium nitride, the width w_a and depth h of air groove on graphene strip are discussed in this article. The smaller the length w_a or depth h , the wider the EIT band is. The peak of high frequency at which the transmission is near to zero is blue-shifted as h increases. However, red-shift is found as width w_a increases. It is found that graphene strip exists as a bright mode. coupling action acts as air groove and gallium nitride slabs function as dark mode, resulting in broadband electromagnetic induced transparency. That is to say, the principle of broadband electromagnetically induced transparency is due to a bright mode coupling in two different forms of dark mode, thus widening the transmission band. This work provides a kind of structure and a design way, to gain the broadband of electromagnetically induced transparency effect. Moreover, it is found that changing the refractive index of background medium, the frequency of high frequency band has a red-shift, the greater change of the refractive index can lead to smaller frequency range. It can be seen that the values of group index n_g of three frequency peaks exceeding 25 are observed. The results also show that the slow-light effect and the sensing effect in several frequency ranges are obtained in the proposed structure and potential applications in the optical storage and highly sensitive infrared-band sensor, infrared optical switching, etc.

Keywords: graphene metasurface, electromagnetic induced transparency, finite difference time domain, broadband

PACS: 02.10.Yn, 33.15.Vb, 98.52.Cf, 78.47.dc

DOI: 10.7498/aps.66.100202

† Corresponding author. E-mail: nrxxiner@hsu.ed.cn