
文章编号: 2095-4980(2017)02-0192-06

基于T型石墨烯超材料可调电磁诱导透明效应

曹妍妍^{a,b}, 李 悅^{a,b}, 刘元忠^{a,b}, 张玉萍^{a,b}, 张会云^{a,b}

(山东科技大学 a.电子通信与物理学院; b.青岛市太赫兹技术重点实验室, 山东 青岛 266510)

摘要: 基于石墨烯电导率的可调性, 设计了T型石墨烯纳米超材料结构, 实现对电磁诱导透明(EIT)效应的动态调谐。研究发现, 当2个石墨烯条互相靠近时, 由于二者间存在较强耦合, 发生相消干涉, 因此出现透明窗口。同时讨论了石墨烯条长度、缝宽、入射偏振角等几何参数对EIT效应的影响。研究结果表明, 耦合强度随着缝宽的增加而减弱; 随着入射偏振角的增加也呈现减弱趋势; 随着石墨烯条长度的增加, 透明窗口发生红移现象, 且第一个下降峰强度明显增加。此外, 当费米能级由0.3 eV增加到0.9 eV时, 共振频率由24 THz蓝移至35 THz, 且强度增强, 证实了改变石墨烯的费米能级, 能够调节透明窗口的位置。并且透明窗口附近有明显的群速度延迟(0.05 ps左右), 即可以实现对光速的减慢。

关键词: 石墨烯; 超材料; 电磁诱导透明

中图分类号: TN911.6

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201702.0192

Tunable electromagnetically induced transparency based on T-shaped graphene metamaterials

CAO Yanyan^{a,b}, LI Yue^{a,b}, LIU Yuanzhong^{a,b}, ZHANG Yuping^{a,b}, ZHANG Huiyun^{a,b}

(a. College of Electronic Communication and Physics; b. Qingdao Key Laboratory of Terahertz Technology, Shandong University of Science and Technology, Qingdao Shandong 266510, China)

Abstract: A tunable graphene nanostructure metamaterial is designed in order to obtain the Electromagnetically Induced Transparency(EIT) which is analogs to the atomic EIT. By placing the light mode and dark mode closer, a transparency window is shaped due to the strong coupling between them. Meanwhile, the effects of gap size, strip length, coupling location, incident polarization angle and refractive index on the EIT phenomenon are investigated. The results show that the coupling strength becomes weaker as the width of gap increases, and a second window occurs when the dark mode shifts away from the center of the light mode. In addition, changing the Fermi energy of the graphene could bring a different transparency window as well as a tunable group delay. This work may provide applications in the field of photonics, biological sensing and slow light devices.

Keywords: graphene; metamaterial; Electromagnetically Induced Transparency

近年来, 由于电磁诱导透明(EIT)在慢光器件^[1]、生物探测器^[2]、等离子体开关^[3]、非线性器件^[4]等方面潜力引起了科研人员的广泛关注。多数EIT超材料的原理都是基于亮模式和暗模式之间的耦合效应^[5-10]。其中亮模式是指可由入射波直接激发产生共振的石墨烯条, 暗模式是指不能被外电场直接激发的石墨烯条, 这是由于缺乏直接耦合, 只能在与亮模式的耦合过程中被激发。二者在透明窗口频率处发生相消干涉, 出现透明现象。但上述文章中的透明窗口只限制在特定频率。

为得到动态可调的透明窗口, 科研人员尝试各种方法设计新的超材料结构。例如, JIN等利用二阶等离子体共振在堆叠光学超材料中实现类电磁诱导透明^[11]; ZHANG等提出了由纳米盘和纳米环组成的等离子体纳米结构^[12];

收稿日期: 2016-09-26; 修回日期: 2016-12-20

项目基金: 山东省自然科学基金资助项目(ZR2012FM011); 青岛市创新领军人才项目(13-CX-25); 中国工程物理研究院太赫兹科学技术基金资助项目(201401); 青岛经济技术开发区重点科技计划资助项目(2013-1-64); 山东科技大学基金资助项目(SDKDYC170235); 国家留学基金资助项目

LIU 等设计了由三角板和纳米棒组成的混合纳米结构,理论上证实了等离子体诱导产生的透明现象^[13]; CHEN 等提出了由波纹金属盘和 C 型偶极子谐振器组成的混合结构,实现了多个暗模式的激发^[14]。由上述研究可知,对结构的几何尺寸重新进行设计,就可以得到不同的透明窗口。但是结构一旦制作完成就很难改变,这限制了超材料在实际中的应用。

具有单层碳原子结构的石墨烯由于等离子体的存在表现出许多优异特性,如动态调谐特性、太赫兹频段的低损耗特性等^[15-17]。值得一提的是,石墨烯的电导率能够随费米能级的变化而变化,而不同的费米能级可以通过化学掺杂或者加偏压实现^[18-20],这在普通金属材料中是难以实现的^[21]。石墨烯的这一特性为动态调节 EIT 窗口提供了另一种思路。SHI 等在深亚波长范围研究了π型石墨烯纳米结构,详细论述了 EIT 产生的原理及费米能级对窗口的动态调谐过程^[18]。DING 等提出了由石墨烯切线对耦合构成的超材料结构,讨论了基于亮膜-亮膜之间的杂化产生的 EIT^[21]。

基于以上研究背景,本文数值模拟了基于石墨烯纳米结构的类 EIT 超材料,该单元结构由 2 个垂直的石墨烯纳米棒和电介质基底组成。当 2 个纳米棒互相靠近时,由于二者之间的强耦合导致了透明窗口的出现,且该窗口可以通过改变石墨烯费米能级动态调节。该超材料结构可应用于慢光器件、光子学和生物传感^[22-26]。

1 理论模型

本文设计的 T 型石墨烯超材料结构的单元模型如图 1 所示。该结构由 1 层石墨烯(深灰色)和 1 层电介质基底(浅灰色)组成,入射波沿波矢方向垂直入射到结构表面。结构中石墨烯费米能级为 0.5 eV,厚度为 1 nm,基底介电常数为 2.1,厚度为 20 nm。图 1 中各个参数分别为: $p=90 \text{ nm}$, $w_1=24 \text{ nm}$, $L_1=72 \text{ nm}$, $w_2=20 \text{ nm}$, $L_2=48 \text{ nm}$, $g=1 \text{ nm}$ 。利用 CST 商用软件中的频域算法对所设计的结构进行仿真, x, y 边界为单元结构, z 为开放边界。由于石墨烯电导率可以表示为 $\sigma(\omega)=i\frac{4\alpha\epsilon_0cE_F}{\hbar(\omega+i/\tau)}$ ^[27-28],其中 α 为精细结构常数, ϵ_0 为真空介电常数, τ 为弛豫时间, E_F 为费米能级, \hbar 为约化普朗克常数。因此石墨烯介电常数为 $\epsilon(\omega)=1+i\frac{\sigma}{\omega t\epsilon_0}$, t 为石墨烯厚度。由于石墨烯结构之间互不相连,可以利用覆盖离子凝胶栅的办法施加门电压^[29]。

2 结果与讨论

图 1 中沿着 x 方向放置的石墨烯条可被入射光直接激发出共振峰,因此该模式可作为亮模式。另一石墨烯条由于缺乏直接耦合,不能被外电场激发^[30],因此该模式可作为暗模式。图 2 中实线给出了入射光垂直入射到亮模式结构上时亮模式的共振曲线,可以看出在 23.65 THz 处出现了共振峰,虚线给出了 45° 斜入射到暗模式结构上时暗模式的共振情况,可以看出在 34.55 THz 处出现共振峰,这种现象是亮模式与暗模式耦合作用的结果。由于石墨烯条的尺寸比真空中波长短很多,因此它们可分别看作偶极子和四偶极子天线。

当亮模式与暗模式互相靠近时,出现了透明窗口,如图 3(a)所示。在 25.80 THz 处出现透射峰,2 个下降峰分别出现在 22.06 THz 和 28.97 THz 处。为了更好地解释亮模式与暗模式的耦合过程,提取了上述 3 个频率处的电场分布图,如图 3(b)所示。从图中可以看出透射峰值处亮模式周围电场分布较弱,只有亮模式与暗模式边界处有电场分布,这是因为亮模式和暗模式之间发生相消干涉,亮模式的电场被抑制。而下降峰值处二者边界和亮模式周围电

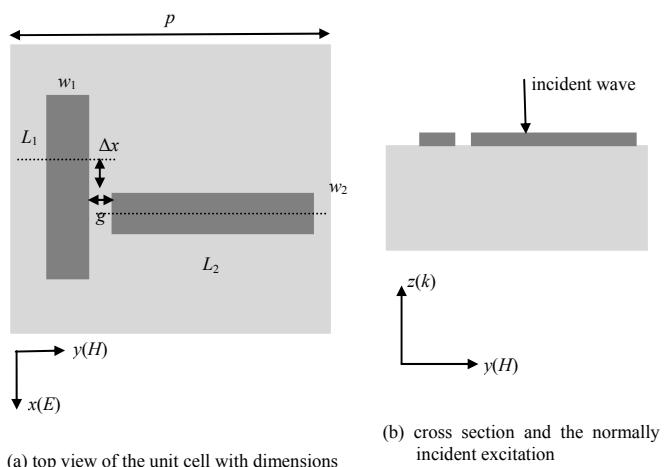


Fig.1 Models of T-shaped graphene metamaterials
图 1 T 型石墨烯超材料结构的单元模型

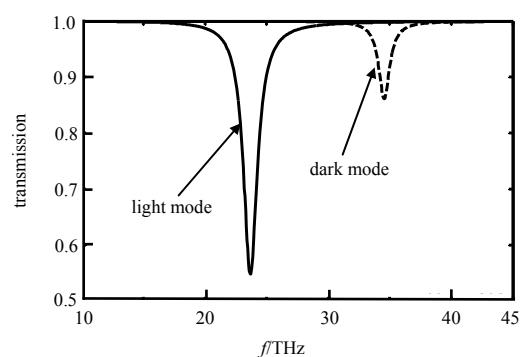


Fig.2 Transmission spectra of radiative mode and dark mode respectively
图 2 亮模式和暗模式单独被激发时的透射谱

场分布都比较强，这是因为 2 模式间发生相长干涉，电场增强。

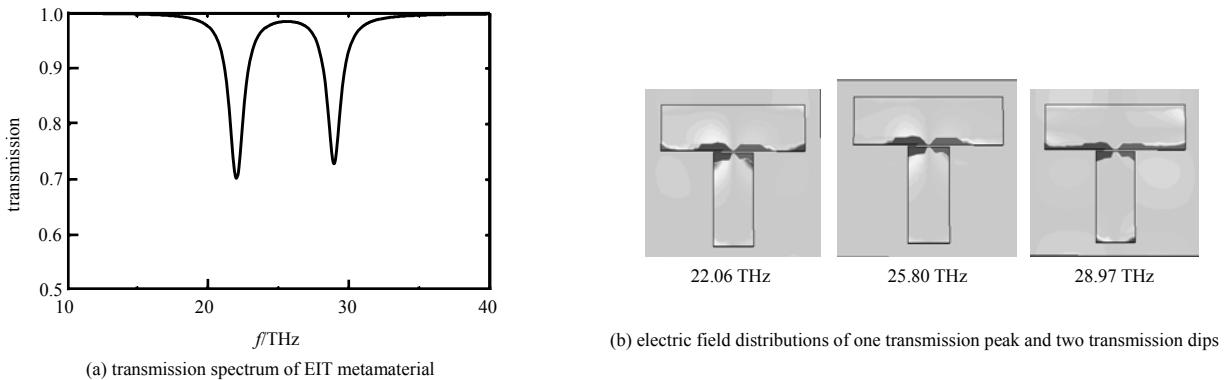


Fig.3 Transmission spectrum and electric field distributions at resonant frequencies

图 3 透射谱及其共振频率处的电场分布图

图 4 研究了缝宽增大时，EIT 谱线随频率的变化情况。从图中可以看出，缝宽增加时，EIT 效应减弱，且第 2 个下降峰也有明显减弱的趋势。这是由于亮模式与暗模式之间的耦合强度减弱，因此出现了共振减弱的情况。

图 5 讨论了亮模式石墨烯条长度不同时，透射谱线随频率的变化情况。如图 5 所示，当亮模式长度 L_1 增加时，透明窗口发生红移。这是因为当石墨烯条长度增加时，偶极子共振发生红移。除此之外，发现随着石墨烯条长度增加，第 1 个下降峰的共振强度也明显增加，而第 2 个下降峰强度稍有减弱。这是因为单个偶极子和四偶极子的相对共振波长出现了增加和减弱的情况。

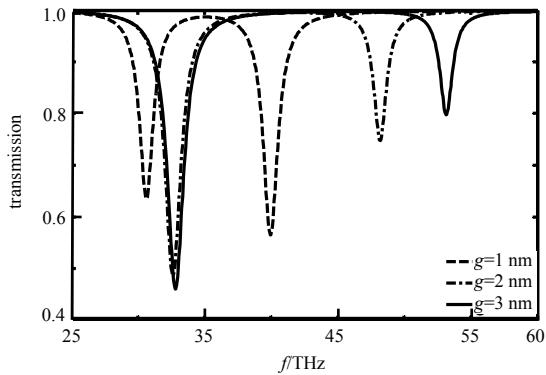


图 4 缝宽不同时，透射谱线随频率的变化关系

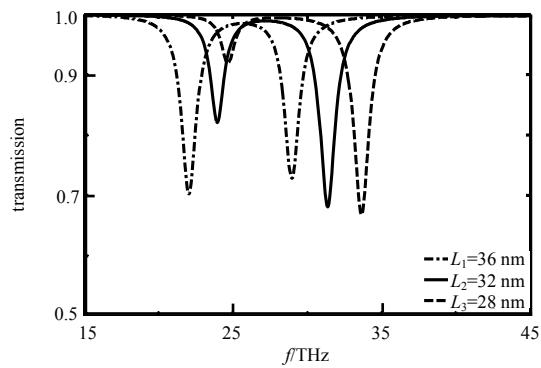


图 5 亮模式石墨烯条长度不同时，透射谱线随频率的变化关系

图 6 给出了当 Δx 增加时透射谱线随频率的变化情况。从图中可知， Δx 增加时，透明窗口逐渐变窄。这是由于 2 个石墨烯条重合部位减少，亮模式与暗模式之间的耦合强度减弱。此外，窗口的右侧出现了第 2 个透明窗口，并且随着距离的增加，第 3 个共振峰逐渐加强，窗口越来越明显。这是因为在结构的另一端也有耦合情况发生，再次出现了相消干涉。图 7 阐释了入射偏振角不同时，透射谱线随频率的变化情况。从图中可知，当入射偏振角增加时，2 模式间的共振强度减弱，这是由于入射偏振角增加时，激发出的偶极子减少，导致耦合减弱。因此入射偏振角对耦合强度也有较大的影响。

图 8(a)研究了基底折射系数增加时，透射谱线随频率的变化关系。可以看出，随着基底折射系数的增加，透射谱线出现红移现象，但是共振强度不变。为更直观地表明这一现象，对共振频率随折射率的变化关系做了线性拟合，如图 8(b)所示。从图中可以看出，透射峰值和下降峰值处频率随折射系数都呈线性变化，拟合效果较好。为了定量地描述该结构的传感特性，计算了该结构的品质因数(Figure Of Merit, FOM)， $FOM = \text{灵敏度}(\text{sensitivity})/\text{FWHM}(\text{Full Width at Half Maxima})$ ，FWHM 为半高全宽。通过计算，得出 2 个下降峰的 FOM 分别为 7.5 THz/RIU 和 11.55 THz/RIU(Refractive Index Unit)，RIU 为折射指数单位。这为调节模式共振提供了另一种方法。

图 9 展示了费米能级不同时，透射谱线随频率的变化情况。可以看出，当费米能级由 0.3 eV 增加到 0.9 eV 时，共振频率发生蓝移(由 24 THz 平移到 35 THz)。此外，2 个下降峰处的共振强度也随费米能级的增加而逐渐增强。

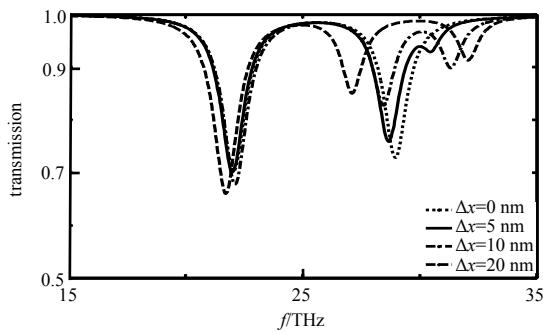


Fig.6 Transmission spectra with different distances between two centers of modes
图6 两模式中心距离不同时,透射谱线随频率的变化关系

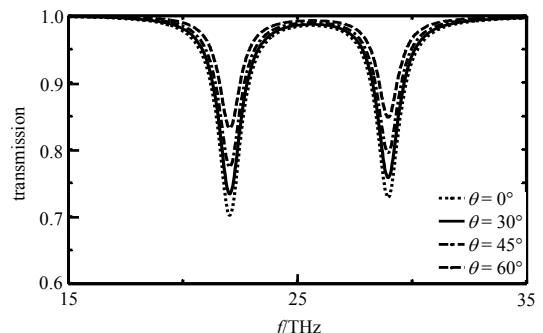
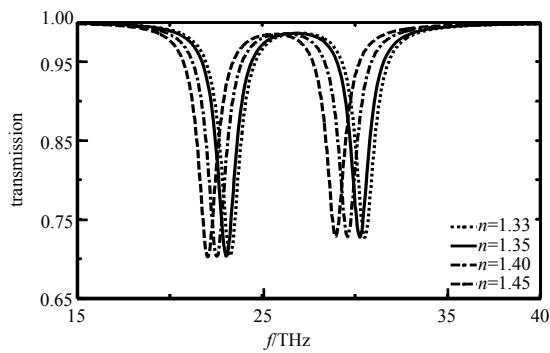
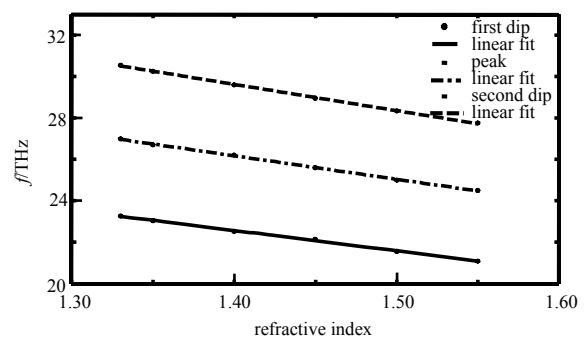


Fig.7 Transmission spectra with different incident polarization angles
图7 入射偏振角不同时,透射谱线随频率的变化关系



(a) transmission spectra with different refractive indexes



(b) resonance frequencies with different refractive indexes

Fig.8 Transmission spectra and resonant frequencies with different refractive indexes
图8 折射率不同时,透射谱及共振频率的变化情况

科研人员已经发现 EIT 效应可以大幅降低光速^[31-32]。图 10 描述了不同费米能级时的群速度延迟情况, 正值和负值分别对应减慢和加快光速。从图中可以看出, 透明窗口附近群速度减缓明显(0.5 ps 左右), 即光速减慢。

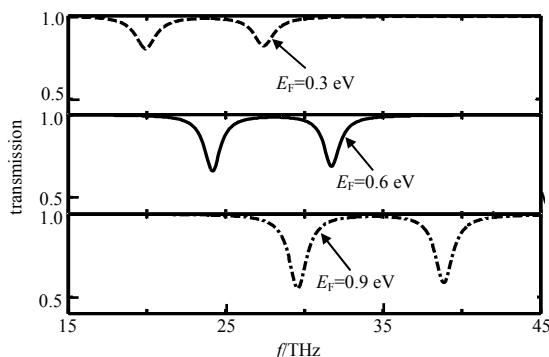


Fig.9 Transmission spectra with different Fermi energies
图9 费米能级不同时,透射谱线随频率的变化情况

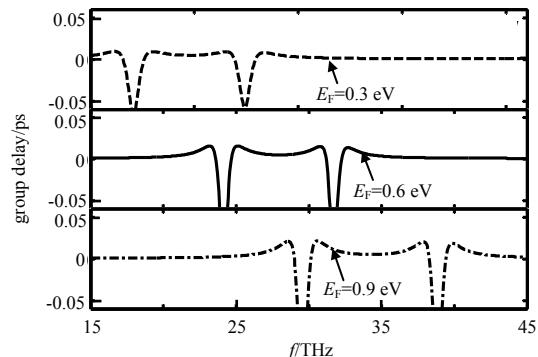


Fig.10 Group delay with different Fermi energies
图10 费米能级不同时,群速度随频率的变化关系

3 结论

本文设计了 T 型石墨烯纳米结构, 通过研究发现, 当亮模式与暗模式互相靠近时, 可以产生电磁诱导透明现象。其次讨论了不同几何尺寸情况下, EIT 效应随频率的变化情况。结果表明当 2 个石墨烯条中心距离由 0 nm 增加到 20 nm 时, 透明窗口由 3 THz 变为 1.5 THz, 且窗口的右侧出现了第 2 个透明窗口。当入射偏振角由垂直入射变为斜 60°入射时, 透射由 0.7 变为 0.85, 耦合强度大大减弱。最后, 讨论了费米能级对 EIT 效应的影响。当费米能级由 0.3 eV 增加到 0.9 eV 时, 共振频率由 24 THz 蓝移至 35 THz, 证实了改变石墨烯费米能级可以调节窗口频率大小, 并实现光速减慢。该工作可用于光子学、生物传感和慢光器件等领域。

参考文献:

- [1] CHANG W S,LASSITER J B,SWANGLAP P,et al. A plasmonic Fano switch[J]. *Nano Letters*, 2012,12(9):4977–4982.
- [2] HARRIS S E,FIELD J E,IMAMOĞLU A. Nonlinear optical processes using electromagnetically induced transparency[J]. *Physical Review Letters*, 1990,64(10):1107–1107-6.
- [3] 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.
- [4] CHEN C Y,UN I W,TAI N H,et al. Asymmetric coupling between subradiant and superradiant plasmonic resonances and its enhanced sensing performance[J]. *Optics Express*, 2009,17(17):15372–15380.
- [5] ZHANG J,XIAO S,JEPPESEN C,et al. Electromagnetically induced transparency in metamaterials at near-infrared frequency[J]. *Optics Express*, 2010,18(16):17187–17192.
- [6] LI Z,MA Y,HUANG R,et al. Manipulating the plasmon-induced transparency in terahertz metamaterials[J]. *Optics Express*, 2011,19(9):8912–8919.
- [7] NA B,SHI J,GUAN C,et al. From electromagnetically induced transparency to absorption in planar optical metamaterials[J]. *Chinese Optics Letters*, 2013,11(11):62–67.
- [8] SHAO Jian,LI Jie,LI Jiaqi,et al. Analogue of electromagnetically induced transparency by doubly degenerate modes in a U-shaped metamaterial[J]. *Applied Physics Letters*, 2013,102(3):034106–034106-4.
- [9] 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.
- [10] XU H,LU Y,LEE Y P,et al. Studies of electromagnetically induced transparency in metamaterials[J]. *Optics Express*, 2010,18(17):17736–17747.
- [11] JIN X R,LU Y,ZHENG H,et al. Plasmonic electromagnetically-induced transparency in metamaterial based on second-order plasmonic resonance[J]. *Optics Communications*, 2011,284(19):4766–4768.
- [12] ZHANG Y,JIA T Q,ZHANG H M,et al. Fano resonances in disk-ring plasmonic nanostructure:strong interaction between bright dipolar and dark multipolar mode[J]. *Optics Letters*, 2012,37(23):4919–4921.
- [13] LIU H,LI B,ZHENG L,et al. Multispectral plasmon-induced transparency in triangle and nanorod(s) hybrid nanostructures[J]. *Optics Letters*, 2013,38(6):977–979.
- [14] CHEN L,WEI Y M,ZANG X F,et al. Excitation of dark multipolar plasmonic resonances at terahertz frequencies[J]. *Scientific Reports*, 2016(6):22027–22027-6.
- [15] WUNSCH B,STAUBER T,SOLS F,et al. Dynamical polarization of graphene at finite doping[J]. *New Journal of Physics*, 2006,8(12):318–318-17.
- [16] HWANG E H,SARMA S D. Dielectric function,screening, and plasmons in two-dimensional graphene[J]. *Physical Review B*, 2007,75(20):205418–205418-5.
- [17] JABLĀN M,BULJĀN H,SOLJAČIĆ M. Plasmonics in graphene at infrared frequencies[J]. *Physical Review B*, 2009,80(24):245435–245435-8.
- [18] SHI X,HAN D,DAI Y,et al. Plasmonic analog of electromagnetically induced transparency in nanostructure graphene[J]. *Optics Express*, 2013,21(23):28438–28443.
- [19] CHENG H, CHEN S,YU P,et al. Dynamically tunable plasmonically induced transparency in periodically patterned graphene nanostrips[J]. *Applied Physics Letters*, 2013,103(20):203112–203112-4.
- [20] FALLAHI A,PERRUISSEAU-CARRIER J. Manipulation of giant Faraday rotation in graphene metasurfaces[J]. *Applied Physics Letters*, 2012,101(23):231605–231605-8.
- [21] DING J,ARIGONG B,REN H,et al.Tunable complementary metamaterial structures based on graphene for single and multiple transparency windows[J]. *Scientific Reports*, 2014,(4):6128–6128-4.
- [22] LUK'YANCHUK B,ZHELUDOV N I,Maior S A,et al. The Fano resonance in plasmonic nanostructures and metamaterials[J]. *Nature Materials*, 2010,9(9):707–715.
- [23] YE J,WEN F,SOBHANI H,et al. Plasmonic nanoclusters:near field properties of the Fano resonance interrogated with SERS[J]. *Nano Letters*, 2012,12(3):1660–1667.
- [24] LIU S D,YANG Z,LIU R P,et al. High sensitivity localized surface plasmon resonance sensing using a double split nanoring cavity[J]. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2011,115(50):24469–24477.
- [25] VERELLEN N,VAN D P,HUANG C,et al. Plasmon line shaping using nanocrosses for high sensitivity localized surface plasmon resonance sensing[J]. *Nano Letters*, 2011,11(2):391–397.

- [26] HAO F, SONNEFRAUD Y, DORPE P V, et al. Symmetry breaking in plasmonic nanocavities: subradiant LSPR sensing and a tunable Fano resonance[J]. *Nano Letters*, 2008, 8(11):3983–3988.
- [27] KOPPENS F H L, CHANG D E, GARCIA de Abajo F J. Graphene plasmonics:a platform for strong light-matter interactions[J]. *Nano Letters*, 2011, 11(8):3370–3377.
- [28] ZHAN T, SHI X, DAI Y, et al. Transfer matrix method for optics in graphene layers[J]. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 2013, 25(21):215301–215301-8.
- [29] FANG Z, THONGRATTANASIRI S, SCHLATHER A, et al. Gated tunability and hybridization of localized plasmons in nanostructured graphene[J]. *ACS Nano*, 2013(7):2388–2395.
- [30] ZHANG S, GENOV D A, WANG Y, et al. Plasmon-induced transparency in metamaterials[J]. *Physical Review Letters*, 2008, 101(4):047401–047401-4.
- [31] HAU L V, HARRIS S E, DUTTON Z, et al. Light speed reduction to 17 metres per second in an ultracold atomic gas[J]. *Nature*, 1999, 397(6720):594–598.
- [32] SCHNORRBERGER U, THOMPSON J D, TROTZKY S, et al. Electromagnetically induced transparency and light storage in an atomic Mott insulator[J]. *Physical Review Letters*, 2009, 103(3):033003–033003-4.

作者简介:



曹妍妍(1990-),女,山东省济宁市人,在读硕士研究生,主要研究方向为太赫兹波段电磁诱导透明的理论仿真、石墨烯超材料结构的分析和研究.email:caoyy0815@163.com.

张玉萍(1976-),女,山东省临沂市人,博士,副教授,主要研究方向为太赫兹波段吸波体和探测器的理论仿真、石墨烯超材料结构的分析和研究.

李 悅(1989-),女,山东省临沂市人,在读硕士研究生,主要研究方向为太赫兹波段探测器的理论仿真、石墨烯超材料结构的分析和研究.

刘元忠(1988-),男,山东省泰安市人,在读硕士研究生,主要研究方向为太赫兹波段吸波体的理论仿真、石墨烯超材料结构的分析和研究.

张会云(1974-),男,山东省临沂市人,博士,副教授,主要研究方向为太赫兹波段电磁诱导透明的理论仿真、石墨烯超材料结构的分析和研究.

(上接第186页)

作者简介:



AN Jianfei(1979-) was born in Shuangliao, Jilin province. His current research interests lie in the areas of MMW/terahertz radar and imaging system. email:anjianfei@mtrc.ac.cn.

CUI Zhenmao(1989-) was born in Wuwei, Gansu province. His current research interests lie in the areas of MMW/terahertz radar and imaging system.

LU Bin(1985-) was born in Chongqing. His current research involves MMW/terahertz instruments, including solid-state mixers and multipliers based on Schottky diodes.

CHENG Binbin(1980-) was born in Suizhou, Hubei province. His current research involves MMW/terahertz radar and imaging system.

FENG Zheng(1980-) was born in Luzhou, Sichuan province. His current research involves terahertz spintronics.

CHEN Fengjun(1988-) was born in Chongqing. His current research involves MMW/terahertz instruments, including solid-state mixers and multipliers based on Schottky diodes.