

栅状结构石墨烯超材料的太赫兹波偏振调制

曹建国^{1,2**}, 周译玄^{2*}

¹西安建筑科技大学理学院, 陕西 西安 710055;

²西北大学物理学院省部共建光电技术与功能材料国家重点实验室培育基地, 陕西 西安 710069

摘要 设计了一种基于栅状结构石墨烯超材料的电控器件, 利用有限元分析方法研究了其太赫兹波偏振调制特性。结果表明: 在 0.1~2.0 THz 的宽波段内, 平行于条带的偏振太赫兹波(TE)响应由石墨烯的 Drude 电导决定, 表现出强的均匀调制; 垂直于条带的偏振太赫兹波(TM)受石墨烯中等离子体效应的影响而基本透明。加栅压提高石墨烯的费米能级可以增强 TE 的衰减, 并使 TM 的等离子体峰蓝移; 石墨烯的面积占比越高, 器件的响应越强; 增大条带宽度会引起等离子体峰红移; 增加石墨烯层数可以使器件的偏振度进一步提高。以 2 μm 为周期, 条带宽为 1.5 μm 的 6 层石墨烯器件的可调偏振度在费米能级为 0.8 eV 时可以达到 0.89。该工作为新型太赫兹偏振调制器件的设计提供了思路。

关键词 光电子学; 调制器; 太赫兹; 石墨烯; 偏振; 超材料

中图分类号 O436 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.092501

Polarization Modulation of Terahertz Wave by Graphene Metamaterial with Grating Structure

Cao Jianguo^{1,2**}, Zhou Yixuan^{2*}

¹ School of Science, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an, Shaanxi 710055, China;

² State Key Lab Incubation Base of Photoelectric Technology and Functional Materials, School of Physics, Northwest University, Xi'an, Shaanxi 710069, China

Abstract We design an electronic control device based on graphene metamaterial with grating structure and study its polarization modulation properties in the terahertz region by finite element analysis method. The results show that in a wide band range of 0.1-2.0 THz, a broadband modulation occurs in the transmission of polarized terahertz wave parallel to the band (TE). It can be attributed to the intraband determined Drude conductivity of graphene. However, because of the plasma effect of graphene metamaterial, the transmission of polarized terahertz wave perpendicular to the band (TM) is almost transparent in the same terahertz region. More calculations also prove that with the increase of Fermi level of graphene, the modulation of TE will be enhanced largely while the plasma peak of TM will be blue shift. Meanwhile, the modulation can be further enhanced by the increase of the area ratio of graphene and the number of graphene layers in the device. In addition, the increase of the band width can cause a red shift of the plasma peak. With 2 μm period and 1.5 μm band width, a tunable maximum polarization degree of 0.89 can be achieved with 6 layer graphene device at Fermi level of 0.8 eV. This work paves a way for new graphene based terahertz polarization modulator.

Key words optoelectronics; modulator; terahertz; graphene; polarization; metamaterials

OCIS codes 250.4110; 160.4236; 300.6495

收稿日期: 2018-02-27; 修回日期: 2018-04-05; 录用日期: 2018-04-10

基金项目: 国家自然科学基金(61605160)、陕西省自然科学基金(2016JQ1010)、陕西省教育厅专项科研项目(16JK1781)、陕西省高校科协青年人才托举计划(20160114)

* E-mail: yxzhou@nwu.edu.cn; ** E-mail: 285291027@qq.com

1 引言

近年来,太赫兹技术得到了越来越多的重视与发展,并已在宽带通讯、安全检查、医学诊断、无损检测、国防雷达等方面展现出良好的应用前景^[1]。然而,与微波和光学波段相比,太赫兹技术的研究起步较晚,目前仍缺乏能够有效调控太赫兹波的功能器件^[2]。偏振调制器是能够使光的偏振状态按一定规律变化的光调制器件,在光学波段主要基于电光效应、法拉第效应、光弹效应等原理设计,目前已在激光器件与设备、光学仪器、机械工程等领域实现了重要应用。虽然太赫兹波段也有基于金属线栅、液晶、聚合物材料的偏振片^[3-4],但是能够实现主动调控功能的调制器件仍然较少。

石墨烯是2004年才被实验发现的二维纳米碳材料^[5],因具有优异的力、热、光和电学特性而迅速得到了学界与工业界的广泛研究^[6]。在太赫兹波段,石墨烯的电导响应变为由载流子带内跃迁主导的Drude形式,单层吸收系数可以达到可见波段的数十倍^[7-8]。并且,石墨烯的载流子浓度和费米能级可以在电压^[9-10]、掺杂^[11]、光抽运^[12]、磁场^[13]等作用下实现主动调谐,因此常被当作太赫兹波调制器的潜在功能材料^[14-17]。另外,将石墨烯制作成超材料结构后,其等离子体峰的中心频段可以达到太赫兹波段范围^[18-20],为具有更灵活功能的太赫兹主动器件的设计提供了原理基础。

本文设计了具有栅状结构的石墨烯超材料,并利用有限元分析方法计算了其在太赫兹波段的偏振调制特性。周期栅状结构的引入使石墨烯具有各向

异性,能对平行于条带的偏振太赫兹波(TE)和垂直于条带的偏振太赫兹波(TM)产生不同的响应。其中:TE的响应由石墨烯的Drude电导模型决定,在0.1~2.0 THz宽波段表现出强的均匀调制;TM的响应受石墨烯中等离子体效应的影响,在0.1~2.0 THz波段基本透明。利用电容器结构对石墨烯加栅压,使其太赫兹电导与等离子体频率可调控,从而使器件具有主动调制能力。基于计算结果讨论了石墨烯费米能级、石墨烯的面积占比、条带宽度及器件中石墨烯层数的影响,给出了器件的可调偏振度随上述参数变化的规律。所得结果可为新型太赫兹偏振调制器件的设计提供思路与参考。

2 基本原理

2.1 结构原理

基于石墨烯超材料的偏振调控太赫兹器件的结构设计如图1所示。该器件由上下两层石墨烯构成,中间采用厚度为 d 的二氧化硅(SiO_2)绝缘层分开,构成一个电容器结构。上下层之间加栅压,以此调控两层石墨烯的费米能级和载流子浓度,栅压和载流子浓度的关系满足经验公式^[21]:

$$|N_c| = 7.5 \times 10^{10} \times |V_g - V_{\text{CNP}}|, \quad (1)$$

式中: N_c 为石墨烯中的载流子浓度; V_g 为实际加的电压; V_{CNP} 为达到石墨烯样品电中性点的电压。当对石墨烯加栅压后,处于正电位的石墨烯变为空穴掺杂,空穴浓度上升;处于负电位的石墨烯变为电子掺杂,电子浓度上升^[14]。电子和空穴作为载流子与费米能级的关系为

$$E_F = \pm \hbar v_F \sqrt{\pi |N_c|}, \quad (2)$$

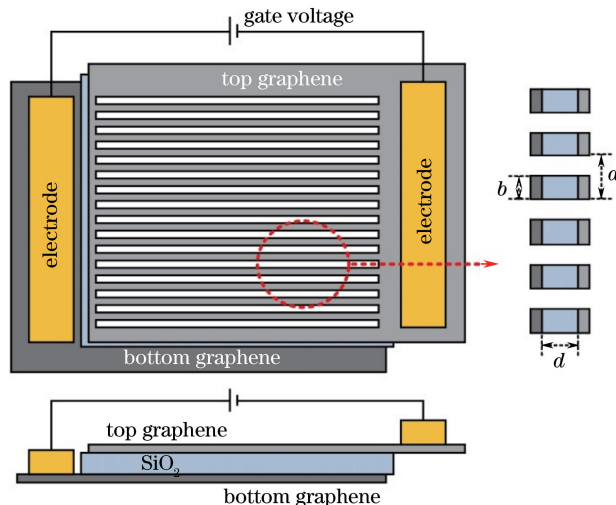


图1 石墨烯太赫兹波偏振调制器件结构

Fig. 1 Structure diagram of graphene terahertz wave polarization modulation device

式中: E_F 为费米能级; \hbar 为普朗克常数; v_F 为石墨烯中载流子的费米速度。当掺杂载流子分别为空穴和电子时, 费米能级分别对应为正值和负值。可见, 无论是空穴还是电子掺杂引起的载流子浓度上升, 都会使费米能级的绝对值增加, 从而使得石墨烯的太赫兹电导增大^[9]。进一步, 将石墨烯中间交叠的区域制作成周期性栅状结构, 长度周期为 a , 条带的宽度为 b , 从而, 器件具有了各向异性的纳米结构。当条带宽度在一定范围时, 石墨烯中的等离子体振荡频率可以达

到太赫兹波段^[18-20], 使得石墨烯在平行和垂直于条带方向上的太赫兹响应发生变化。最终, 当太赫兹波正入射透过该器件之后, 平行于条带方向和垂直于条带方向上的两个偏振分量产生与器件结构、所加栅压相关的不同的透过率, 从而实现偏振调控。

2.2 计算方法

为了对上述结构、掺杂等参数的影响进行评估与分析, 这里利用有限元方法对 TE 和 TM 进行仿真分析。其中, 石墨烯的太赫兹电导使用 Kubo 模型^[22-23]:

$$\sigma = \frac{ie^2(\omega + 2i\Gamma)}{\pi\hbar^2} \left\{ \frac{1}{(\omega + 2i\Gamma)^2} \int_0^\infty E \left[\frac{\partial f_d(E)}{\partial E} - \frac{\partial f_d(-E)}{\partial E} \right] dE - \int_0^\infty \frac{\partial f_d(E)}{(\omega + 2i\Gamma)^2 - 4(E/\hbar)^2} dE \right\}, \quad (3)$$

式中: ω 为角频率; E 为能量; Γ 为载流子散射概率; e 为电子的电荷量; $f_d(E) = \left(1 + \exp \frac{E - E_F}{K_b T} \right)^{-1}$ 为费米狄拉克分布, 其中 T 为温度, K_b 为波尔兹曼常数。 Γ 与 E_F 的关系可以写为 $\Gamma = \mu E_F / (ev_F^2)$ ^[23], 其中费米速度 $v_F = 1 \times 10^6$ m/s, 载流子迁移率 $\mu = 10000$ cm²/(V·s)。由此可见, 在室温时, 石墨烯的太赫兹电导是随着费米能级和太赫兹频率变化的量。费米能级与所加栅压的大小有关, 为了使计算更有普遍性, 本研究采用费米能级为变化量讨论器件的可调控性, 费米能级范围为 0.1~0.8 eV。计算中选取的石墨烯条带周期为 1~6 μm , 条带宽度为 0.5~3.0 μm , SiO₂ 层的厚度 $d = 30$ nm。

3 分析与讨论

首先, 计算长度周期为 3 μm 、条带宽度为 1.5 μm 的器件在 0.1~0.8 eV 费米能级的 TE 和 TM 透过率, 结果分别如图 2(a) 和图 2(b) 所示。由图 2(a) 可知: 当太赫兹波电场与条带的方向平行

时, 透过率随着费米能级的增大而明显下降(这种下降是依赖于频率的); 在 0.1~2.0 THz 的低频波段, 透过率下降是宽波段均匀的, 数值由 0.94 下降到 0.23; 随着频率增大, 这种调控程度越来越小, 在 20 THz 之后, 调控已经越来越不明显。由图 2(b) 可以看出: 当太赫兹波电场与条带的方向垂直时, 透过情况与 TE 完全不同; 在低频波段, 太赫兹波的透过率几乎不随费米能级而改变, 数值接近 1; 随着频率增大, 可以看到明显的等离子体吸收峰; 随着石墨烯的费米能级由 0.1 eV 提高到 0.8 eV, 等离子体峰值由 12.2 THz 蓝移到 30.2 THz, 峰值透过率由 0.96 下降到 0.27。石墨烯中的等离子体频率被证明正比于 $E_F^{1/2}$ ^[18,20], 因此此处等离子峰的蓝移是由费米能级上升和载流子浓度提高引起的。从偏振调控角度分析, 在 0.1~2.0 THz 的宽波段范围, 器件可以实现对 TM 的高透过和对 TE 的良好调制。以 $P = (T_{\text{TM}} - T_{\text{TE}}) / (T_{\text{TM}} + T_{\text{TE}})$ 定义偏振度 (T_{TM} 、 T_{TE} 分别为 TM 和 TE 的透过率), 在费米能级为 0.8 eV 的情况下, 器件的偏振度为 0.63。

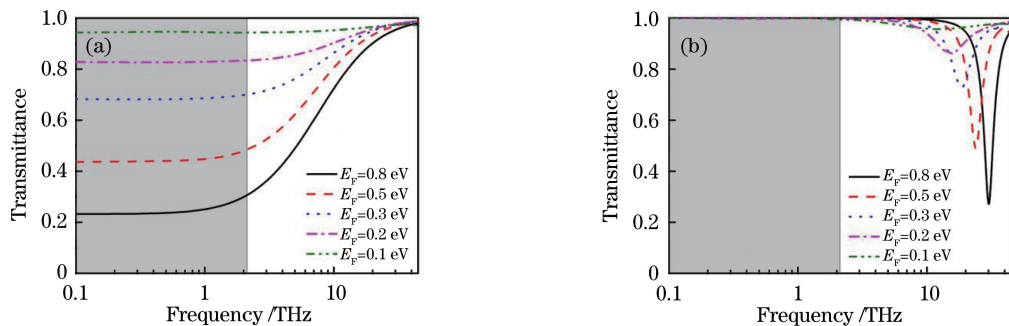


图 2 不同费米能级时, 偏振太赫兹波透过石墨烯器件的透过率随频率的变化。(a) TE; (b) TM

Fig. 2 Transmittance of polarized terahertz wave through graphene device as a function of frequency for different Fermi levels. (a) TE; (b) TM

其次,通过固定石墨烯的面积占比为 $1/2$ ($a = 2b$),在改变器件的条带宽度为 $0.5 \sim 3.0 \mu\text{m}$ 的情况下讨论最高掺杂程度(费米能级为 0.8 eV)时器件性能的变化规律。由图 3 可见,随着条带宽度从 $0.5 \mu\text{m}$ 提高到 $3.0 \mu\text{m}$,TE 的透过率变化很小,而 TM 的等离子体峰位置从 47.7 THz 明显红移到了 21.5 THz 。这是因为 TE 传输平行于条带,这时不同条带宽度的石墨烯在这个方向上的太赫兹电导都

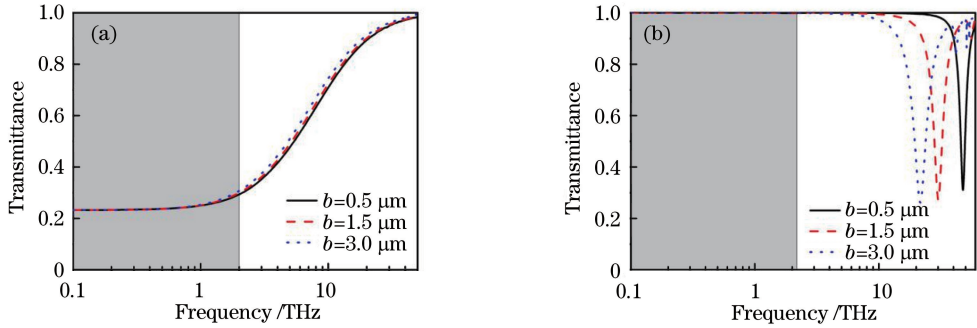


图 3 不同条带宽度时,偏振太赫兹波透过石墨烯器件的透过率随频率的变化。(a) TE;(b) TM

Fig. 3 Transmittance of polarized terahertz wave through graphene device as a function of frequency for different band widths. (a) TE; (b) TM

再次,固定条带宽度为 $1.5 \mu\text{m}$,在器件长度周期为 $2 \sim 6 \mu\text{m}$ 的情况下讨论最高掺杂程度(费米能级为 0.8 eV)时器件性能的变化规律,结果见图 4。与上一种情况不同的是,图 3 中器件的面积占比不变,而图 4 改变的则正是面积占比。从 TE 的情况来看,改变面积占比可以在很大程度上影响太赫兹波的透过率,随着周期由 $6 \mu\text{m}$ 下降到 $2 \mu\text{m}$,器件在

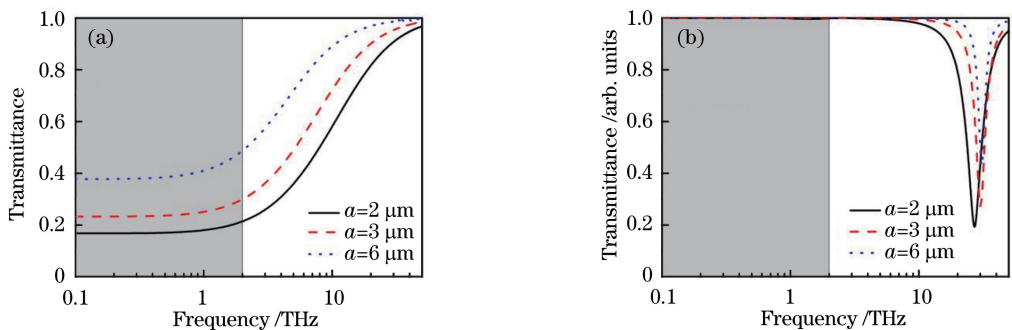


图 4 不同长度周期时,偏振太赫兹波透过石墨烯器件的透过率随频率的变化。(a) TE;(b) TM

Fig. 4 Transmittance of polarized terahertz wave through graphene device as a function of frequency for different period lengths. (a) TE; (b) TM

最后,为了进一步提高偏振度,计算石墨烯层数的影响。图 1 所示为双层石墨烯的模型。假设增加石墨烯层数后仍然可以实现电容器结构的调控。例如,对于一个有 6 层石墨烯的结构,需要在相邻石墨烯之间制作介质层,然后让偶数层连接一个电极,奇数层连接另一个电极,从而可以加栅

表现为 Drude 形式,在材料面积占比一定的情况下,表现出的太赫兹波响应仍然一致。然而,对垂直于条带的 TM 而言,石墨烯中的等离子体频率被证明正比于 $b^{-1/2}$ [18,20],因此此处等离子体峰的红移变化是由条带尺寸变宽引起的。从偏振调控应用角度讲,更窄的条带可以使等离子体峰移动到更高的频段,从而获得低频段宽波段的调控。在实际制作中应当权衡条带宽度与制作成本的影响。

$0.1 \sim 2.0 \text{ THz}$ 波段的透过率由 0.38 下降到了 0.17 。同时, TM 在低频部分仍然透明,等离子体的峰值位置变化较小,强度由 0.44 下降到了 0.19 。从应用角度讲,提高面积占比可以有效提升器件的调控能力。应用中需要考虑制作的工艺难度,以保证一定的带隙,以 $2 \mu\text{m}$ 周期为例,可以将器件的可调偏振度提高到 0.71 。

压调控所有石墨烯的太赫兹电导。图 5 为 2、4 和 6 层石墨烯器件的 TE 和 TM 的透过率 ($E_F = 0.8 \text{ eV}$, $a = 2 \mu\text{m}$, $b = 1.5 \mu\text{m}$)。从 TE 的情况来看,增加石墨烯层数到 6 层时就可以使器件在低频波段的透过率由 2 层时的 0.17 降低到 0.06 。同时,其等离子体峰值频率由 2 层时的 27.1 THz 上

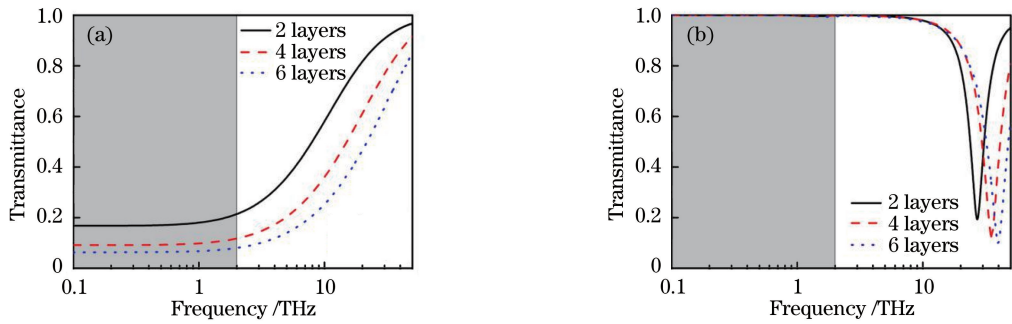


图5 不同石墨烯层数时,偏振太赫兹波透过石墨烯器件的透过率随频率的变化。(a) TE;(b) TM

Fig. 5 Transmittance of polarized terahertz wave through graphene device as a function of frequency for different graphene layer numbers. (a) TE; (b) TM

升到了6层时的39.7 THz,因此TM在低频波段可以保持良好的透明。通过增加石墨烯的层数到6层,可以使器件的偏振度达到0.89。器件的偏振度可以通过进一步叠加石墨烯的层数来加以提高,然而应用中应考虑制备工艺的难度与成本进行优化选择。

4 结 论

对于具有栅状结构的石墨烯超材料器件,其透过TE的响应由石墨烯的Drude电导模型决定,在0.1~2.0 THz的宽波段表现出强的均匀调制;TM的响应受石墨烯中等离子体效应的影响,在0.1~2.0 THz波段基本透明。从参数角度讲,石墨烯费米能级的提高可以使TE的响应提高,等离子体频率蓝移;当固定石墨烯面积占比时,条带宽度不影响TE的衰减,但会引起等离子体峰值频率移动;当固定条带宽度时,石墨烯的面积占比越高,器件的偏振度越高;在相同的结构参数下,增加石墨烯层数可以使器件的偏振度进一步提高。本研究的工作结果证明,栅状结构石墨烯器件具备对太赫兹波偏振主动调制的功能,有望将太赫兹波偏振器件由以往的被动引入主动器件时代。

参 考 文 献

[1] Tonouchi M. Cutting-edge terahertz technology[J]. *Nature Photonics*, 2007, 1(2): 97-105.
 [2] Williams G P. Filling the THz gap-high power sources and applications[J]. *Reports on Progress in Physics*, 2006, 69(2): 301-326.
 [3] Liu L M, Zhao G Z, Zhang G H, *et al.* Polarization characteristics of one-dimensional metallic wire-grating polarizer in terahertz frequency range[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(3): 0311001.

刘立明, 赵国忠, 张杲辉, 等. 太赫兹波段一维金属线栅的偏振特性研究[J]. *中国激光*, 2012, 39(3): 0311001.

[4] Mao H Y, Xu H M, Xia L P, *et al.* A large area and low loss thin-film terahertz polarizer [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, 44(9): 0923004.
 毛洪艳, 许红梅, 夏良平, 等. 大面积低损耗薄膜衬底太赫兹偏振片[J]. *光子学报*, 2015, 44(9): 0923004.
 [5] Novoselov K S, Geim A K, Morozov S V, *et al.* Electric field effect in atomically thin carbon films [J]. *Science*, 2004, 306(5696): 666-669.
 [6] Novoselov KS, Fal'ko VI, Colombo L, *et al.* A roadmap for graphene [J]. *Nature*, 2012, 490(7419): 192-200.
 [7] Docherty C J, Johnston M B. Terahertz properties of graphene[J]. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 2012, 33(8): 797-815.
 [8] Zhou Y X. Study on tunable conductance characteristics and application of graphene in terahertz band[D]. Xi'an: Northwest University, 2014: 20-23.
 周译玄. 太赫兹波段石墨烯可调电导特性与应用研究[D]. 西安: 西北大学, 2014: 20-23.
 [9] Maeng I, Lim S, Chae S J, *et al.* Gate-controlled nonlinear conductivity of Dirac fermion in graphene field-effect transistors measured by terahertz time-domain spectroscopy [J]. *Nano Letters*, 2012, 12(2): 551-555.
 [10] Yang C H, Wang L, Chen Y Y, *et al.* Optical absorption property of graphene PN junction modulated by voltage in terahertz region[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(11): 112601.
 杨翠红, 王璐, 陈云云, 等. 电压调制的石墨烯PN结在太赫兹区的光吸收特性[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(11): 112601.

- [11] Zhou Y X, Xu X L, Hu F R, *et al.* Graphene as broadband terahertz antireflection coating [J]. Applied Physics Letters, 2014, 104(5): 051106.
- [12] Weis P, Garcia-Pomar J L, Höh M, *et al.* Spectrally wide-band terahertz wave modulator based on optically tuned graphene [J]. ACS Nano, 2012, 6(10): 9118-9124.
- [13] Zhou Y X, Xu X L, Fan H M, *et al.* Tunable magnetoplasmons for efficient terahertz modulator and isolator by gated monolayer graphene [J]. Physical Chemistry Chemical Physics, 2013, 15(14): 5084-5090.
- [14] Sensale-Rodriguez B, Yan R S, Kelly M M, *et al.* Broadband graphene terahertz modulators enabled by intraband transitions [J]. Nature Communications, 2012, 3: 780.
- [15] Sun Z P, Martinez A, Wang F. Optical modulators with 2D layered materials [J]. Nature Photonics, 2016, 10(4): 227-238.
- [16] Geng L, Xie Y N, Yuan Y. Graphene-based antenna with reconfigurable radiation pattern in terahertz [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(3): 031602.
耿莉, 谢亚楠, 原媛. 基于石墨烯的太赫兹方向图可重构天线 [J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(3): 031602.
- [17] 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.
- [18] Ju L, Geng B S, Horng J, *et al.* Graphene plasmonics for tunable terahertz metamaterials [J]. Nature Nanotechnology, 2011, 6(10): 630-634.
- [19] Low T, Avouris P. Graphene plasmonics for terahertz to mid-infrared applications [J]. ACS Nano, 2014, 8(2): 1086-1101.
- [20] Yan H G, Li X S, Chandra B, *et al.* Tunable infrared plasmonic devices using graphene/insulator stacks [J]. Nature Nanotechnology, 2012, 7(5): 330-334.
- [21] Horng J, Chen C F, Geng B S, *et al.* Drude conductivity of Dirac fermions in graphene [J]. Physical Review B, 2011, 83(16): 165113.
- [22] Yao Z H, Huang Y Y, Wang Q, *et al.* Tunable surface-plasmon-polariton-like modes based on graphene metamaterials in terahertz region [J]. Computational Materials Science, 2016, 117: 544-548.
- [23] Hanson G W. Dyadic Green's functions and guided surface waves for a surface conductivity model of graphene [J]. Journal of Applied Physics, 2008, 103(6): 064302.