

石墨烯微波至太赫兹的特性及天线中的应用

谢亚楠 刘志坤 耿 莉 潘登科 宋 盼

上海大学 通信与信息工程学院 上海 200072

摘要 微波至太赫兹波段,石墨烯的电导率由带内贡献决定。利用带内电导率模型,研究了该频段石墨烯的表面电导率、等效表面阻抗和等效介电常数随化学势和温度的变化关系。石墨烯的表面电导率和等效表面阻抗受化学势的影响比较大,具有可调谐性,而受温度的影响比较小。根据带内电导率模型和石墨烯表面等离子激元的色散方程研究了无限大平面石墨烯表面等离子激元横磁模的有效模式指数。结果表明,石墨烯应用于等离子天线时,与传统材料的天线相比高度小型化。所以,石墨烯应用于天线具有可调谐、性能可靠和小型化等优点。根据电磁波的传输特性,研究了石墨烯的透射系数随化学势的变化关系,透射系数受化学势影响比较大,这为设计可调式太赫兹滤波器提供了可能。设计了可弯曲石墨烯天线,获得了较好的增益方向图。

关键词 材料; 天线; 电磁特性; 透射系数; 太赫兹

中图分类号 O441.4 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201535.s116005

Properties of Graphene and Antenna Applications in Microwave to THz

Xie Yanan Liu Zhikun Geng Li Pan Dengke Song Pan

School of Communication and Information Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China

Abstract Graphene's conductivity is governed by intraband contributions in microwave to terahertz band. The dependence of the surface conductivity, the equivalent surface impedance and permittivity on the chemical potential and temperature using the intraband conductivity model are studied. The surface conductivity and equivalent surface impedance largely depend on the chemical potential, and hardly depend on the temperature. So the graphene has tunable surface conductivity and impedance. The effective surface plasmon polaritons mode index of the infinite planar graphene based on the intraband conductivity model and the dispersion relation of TM (transverse magnetic) modes of graphene's SPP (surface plasmon polaritons) are researched. The result proves that graphene-based plasmonic resonant antennas are expected to be smaller than traditional material antennas. So the graphene antennas are tunable, stable and miniature. The dependence of transmission coefficient on chemical potential based on the property of electromagnetic waves is studied. The transmission coefficient largely depends on the chemical potential so as to make the material possible for tunable THz filter. Flexible graphene antenna is designed. The good gain is observed.

Key words materials; antenna; electromagnetic property; transmission coefficient; terahertz wave

OCIS codes 160.4236; 160.4330; 240.6680

1 引 言

石墨烯是碳原子以 sp^2 杂化轨道按蜂巢晶格排列构成的单层二维结构,石墨烯具有奇异的机械、热学、电学和光学性质^[1-6],因此石墨烯被广泛应用于超快晶体管^[7]、液晶器件^[8]、超材料^[9]、纳米光子学^[10]等领域。虽然石墨烯是已知最好的良导体,但由于它仅仅一个碳原子厚度,因此在微波和毫米波段相对于金属表面阻抗较大^[11]。在太赫兹波段,电磁波能够在一定结构的石墨烯表面激发表面等离子激元(SPP),使得石墨烯应用于太赫兹的探测^[12]和成像等领域具有广阔的前景。

收稿日期: 2015-01-23; 收到修改稿日期: 2015-03-03

作者简介: 谢亚楠(1962—),男,博士,教授,主要从事遥感、石墨烯天线方面的研究。E-mail: yxie@shu.edu.cn

本文主要讨论了微波至太赫兹波段无限薄石墨烯的电磁特性,计算和仿真了石墨烯的电导率、阻抗、介电常数、以及透射率随频率和化学势之间的变化关系,说明了石墨烯应用于天线时有许多优势,并且仿真了工作频率在 2.8GHz 的石墨烯可弯曲天线。

2 微波至太赫兹波段石墨烯的电磁特性

微波至太赫兹波段,石墨烯的电导率可以用复数面电导率 $\sigma_s(\omega) = \sigma'_s - i\sigma''_s$ 来表征,时间变化量取为 $\exp(i\omega t)$ 。在太赫兹波段,石墨烯的电导率主要有带内贡献所主导^[13-15]:

$$\sigma_s = \frac{2e^2 k_B T}{\pi \hbar} \ln \left[2 \cosh \left(\frac{\mu_c}{2k_B T} \right) \right] \frac{i}{\omega + i\tau^{-1}}, \quad (1)$$

式中 $\tau = 1 \times 10^{-13}$ s 为弛豫时间, μ_c 是化学势, T 是温度, e 是电子的电荷, \hbar 是归一化普朗克常数, k_B 是玻尔兹曼常数和 $\omega = 2\pi f$ 是角频率。所以 σ'_s 和 σ''_s 可由(1)式求得(即分别是 σ_s 的实部和虚部)。所谓带内贡献是指带内(导带或价带)单个粒子激发所导致的损耗^[16]。对于一个悬浮的石墨烯薄层,化学势 μ_c 由载流子浓度 n_s 决定^[13]

$$n_s = \frac{2}{\pi \hbar^2 v_F^2} \int_0^{+\infty} \epsilon [f_d(\epsilon) - f_d(\epsilon + 2\mu_c)] d\epsilon, \quad (2)$$

式中 ϵ 为能量, $v_F = 9.5 \times 10^5$ m/s 是费米速度, $f_d(\epsilon)$ 为费米-狄拉克分布函数:

$$f_d(\epsilon) = \left[\exp \left(\frac{\epsilon - \mu_c}{k_B T} \right) + 1 \right]^{-1}, \quad (3)$$

载流子浓度可以通过化学掺杂或栅极偏压等方式进行调节。

2.1 石墨烯电导率与化学势、温度的变化关系

从微波至太赫兹波段,石墨烯的面电导率是个复数,它是频率、化学势和温度的函数。石墨烯化学势的调节有主动和被动两种^[15]。仿真了石墨烯复数面电导率与化学势、温度的变化关系。

图 1 是在温度在 $T = 300$ K 仿真的结果,从图可以看出,石墨烯面电导率受化学势的影响比较大。因此,通过加载外部电场来调节化学势,最终制备出辐射方向图和辐射效率动态可调节的智能化石墨烯天线。

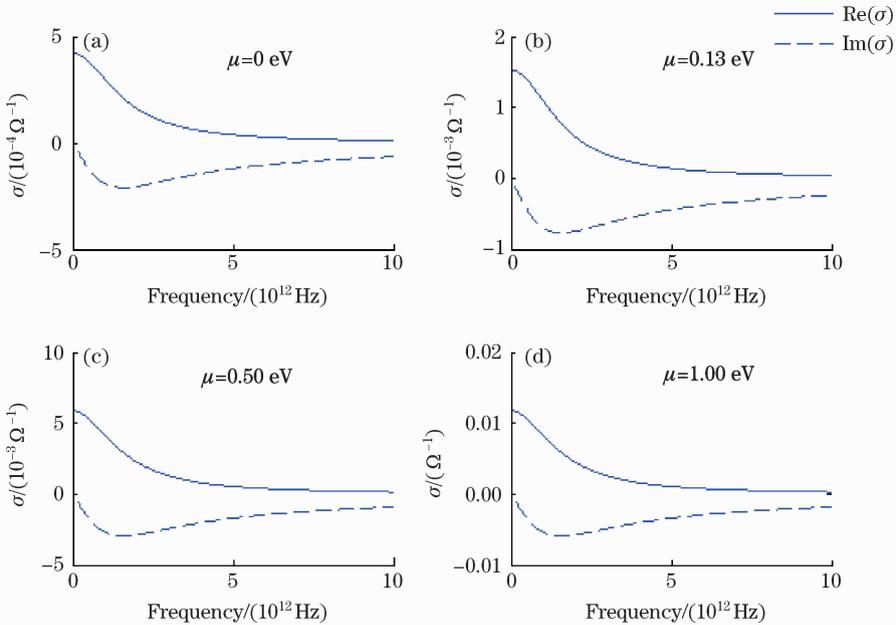


图 1 微波至太赫兹波段石墨烯复数面电导率随化学势的变化关系

Fig. 1 Graphene complex surface conductivity for different chemical potential in microwave to THz band

图 2 是在 $\mu_c = 0.13$ eV 时模拟的结果,从图看出石墨烯面电导率受温度影响不大。这是因为,对(1)式化简:

$$\cosh\left(\frac{\mu_c}{2k_B T}\right) = \frac{\exp\left(\frac{\mu_c}{2k_B T}\right) + \exp\left(-\frac{\mu_c}{2k_B T}\right)}{2}, \quad (4)$$

在一定温度下(200~400 K),经过计算 $\mu_c = 0.13$ eV 时, $\exp\left(\frac{\mu_c}{2k_B T}\right)$ 远大于 $\exp\left(-\frac{\mu_c}{2k_B T}\right)$, 所以由(1)式得出:

$$\sigma_s = \frac{e^2 \mu_c}{\pi \hbar^2} \frac{i}{\omega + i\tau^{-1}}, \quad (5)$$

从(5)式看到,在合适的温度和化学势下,石墨烯面电导率和温度无关。这是石墨烯用于天线的优势之一。

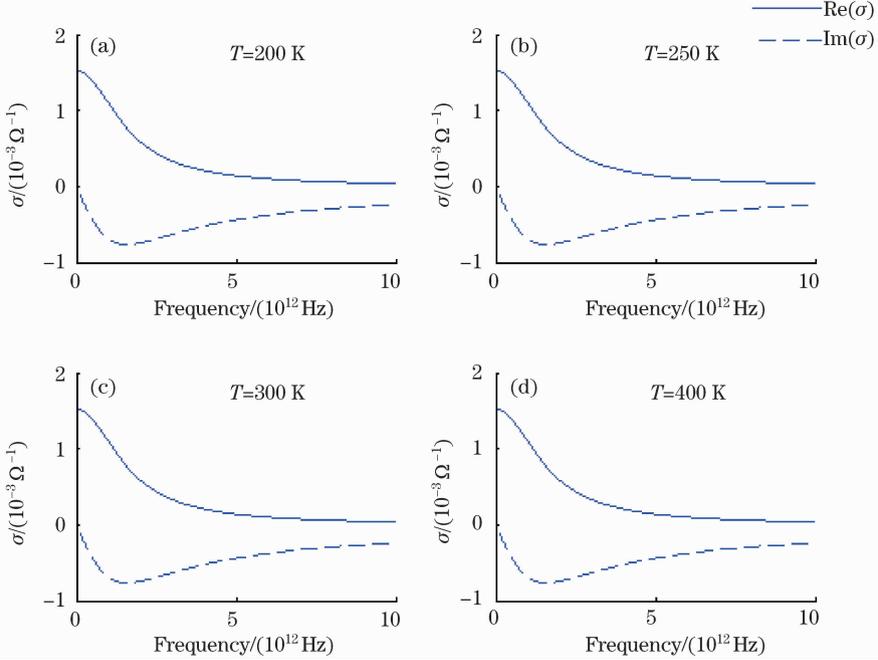


图 2 微波至太赫兹波段石墨烯复数面电导率随温度的变化关系

Fig. 2 Graphene complex surface conductivity for different temperature in microwave to THz band

2.2 石墨烯阻抗、等效介电常数随频率的变化关系

石墨烯的等效表面阻抗用公式 $Z_s = R_s + iX_s$ 表示。又因为 $Z_s = 1/\sigma_s(\omega)$, 因此在 $T = 300$ K, $\mu_c = 0.13$ eV 下, 仿真了石墨烯的等效表面阻抗随频率的变化关系(如图 3)。从图看出,微波至毫米波波段,石墨烯表面电阻几乎不随频率变化,并且表面电抗较小。随着频率的增加,石墨烯的表面阻抗由电抗(感抗)所主导,导致在太赫兹波段石墨烯等离子体震荡,产生了等离子体频率区域。这为石墨烯表面等离子激元(SPP)的产生创造了条件。因此,在纳米无线通信系统中,利用表面等离激元制备石墨烯天线是一个很好的前景。

石墨烯的等效介电常数表示为 $\epsilon' = \epsilon_0 - i \frac{\sigma}{\omega}$, 式中 $\sigma = \frac{\sigma_s}{d}$, σ 是石墨烯的体电导率, d 是石墨烯的厚度。等效介电常数的实部代表位移电流的贡献,而虚部为传导电流的贡献。石墨烯的等效介电常数用面电导率表示为:

$$\epsilon'_r = \left(1 - \frac{\sigma''_s}{\omega \epsilon_0 d}\right) - i \frac{\sigma'_s}{\omega \epsilon_0 d}, \quad (6)$$

在 $T = 300$ K, $\mu_c = 0.13$ eV 和 $d = 0.35$ nm 下, 论文仿真了石墨烯的等效介电常数随频率的变化关系(如图 4 所示)。图 4 可得,在太赫兹波段石墨烯等效介电常数是负数,实部的绝对值要大于虚部的绝对值。因此,在太赫兹波段石墨烯的特性由实部所主导。(6)式和图 4 对于仿真石墨烯天线、介电常数的设置具有指导意义。

2.3 太赫兹波段石墨烯表面等离激元的有效模式指数

考虑中间层为无限大石墨烯,上下层为相对介电常数 ϵ_{r1} 和 ϵ_{r2} 两介质结构,由麦克斯韦方程组和边界条件可求得其色散方程^[16]为:

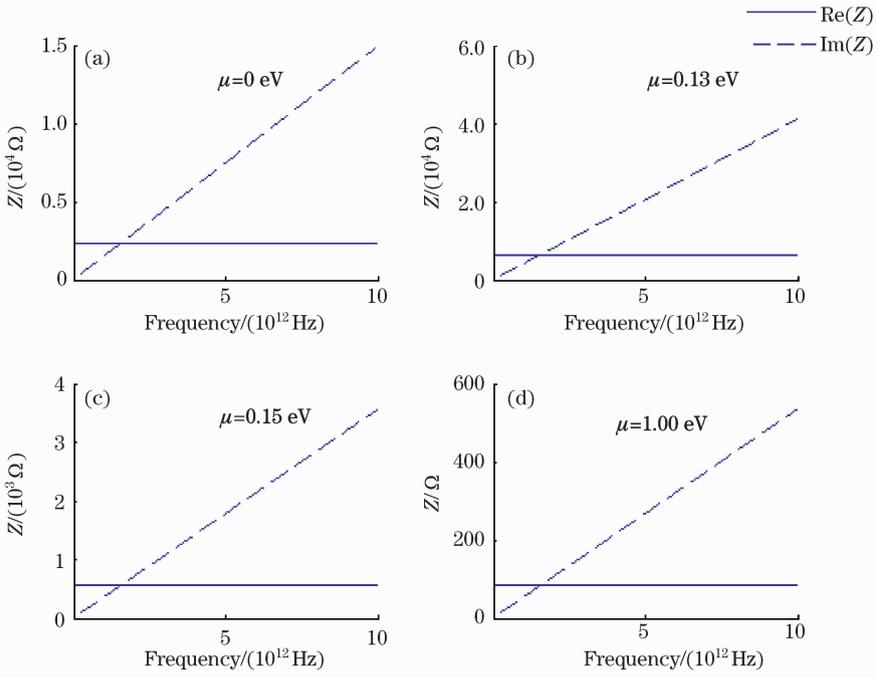


图 3 石墨烯表面阻抗随频率的变化关系

Fig. 3 Graphene equivalent surface impedance for different chemical potential in microwave to THz band

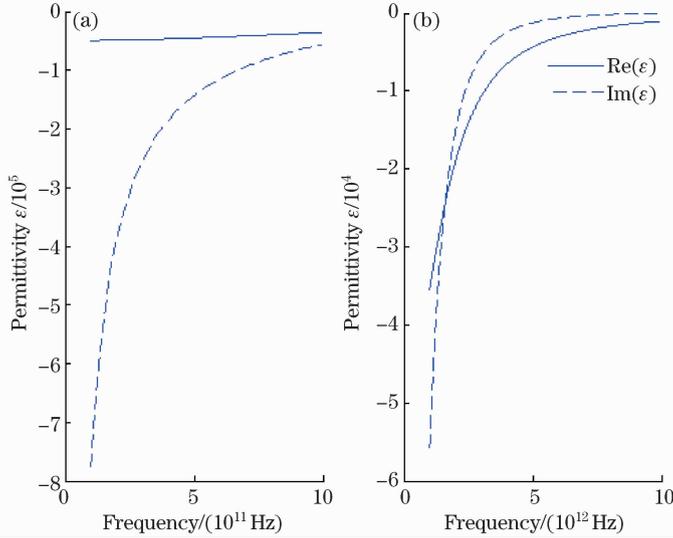


图 4 石墨烯等效介电常数和频率的变化关系

Fig. 4 Graphene equivalent permittivity in microwave to THz band

$$\frac{\epsilon_{r1}}{\sqrt{\beta^2 - \frac{\epsilon_{r1}\omega^2}{c^2}}} + \frac{\epsilon_{r2}}{\sqrt{\beta^2 - \frac{\epsilon_{r2}\omega^2}{c^2}}} = \frac{\sigma_s}{\omega\epsilon_0} i, \quad (7)$$

式中 β 为 SPP 的波矢, 由于时间变化因子取 $\exp(i\omega t)$, 所以(7)式等号右边无负号。设上下衬底为空气(即 $\epsilon_{r1} = \epsilon_{r2} = 1$), 由(7)式求得:

$$\beta^2 = k_0^2 \left[1 - \left(\frac{2}{\eta^s} \right)^2 \right], \quad (8)$$

所以, 有效模式指数为 $n = \frac{\text{Re}(\beta)}{k_0}$ 。在 $T=300$ K 和 $\mu_c=0.13$ eV 条件下, 根据(8)式得出了 SPP 的有效模式指数随频率的变化关系(如图 5), 从图 5 得出, 随着频率的增加有效模式指数是增大的。该图也说明在同样

的谐振频率下,石墨烯太赫兹天线要比半波金属振子天线小几十倍,易于集成在纳米通信系统中。

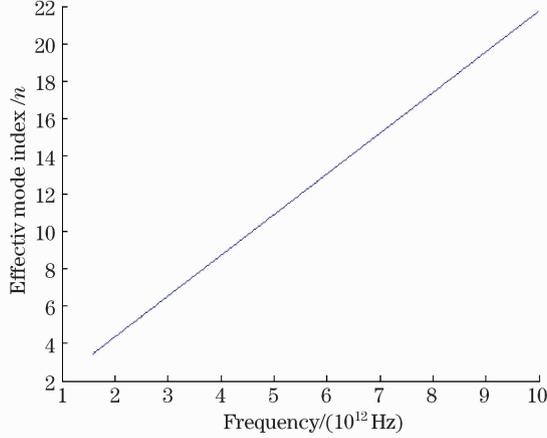


图5 SPP的有效模式指数随频率的变化关系

Fig.5 Effective mode index of SPP in THz band

2.4 微波至太赫兹波段石墨烯的透射系数

考虑以平面波照射到无限大石墨烯表面上,如图6所示。入射光的电场和磁场分别为 $\hat{x}E_x^i$ 和 $\hat{z}H_z^i$, 反射光的电场和磁场分别为 $-\hat{x}E_x^r$ 和 $\hat{z}H_z^r$, 透射光的电场分别为 $\hat{x}E_x^t$ 和 $\hat{z}H_z^t$ 。电磁波的边界条件为:

$$\vec{n} \cdot [\vec{E}|_{z=+0} - \vec{E}|_{z=-0}] = 0, \quad (9)$$

$$\vec{n} \times [\vec{H}|_{z=+0} - \vec{H}|_{z=-0}] = \vec{J}_s, \quad (10)$$

由边界条件(9)式和(10)式得:

$$H_z^i + H_z^r - H_z^t = J_s, \quad (11)$$

$$E_x^i - E_x^r = E_x^t, \quad (12)$$

又因为:

$$\frac{E_x^i}{H_z^i} = \eta, \frac{E_x^r}{H_z^r} = \eta, \frac{E_x^t}{H_z^t} = \eta, \quad (13)$$

$$J_s = \sigma_s E_x^i, \quad (14)$$

$$\Gamma = \frac{H_z^r}{H_z^i}, \quad (15)$$

由(11)~(15)式可求得:

$$\Gamma = \frac{1}{1 + \frac{1}{2}\sigma_s\eta}, \quad (16)$$

式中 J_s 为电流面密度, η 为空气波阻抗, σ_s 为石墨烯面电导率和 Γ 为电磁波的透射系数。因为 $\Gamma = \Gamma' + i\Gamma''$, 透射系数的实部 Γ' 即是传统意义上的透射系数, 而虚部为相位的变化。在 $T=300$ K 时, 仿真了石墨烯的透射系数和频率、化学势的变化关系, 如图7所示。从图7可以看出, 透射系数随着频率的增加而增加, 随着化学势的减小而增加。利用这一特点, 可以制备可调式太赫兹滤波器, 即通过加载外部电场, 选取合适的频段。

总之, 微波至太赫兹波段, 石墨烯表面电导率的可调谐性, 导致了石墨烯阻抗、等效介电常数和透射系数等的可调谐性。在太赫兹波段, $\sigma'' > \sigma'$, $X_s > R_s$ 和 $\text{Re}(\epsilon) > \text{Im}(\epsilon)$ 是等效的, 这在石墨烯表面激发 SPP 创造了条件。

3 石墨烯在天线中的潜在应用

石墨烯在天线中的位置有两类: 作辐射体和衬底^[17]。在微波至毫米波波段, 当石墨烯作为传统意义上的金属在天线上使用时, 由于石墨烯电导率较高的可调谐性, 因此用于设计辐射方向图和辐射效率动态可调节的智能天线。石墨烯机械性能较好, 对不同曲率半径有较稳定的电抗性能^[18], 因此可制成可弯曲天线^[19]。

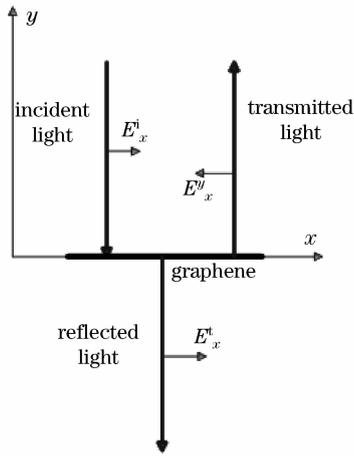


图 6 电磁波和石墨烯作用图

Fig. 6 Interaction of an incident wave and graphene

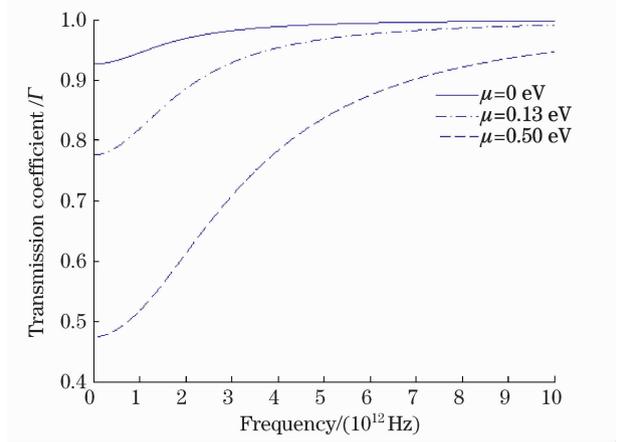


图 7 石墨烯透射系数随频率的变化关系

Fig. 7 Transmission coefficient in microwave to THz

本文设计了工作频率在 2.8GHz 可弯曲石墨烯偶极子天线,在仿真软件 HFSS 微波工作室中建模。模型中,使用聚二甲基硅氧烷(PDMS)作为衬底,其相对介电常数为 2.65,损耗正切 $\tan\delta=0.02$ 。偶极子天线的臂长为 21 mm,宽为 3 mm。对于三角形的微带巴伦结构,其作用是矫正了方向图,减少了反向电流的影响。衬底长为 60 mm,宽为 40 mm,厚度为 1.6 mm。石墨烯偶极子天线的模型如图 8 所示。

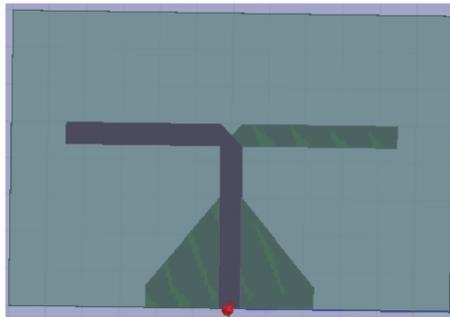


图 8 石墨烯偶极子天线结构(俯视图)

Fig. 8 Schematic diagram of graphene dipole antenna

图 9 为石墨烯偶极子天线的 E 面方向图,从图看出石墨烯可弯曲天线的增益非常可观。而天线的曲率半径对天线的影响非常有限^[19]。

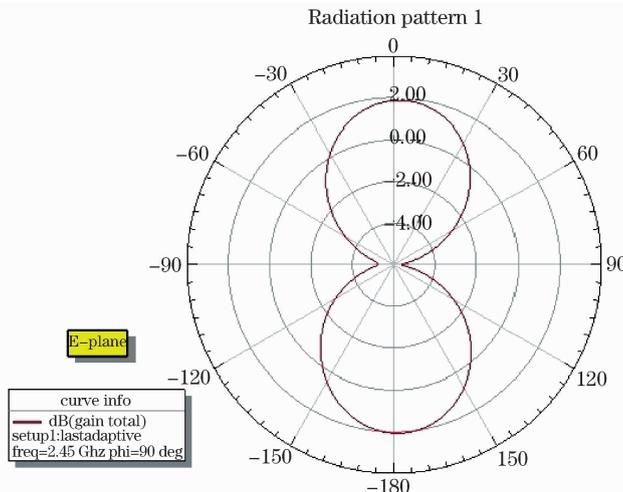


图 9 石墨烯天线 E 面方向图

Fig. 9 E-plane radiation pattern of graphene antenna

石墨烯另一个非常有前景的应用领域是纳米无线通信系统。在纳米无线通信系统中,不可能简单地把金属的尺寸缩小至几个微米,甚至纳米来实现^[20]。一是在纳米尺度的金属结构中,电子迁移率较低;二是在相同尺寸下,与石墨烯相比较金属有较高的谐振频率(达到近红外甚至光频段)。的确,几个微米量级的石墨烯纳米天线能够辐射太赫兹波段电磁波,与金属相比,具有更小的谐振频率和较大的辐射效率。由于在太赫兹波段石墨烯表面能够激发 SPP,因此石墨烯被认为能够实现纳米无线通信系统的重要材料。石墨烯的等离子体频率区域在太赫兹至近红外波段,而金属的等离子体频率区域在近红外至可见光波段,因此石墨烯等离子体频率区域与金属相比要低 10~100 倍^[21]。

4 小 结

根据微波至太赫兹波段石墨烯带内贡献的电导率模型,推导了等效表面电阻,等效介电常数,有效模式指数和透射系数随频率和化学势的变化关系,证明了与金属相比,石墨烯无论作为传统的传输线应用于天线或是在微纳米天线中都有许多优点。也论证了,在太赫兹波段电磁波经过石墨烯后相位的变化要强于强度的变化,因此利用此特点设计太赫兹相差显微镜来观察石墨烯。设计了石墨烯可弯曲天线,实现了较好的增益,对于以后石墨烯天线的研究具有较好的指导意义。

参 考 文 献

- 1 A K Geim, K S Novoselov. The rise of graphene [J]. Nature Materials, 2007, 6(3): 183-191.
- 2 K S Novoselov, A K Geim, S V Morozov, *et al.*. Electric field effect in atomically thin carbon films [J]. Science, 2004, 306(5696): 666-669.
- 3 C Lee, X Wei, J W Kysar, *et al.*. Measurement of the elastic properties and intrinsic strength of monolayer graphene [J]. Science, 2008, 321(5887): 385-388.
- 4 K S Novoselov, A K Geim, S V Morozov, *et al.*. Two-dimensional gas of massless Dirac fermions in graphene [J]. Nature, 2005, 438(7065): 197-200.
- 5 K S Novoselov, E McCann, S V Morozov, *et al.*. Unconventional quantum Hall effect and Berry's phase of 2π in bilayer graphene [J]. Nature Physics, 2006, 2(3): 177-180.
- 6 P Blake, E W Hill, A H C Neto, *et al.*. Making graphene visible [J]. Applied Physics Letters, 2007, 91(6): 063124.
- 7 F Schwierz. Graphene transistors [J]. Nature Nanotechnology, 2010, 5(7): 487-496.
- 8 P Blake, P D Brimicombe, R R Nair, *et al.*. Graphene-based liquid crystal device [J]. Nano Letters, 2008, 8(6): 1704-1708.
- 9 A Vakil, N Engheta. Transformation optics using graphene [J]. Science, 2011, 332(6035): 1291-1294.
- 10 F J Garcia de Abajo. Graphene plasmonics: challenges and opportunities [J]. ACS Photonics, 2014, 1(3): 135-152.
- 11 Perruisseau-Carrier J. Graphene for antenna applications: opportunities and challenges from microwaves to THz [C]. Antennas and Propagation Conference, 2012: 1-4.
- 12 C H Liu, Y C Chang, T B Norris, *et al.*. Graphene photodetectors with ultra-broadband and high responsivity at room temperature [J]. Nature Nanotechnology, 2014, 9: 273-278.
- 13 G W Hanson. Dyadic Green's functions for an anisotropic, non-local model of biased graphene [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2008, 56(3): 747-757.
- 14 V P Gusynin, S G Sharapov, J P Carbotte. Magneto-optical conductivity in graphene [J]. Journal of Physics: Condensed Matter, 2007, 19(2): 026222.
- 15 P Y Chen, A Alù. Atomically thin surface cloak using graphene monolayers [J]. ACS Nano, 2011, 5(7): 5855-5863.
- 16 M Jablan, H Buljan, M Soljačić. Plasmonics in graphene at infrared frequencies [J]. Phys Rev B, 2009, 80(24): 245435.
- 17 M Aldrigo, M Dragoman, D Dragoman. Smart antennas based on graphene [J]. Journal of Applied Physics, 2014, 116(11): 114302.
- 18 W Zhu, D B Farmer, K A Jenkins, *et al.*. Graphene radio frequency devices on flexible substrate [J]. Applied Physics Letters, 2013, 102(23): 233102.
- 19 M M Mansor, S K A Rahim, U Hashim. A 2.45 GHz wearable antenna using conductive graphene and polymer substrate [C]. Technology Management and Emerging Technologies, 2014: 29-32.
- 20 I Llatser, C Kremers, A Cabellos-Aparicio, *et al.*. Graphene-based nano-patch antenna for terahertz radiation [J]. Photonics and Nanostructures-Fundamentals and Applications, 2012, 10(4): 353-358.
- 21 J S Gomez-Diaz, J Perruisseau-Carrier. Microwave to THz properties of graphene and potential antenna applications [C]. 2012 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP), 2012: 239-242.

栏目编辑: 刘丰瑞