

# 基于石墨烯的太赫兹方向图可重构天线

耿莉<sup>1,2</sup>, 谢亚楠<sup>1,2</sup>, 原媛<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>上海大学特种光纤及光接入网络重点实验室, 上海 200444;

<sup>2</sup>上海大学通信与信息工程学院, 上海 200444

**摘要** 为克服晶体管或者电子开关在太赫兹频段上的不足,将石墨烯应用于太赫兹可重构天线中。根据石墨烯表面电导率模型,分析了其面电导率随频率、化学势和温度的变化关系,以及表面阻抗与化学势的关系,证明了石墨烯应用于可重构天线的优势。设计了一款外加偏置电压的石墨烯方向图可重构天线,天线结构包括金属偶极子(有源振子)以及作为反射器/引向器的金属和石墨烯振子。利用改变化学势(外加偏置电压)的方式调节无源振子中石墨烯贴片的阻抗状态,改变电流分布,使得无源振子在反射器与引向器之间转换。通过 HFSS 软件的仿真优化,天线实现了在  $0^\circ, \pm 32^\circ, \pm 37^\circ, \pm 40^\circ$  方向的辐射,工作频率在  $(1.07 \pm 0.06)$  THz 范围内,相对带宽大于 7.84%,辐射效率最高达 89.96%。7 个辐射方向中,最大辐射增益达 8.312 dB。该天线具有体积小、重量轻、调控方式简便且稳定的优点,在太赫兹波束可重构天线领域有一定的应用价值。

**关键词** 材料; 石墨烯天线; 方向图可重构; 太赫兹

**中图分类号** TN828; O441.4 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP54.031602

## Graphene-Based Antenna with Reconfigurable Radiation Pattern in Terahertz

Geng Li<sup>1,2</sup>, Xie Ya'nan<sup>1,2</sup>, Yuan Yuan<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Specialty Fiber Optics and Optical Access Networks, Shanghai University, Shanghai 200444, China;

<sup>2</sup>Department of Communication and Information Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China

**Abstract** In order to overcome the deficiency of transistors or electronic switches in terahertz band, graphene is used in a terahertz reconfigurable antenna. Based on the model of graphene surface conductivity, the relationships of its surface conductivity to frequency, chemical potential and temperature, and the relationship between surface impedance and chemical potential are analyzed. Analysis of these relationships proves the advantages of utilizing graphene in reconfigurable antennas. A graphene-based antenna with reconfigurable radiation pattern via applying external biased voltage is designed. The structure consists of a metal dipole (active element) and two metal with graphene dipoles as a reflector and a director. By altering chemical potential (external biased voltage), the states of graphene impedance configured in passive elements are adjusted and their current distribution is changed, which converts the passive ones between a reflector and a director. At last, through simulation and optimization of HFSS, the antenna realizes radiation with directions of  $0^\circ, \pm 32^\circ, \pm 37^\circ, \pm 40^\circ$ , operation frequency in  $(1.07 \pm 0.06)$  THz, relative impedance bandwidth over 7.84% and the maximum radiation efficiency of 89.96%. The maximum radiation gain has reached up to 8.312 dB at these seven radiation directions. This design has advantages as small size, light weight, simple and stable control, and offers a certain application value to beam-reconfigurable antenna in terahertz.

**Key words** materials; graphene antenna; reconfigurable radiation pattern; terahertz

**OCIS codes** 160.4236; 040.2235

**收稿日期:** 2016-10-28; **收到修改稿日期:** 2016-11-30

**作者简介:** 耿莉(1991—),女,硕士研究生,主要从事石墨烯天线方面的研究。E-mail: phoebe\_geng@163.com

**导师简介:** 谢亚楠(1962—)男,博士研究生,研究员,主要从事遥感和石墨烯方面的研究。

E-mail: yxie@shu.edu.cn(通信联系人)

# 1 引言

太赫兹波通常是指频率为 0.3~10 THz(波长为 0.03~1 mm)的电磁波。太赫兹波的频率高于微波,低于红外光<sup>[1]</sup>。相比于微波通信,太赫兹通信具有如下优点:传输速率快、容量大,具有较宽的瞬时带宽;波束更窄,方向性更好;波长更短,太赫兹器件、天线和系统可以做得更小更紧凑<sup>[2]</sup>。太赫兹通信具有显著的优势,但截至目前,关于太赫兹空间通信的研究成果还较少,最主要的原因是传统的电子学、光学的技术和器件都不能完全满足太赫兹波以及太赫兹通信系统器件(例如天线)的需求<sup>[3]</sup>。

方向图可重构天线是现代通信系统中为达到小型化所应用的天线类型之一,实现波束重构的方式有以下三种:1)采用相控阵天线技术,但是阵列结构复杂,频率越高所用移相器的价格也越贵,成本也越高,限制了其在通信中的应用;2)在天线上加载开关或者变容二极管,但目前一些基于机械<sup>[4]</sup>、电机<sup>[5]</sup>的调控方法存在一些局限性,即转换速度慢<sup>[4,6]</sup>、频率调控范围小<sup>[7]</sup>,频率越高,其开关特性的劣化也越严重,不适用于太赫兹波段;3)使用新材料,通过新材料的特殊性质来改变天线的形状,以此达到最大辐射方向偏转的目的。石墨烯的表面电导率能够发生改变,理论上其电特性可从金属过渡到介质<sup>[8]</sup>。因此,石墨烯与器件相结合能够实现天线的可调性。石墨烯的工作频率覆盖了太赫兹频段,并且其制备<sup>[9]</sup>和图案化的方法已经得到了深入的研究,如化学气相沉积法、飞秒激光切割法<sup>[10]</sup>,因此石墨烯成为实现太赫兹可重构天线应用的重要材料<sup>[11]</sup>。

石墨烯是由碳原子组成的六边形结构的平面原子层<sup>[12]</sup>,具有高载流子迁移率[大于  $2 \times 10^5 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ ]<sup>[13]</sup>,因此用石墨烯制成的器件具有薄、轻、导电速度快的优点;其次,若在石墨烯表面施加外部机械拉力时,碳原子会为适应外力而重新排列,因此石墨烯具有坚硬和易拉伸的特性<sup>[14]</sup>;再者,石墨烯熔点可达到 3652~3697 °C,是极好的耐高低温材料;最后,金属结构与石墨烯的结合为天线性能的动态控制提供了一个可能的平台<sup>[15]</sup>。一些研究小组对太赫兹波段的石墨烯可重构天线进行了研究。2010 年 Dragoman 等<sup>[16]</sup>发现通过调节加在石墨烯上的栅极电压,可以调节天线的增益变化;将石墨烯作为一种辐射开关,结合金属偶极子阵列,实现了辐射方向图的重构。2011 年上海交通大学的 Huang 等<sup>[17]</sup>提出了基于单层石墨烯的可重构高阻抗表面并以此为基底设计了一种辐射方向可重构的太赫兹环形天线。2013 年 Esquius-Morote 等<sup>[18]</sup>提出了在太赫兹频段下的正弦调制石墨烯漏波天线模型,该天线在固定工作频率下实现波束电扫描的功能,验证了波束可重构特点。2014 年,加拿大维多利亚大学 Xu 等<sup>[19]</sup>研究了石墨烯等离子体天线的可重构多输入多输出系统,设计了石墨烯等离子可重构天线,工作频率为 1 THz,通过控制每一个石墨烯片的状态来控制光束的宽度和方向,实现了光束的可重构。

本文首先讨论了太赫兹波段单层石墨烯的电磁特性。基于石墨烯表面电导率的模型,计算并仿真了其表面电导率分别与频率、化学势和温度的关系,以及表面阻抗与化学势的关系,证明了石墨烯应用于太赫兹方向图可重构天线方面的优势。其次,根据讨论的结论,设计了一种加载石墨烯的、类似八木天线的方向图可重构天线,通过改变化学势(外加偏置电压)的方法,加载石墨烯的寄生振子的电流分布发生变化,从而实现  $0^\circ, \pm 32^\circ, \pm 37^\circ, \pm 40^\circ$  的辐射方向。最后,使用 HFSS 软件对天线进行仿真并优化,得到了辐射性能良好的天线,工作频率在  $(1.07 \pm 0.06) \text{ THz}$ ,相对带宽大于 7.84%,7 个辐射方向上的增益最低为 5.383 dB,最高为 8.312 dB,验证了基于石墨烯的太赫兹方向图可重构天线的可行性。

## 2 理论模型与分析

### 2.1 石墨烯太赫兹波段的电磁特性

石墨烯材料可以由无限薄、二维、非局部的各向异性的表面电导率来代表。假设不存在额外的磁场,或者弱磁场(即没有霍尔电导率),则石墨烯的表面电导率变成了各向同性<sup>[20-21]</sup>,可以用  $\sigma_s[\omega, \Gamma, T, \mu_c(E_0)]$  来表示。其中  $\omega$  为辐射角频率,  $\mu_c$  为化学势(可通过施加偏置电场  $E_0$  或者掺杂的方法来改变化学势大小),  $\Gamma$  为独立能量  $\epsilon$  的电子散射速率(与能级无关),  $T$  是温度。表面电导率公式可以根据 Kubo 方程<sup>[22-23]</sup>推导出:

$$\sigma_s[\omega, \Gamma, T, \mu_c(E_0)] = \frac{ie^2(\omega - i2\Gamma)}{\pi\hbar^2} \left\{ \frac{1}{\omega - i2\Gamma} \int_0^\infty \epsilon \left[ \frac{\partial f_d(\epsilon)}{\partial \epsilon} - \frac{\partial f_d(-\epsilon)}{\partial \epsilon} \right] d\epsilon - \int_0^\infty \frac{f_d(-\epsilon) - \partial f_d(\epsilon)}{(\omega - i2\Gamma)^2 - 4(\epsilon/\hbar)^2} d\epsilon \right\}, \quad (1)$$

式中  $e$  为电荷数,  $\hbar = h/(2\pi)$  为约化普朗克常数。  $f_d$  为费米-狄拉克分布函数, 其公式为:

$$f_d(\epsilon) = \left[ \exp\left(\frac{\epsilon - \mu_c}{k_B T}\right) + 1 \right]^{-1}, \quad (2)$$

式中  $k_B$  为玻耳兹曼常数。

(1) 式中, 大括号内的第一项积分是由带内跃迁贡献的, 第二项积分是由带间跃迁贡献的。由于(1)式数据计算量大, 不利于下文的定性分析, 因此, 将(1)式作近似简化, 以便运算分析。

根据德鲁德-玻尔兹曼表达式<sup>[23]</sup>, (1) 式中的第一项(带内电导率)可转化为

$$\sigma_{\text{intra}} = i \frac{2e^2 T}{\pi \hbar \omega} \ln\left(2 \cosh \frac{\mu_c}{T}\right), \quad (3)$$

(1) 式中第二项(带间电导率)的费米-狄拉克分布函数  $f_d$  不同, 并且改写为

$$G(\epsilon) = \frac{\sinh(\epsilon/T)}{\cosh(\mu_c/T) + \cosh(\epsilon/T)}, \quad (4)$$

提取(1)式第二项积分的主值, 得到了没有奇点的积分, 因此 Kubo 方程的第二项(带间电导率)可表示为

$$\sigma_{\text{inter}} = \frac{e^2}{4\hbar} \left[ G(\omega/2) - \frac{4\omega}{i\pi} \int_0^{+\infty} \frac{G(\epsilon) - G(\omega/2)}{\omega^2 - 4\epsilon^2} d\epsilon \right]. \quad (5)$$

由随机相位近似法, 石墨烯的带内、带间电导率可以进一步改写为

$$\sigma_{s, \text{intra}} = \frac{2e^2 k_B T}{\pi \hbar^2} \ln\left(2 \cosh \frac{\mu_c}{2k_B T}\right) \frac{i}{\omega + i\tau^{-1}}, \quad (6)$$

$$\sigma_{s, \text{inter}} = \frac{e^2}{4\hbar} \left[ \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \arctan \frac{\hbar \omega - 2\mu_c}{2k_B T} - \frac{i}{2\pi} \ln \frac{(\hbar \omega + 2\mu_c)^2}{(\hbar \omega - 2\mu_c)^2 + 4(k_B T)^2} \right], \quad (7)$$

式中,  $\Gamma$ 、 $\tau$  分别为散射率和弛豫时间, 是从现象的角度考虑电子杂质、电子缺陷和电子-声子散射引起的损耗, 它们之间存在一定的对应关系<sup>[21]</sup>, 即  $2\Gamma = 1/\tau$ , 假定  $\tau = 1 \text{ ps}$ <sup>[24]</sup>。石墨烯的面电导率  $\sigma_s = \sigma_{s, \text{intra}} + \sigma_{s, \text{inter}}$ 。

由(6)、(7)式可知, 石墨烯的表面电导率  $\sigma_s$  是关于频率  $f$ 、化学势  $\mu_c$  和温度  $T$  的函数。接下来, 分别改变频率  $f$ 、化学势  $\mu_c$  和温度  $T$  的值, 来分析石墨烯表面电导率  $\sigma_s$  的变化。其中, 取室温温度  $T = 300 \text{ K}$ , 频率  $f = 1 \text{ THz}$ (频率取  $1 \text{ THz}$  是基于文中设计的石墨烯天线谐振频率  $1 \text{ THz}$ , 以便设计后文的天线模型)。

不同化学势  $\mu_c$  和温度  $T$  的条件下, 石墨烯表面电导率  $\sigma_s$  随频率  $f$  的变化关系如图 1(a)、(b)所示, 图 1(a)中取室温  $T = 300 \text{ K}$ , 图 1(b)中取未加偏置电压的石墨烯化学势  $\mu_c = 0 \text{ eV}$ 。从图中可以得知, 石墨烯的表面电导率  $\sigma_s$  是个复数, 电导率实部对应的是焦耳热, 体现为能量的耗散; 虚部对应的是电能与磁能的转换, 体现为能量的转移。在不同化学势  $\mu_c$  和温度  $T$  的情况下, 石墨烯面电导率的实部  $\text{Re}(\sigma_s)$  随着频率  $f$  的增大而减小, 虚部  $\text{Im}(\sigma_s)$  随频率  $f$  的增大而增大, 可见在太赫兹频率范围内, 石墨烯面电导率的虚部  $\text{Im}(\sigma_s)$  占主导地位, 并且随着频率  $f$  的升高, 石墨烯面电导率  $\sigma_s$  的变化趋于平稳。此外, 化学势  $\mu_c$  和温度  $T$  越大, 石墨烯实部  $\text{Re}(\sigma_s)$  越大, 其虚部  $\text{Im}(\sigma_s)$  的绝对值也越大。

化学势  $\mu_c$  可以调控石墨烯表面电导率  $\sigma_s$  的实部与虚部, 如图 2 所示, 图 2(a)中取室温  $T = 300 \text{ K}$ , 图 2

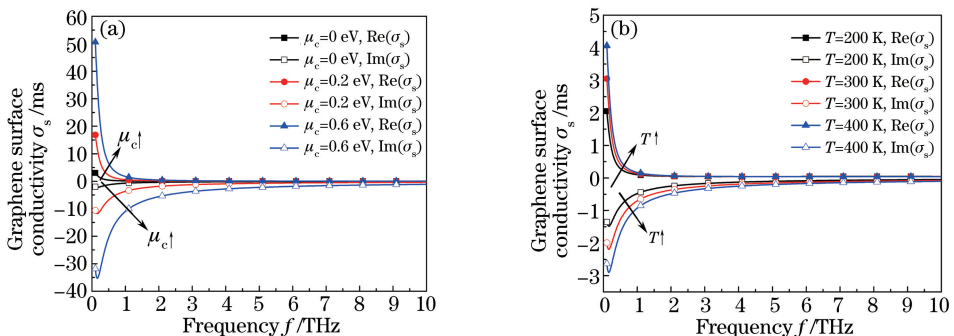


图 1 石墨烯表面电导率  $\sigma_s$  随频率  $f$  的变化关系。(a)  $T = 300 \text{ K}$ ,  $\mu_c = 0, 0.2, 0.6 \text{ eV}$ ; (b)  $\mu_c = 0 \text{ eV}$ ,  $T = 200, 300, 400 \text{ K}$

Fig. 1 Relationship between graphene surface conductivity  $\sigma_s$  and frequency  $f$ .

(a)  $T = 300 \text{ K}$ ,  $\mu_c = 0, 0.2, 0.6 \text{ eV}$ ; (b)  $\mu_c = 0 \text{ eV}$ ,  $T = 200, 300, 400 \text{ K}$

(b)中的频率  $f$  取 1 THz。从图 2 中可知,在太赫兹稍低频段内,石墨烯面电导率的虚部  $\text{Im}(\sigma_s)$  受化学势  $\mu_c$  的影响较大。在  $0 \text{ eV} < \mu_c \leq 1 \text{ eV}$  范围内,石墨烯面电导率  $\sigma_s$  与化学势  $\mu_c$  几乎呈线性关系,且温度  $T$  几乎不影响石墨烯面电导率  $\sigma_s$  与化学势  $\mu_c$  的关系。因此,可以通过改变化学势  $\mu_c$  来有效改变石墨烯的表面特性。往往通过掺杂或者加电压的方式改变石墨烯载流子浓度<sup>[25]</sup>,进而调节石墨烯的化学势  $\mu_c$  的大小,从而实现石墨烯的面电导率  $\sigma_s$  的可调性<sup>[26]</sup>。

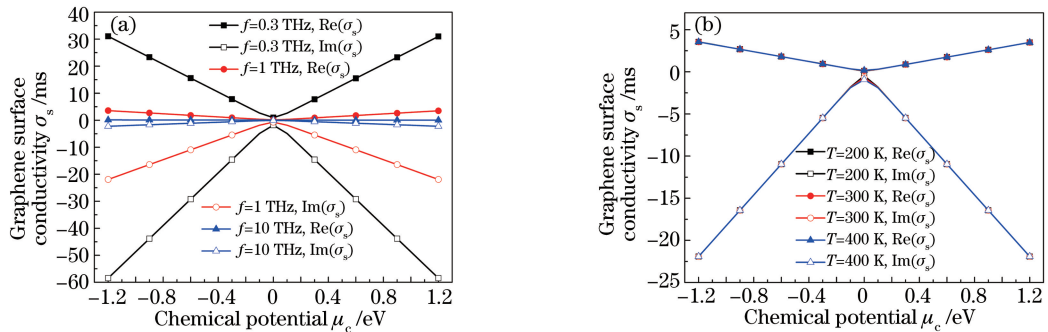


图 2 石墨烯表面电导率  $\sigma_s$  随化学势  $\mu_c$  的变化关系。(a)  $T=300 \text{ K}$ ,  $f=0.3, 1, 10 \text{ THz}$ ;  
(b)  $f=1 \text{ THz}$ ,  $T=200, 300, 400 \text{ K}$

Fig. 2 Relationship between graphene surface conductivity  $\sigma_s$  and chemical potential  $\mu_c$ .

(a)  $T=300 \text{ K}$ ,  $f=0.3, 1, 10 \text{ THz}$ ; (b)  $f=1 \text{ THz}$ ,  $T=200, 300, 400 \text{ K}$

石墨烯表面电导率  $\sigma_s$  随温度  $T$  的变化关系如图 3 所示。根据图 3(a)可以发现频率  $f$  越高,石墨烯面电导率  $\sigma_s$  越不受温度  $T$  的影响。从图 3(b)可知,不同化学势  $\mu_c$  对石墨烯面电导率  $\sigma_s$  关于温度  $T$  的曲线斜率无影响。因此,石墨烯天线具有温度不敏感的特性,这是石墨烯太赫兹天线的优势之一。

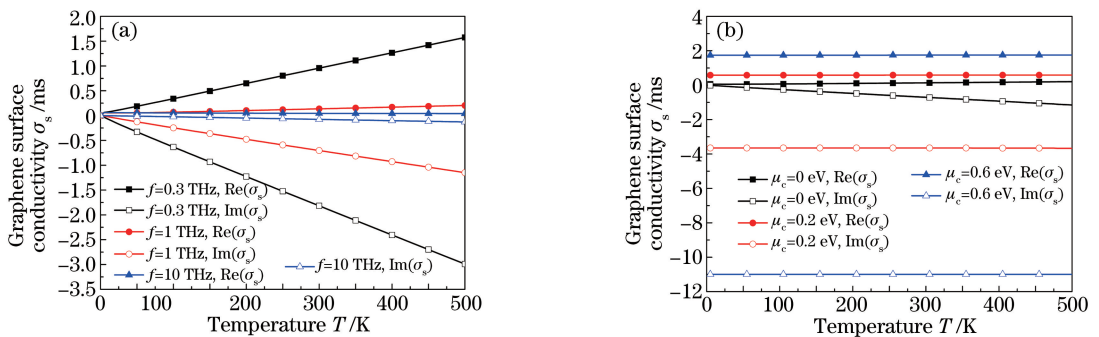


图 3 石墨烯表面电导率  $\sigma_s$  随温度  $T$  的变化关系。(a)  $\mu_c=0 \text{ eV}$ ,  $f=0.3, 1, 10 \text{ THz}$ ;  
(b)  $f=1 \text{ THz}$ ,  $\mu_c=0, 0.2, 0.6 \text{ eV}$

Fig. 3 Relationship between graphene surface conductivity  $\sigma_s$  and temperature  $T$ . (a)  $\mu_c=0 \text{ eV}$ ,  $f=0.3, 1, 10 \text{ THz}$ ;

(b)  $f=1 \text{ THz}$ ,  $\mu_c=0, 0.2, 0.6 \text{ eV}$

根据  $Z_s=1/\sigma_s$ ,可以得到石墨烯的表面阻抗  $Z_s$ 。根据图 1 和图 2 可知,太赫兹频段内,石墨烯面电导率  $\sigma_s$  受频率  $f$  的影响并不大,而受化学势  $\mu_c$  的影响较大。因此,取室温  $T=300 \text{ K}$ 、本设计的天线谐振频率  $f=1 \text{ THz}$ ,仿真了石墨烯表面阻抗  $Z_s$  与化学势  $\mu_c$  的关系,以此确定天线中石墨烯材料的参数,结果如图 4 所示。

图 4 中,石墨烯表面阻抗  $Z_s$  在太赫兹频段是由表面电抗  $\text{Im}(Z_s)$  所主导。在化学势  $\mu_c$  的调控下,石墨烯表面电抗  $\text{Im}(Z_s)$  可以在  $10 \sim 10^3$  量级范围内变化,表面电阻  $\text{Re}(Z_s)$  在  $1 \sim 10^2$  间变化。由此可知,可以通过改变化学势  $\mu_c$  实现石墨烯表面阻抗大小的改变,并且调节其表面损耗。

由上述分析可知,在太赫兹频段内,石墨烯的面电导率  $\sigma_s$  几乎不受频率以及温度的影响,保障了天线的工作稳定性;再者,石墨烯的表面特性能够由化学势  $\mu_c$  控制,可以通过在石墨烯贴片(负极)与  $\text{SiO}_2/\text{Si}$ (正极)之间加偏置电压的方式,改变石墨烯的阻抗状态,从而实现太赫兹天线的可调。

## 2.2 天线模型

本文设计的石墨烯方向图可重构天线的结构如图 5 所示。天线的工作频率为  $(1.07 \pm 0.06) \text{ THz}$ 。该天

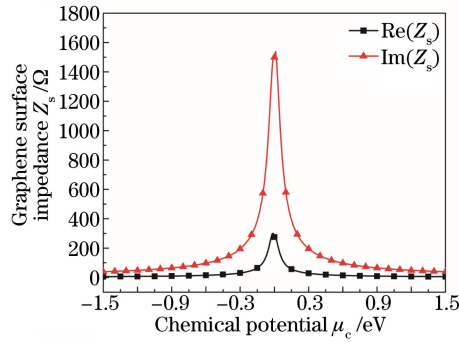


图4 石墨烯表面阻抗  $Z_s$  随化学势  $\mu_c$  的变化关系 ( $T=300\text{ K}$ ,  $f=1\text{ THz}$ )

Fig. 4 Relationship between graphene surface impedance  $Z_s$  and chemical potential  $\mu_c$  ( $T=300\text{ K}$ ,  $f=1\text{ THz}$ )

线是由金属偶极子、金属+石墨烯寄生振子组成,以聚酰亚胺作为天线衬底,  $\text{SiO}_2/\text{Si}$  作为偏置电压的正极电极;以地面作为反射面,实现天线上半空辐射。石墨烯的材料参数为:  $\tau=1\text{ ps}$ ,  $T=300\text{ K}$ , 分别与偏置电压  $V_1$ 、 $V_2$  负极相连接。衬底聚酰亚胺材料参数为:相对介电常数  $\epsilon_r=3.5$ , 损耗  $\tan\delta=0.008$ 。

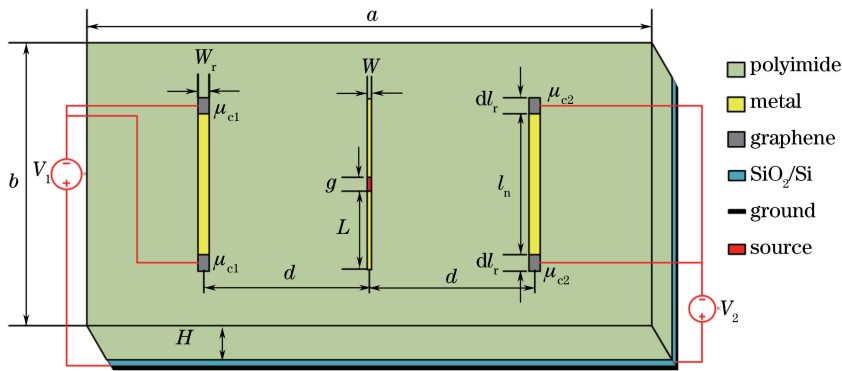


图5 石墨烯方向图可重构天线结构示意图

Fig. 5 Sketch map of graphene-based antenna with reconfigurable radiation pattern

本设计使用金属半波偶极子天线实现上半空辐射,用单层端口馈电。原本经典的八木天线是将 PIN 二极管插入寄生单元中,改变 PIN 的状态,利用寄生单元作为反射器或者引向器,以此控制主波束的辐射方向。根据 2.1 节的讨论可知,石墨烯的表面电导率  $\sigma_s$  是可调的。可以通过外加偏置电压  $V_1$  和  $V_2$ ,改变石墨烯贴片的化学势  $\mu_{c1}$  和  $\mu_{c2}$ ,使得石墨烯贴片具有不同的阻抗状态。将其加载于寄生振子的不同位置,金属+石墨烯振子的电流分布会发生变化,因此金属+石墨烯振子可以作为反射器或者引向器来实现不同方向的辐射。

将寄生单元中的金属贴片设计为引向振子,因此其长度为  $l_n \approx 0.43\lambda_g$  ( $\lambda_g$  为介质波长),而石墨烯+金属贴片设计为反射振子,因此其总长度为  $2dl_r + l_n \approx 0.53\lambda_g$ 。天线的具体设计参数如表 1 所示。

表 1 石墨烯方向图可重构天线的设计参数

Table 1 Design parameters of graphene-based antenna with reconfigurable radiation pattern

Parameter	Symbol	Value / $\mu\text{m}$
Metal dipole length and width	$2L \times W$	$77.6 \times 2$
Metal sheet of parasitic element (left/right) length and width	$l_n \times W_r$	$64 \times 5.5$
Graphene sheet of parasitic element (left/right) length and width	$dl_r \times W_r$	$8 \times 5.5$
Dielectric substrate length, width and thickness (polyimide)	$a \times b \times H$	$340 \times 150 \times 35$
Distance among three elements	$d$	53
Source port length and width	$g \times W$	$1 \times 2$

### 3 仿真结果及分析

通过以上分析,利用 HFSS 软件对石墨烯方向图可重构天线进行仿真。首先,研究化学势与寄生单元反射器/引向器转换的关系。将右边寄生单元中石墨烯的化学势  $\mu_{c2}$  设置为  $0\text{ eV}$ ,改变左边寄生单元石墨烯的化学势  $\mu_{c1}$  的值,仿真天线在此条件下的辐射特性,仿真结果如图 6 所示,  $\varphi$  表示坐标  $xoy$  平面内的方位角。

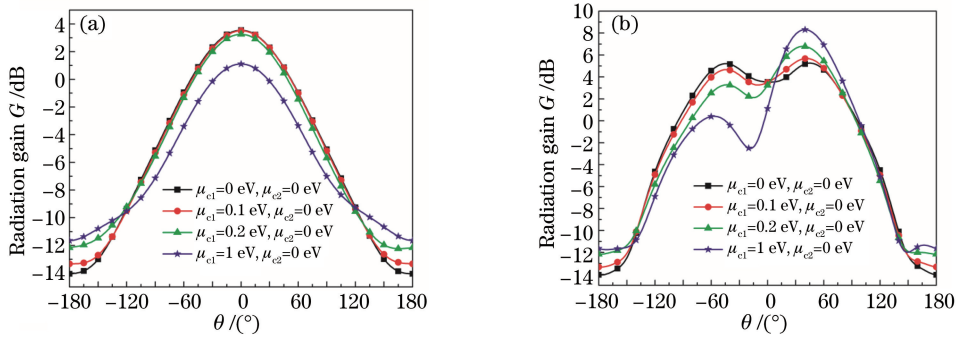


图 6 石墨烯可重构天线的辐射增益- $\theta$  图。(a)  $\varphi=0^\circ$ ; (b)  $\varphi=90^\circ$

Fig. 6 Radiation gain- $\theta$  diagrams of graphene-based antenna with reconfigurable radiation pattern. (a)  $\varphi=0^\circ$ ; (b)  $\varphi=90^\circ$

由图 6(a)可知,石墨烯的阻抗状态影响  $\varphi=0^\circ$  时方向图的辐射增益,化学势  $\mu_c$  越高,辐射增益越小,但最大辐射方向保持为  $\theta=0^\circ$ 。由图 6(b)可得,石墨烯的阻抗状态影响  $\varphi=90^\circ$  时方向图的辐射方向以及辐射增益大小,并且  $\mu_{c1}$  越高,最大辐射方向的辐射增益越高。由此可见,石墨烯贴片的化学势  $\mu_c$  越大,表面阻抗越低,石墨烯贴片本身特性就越接近于金属特性,因此其加载的金属+石墨烯寄生单元就越体现为反射器的特性,如图 7(a)和(b)所示。反之,石墨烯贴片的化学势  $\mu_c$  越小,表面阻抗越高,石墨烯贴片的影响就越弱,其加载的金属+石墨烯寄生单元就越体现为引向器的特性,如图 7(a)和(b)所示。图 7 为在三组不同石墨烯化学势  $\mu_c$  的条件下,天线的电流分布情况。从图 7(a)和(b)中可以看出,石墨烯化学势  $\mu_c$  越大,石墨烯的面电流分布情况就越显著;当  $\mu_{c1}=\mu_{c2}$  时,寄生振子对天线的影 响是相同的,此时天线的主辐射方向由有源振子主导。

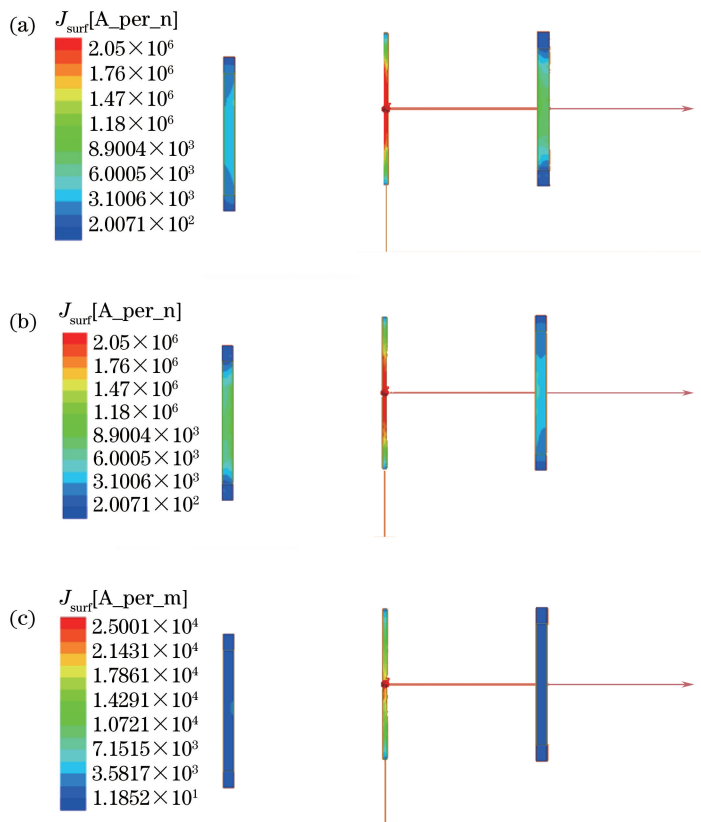


图 7 不同石墨烯化学势  $\mu_c$  条件下,石墨烯方向图可重构天线的电流分布图。

(a)  $\mu_{c1}=1\text{ eV}, \mu_{c2}=0\text{ eV}$ ; (b)  $\mu_{c1}=0\text{ eV}, \mu_{c2}=1\text{ eV}$ ; (c)  $\mu_{c1}=0.3\text{ eV}, \mu_{c2}=0.3\text{ eV}$

Fig. 7 Current distributions of graphene-based antenna with reconfigurable radiation pattern with different graphene chemical potentials  $\mu_c$ . (a)  $\mu_{c1}=1\text{ eV}, \mu_{c2}=0\text{ eV}$ ; (b)  $\mu_{c1}=0\text{ eV}, \mu_{c2}=1\text{ eV}$ ; (c)  $\mu_{c1}=0.3\text{ eV}, \mu_{c2}=0.3\text{ eV}$

其次,研究化学势  $\mu_c$  对天线的主波束辐射角度的影响。根据图 6 得到的结果,将左边寄生单元的石墨烯化学势  $\mu_{c1}$  设为 1 eV,作为反射器,改变右边寄生单元的石墨烯化学势  $\mu_{c2}$  的值,得到的结果如图 8 所示。

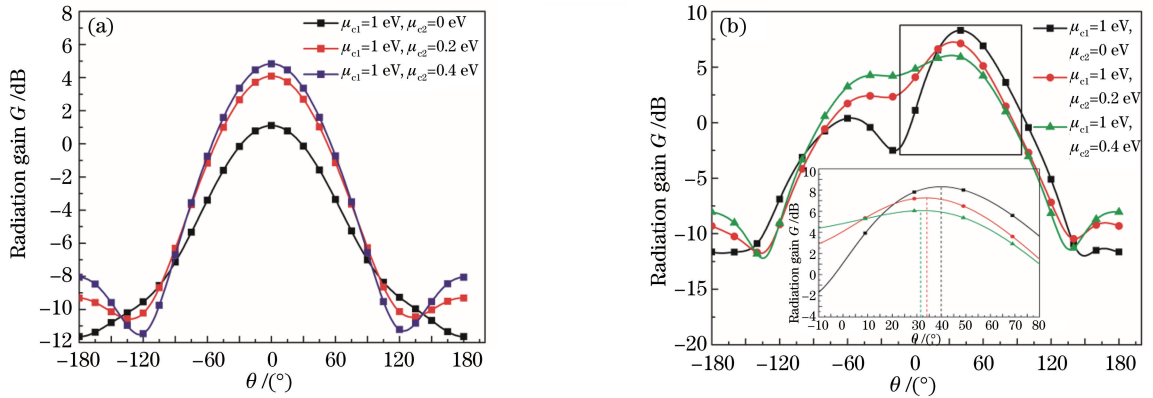


图 8 石墨烯可重构天线的辐射增益- $\theta$  图。(a)  $\varphi=0^\circ$ ; (b)  $\varphi=90^\circ$

Fig. 8 Radiation gain- $\theta$  diagrams of graphene-based antenna with reconfigurable radiation pattern. (a)  $\varphi=0^\circ$ ; (b)  $\varphi=90^\circ$

根据图 8(a)发现石墨烯化学势  $\mu_c$  并不影响  $\varphi=0^\circ$  时的主波束辐射角度。图 8(b)描述的是  $\varphi=90^\circ$  时,天线在  $\mu_{c1}=1$  eV,  $\mu_{c2}$  分别为 0, 0.2, 0.4 eV 条件下的辐射特性,当  $\mu_{c1}=1$  eV,  $\mu_{c2}=0$  eV 时,天线在  $\theta=-57^\circ$  处有副瓣且辐射增益为 0.414 dB,在  $\theta=40^\circ$  处波束的辐射增益为 8.312 dB;当  $\mu_{c1}=1$  eV,  $\mu_{c2}=0.2$  eV 时,天线在  $\theta=-41^\circ$  处有副瓣且辐射增益为 2.418 dB,在  $\theta=34^\circ$  处波束的辐射增益为 7.260 dB;当  $\mu_{c1}=1$  eV,  $\mu_{c2}=0.4$  eV 时,天线在  $\theta=-43^\circ$  处有副瓣且辐射增益为 4.218 dB,在  $\theta=32^\circ$  处波束的辐射增益为 6.056 dB。由此可见,当天线中一个寄生振子作为反射器时,另一个寄生振子作为引向器,其石墨烯化学势  $\mu_c$  大小对主波束的辐射增益以及辐射方向都会产生影响。副瓣增益随着引向器中石墨烯化学势  $\mu_c$  的增加而增加,主波束增益随着化学势  $\mu_c$  的减小而增加。这是因为化学势  $\mu_c$  越大,石墨烯的面电导率  $\sigma_s$  也越大,此时加载  $\mu_c$  的石墨烯产生的电流强度增加,金属+石墨烯寄生振子的作用就越接近于反射器,由于相位相抵、场强相消的程度加强,主波束辐射角度向  $\theta=0^\circ$  靠近,两波束的辐射增益也趋于相同值。反之,当化学势  $\mu_{c1}$  与  $\mu_{c2}$  相差越大时,最大辐射角的绝对值就越大。

根据以上石墨烯化学势  $\mu_c$  对天线波束辐射角度影响的分析,综合考虑辐射增益以及回波损耗  $S_{11}$  的仿真结果,选择了 7 组合适的化学势  $\mu_c$  加载于石墨烯贴片,实现了石墨烯天线在  $\theta=0^\circ, \pm 32^\circ, \pm 37^\circ, \pm 40^\circ$  ( $\varphi=90^\circ$ ) 方向上辐射,其辐射特性如图 9 所示,回波损耗  $S_{11}$  情况如图 10 所示。

该天线在 7 个波束辐射方向中,辐射增益最低为 5.383 dB,最高达 8.312 dB;并且能够保持天线的工作频段在 1.035~1.112 THz,相对带宽约为 7.12%;辐射效率最低为 87.71%,最高为 89.98%。本研究中的石墨烯方向图可重构天线的具体辐射特性如表 2 所示。

表 2 石墨烯方向图可重构天线的辐射特性

Table 2 Radiation performances of graphene-based antenna with reconfigurable radiation pattern

Chemical potential $\mu_{c1}, \mu_{c2}/\text{eV}$	Resonant frequency $f_r/\text{THz}$	Absolute impedance bandwidth $B/\text{THz}$	Relative impedance bandwidth $B_r/\%$	Maximum radiation angle $\theta(\varphi=90^\circ)/^\circ$	Maximum radiation gain $G$ $(\varphi=90^\circ)/\text{dB}$	Radiation efficiency $\epsilon/\%$
$\mu_{c1}=0.3, \mu_{c2}=0.3$	1.058	0.125	11.61	0	5.383	87.71
$\mu_{c1}=0.7, \mu_{c2}=0.3$	1.064	0.084	7.84	32	6.373	89.65
$\mu_{c1}=0.3, \mu_{c2}=0.7$	1.059	0.09	8.39	-32	6.365	89.61
$\mu_{c1}=1, \mu_{c2}=0.1$	1.084	0.111	10.14	37	8.052	89.93
$\mu_{c1}=0.1, \mu_{c2}=1$	1.08	0.121	11.1	-37	8.029	89.66
$\mu_{c1}=1, \mu_{c2}=0$	1.087	0.111	10.16	40	8.312	89.82
$\mu_{c1}=0, \mu_{c2}=1$	1.091	0.118	10.75	-40	8.312	89.96

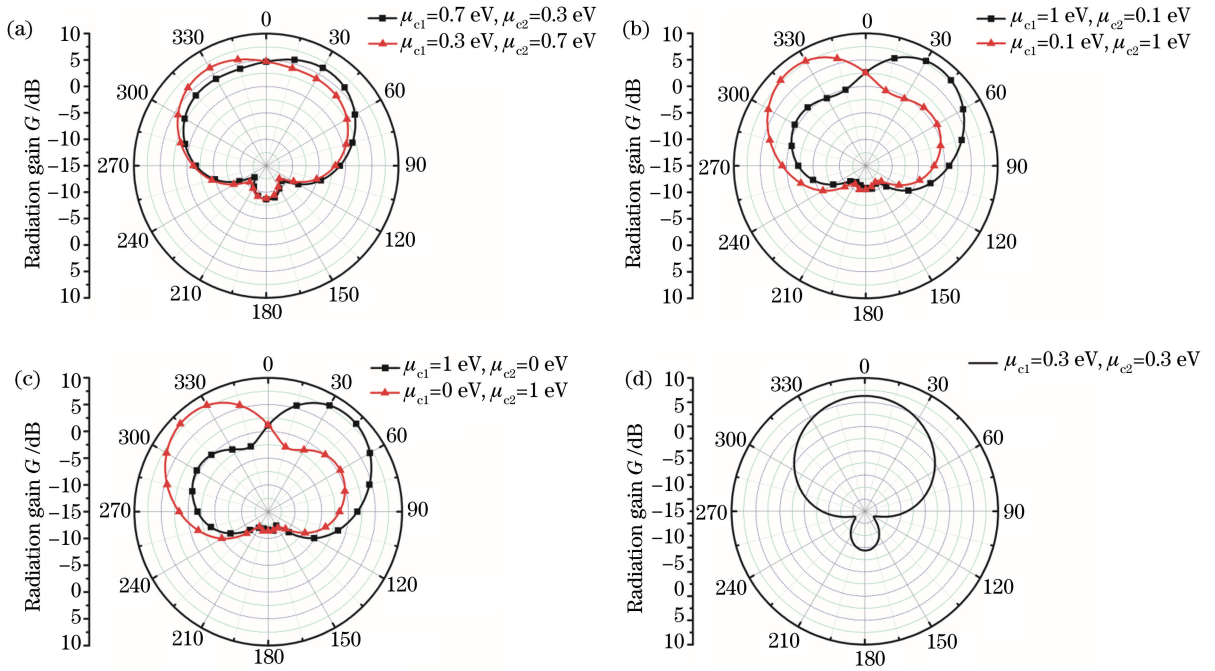


图 9 石墨烯可重构天线的辐射方向图( $\varphi=90^\circ$ )。 (a)  $\theta=\pm 32^\circ$ ; (b)  $\theta=\pm 37^\circ$ ; (c)  $\theta=\pm 40^\circ$ ; (d)  $\theta=0^\circ$

Fig. 9 Radiation pattern of graphene-based antenna with reconfigurable radiation pattern ( $\varphi=90^\circ$ ).

(a)  $\theta=\pm 32^\circ$ ; (b)  $\theta=\pm 37^\circ$ ; (c)  $\theta=\pm 40^\circ$ ; (d)  $\theta=0^\circ$

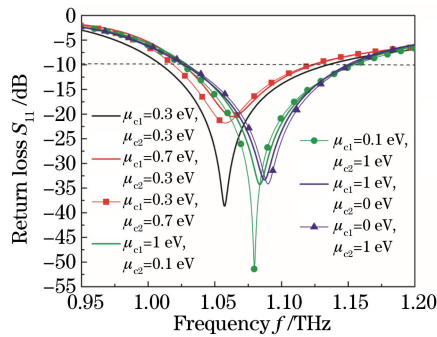


图 10 石墨烯可重构天线的回波损耗  $S_{11}$

Fig. 10 Return loss  $S_{11}$  of graphene-based antenna with reconfigurable radiation pattern

## 4 结 论

设计了一款工作于  $(1.07 \pm 0.06)$  THz 的石墨烯方向图可重构天线。基于理论研究发现,在太赫兹频段石墨烯的表面特性能够有效受控于化学势,并且频率以及温度对其影响不大,说明石墨烯具有动态调控的特性,且能够保证自身的工作稳定性,验证了石墨烯应用于太赫兹可重构天线中的优势。将具有面电导率可调特性的石墨烯加载于天线的寄生单元,以代替 PIN 二极管等开关器件,利用不同外加偏置电压改变石墨烯的化学势,改变天线寄生振子的电流分布,作为反射器或者引向器,以实现方向图可重构。本设计的天线分别在  $\theta=0^\circ, \pm 32^\circ, \pm 37^\circ, \pm 40^\circ$  ( $\varphi=90^\circ$ ) 方向上辐射,通过不同石墨烯化学势来控制。在 7 个不同的辐射方向中,辐射增益最高为 8.312 dB;相对带宽最小为 7.84%,最大为 11.61%;辐射效率最低为 87.71%,最高为 89.96%。本设计的天线中,利用新材料石墨烯作为调控元件,实现动态控制波束辐射角度,并且在每个状态都得到了较好的辐射特性;该天线体积小,调控方式简便且稳定,有效地验证了太赫兹频段石墨烯作为可调材料应用于可重构天线的可行性。



## 参 考 文 献

- [1] Li Xin, Xu Hui, Yu Xumin, *et al.* Progress of terahertz communication technology and space application outlook[J]. Space Electronic Technology, 2013(4): 56-60.  
李欣, 徐辉, 禹旭敏, 等. 太赫兹通信技术研究进展及空间应用展望[J]. 空间电子技术, 2013(4): 56-60.
- [2] Zhang Jian, Deng Xianjin, Wang Cheng, *et al.* Terahertz high speed wireless communications: systems, techniques and demonstrations[J]. Information and Electronic Engineering, 2014, 12(1): 1-13.  
张健, 邓贤进, 王成, 等. 太赫兹高速无线通信: 体制、技术与验证系统[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2014, 12(1): 1-13.
- [3] Wang Lin. Design and performance analysis of terahertz space communication system [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2008: 1-2.  
王琳. 太赫兹空间通信系统的设计与性能分析[D]. 武汉: 华中科技大学, 2008: 1-2.
- [4] Huang F, Baumberg J J. Actively tuned plasmons on elastomerically driven Au nanoparticle dimers[J]. Nano Letters, 2010, 10(5): 1787-1792.
- [5] Berthelot J, Bouhelier A, Huang C, *et al.* Tuning of an optical dimer nanoantenna by electrically controlling its load impedance[J]. Nano Letters, 2009, 9(11): 3914-3921.
- [6] Xu G, Huang C M, Tazawa M, *et al.* Nano-Ag on vanadium dioxide. II. Thermal tuning of surface plasmon resonance [J]. Journal of Applied Physics, 2008, 104(5): 053102.
- [7] Abb M, Wang Y, Groot C H D, *et al.* Hotspot-mediated ultrafast nonlinear control of multifrequency plasmonic nanoantennas[J]. Nature Communications, 2014, 5: 4869.
- [8] Xie Ya'nan, Liu Zhikun, Geng Li, *et al.* Properties of graphene and antenna applications in microwave to THz[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(s1): 116005.  
谢亚楠, 刘志坤, 耿莉, 等. 石墨烯微波至太赫兹的特性及天线中的应用[J]. 光学学报, 2015, 35(s1): 116005.
- [9] Jiang Juan, Huang Ting, Zhong Minlin, *et al.* Research status and development trends of interaction between laser and graphene[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(2): 0201002.  
姜娟, 黄婷, 钟敏霖, 等. 激光与石墨烯相互作用的研究现状及发展趋势[J]. 中国激光, 2013, 40(2): 0201002.
- [10] Lin Zhe, Ye Xiaohui, Han Jinpeng, *et al.* Patterning of graphene by femtosecond laser cutting[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(7): 703002.  
林喆, 叶晓慧, 韩金鹏, 等. 基于飞秒激光切割的石墨烯图案化研究[J]. 中国激光, 2015, 42(7): 703002.
- [11] Zheng X, Liu C. Recent development of THz technology and its application in radar and communication system [J]. Journal of Microwaves, 2011, 27(1): 1-5.
- [12] Novoselov K S, Fal'ko V I, Colombo L, *et al.* A roadmap for graphene[J]. Nature, 2012, 490(7419): 192-200.
- [13] Geim A K, Novoselov K S. The rise of graphene[J]. Nature Materials, 2007, 6(3): 183-191.
- [14] Barone V, Hod O, Scuseria G E. Electronic structure and stability of semiconducting graphene nanoribbons[J]. Nano Letters, 2006, 6(6): 2748-2754.
- [15] Yao Y, Kats M A, Genevet P, *et al.* Broad electrical tuning of graphene-loaded plasmonic antennas[J]. Nano Letters, 2013, 13(3): 1257-1264.
- [16] Dragoman M, Muller A A, Dragoman D, *et al.* Terahertz antenna based on graphene[J]. Journal of Applied Physics, 2010, 107(10): 104313.
- [17] Huang Y, Wu L S, Tang M, *et al.* Design of a beam reconfigurable THz antenna with graphene-based switchable high-impedance surface[J]. IEEE Transactions on Nanotechnology, 2012, 11(4): 836-842.
- [18] Esquis-Morote M, Gomez-Diaz J S, Perruisseau-Carrier J. Sinusoidally modulated graphene leaky-wave antenna for electronic beams scanning at THz[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science & Technology, 2013, 4(1): 116-122.
- [19] Xu Z, Dong X, Bornemann J. Design of a reconfigurable MIMO system for THz communications based on graphene antennas[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science & Technology, 2014, 4(5): 609-617.
- [20] 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.
- [21] Hanson G W. Dyadic Green's functions for an anisotropic, non-local model of biased graphene[J]. IEEE Transactions

- on Antennas & Propagation, 2008, 56(3): 747-757.
- [22] Gusynin V P, Sharapov S G, Carbotte J P. Magneto-optical conductivity in graphene[J]. Journal of Physics Condensed Matter, 2007, 19(2): 249-264.
- [23] Falkovsky L A, Pershoguba S S. Optical far-infrared properties of a graphene monolayer and multilayer[J]. Physical Review B Condensed Matter, 2007, 76(15): 153410.
- [24] Lin Y M, Jenkins K A, Valdesgarca A, *et al.* Operation of graphene transistors at gigahertz frequencies[J]. Nano Letters, 2009, 9(1): 422-426.
- [25] Chen P Y, Alù A. Atomically thin surface cloak using graphene monolayers[J]. Acs Nano, 2011, 5(7): 5855-5863.
- [26] Andersen D R. Graphene-based long-wave infrared TM surface plasmon modulator[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2010, 27(4): 818-823.