

太赫兹波段石墨烯频率可调贴片天线

原媛^{1,2}, 谢亚楠^{1,2*}, 李鑫^{1,2}

¹上海大学特种光纤与光接入网重点实验室, 上海 200444;

²上海大学通信与信息工程学院, 上海 200444

摘要 以聚酰亚胺为衬底,设计了一种基于石墨烯的工作在太赫兹波段的频率可重构贴片天线,该天线不需要加载电子开关,通过调节偏置电场,可动态地调控天线的谐振频率点并保持辐射性能不变。研究了石墨烯的主要特性,利用天线的等效电路模型,计算了石墨烯贴片天线的输入阻抗,理论解释了频率可调谐的原因。所设计的石墨烯天线在太赫兹波段有 5 个谐振频率点,覆盖了 678.25~721.75 GHz 的频段,辐射增益峰值可达 6.92 dB,辐射效率最高可达 86.48%。

关键词 材料; 频率可重构天线; 等效电路模型; 太赫兹; 石墨烯

中图分类号 O441.4

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0216001

Frequency-Tunable Graphene Patch Antenna in Terahertz Regime

Yuan Yuan^{1,2}, Xie Yanan^{1,2}, Li Xin^{1,2}

¹Key Laboratory of Specialty Fiber Optics and Optical Access Networks,

Shanghai University, Shanghai 200444, China;

²School of Communication & Information Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China

Abstract A frequency-reconfigurable graphene patch antenna working in the terahertz band is designed on a polyimide substrate. The resonance frequency points of this antenna can be tuned dynamically by the bias electrical field rather than any electronic switch, meanwhile its radiation performance is kept. The main characteristics of graphene are studied, the input impedance of the graphene patch antenna is calculated based on the equivalent circuit model, and the reason of frequency-tuning is explained theoretically. The designed graphene antenna achieves five resonance frequency points in the terahertz band, which covers the frequency bands ranging from 678.25 GHz to 721.75 GHz. The radiation gain peak can reach 6.92 dB, and the radiation efficiency can reach 86.48%.

Key words materials; frequency-reconfigurable antenna; equivalent circuit model; terahertz; graphene

OCIS codes 160.4236; 350.4010; 350.5610

1 引 言

太赫兹通信具有传输容量大、方向性好等优点,随着太赫兹源和太赫兹探测器的迅速发展,太赫兹辐射受到了越来越多的关注^[1-2]。太赫兹波段在机载通信、射电天文学等领域的应用极大地促进了太赫兹天线研究的发展^[3]。同时,无线通信设备数量迅速增加,对信道容量提出了更高的要求。基于频率可调天线,通过调谐频率范围,可使天线保持良好的辐射性能^[4]。

石墨烯具有优异的电学、热学以及力学性能,近

年来受到了越来越多的关注^[5-6]。石墨烯在太赫兹天线应用中具有很多优势,如小型化、机械灵活性及动态可调性^[7-8]。

受热效应和集肤深度的影响,金属在太赫兹频段的辐射性能差、欧姆损耗严重,而石墨烯具有稳定的物理特性与机械特性,可满足高频性能的需求^[9-10]。本文通过设计基于石墨烯天线的等效电路模型,找出了石墨烯特性与天线谐振频率间的关系,得到了石墨烯化学势与天线谐振频率的关系曲线,以此得到一种较便捷的方法来预计天线的辐射特性。本文提出的天线结构简单,无寄生元件和电子

收稿日期: 2017-07-14; 收到修改稿日期: 2017-09-26

作者简介: 原媛(1992—),女,硕士研究生,主要从事石墨烯天线方面的研究。E-mail: Yuanyan@shu.edu.cn

导师简介: 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

(通信联系人)

器件,不受电开关的限制。与之前的研究^[11]相比,所设计的天线在增益、宽带宽和辐射效率方面的性能更好。

2 基本原理

2.1 石墨烯表面电导率

石墨烯的表面电导率在天线频移中起到重要作用。由于石墨烯厚度超薄,因此可通过表面电导率 σ_s 建模。当结构的横向尺寸大于100 nm时,边缘效应可以忽略。因此,当电压偏置时,石墨烯层的表面电导率可由 Kubo 公式^[12-13]表示为

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

式中 $\omega = 2\pi f$ 为角频率, f 为频率; Γ 为散射率; μ_c 为化学势; T 为温度; e 为电子电荷; \hbar 为约化普朗克常数; ϵ 为能量; f_d 为费米-狄拉克分布,可表示为

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

式中 k_B 为波尔兹曼常量。通常选取室温($T = 300$ K), $\Gamma = 1/(2\tau)$, τ 为弛豫时间,选取典型值^[14] $\tau = 1$ ps。(1)式右边的积分第一项是由石墨烯带内跃迁所贡献,积分第二项是由带间跃迁所贡献。在太赫兹波段,石墨烯的电导率主要是由带内跃迁所贡献,根据德鲁德模型^[15-16], (1)式右边的第一项(带内电导率 σ_{intra})可进一步改写为

$$\sigma_{\text{intra}}(\omega, \Gamma, T, \mu_c) = -\frac{ie^2 k_B T}{\pi\hbar^2(\omega - i2\Gamma)} \left\{ \frac{\mu_c}{k_B T} + 2\ln\left[\exp\left(-\frac{\mu_c}{k_B T}\right) + 1\right] \right\}. \quad (3)$$

通过(3)式得出石墨烯表面电导率随化学势的变化关系如图1所示。

从图1可以看出,当频率不变时,随着化学势的增大,石墨烯电导率的实部增大,虚部减小,因此石墨烯表面电导率虚部在较高频率下占据主导作用,且可通过调控化学势来实现石墨烯表面电导率的可调性。

2.2 石墨烯化学势和偏置电场

由(3)式可知,石墨烯表面电导率可由化学势控制。为了调控石墨烯表面电导率,必须确定化学势和偏置静电场 E_0 的关系(图2)。根据文献[10, 17-18]

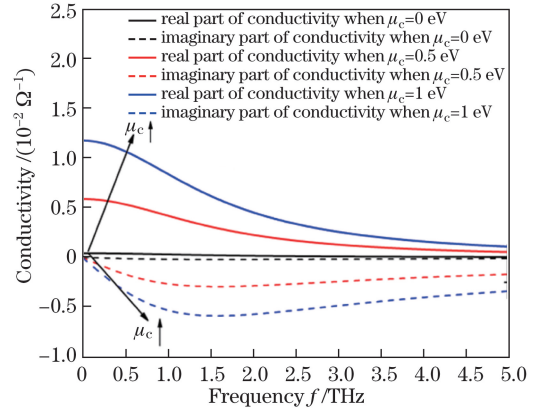


图1 室温下石墨烯表面电导率随化学势的变化关系
Fig. 1 Surface conductivity versus chemical potential of graphene at room temperature

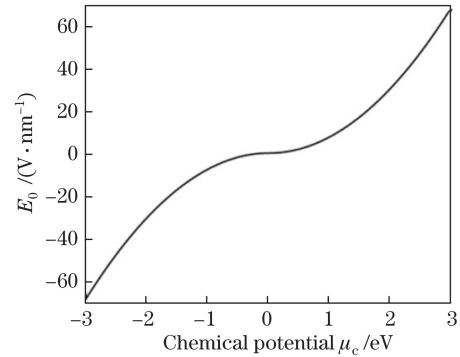


图2 当 $\epsilon_b = 3.5$ F/m时,石墨烯偏置电场与化学势的关系
Fig. 2 Relationship between bias electric field and chemical potential at $\epsilon_b = 3.5$ F/m

的研究结果可知,在门控电压条件下,由介质衬底支撑的石墨烯贴片的化学势 μ_c 和偏置静电场 E_0 的关系^[10]为

$$E_0 = \frac{e}{\pi\hbar^2 v_F^2 \epsilon_b} \int_0^\infty \epsilon [f_d(\epsilon) - f_d(\epsilon + 2\mu_c)] d\epsilon, \quad (4)$$

式中与能带无关的电子速度 $v_F = 10^6$ m/s, ϵ_b 为电位移矢量侧的均匀介质的介电常数。通过外加偏压可改变偏置电场,由(4)式可以看出,可通过改变偏置电压来调节石墨烯的表面电导率。采用数值计算的方法确定化学势 μ_c ,并计算出 E_0 。

2.3 石墨烯天线的等效电路模型

为了计算石墨烯可重构天线的输入阻抗,研究了矩形微带天线等效电路模型,如图3所示。

根据微带天线理论^[19],矩形微带天线可以等效为两个由传输线连接的平行开口槽。开口槽的等效导纳为 $Y_{sn} = G_{sn} + i\omega C_{sn}$ 表示(其中 $n = 1, 2$, G_{sn} 为辐射电导, C_{sn} 为由边缘效应引起的电容),传输线的输入导纳为 Y_{cn} , Y_{sn} 与 Y_{cn} 并联形成等效传输线导纳 Y_{line} 和等效辐射贴片导纳 Y_{patch} ,此时天线

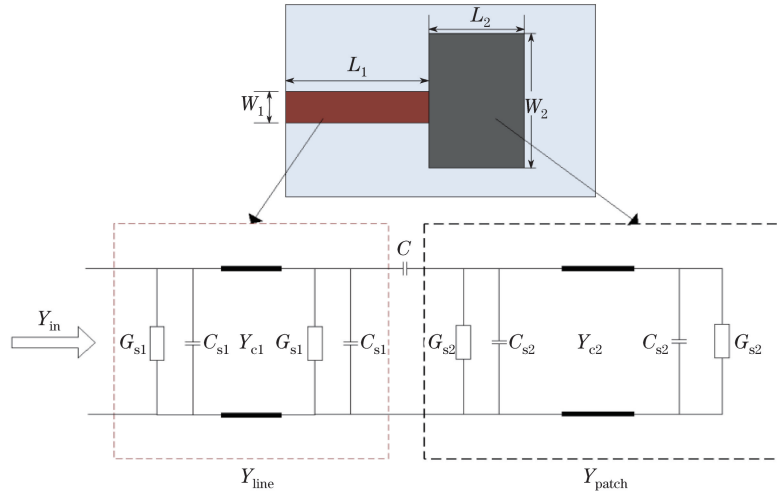


图 3 矩形微带天线的等效电路模型

Fig. 3 Equivalent circuit model of rectangular microstrip antenna

的输入导纳 Y_{in} 就由并联的 Y_{line} 和 Y_{patch} 与耦合电容 C 串联形成, 即 $Y_{in} = Y_{line} + Y_{patch} + i\omega C$ 。 $Y_{line} (n=1)$ 和 $Y_{patch} (n=2)$ ^[20] 可表示为

$$Y_{line(patch)} = Y_{sn} + Y_{on} \frac{Y_{sn} + Y_{on} \tan(\gamma_n L_n)}{Y_{on} + Y_{sn} \tan(\gamma_n L_n)}, \quad (5)$$

式中 Y_{on} 为特性导纳, L_n 为导电贴片的长度, γ_n ^[20] 可表示为

$$\gamma_n = \alpha_{cn} + \alpha_{dn} + i\beta = \frac{R_s}{Z_{0n} W_n} + \frac{k_0 \epsilon_r (\epsilon_{en} - 1) \tan \delta}{2 \sqrt{\epsilon_{en}} (\epsilon_r - 1)} + i\beta, \quad (6)$$

式中 α_{cn} 为导电损耗; α_{dn} 为介质损耗; β 为相位常数; Z_{0n} 为特性阻抗; W_n 为贴片宽度; k_0 为自由空间波矢量大小; ϵ_r 为衬底的相对介电常数; ϵ_{en} 为微带线的有效介电常数; $\tan \delta$ 为衬底的介电损耗角正切; R_s 为导体的表面电阻, 可表示为

$$R_s = \sqrt{\frac{\omega \mu_0}{2\sigma_v}}, \quad (7)$$

式中 μ_0 为真空磁导率; σ_v 为导体的体电导率 (即石墨烯的等效体电导率), 可表示为^[21] $\sigma_v = \sigma_s / d_g$, 其中 d_g 为石墨烯的等效厚度。

将石墨烯作为天线辐射电导贴片和微带传输线。根据(5)~(7)式可知, 石墨烯的表面电导率 $\sigma_s = \sigma'_s + i\sigma''_s$ 是天线输入导纳 Y_{in} 的一项, 在并联谐振与串联谐振条件下, 输入导纳虚部为 0, 对应天线的输入阻抗不同, 石墨烯天线的输入阻抗 Z_{in} 与输入导纳的关系为 $Z_{in} = 1/Y_{in}$ 。因此, 偏压直接影响天线的输入阻抗, 在阻抗匹配条件下, 天线的谐振频率点发生偏移, 利用石墨烯表面电导率的动态可调性, 可实现天线频率重构。分别计算了石墨烯贴片天线的

输入电阻曲线和输入电抗曲线, 计算结果如图 4 和图 5 所示, 其中 $\text{Re}(\cdot)$ 表示实部, $\text{Im}(\cdot)$ 表示虚部。由图 4 和图 5 可看出, 通过改变石墨烯的化学势 μ_c , 石墨烯天线的谐振频率可以发生频移; 当化学势增大时, 谐振频率值增大, 输入电阻值减小, 并且频率的变化对输入电抗的影响变小。

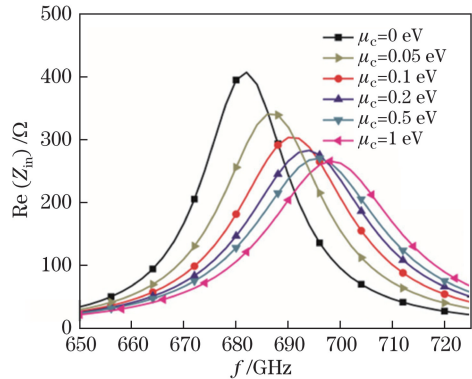


图 4 石墨烯贴片天线的输入电阻曲线图

Fig. 4 Input resistance curve of graphene patch antenna

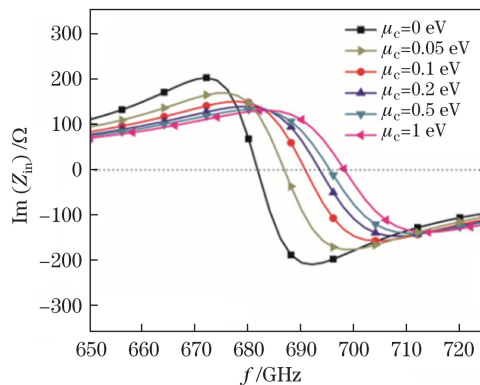


图 5 石墨烯贴片天线的输入电抗曲线图

Fig. 5 Input reactance curve of graphene patch antenna

3 太赫兹波段石墨烯天线设计

基于图 3 和(3)~(7)式,设计了一款基于石墨烯的可变频率天线,其中天线尺寸参数详见表 1。天线的结构如图 6 和图 7 所示。

表 1 石墨烯频率可重构天线参数

Table 1 Parameters of frequency-reconfigurable graphene antenna

Component	Parameter	Value / μm
Patch	Length L	98.5
	Width W	133.2
Microstrip line	Length L'_1	16.98
	Length L'_2	30
	Length L'_3	13
	Width W'_1	6
	Width W'_2	6
	Width W'_3	20
Substrate (polyimide)	Length L_s	210
	Width W_s	433.5
	Height h	18
Silicon	Height h_1	0.525

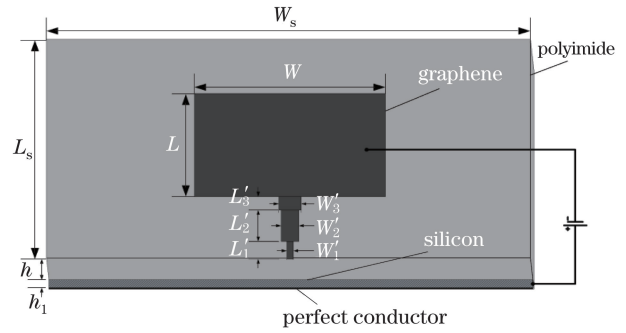


图 6 基于石墨烯的频率可重构天线俯视图
Fig. 6 Top view of frequency-reconfigurable graphene antenna

在该天线结构中,石墨烯用作矩形辐射贴片和微带传输线,聚酰亚胺衬底与地之间是高阻硅。辐射贴片与 Si 由偏置电场的导线连接。石墨烯的横向尺寸大于 100 nm,所讨论的模型适用于该结构。该天线结构中传输线的长度用于匹配辐射贴片与太赫兹源的阻抗,微带线宽度用于改善天线的增益与效率,并补偿阻抗的失配损耗。衬底(聚酰亚胺; $\epsilon_r=3.5 \text{ F/m}$, $\tan \delta=0.008$)所具有的低介电常数特性有助于增大辐射方向的辐射效率^[22]。

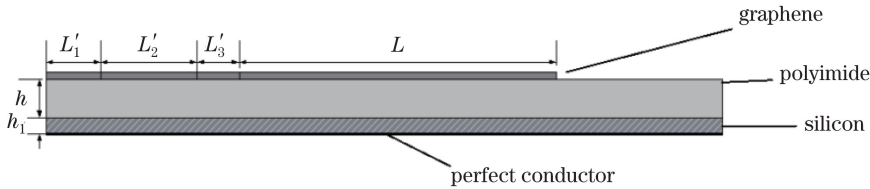


图 7 基于石墨烯的频率可重构天线左视图

Fig. 7 Left view of frequency-reconfigurable graphene antenna

4 仿真结果及分析

运用 Ansys-HFSS 仿真天线来研究石墨烯天线的辐射特性。通过调节石墨烯化学势,天线可工作在 695.55, 698.10, 701.55, 703.15, 705.05 GHz 处。在每个谐振频率 f_{res} 处,天线在 -10 dB 回波损耗处所得到的相对阻抗带宽均大于 4.5%,如图 8 所示。

当天线工作于不同谐振频率时,天线的辐射方向如图 9 所示。从图 9 可以看出,当仰角 $\theta=0^\circ$ 时,石墨烯天线的辐射增益最大,这主要是因为天线的增益受反射板和天线结构的影响。在所选的 5 个工作频段中,天线的最大辐射增益超过了 5.8 dB。

如图 8,9 所示,通过控制化学势,基于石墨烯的频率可重构天线可以实现 5 个连续的工作频带,并且在工作频带上具有较小的后瓣辐射和较好的前瓣辐射比。具体的天线辐射性能见表 2。

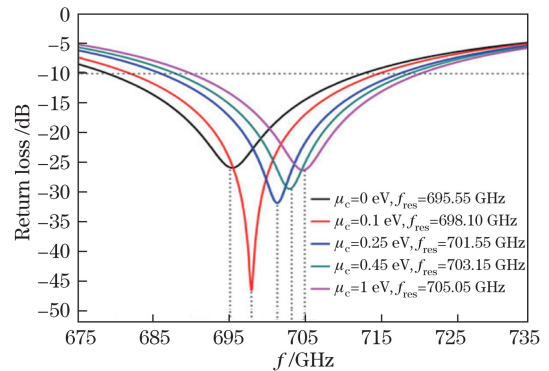


图 8 天线的回波损耗

Fig. 8 Return loss of antenna

从表 2 中看出,当化学势增大时,天线辐射效率增大,相对阻抗带宽减小。而化学势对天线工作频率的影响与基于等效电路模型的研究结果一致。基于设计的天线结构(图 6,7)和表达式 [(5)~(7)式],建立了一个数值模型以得到输入阻抗曲线,该曲

线揭示了天线谐振特性与石墨烯可变表面电导率的关系。根据参考文献[19],可计算出辐射电导

和感应电容等电路元件参数的值。等效电路元件的参数见表3。

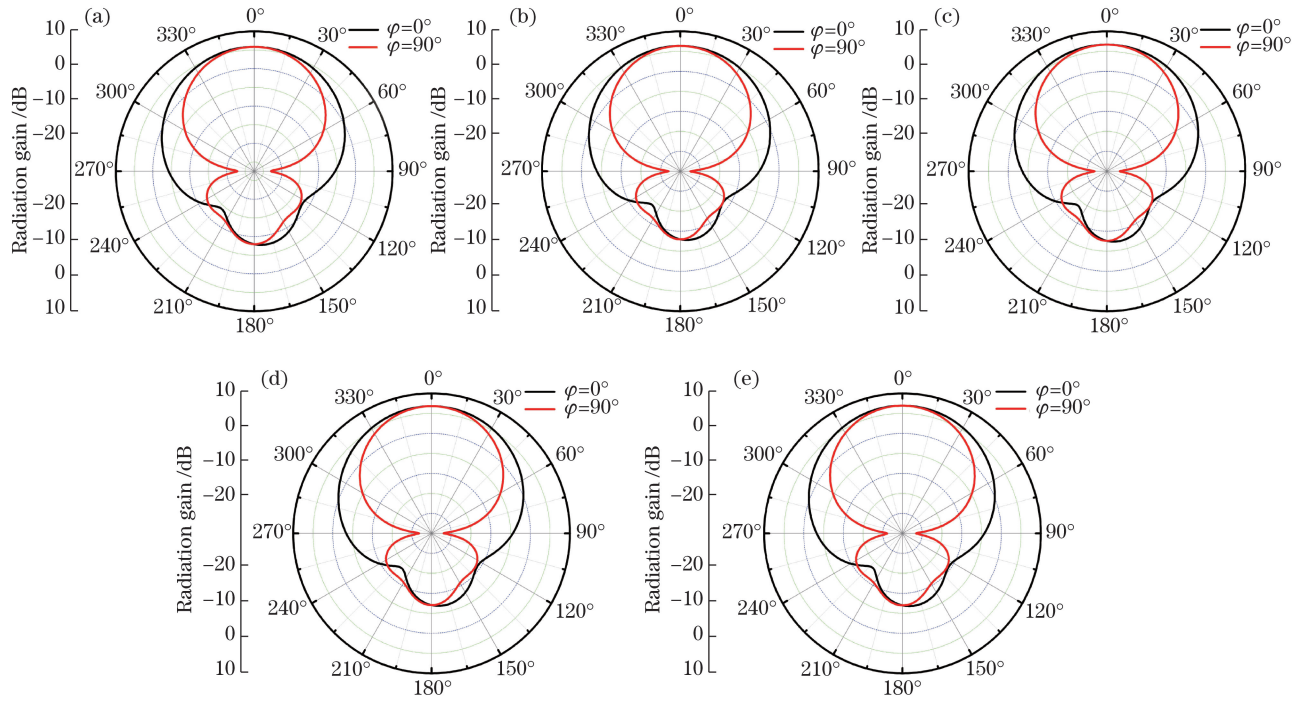


图9 不同谐振频率下石墨烯天线的辐射方向图。(a) 695.55 GHz; (b) 698.10 GHz; (c) 701.55 GHz; (d) 703.15 GHz; (e) 705.05 GHz

Fig. 9 Radiation patterns of graphene antenna under different resonance frequencies.

(a) 695.55 GHz; (b) 698.10 GHz; (c) 701.55 GHz; (d) 703.15 GHz; (e) 705.05 GHz

表2 石墨烯频率可重构天线的辐射特性

Table 2 Radiation performances of frequency-reconfigurable graphene antenna

Resonance frequency /GHz	Chemical potential /eV	Absolute impedance	Relative impedance	Maximum radiation gain /dB	Directivity factor /dB	Radiation efficiency /%
		bandwidth /GHz	bandwidth /%			
695.55	0	678.25-713.65	5.08	5.82	8.01	72.56
698.10	0.1	680.75-715.95	5.04	6.33	8.02	79.00
701.55	0.25	685.10-718.55	4.77	6.66	8.01	83.10
703.15	0.45	687.05-720.05	4.70	6.80	8.01	84.80
705.05	1	689.95-721.75	4.63	6.92	8.01	86.48

表3 石墨烯频率可重构天线的等效电路参数

Table 3 Parameters in equivalent circuit of frequency-reconfigurable graphene antenna

f_{res} /GHz	μ_c /eV	G_{s1} / μ S	G_{s2} /mS	C_{s1} /aF	C_{s2} /fF	C /fF
695.55	0	11.7072	1.0598	409.10	2.3689	1.3
698.10	0.1	11.7946	1.0677	408.99	2.3387	0.2
701.55	0.25	11.9107	1.0782	408.85	2.3278	0.9
703.15	0.45	11.9610	1.0827	408.79	2.3240	0.9
705.05	1	12.0286	1.0889	408.71	2.3212	0.9

由(5)~(7)式可知,石墨烯的表面电导率 σ_s 是天线输入导纳 Y_{in} 中的一项,石墨烯天线的谐振特性可通过改变化学势的方法得到,如图10所示。图10揭示了化学势 μ_c 与谐振频率 f_{res} 的曲线关系,

化学势 μ_c 越大,谐振频率 f_{res} 越大,但是随着化学势 μ_c 的增大,石墨烯的调控能力受到限制,综合考虑偏置电压、衬底介电常数以及厚度对石墨烯化学势的影响,得到 μ_c 的范围为0~1 eV。所设计的天线结

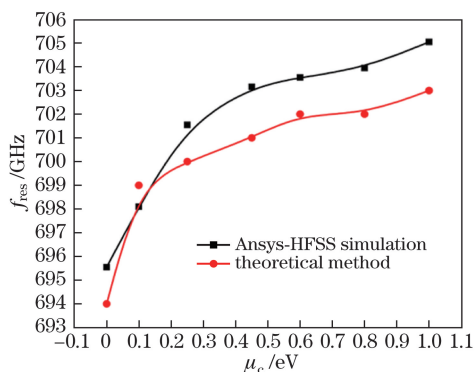


图 10 化学势与谐振频率的关系

Fig. 10 Chemical potential versus resonance frequency

构在化学势从 0 eV 增大到 1 eV 时,对应的谐振频率从 695.55 GHz 上升到 705.05 GHz,当指定的天

表 4 不同参考文献中的天线辐射特性

Table 4 Radiation performances of existing antennas from different references

Parameter	Ref. [11]	Ref. [23]	Ref. [24]	Ref. [25]	Ref. [26]		
Resonance frequency /GHz	750	770	6000	1500	720	1425	1325
Impedance bandwidth /%	6.67	6.67	12.83	-	13.36	-	-
Maximum radiation gain /dB	5.09	5.07	3.27	0	3.852	-	-
Directivity factor /dB	5.71	5.70	7.56	-	6.456	-	-
Radiation efficiency /%	86.58	86.43	37.17	-	54.9	43	44.5

5 结 论

基于石墨烯的频率可重构天线没有外加电子元件,可以工作在 695.55, 698.10, 701.55, 703.15, 705.05 GHz 5 个谐振频率点,并具有 678.25 ~ 721.75 GHz 的工作频带,通过外加偏压改变石墨烯导电性以实现天线频率可调性。提出了基于石墨烯天线的等效电路模型,解释了频率可调谐的原因,与 Ansys-HFSS 的仿真结果相比,数值计算方法进一步验证了天线设计的可行性,有助于分析天线的谐振性能。通过仿真,每个工作频带的相对阻抗带宽均大于 4.5%,当谐振频率为 705.05 GHz 时,辐射增益达到最大值 6.92 dB;当谐振频率为 695.55 GHz 时,最小辐射增益为 5.82 dB。与其他以石墨烯为基础的太赫兹天线相比,所提出的天线具有较大的辐射增益。此外,所提出天线的辐射效率比传统天线大得多。因此,所提出的基于石墨烯的频率可重构天线在结构、辐射增益和辐射效率等方面具有优势。

参 考 文 献

[1] Mueller E R. Terahertz radiation: applications and sources[J]. Industrial Physicist, 2003, 9(4): 27-30.
 [2] Zheng X, Liu C. Recent development of THz technology

线工作频率在 695.55~705.05 GHz 之间时,可以通过微调化学势(偏置电压)实现天线在指定频点工作的功能;若指定的天线工作频率不在此范围内,则需要通过改变天线结构或调整天线尺寸来实现天线在指定频点工作的功能。基于理论计算和 Ansys-HFSS 仿真两种方法,所得到的两条曲线具有相同的趋势,但是存在差异,这是因为在理论计算中,微带传输线之间的耦合效应被忽略了。

不同参考文献中的天线辐射特性见表 4。石墨烯频率可重构天线在辐射特性方面具有明显优势:当谐振频率为 705.05 GHz 时,辐射增益最大为 6.92 dB。相较于参考文献[11,23-26]中的天线,所设计天线的辐射效率更高。

and its application in radar and communication system[J]. Journal of Microwaves, 2011, 27(1): 1-5.
 [3] Siegel P H. Terahertz technology[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2002, 50(3): 910-928.
 [4] Petosa A. An overview of tuning techniques for frequency-agile antennas[J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2012, 54(5): 271-296.
 [5] Geim A K, Novoselov K S. The rise of graphene[J]. Nature Materials, 2007, 6(3): 183-191.
 [6] Xie Y N, Liu Z K, Geng L, et al. Properties of graphene and antenna applications in microwave to THz[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(s1): s116005. 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): s116005.
 [7] Perruisseau-Carrier J, Tamagnone M, Gomez-Diaz J S, et al. Graphene antennas: Can integration and reconfigurability compensate for the loss?[C]. Microwave Conference, 2013: 369-372.
 [8] 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.
- [9] 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.
- [10] Amanatiadis S A, Karamanos T D, Kantartzis N V. Radiation efficiency enhancement of graphene THz antennas utilizing metamaterial substrates[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2017, 16: 2054-2057.
- [11] Anand S, Kumar D S, Wu R J, *et al.* Graphene nanoribbon based terahertz antenna on polyimide substrate[J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2014, 125(19): 5546-5549.
- [12] Gusynin V P, Sharapov S G, Carbotte J P. Magneto-optical conductivity in graphene[J]. *Journal of Physics*, 2007, 19(2): 026222.
- [13] Falkovsky L A, Pershoguba S S. Optical far-infrared properties of a graphene monolayer and multilayer[J]. *Physical Review B*, 2007, 76(15): 153410.
- [14] Lin Y M, Jenkins K A, Valdes-Garcia A, *et al.* Operation of graphene transistors at gigahertz frequencies[J]. *Nano Letters*, 2009, 9(1): 422-426.
- [15] Hanson G W. 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.
- [16] Falkovsky L A, Pershoguba S S. Optical far-infrared properties of a graphene monolayer and multilayer[J]. *Physical Review B*, 2007, 76(15): 153410.
- [17] Ryzhii V, Satou A, Otsuji T. Plasma waves in two-dimensional electron-hole system in gated graphene heterostructures[J]. *Journal of Applied Physics*, 2007, 101(2): 024509.
- [18] Falkovsky L A. Unusual field and temperature dependence of the Hall effect in graphene[J]. *Physical Review B*, 2007, 75(3): 033409.
- [19] Zhong S S. Microstrip antenna theory and application[M]. Xi'an: Xidian University Publisher, 1991.
钟顺时. 微带天线理论与应用[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1991.
- [20] Pozar D M. Microwave engineering[M]. New York: Academic Press, 2006.
- [21] Liu Z K, Xie Y N, Geng L, *et al.* Scattering of circularly polarized terahertz waves on a graphene nanoantenna[J]. *Chinese Physics Letters*, 2016, 33(2): 027802.
- [22] Jha K R, Singh G. Effect of low dielectric permittivity on microstrip antenna at terahertz frequency[J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2013, 124(22): 5777-5780.
- [23] Thampy A S, Darak M S, Dhamodharan S K. Analysis of graphene based optically transparent patch antenna for terahertz communications[J]. *Physica E*, 2015, 66: 67-73.
- [24] Li J, He M, Wu C B, *et al.* Radiation pattern reconfigurable graphene leaky-wave antenna at terahertz band based on dielectric grating structure[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2017, 16: 1771-1775.
- [25] Sharma A, Dwivedi V K, Singh G. THz rectangular patch microstrip antenna design using photonic crystal as substrate[C]. *Progress in Electromagnetic Research Symposium*, 2008: 161-165.
- [26] Rashed A N Z, Sharshar H A. Optical microstrip patch antennas design and analysis[J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2013, 124(20): 4331-4335.