

激光与光电子学进展

基于石墨烯的多模式可重构太赫兹微带天线

李佳宁, 李春树*, 程朝阳, 陈文阳, 罗欢, 冯宇阳, 姜文超

宁夏大学物理与电子电气工程学院, 宁夏 银川 750021

摘要 为了满足通信设备大容量数据传输与设备小型化的需求,提出了一种包括矩形贴片、介质基板和开槽接地板的多模式可重构太赫兹微带天线。基于石墨烯材料在太赫兹波段的电可控特性,将3组石墨烯作为调控开关分布在开槽处,通过控制石墨烯的偏置电压实现开关通断。该天线具有6种频率可重构模式,谐振频率分布在2.652~4.565 THz范围内,-10 dB带宽均大于10%,最大辐射增益为2 dBi,反射系数均低于-15 dB,表现出了良好的辐射特性。将单组石墨烯作为微调控制单元时可实现天线小频率范围内的可调谐功能,在石墨烯太赫兹可重构天线和天线阵列设计中具有巨大的应用潜力。

关键词 材料; 石墨烯; 太赫兹; 可重构天线; 微带天线

中图分类号 TB34; TN822+.4

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202259.0316006

Multi Mode Reconfigurable Terahertz Microstrip Antenna Based on Graphene

Li Jianing, Li Chunshu*, Cheng Zhaoyang, Chen Wenyang, Luo Huan, Feng Yuyang, Jiang Wenchao

School of Physics and Electrical Engineering, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia 750021, China

Abstract In order to meet the needs of large-capacity data transmission and equipment miniaturization of communication equipment, a multi-mode reconfigurable terahertz microstrip antenna including rectangular chip, media substrate and slotted floor is proposed in this paper. Based on the electrically controllable characteristics of graphene materials in the terahertz band, 3 groups of graphene are distributed as regulator switches in the slotting, and the switch is switched off by controlling the bias voltage of graphene. The antenna has 6 frequency reconfigurable modes, the resonant frequency is distributed in the range of 2.652-4.565 THz, the -10 dB bandwidth is greater than 10%, the maximum radiation gain is 2 dBi, and the reflection coefficient is lower than -15 dB, showing good radiation characteristics. The use of a single group of graphene as a fine-tuning control unit can realize the tunable function of the antenna in the small frequency range, which has great application potential in the design of graphene terahertz reconfigurable antennas and antenna arrays.

Key words materials; graphene; terahertz; reconfigurable antenna; microstrip antenna

1 引言

太赫兹 (THz) 波介于微波和红外之间,其频率

范围为 0.1~10 THz。太赫兹技术的研究在太赫兹成像、无损检测、短距离高速通信等领域具有重要意义,尤其在通信领域,太赫兹通信被预测为实

收稿日期: 2021-04-12; 修回日期: 2021-05-09; 录用日期: 2021-05-18

基金项目: 宁夏自然科学基金(2020AAC03033)、宁夏大学研究生创新项目(GIP2020074)

通信作者: *lichsh@nxu.edu.cn

现下一代高速无线通信(6G)的关键技术。相比毫米波,太赫兹波通信的传输容量更大^[1],具有更好的方向性、保密性、抗干扰能力以及窄波束特性。相比光通信,太赫兹通信的能量效率更高、沙尘烟雾穿透力更强,可以实现全天候工作,为下一代无线通信系统的实现奠定了基础。新一代无线通信系统正在朝轻质化、小型化、多频段化的方向发展,需要具有更高的集成度和更多的功能^[2]。天线作为通信系统的关键部件,需要在太赫兹频段完成正常的辐射接收工作,而传统电子学方法,如互补金属氧化物半导体(CMOS)、BiCMOS、III-V 半导体、高电子迁移率晶体管(HEMT)和肖特基二极管技术的性能已达到极限(工作频率最高可达到 1 THz)^[3],因此,基于传统材料的天线元件已不再适用于高频段通信,探索一种新的替代材料显得尤为关键。

可重构天线既能满足通信系统小型化的要求,又能提高频谱利用率、降低终端系统的研发复杂度、克服多个天线之间的电磁干扰。传统的可重构方式一般采用二极管开关^[4-5]、微电子机械开关^[6]等电子元件实现天线的可重构,但受热效应和集肤深度的影响,该方式在太赫兹波段存在切换速度慢、集成困难、欧姆损耗严重且易产生电磁干扰^[7]等问题,极大影响了天线的辐射性能。石墨烯是一种二维碳纳米材料,受温度的影响较小,且具有超高的电子迁移率、优异的物理化学特性以及良好的导电性和导热性,在极高频器件中得到了广泛应用。此外,石墨烯具有电导率可控特性,支持太赫兹频率下表面等离子波的传播^[8],汤文达等^[2]设计了一款基于石墨烯的可调谐八木天线,通过改变石墨烯贴片的偏置电压调控石墨烯的化学势,且该天线具有 2 种频率(300 GHz 和 500 GHz)工作模式。原媛

等^[9]设计了一款微带贴片天线,具有 5 个可调谐振频率点,覆盖了 678.25~721.75 GHz 频段。Yasir 等^[10]设计了一款微带可调谐天线,通过调节石墨烯的化学势在 5 GHz 频率附近实现了 370 MHz 的可调范围。Ali 等^[11]设计了一款双模式可调谐多输入多输出(MIMO)天线,2 个模式分别为单频点可调谐和双频点可调谐,调谐范围为 1.45~2.17 THz。

本文基于石墨烯的电可控特性设计了一款双模式可调谐贴片天线,将 3 组石墨烯作为调控开关分布在开槽处,通过控制石墨烯的偏置电压实现开关通断。该天线的谐振频率分布在 2.652~4.565 THz 范围内,调谐跨度为 1.913 THz。仿真结果表明,将单组石墨烯作为微控制单元时可实现天线小频率范围内的可调谐功能,为石墨烯太赫兹可重构天线和天线阵列的设计提供了新思路。

2 石墨烯的电导率模型

石墨烯作为一种新型材料,是一种由碳原子在二维蜂窝晶格中建立的平面结构,单层厚度仅为 0.335 nm,适合于太赫兹波段器件的开发应用。石墨烯具有许多独特的电磁、热、机械和光学性能,如高导热率,其载流子迁移率在室温下可达到 200000 cm²/(V·s),杨氏模量为 1.5 TPa;且其在太赫兹波段支持横磁(TM)模表面等离子体激元(SPP)^[12],为无线纳米系统中器件的小型化和集成化提供了可能。此外,石墨烯的可调电导率也为可重构器件的设计提供了理论依据。

在数值模拟中,石墨烯的厚度比波长小得多,可以当作是具有复杂表面电导率的薄膜,其电导率由 Kubo 公式^[13-14]可表示为

$$\sigma_s = \sigma_s^{\text{intra}} + \sigma_s^{\text{inter}}, \quad (1)$$

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

式中, σ_s^{intra} 和 σ_s^{inter} 分别为带内电导率和带间电导率, ω 为角频率, $\epsilon \geq 0$ 为载流子动能, e 为电子电荷, \hbar 为约化普朗克常数, μ_c 为石墨烯的化学势, T 为温度, $\Gamma = 1/(2\tau)$ 为散射率, τ 为弛豫时间, 实验中设定为 0.1 ps, f_d 为费米-狄拉克分布, 可表示为

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

式中, K_B 为玻尔兹曼常数。在较低的太赫兹频率

下,由于泡利效应,带间电导率可以忽略不计^[15],石墨烯的电导率由带内电导率控制。根据随机相位近似(RPA)理论,可以用 Drude 模型^[16]将 σ_s 近似为

$$\sigma_s(\omega, \Gamma, T, \mu_c) = -\frac{ie^2 K_B T}{\pi\hbar^2(\omega - i2\Gamma)} \left\{ \frac{\mu_c}{K_B T} + 2 \ln \left[\exp\left(-\frac{\mu_c}{K_B T}\right) + 1 \right] \right\}. \quad (4)$$

从(4)式可以发现,石墨烯的电导率依赖于频率与化学势 μ_c 之间的关系,不同化学势下电导率与频率的关系如图1所示。可以发现,电导率的实部和虚部均随化学势的增加而增加;且相比高频段,

太赫兹低频部分化学势导致的电导率变化更分散,而化学势 μ_c 的大小取决于外加偏置电压^[17-18],石墨烯化学势与外加电压的关系^[19-20]可表示为

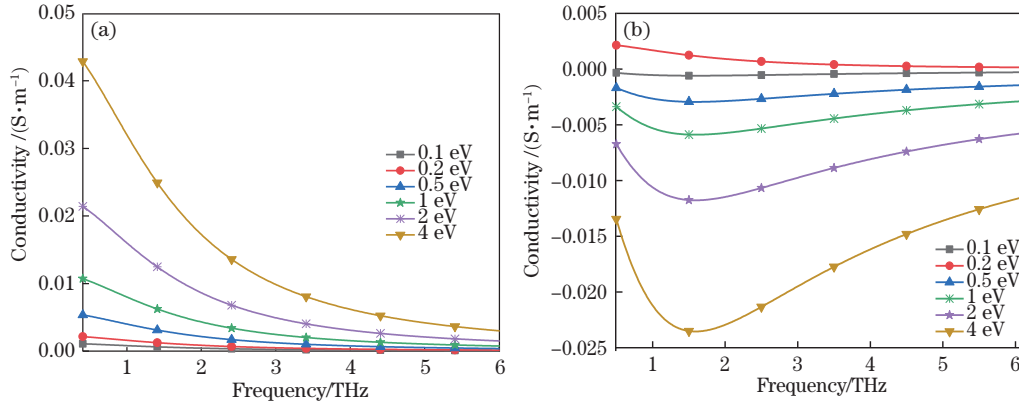


图1 不同化学势下电导率与频率的关系。(a)电导率实部与频率的关系;(b)电导率虚部与频率的关系
Fig. 1 Relationship between conductivity and frequency under different chemical potentials. (a) Relationship between the real part of conductivity and frequency; (b) relationship between the imaginary part of conductivity and frequency

$$V = V_0 + \frac{t\epsilon\mu_c^2}{\epsilon_0\epsilon_r\pi\hbar^2v_F^2}, \quad (5)$$

式中, V_0 为反映石墨烯自然掺杂浓度的电压偏移量,一般设置为0 V, ϵ_0 为真空介电常数, t 和 ϵ_r 分别为石墨烯与电极之间绝缘层介质的厚度和相对介电常数, $v_F=9.5\times 10^5$ m/s为费米速率。 $t=1$ nm, $\epsilon_r=3.8$ 时化学势与偏置电压的变化关系如图2所示,可以发现,可通过调控外加偏置电压调节石墨

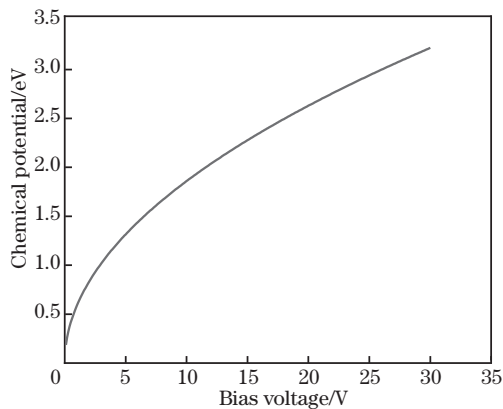


图2 石墨烯偏置电压与化学势的关系
Fig. 2 Relationship between bias voltage and chemical potential of graphene

烯的电导率^[21]。

3 天线设计与分析

3.1 基于石墨烯的微带天线

设计的微带天线由0.8 μm 厚的二氧化硅介质基板、0.017 μm 厚的金属铜辐射贴片和开槽金属接地板组成^[22],外观尺寸为微米量级。为了实现天线的可重构功能,将石墨烯分为3组设置在底板开槽处,工程中石墨烯通常被淀积在二氧化硅材料上,因此,介质基板选择二氧化硅(介电常数为3.75)。通过外接偏置电压控制石墨烯的化学势 μ_c 调控石墨烯的电导率 σ_s ,偏置电路通常使用三明治结构进行馈电^[23],使石墨烯具有较高或较低的电阻和电抗,从而导通或断开金属地板的开槽通道,影响天线的谐振频率,这种性能类似射频电路中的PIN二极管开关。设计的微带天线几何结构如图3所示,尺寸参数如表1所示。将单层石墨烯作为寄生层分为3组(编号分别为P1、P2、P3),对称分布在接地板开槽处。

3.2 石墨烯的开关模式

3.2.1 模式设定

由表面阻抗 $Z=1/\sigma_s$ 和(4)式可知,石墨烯的表面阻抗与化学势成反比,在温度 $T=300$ K、弛豫时间 $\tau=0.1$ ps,化学势为0.1 eV时,石墨烯方块的电阻(方阻)为900 Ω/sq (sq为单位平方米),可将其视为介质;当化学势为4 eV时,方阻为21 Ω/sq 时,可将其视为金属。将化学势为0.1 eV时的石墨烯设定为OFF状态,化学势为4 eV的石墨烯设定为

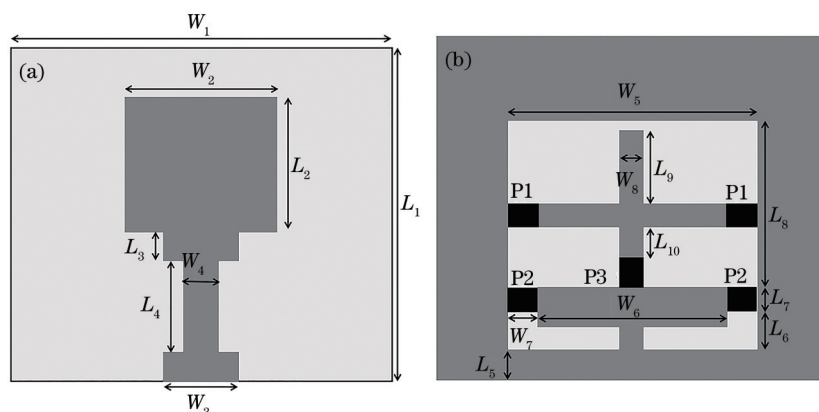


图 3 天线的几何结构。(a)俯视图;(b)仰视图

Fig. 3 Geometric structure of the antenna. (a) Top view; (b) bottom view

表 1 天线的尺寸参数

Table 1 Size parameters of the antenna unit: μm

Parameter	Value	Parameter	Value
L_1	40.0	L_{10}	1.5
L_2	10.0	W_1	40.0
L_3	1.0	W_2	10.0
L_4	3.0	W_3	1.5
L_5	2.0	W_4	0.5
L_6	1.5	W_5	17.0
L_7	2.5	W_6	14.0
L_8	11.0	W_7	1.5
L_9	5.5	W_8	1.0

表 2 天线开关的模式

Table 2 Mode of antenna switch

Mode	P1	P2	P3
state 1	OFF/OFF	ON/ON	ON
state 2	ON/ON	ON/ON	ON
state 3	OFF/OFF	ON/OFF	ON
state 4	OFF/OFF	ON/ON	OFF
state 5	OFF/OFF	OFF/OFF	OFF
state 6	OFF/OFF	ON/OFF	OFF

ON 状态, 由于每组石墨烯均为对称分布, 排列组合后共有 18 种模式。仿真结果表明, 其中 6 种模式的性能达到工程可用标准; 且可重构功能优良, 各频带区分度较高, 6 种模式下的开关设定如表 2 所示。

3.2.2 仿真结果和分析

通过电磁场仿真软件 CST 的时域求解器, 将石墨烯设置为表面阻抗材料, 利用 Drude 模型计算石墨烯的电导参数, 依照表 2 对天线模型在 2~6 THz

频率范围内进行仿真, 不同模式下天线的回波参数如图 4 所示。可以发现, 天线可实现 6 种大区分度的频率可重构功能。6 种模式的性能参数如表 3 所示, 可以发现, 谐振点依次为 4.430 THz、4.565 THz、3.940 THz、3.800 THz、2.652 THz、3.147 THz, 所有状态匹配良好 (反射系数 $S_{11} < -15$ dB)。石墨烯存在的辐射损耗, 增加了天线的损耗功率, 降低了微带天线的品质因数, 也拓宽了天线的工作带宽 (BW)。加入石墨烯后天线的 -10 dB 带宽均大于 10%, 各模式的辐射增益范围为 -1.750~2.000 dBi。图 5 为天线在 6 种模式下谐振频率点处电场面 (E 面) 和磁场面 (H 面) 的辐射方向图, 可以

表 3 天线开关模式的性能参数

Table 3 Performance parameters of antenna switch mode

Mode	Resonance frequency / THz	S_{11} / dB	Gain in the resonance frequency / dBi	Absolute BW / THz	BW / %
state 1	4.430	-34.19	1.446	4.1465-4.7037	12.5
state 2	4.565	-24.32	-1.750	4.2692-4.8431	12.5
state 3	3.940	-19.34	-0.973	3.6753-4.2113	13.6
state 4	3.800	-22.68	2.000	3.5325-4.0522	13.6
state 5	2.652	-19.08	0.540	2.4794-2.8294	13.1
state 6	3.147	-15.93	1.520	2.9400-3.3460	12.9

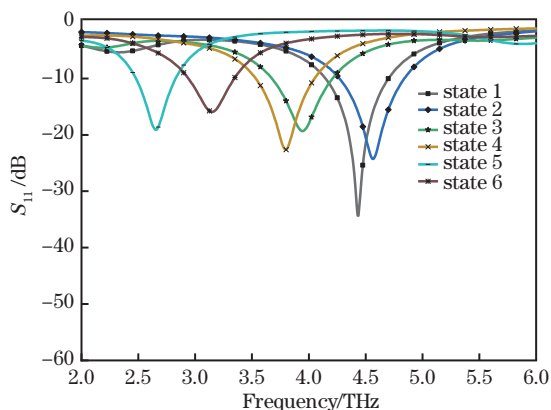


图 4 开关模式下的回波参数

Fig. 4 Echo parameters in switch mode

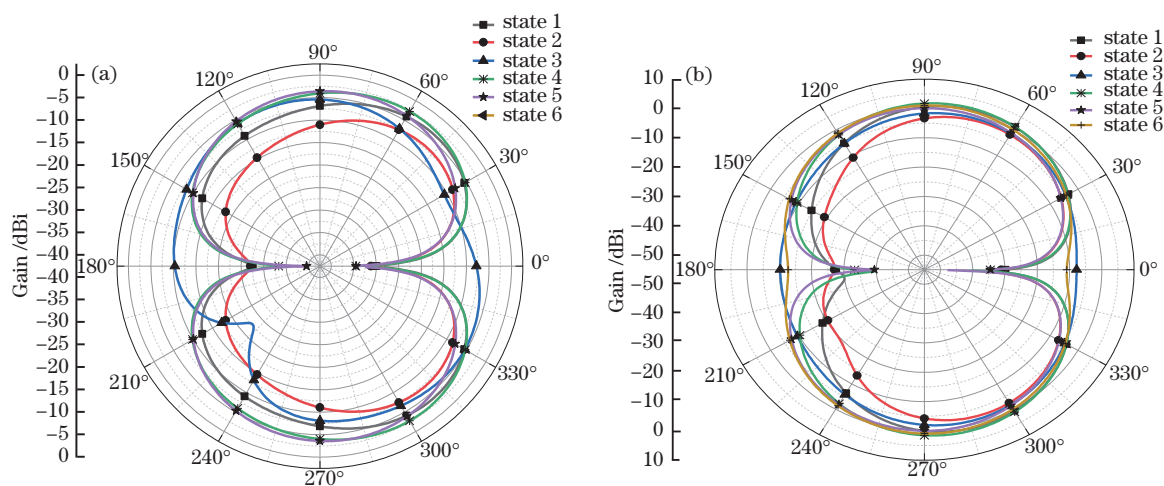


图 5 开关模式下天线的辐射方向图。(a) E 面; (b) H 面

Fig. 5 Radiation pattern of the antenna in switch mode. (a) E side; (b) H side

图 6 为模式 2 和模式 5 下天线背面的电流分布, 图 6(a) 为开关全开状态, 图 6(b) 为开关全断状态。可以发现, 石墨烯为 ON 状态 (化学势为 4 eV) 时, 背面开槽处导通, 有强电流流过; 石墨烯为 OFF 状态

(化学势为 0.1 eV) 时, 背面开槽处几乎断路, 电流强度很弱, 验证了石墨烯在该天线中起到的开关特性, 即通过控制石墨烯的通断改变天线的电流分布, 从而起到频率可重构的功能。从表 3 和图 6 可以发现,

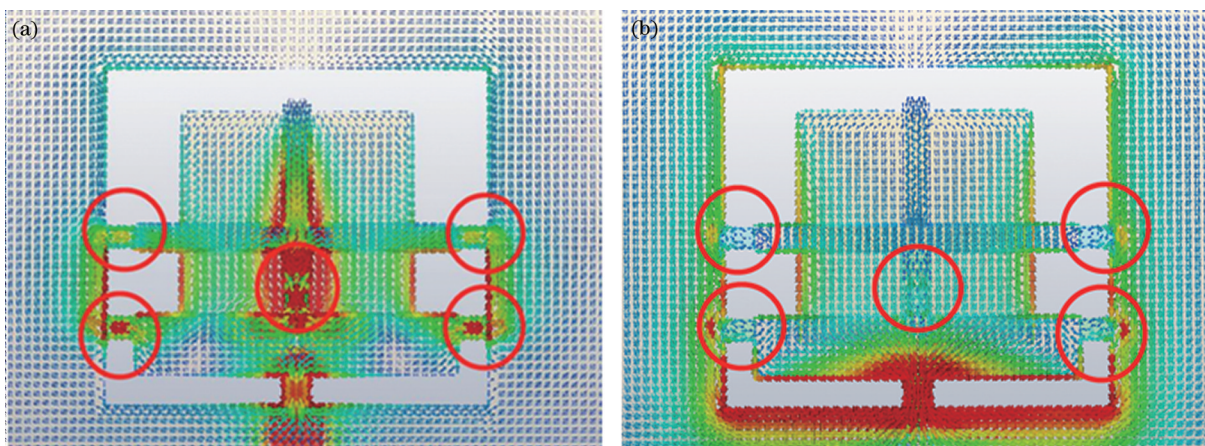


图 6 天线背面电流的分布。(a) state 2; (b) state 5

Fig. 6 Current distribution on the back of the antenna. (a) state 2; (b) state 5

石墨烯 P2 对天线可重构性能的影响更明显,因此,固定 P1、P3 为 OFF 状态,在开关状态之间调节 P2

3.3 石墨烯的微调模式

3.3.1 模式设定

将化学势为 0.1 eV 的石墨烯设定为 OFF 状态,化学势为 4 eV 的石墨烯设定为 ON 状态,在微调模式中,固定石墨烯 P1、P3 均为 OFF 状态,在 0.1~4 eV 之间对石墨烯 P2 的化学势随机选取 5 个值,定义的 5 种模式如表 4 所示。

表 4 石墨烯的微调模式

Table 4 Fine-tuning modes of graphene

Mode	P1	P2 /eV	P3
state 5.1	OFF	0.1	OFF
state 5.2	OFF	0.3	OFF
state 5.3	OFF	0.5	OFF
state 5.4	OFF	1	OFF
state 5.5	OFF	4	OFF

3.3.2 仿真结果及分析

按照表 4 中的 5 种模式在 2~6 THz 范围内对天线进行仿真,不同模式下天线的反射系数如图 7 所示。可以发现,通过调节 P2 的化学势,天线可在 1.148 THz 范围内实现 5 种模式的可调谐功能,且每

的化学势,即在 0.1~4 eV 之间对 P2 的化学势进行取值,以在小频带范围内实现天线的频率可重构。

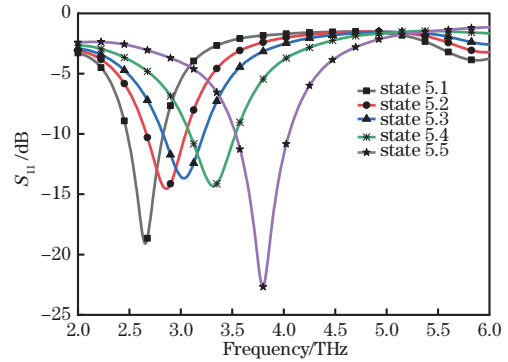


图 7 微调模式下的回波参数

Fig. 7 Echo parameters in fine-tuning mode

个频带均具有明显的区分度。5 种模式的性能参数如表 5 所示,可以发现,谐振点依次为 2.652 THz、2.855 THz、3.028 THz、3.313 THz、3.800 THz,石墨烯 P2 的化学势越大,谐振频率就越高,且该天线的 -10 dB 带宽均大于 10%。图 8 为天线在微调 5 种模式下谐振频率点处 E 面和 H 面的辐射方向图,可以发现,5 种模式的方向性没有太大差异。

表 5 微调模式天线的性能参数

Table 5 Performance parameters of fine-tuning mode antenna

Mode	Resonance frequency /THz	S_{11} /dB	Gain in the resonance frequency /dBi	Absolute BW /THz	BW /%
state 5.1	2.652	-19.08	0.54	2.4794-2.8294	13.1
state 5.2	2.855	-14.54	-0.22	2.6642-3.0464	13.3
state 5.3	3.028	-13.67	-0.21	2.8255-3.2228	13.1
state 5.4	3.313	-14.31	0.18	3.0885-3.5324	13.4
state 5.5	3.800	-22.68	1.97	3.5325-4.0522	13.6

图 9 为微调模式下天线背面的电流分布,图中标注出了石墨烯 P2 的位置。可以发现,P2 的化学势越大,石墨烯的方阻越小,开槽处的导通特性越强,电流强度越大。这表明石墨烯不仅具有开关特性,化学势处在开关的中间状态也能影响天线的电流分布,从而实现天线的可调谐功能。除石墨烯 P2 能实现微调模式外,调节石墨烯 P1、P3 的化学势,均可实现不同程度的微调谐功能。

4 结 论

基于石墨烯的电导率可控特性,设计了一款太赫兹波段频率可重构微带天线,将 3 组石墨烯分布在

天线背面开槽处,通过调控石墨烯的化学势,实现了石墨烯的开关和微调模式。在开关模式中,设定了 6 种石墨烯状态模式,谐振点分别为 4.430 THz、4.565 THz、3.940 THz、3.800 THz、2.652 THz、3.147 THz,调谐跨度为 1.913 THz,各频带间具有较高的区分度;且其辐射性能优良,可完成大尺度调谐功能。在微调模式中,仅改变 1 组石墨烯的化学势,设定了 5 种模式,谐振点分别为 2.652 THz、2.855 THz、3.028 THz、3.313 THz、3.800 THz,调谐跨度为 1.148 THz,各模式的方向性没有发生明显变化,辐射性能优良。此外,通过微调模式验证了通过调控部分石墨烯在小范围内实现天线的调

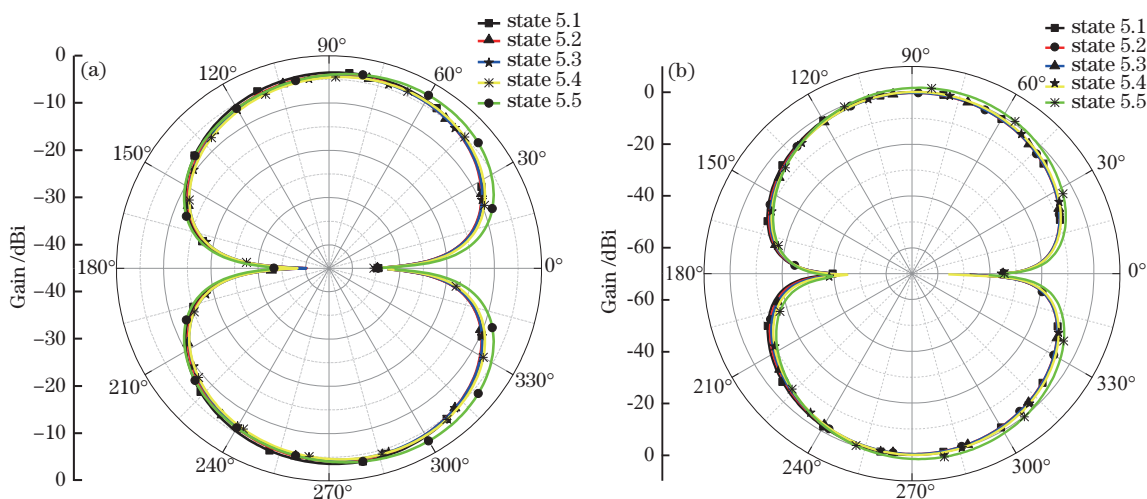


图 8 微调模式下天线的辐射方向图。(a) E 面; (b) H 面

Fig. 8 Radiation pattern of the antenna in fine-tuning mode. (a) E side; (b) H side

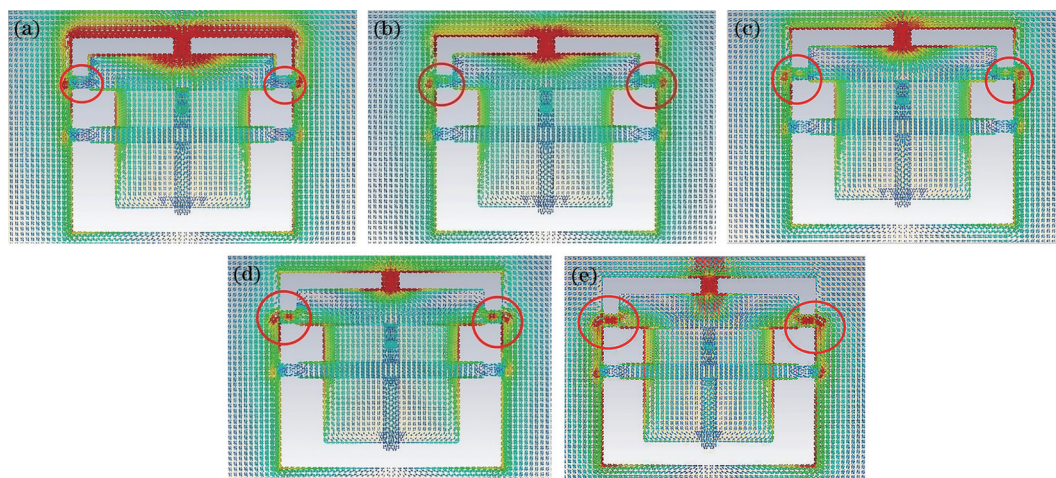


图 9 天线背面的电流分布。(a) state 5.1; (b) state 5.2; (c) state 5.3; (d) state 5.4; (e) state 5.5

Fig. 9 Current distribution on the back of the antenna. (a) state 5.1; (b) state 5.2; (c) state 5.3; (d) state 5.4; (e) state 5.5

谐功能,该研究结果在新材料可重构天线和天线阵列的设计中具有重要意义。

参 考 文 献

[1] Tonouchi M. Cutting-edge terahertz technology[J]. Nature Photonics, 2007, 1(2): 97-105.
 [2] Tang W D, Xie Y N, Liu P F. Frequency reconfigurable Yagi antenna based on graphene in terahertz band[J]. Industrial Control Computer, 2020, 33(4): 144-146.
 汤文达, 谢亚楠, 刘鹏飞. 基于石墨烯材料的太赫兹波段频率可重构八木天线[J]. 工业控制计算机, 2020, 33(4): 144-146.
 [3] Singh A, Andreollo M, Thawdar N, et al. Design and operation of a graphene-based plasmonic nano-antenna array for communication in the terahertz band[J]. IEEE

Journal on Selected Areas in Communications, 2020, 38 (9): 2104-2117.

[4] Chen S L, Qin P Y, Lin W, et al. Pattern-reconfigurable antenna with five switchable beams in elevation plane[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2018, 17(3): 454-457.
 [5] Malakooti S A, Mousavi S M H, Fumeaux C. Tunable bandpass-to-bandstop quasi-Yagi-Uda antenna with sum and difference radiation patterns[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2019, 67 (4): 2260-2271.
 [6] Liu Q, Wang N Z, Wu C Y, et al. Frequency reconfigurable antenna controlled by multi-reed switches [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2015, 14: 927-930.
 [7] Yang X S, Wang B Z. Research on the reconfigurable

- antennas[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2003, 25(4): 417-421.
- 杨雪松, 王秉中. 可重构天线的研究进展[J]. *系统工程与电子技术*, 2003, 25(4): 417-421.
- [8] Teng D, Wang Y C, Guo J K, et al. Modal properties of graphene-coated elliptical nanowire pairs[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(23): 232303.
- 滕达, 王云成, 郭晋康, 等. 涂覆石墨烯层的双椭圆形纳米线模式特性[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(23): 232303.
- [9] Yuan Y, Xie Y N, Li X. Frequency-tunable graphene patch antenna in terahertz regime[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(2): 0216001.
- 原媛, 谢亚楠, 李鑫. 太赫兹波段石墨烯频率可调贴片天线[J]. *光学学报*, 2018, 38(2): 0216001.
- [10] Yasir M, Savi P. Microstrip tunable antenna based on commercial graphene nanoplatelets[C]//2020 14th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), March 15-20, 2020, Copenhagen, Denmark. New York: IEEE Press, 2020: 1-3.
- [11] Ali M F, Singh R K, Bhattacharya R. Reconfigurable graphene-based two port dual-band and MIMO antenna for THz applications[C]//2020 IEEE Students Conference on Engineering & Systems (SCES), July 10-12, 2020, Prayagraj, India. New York: IEEE Press, 2020: 1-5.
- [12] Li Q. Research on terahertz active and passive modulators based on graphene and metamaterial[D]. Tianjin: Tianjin University, 2016.
- 李泉. 基于超材料和石墨烯的太赫兹主、被动调制器件研究[D]. 天津: 天津大学, 2016.
- [13] Yuan Z H, Xu Y, Cao B, et al. Broadband transmission infrared light modulator based on graphene plasma[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(23): 232301.
- 袁志豪, 徐俞, 曹冰, 等. 基于石墨烯等离子体的宽带透射式红外光调制器[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(23): 232301.
- [14] Guo C Y, Wang D D, Mu C L. Progress on optical fiber sensors based on graphene/graphene oxide[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(15): 150003.
- 郭晨瑜, 王豆豆, 穆长龙. 基于石墨烯/氧化石墨烯的光纤传感器研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(15): 150003.
- [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] Zhang Y P, Li T T, Zeng B B, et al. A graphene based tunable terahertz sensor with double Fano resonances[J]. *Nanoscale*, 2015, 7(29): 12682-12688.
- [17] Zhou Y X, Huang Y Y, Jin Y P, et al. Terahertz properties of graphene and graphene-based terahertz devices[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(6): 0614011.
- 周译玄, 黄媛媛, 靳延平, 等. 石墨烯太赫兹波段性质及石墨烯基太赫兹器件[J]. *中国激光*, 2019, 46(6): 0614011.
- [18] Wu Y P, Kang J Y. Control growth of mono-and bilayer graphene films and the modulation of graphene conductivity[J]. *Journal of Xiamen University (Natural Science)*, 2014, 53(5): 682-688.
- 吴雅苹, 康俊勇. 单双层石墨烯的制备及电导特性调控[J]. *厦门大学学报(自然科学版)*, 2014, 53(5): 682-688.
- [19] 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.
- [20] Hu Y. Research on millimeter wave and terahertz pattern reconfigurable antenna[D]. Xi'an: Xidian University, 2019.
- 胡月. 毫米波与太赫兹方向图可重构天线研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2019.
- [21] Wang S L. Application research of graphene in antenna design[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2019.
- 王胜兰. 石墨烯在天线设计中的应用研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2019.
- [22] Moradi K, Pourziad A, Nikmehr S. A frequency reconfigurable microstrip antenna based on graphene in terahertz regime[J]. *Optik*, 2021, 228: 166201.
- [23] Chen H, Liu Z G, Lu W B, et al. Microwave beam reconfiguration based on graphene ribbon[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2018, 66(11): 6049-6056.