

## 激光与光电子学进展

## 太赫兹波段方向图可重构微带阵列天线设计

王颖, 李春树\*, 闫翔

宁夏大学电子与电气工程学院, 宁夏 银川 750021

**摘要** 结合石墨烯材料在太赫兹波段下具有利于阻抗匹配、电可控的独特优势与可重构微带阵列天线高辐射效率等特点,设计了一款适用于太赫兹波段基于石墨烯材料的方向图可重构微带阵列天线。该阵列天线的天线单元在辐射贴片中嵌入石墨烯贴片充当开关,通过调节石墨烯的外加偏置电压改变开关的导通与截止状态。天线单元及阵列天线的工作频率皆为 5.012 THz,天线单元在工作频率可以实现 $12^{\circ}\sim 24^{\circ}$ 的方向图调整,且具有良好的增益特性及抗干扰性,由天线单元组成的 $2\times 2$ 的微带阵列天线可实现在 $0^{\circ}\sim 13^{\circ}$ 的方向图可重构功能,仿真结果表明,阵列天线的最大增益为 12.5 dBi,最大波束宽度为 $51.4^{\circ}$ ,具有较好的方向性与抗干扰能力。

**关键词** 石墨烯材料; 太赫兹波段; 方向图可重构; 微带阵列天线; 天线单元

**中图分类号** TB34; TN822+.4; TN823+.27

**文献标志码** A

**DOI:** 10.3788/LOP231190

## Design of Pattern Reconfigurable Microstrip Array Antenna in Terahertz Band

Wang Ying, Li Chunshu\*, Yan Xiang

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

**Abstract** A graphene-based reconfigurable microstrip array antenna suitable for the terahertz band was designed in this study. The design combined the unique advantages of graphene for impedance matching and electrical controllability in the terahertz band and the characteristics of high radiation efficiency of the reconfigurable microstrip array antenna. The array antenna unit embedded a graphene patch in the radiant patch as a switch and changed the switch's on-off and off-off states by adjusting the applied bias voltage of graphene. The antenna unit and the array antenna have an operating frequency of 5.012 THz. The antenna unit exhibits strong gain characteristics and anti-interference performance, and can realize the pattern of adjustment to  $12^{\circ}\sim 24^{\circ}$  at the working frequency. The  $2\times 2$  microstrip array antenna composed of the antenna unit can realize the pattern reconfiguration function of  $0^{\circ}\sim 13^{\circ}$ . The simulation results show that the maximum gain of the array antenna is 12.5 dBi and the maximum beam width is  $51.4^{\circ}$ . In addition, the array antenna exhibits good directivity and anti-interference ability.

**Key words** graphene materials; terahertz band; pattern reconfigurable; microstrip array antenna; antenna unit

## 1 引言

太赫兹 (THz) 是介于微波与光频之间且频段范围介于 0.1~10 THz 之间的波段。太赫兹通信在传输容量、抗干扰能力和安全性能方面都远高于现有的微波通信传输系统,窄波束的特点更是有利于高精度探测,便于实现准确定位。太赫兹研究在成像技术、雷达、生物医学、公共安全和无损检测等领域都有巨大的研究价值和广泛的应用前景<sup>[1]</sup>。阵列天线具有方向性强、

易实现波束赋形和电扫描等特性,被广泛应用于雷达和通信电子系统中<sup>[2]</sup>。方向图可重构天线所具备的辐射波束可调的特性可以有效解决相控阵大角度扫描问题<sup>[3]</sup>,增加了天线的设计自由度<sup>[4]</sup>,将方向图可重构天线作为阵列单元应用于相控阵天线设计中,阵列的波束扫描范围可以显著地扩大<sup>[5]</sup>。

电磁超材料拥有自然界材料不具有的特殊电磁特性,已经成为电子工程等领域的研究热点。与传统金属材料相比,石墨烯具有稳定的物理特性与机械特性、较

收稿日期: 2023-04-27; 修回日期: 2023-05-17; 录用日期: 2023-05-26; 网络首发日期: 2023-07-12

基金项目: 宁夏自然科学基金(2022AAC03116)

通信作者: lichsh@nxu.edu.cn

低的损耗率和良好的导电性,可满足高频性能的需求。在新能源、可重构通信器件等领域得到了广泛应用<sup>[6]</sup>。

文献[7]设计了一款石墨烯材料的微带贴片天线,具有 5 个可调谐振频率点,覆盖了 678.25~721.75 GHz 频段,辐射增益可达 6.92 dB,辐射效率可达 86.48%。文献[8]设计的多模式可重构天线,实现了太赫兹波段 2.652~4.565 THz 范围内的频率可调谐功能。文献[9]设计了一款由三个发射和四个接收子阵列构成的多输入多输出(MIMO)微带阵列天线,该阵列天线可以实现较大的阻抗和轴比带宽,分别为 58.86~65.15 GHz 和 59.9~64.1 GHz。文献[10]设计了一种工作在 X 波段的方向图可重构超表面的 16×16 阵列天线,该天线工作在 11.7 GHz 频段,峰值增益为 19 dBi,具有低剖面、波束切换灵敏的优点。

本文提出了一种基于石墨烯贴片的方向图可重构微带阵列天线,该天线单元由刻蚀于介质基板上层的矩形贴片、方形贴片以及加载于两个贴片中间的石墨烯贴片组成。石墨烯贴片可替代 PIN 二极管在微带天线单元中充当开关<sup>[8]</sup>,通过调节石墨烯外加电压的大小实现开关的导通与截止。仿真结果表明,该天线单

元通过调节石墨烯贴片的电阻值可以实现小范围的方向图波束变化,由该单元组成的 2×2 微带天线阵列在天线单元开关状态不同的情况下也可实现方向图调整,且方向性与抗干扰能力良好。

## 2 石墨烯的电导率模型

### 2.1 石墨烯的电导率模型

石墨烯表面可视为无限薄的导电层,可以代替现有的电子系统中的一部分导电材料,有可能大幅度提高电子设备的工作性能<sup>[11]</sup>。电导率是最适合表征石墨烯电磁特性的主要参数,该参数的值主要取决于石墨烯独特的能带结构、温度、散射率、费米能级、电子群速等多个参数<sup>[12]</sup>。此外,石墨烯的电导率还可以随着偏压电场的变化而变化<sup>[13]</sup>。

石墨烯的能带结构在其超薄厚度的影响下,伴随着石墨烯材料载流子浓度的变化能够表现出非常明显的电场效应<sup>[14]</sup>。由石墨烯的能带结构所表现出来的石墨烯表面电导率特征对石墨烯研究非常有意义。石墨烯的电导率特性包括带内和带间贡献电导率,石墨烯的电导率模型可以由 Green-Kubo 公式<sup>[15]</sup>表达

$$\sigma(\omega, \mu_c, \Gamma, T, B_0) = \frac{e^2 v_F^2 |eB_0| (\omega - i2\Gamma)\hbar}{-i\pi} \times \sum_{n=0}^{\infty} \left\{ \frac{f_d(M_n) - f_d(M_{n+1}) + f_d(-M_{n+1}) - f_d(-M_n)}{(M_{n+1} - M_n)^2 - (\omega - j2\Gamma)^2 \hbar^2} \times \frac{1 - \Delta^2 / (M_n M_{n+1})}{M_{n+1} - M_n} + \frac{f_d(-M_n) - f_d(M_{n+1}) + f_d(-M_{n+1}) - f_d(M_n)}{(M_{n+1} + M_n)^2 - (\omega - j2\Gamma)^2 \hbar^2} \times \frac{1 + \Delta^2 / (M_n M_{n+1})}{M_{n+1} + M_n} \right\}, \quad (1)$$

式中:  $B_0$  表示直流偏置磁场;  $M_n = \sqrt{\Delta^2 + 2n v_F^2 |eB_0| \hbar}$ ;  $f_d(\epsilon) = 1 / \{1 + \exp[(\epsilon - \mu_c) / k_B T]\}$  为费米-狄拉克分布。在只考虑电场偏置的情况下,石墨烯的电导率<sup>[16]</sup>可以表示为

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

式中:  $\sigma_{\text{intra}}$ 、 $\sigma_{\text{inter}}$  分别为带内电导率和带间电导率;  $e$  表示电子电荷,计算数值为  $1.6 \times 10^{-19} \text{C}$ ;  $\omega = 2\pi f$  是角频率;  $\hbar$  表示普朗克常数,也称狄拉克常数,计算数值为  $6.626 \times 10^{-34} \text{J}\cdot\text{s}$ ;  $\mu_c$  表示化学势;  $T$  表示温度;  $\Gamma = 1/(2\tau)$  表示为散射率,  $\tau$  为弛豫时间,在仿真实验中取  $\tau = 0.1 \text{ps}$ ;  $k_B$  表示玻尔兹曼常数,计算数值为  $1.38 \times 10^{-23} \text{J/K}$ 。

当频率范围低于 10 THz 时,由于泡利效应,石墨烯的带间电导率对计算结果几乎没有影响,所以可忽略不计<sup>[17]</sup>。本文所设计的微带天线工作频率小于 10 THz,对于石墨烯的表面电导率计算只需要考虑带内的阻抗部分即可。根据随机相位近似理论,通过 Drude 模型将石墨烯的电导率<sup>[18]</sup>近似看作

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

由式(3)可知,石墨烯的电导率  $\sigma$  取决于角频率  $\omega$  和化学势  $\mu_c$  的大小,且随着频率的提高,石墨烯电导率虚部的比重会越来越大,当频率达到 1 THz 以上时,可以只考虑石墨烯电导率的虚部,忽略实部<sup>[7]</sup>。化学势  $\mu_c$  与外加偏置电压的关系<sup>[19]</sup>可表示为

$$V = V_0 + \frac{te\mu_c^2}{\epsilon_0 \epsilon_r \pi \hbar^2 v_F^2}, \quad (4)$$

式中:  $V_0$  为石墨烯自然掺杂浓度的电压偏移量,本设

计的仿真实验中设置为 0;  $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}$  F/m 为真空介电常数;  $t$  和  $\epsilon_r$  为石墨烯与电极之间绝缘层的厚度和介电常数;  $v_F = 9.5 \times 10^5$  m/s 为费米速率。由式(4)可知, 当外加偏置电压增加时, 化学势也增大<sup>[17]</sup>。

## 2.2 石墨烯的开关模式

在确定石墨烯的电导率之后, 使用下式计算石墨烯表面电阻值<sup>[18]</sup>, 其中  $Z$  表示石墨烯的表面阻抗值。

$$Z = \frac{1}{\sigma} \quad (5)$$

由此可知, 石墨烯的表面阻抗与化学势  $\mu_c$  成反比, 通过调整外加偏置电压大小即可调整化学势大小, 而化学势又可控制石墨烯表面阻抗的值。在仿真实验中, 通过外加偏置电压的值来确定石墨烯的表面阻抗, 可将石墨烯视为介质或金属<sup>[7]</sup>。

通过计算得知: 当温度  $T = 300$  K、弛豫时间  $\tau = 0.1$  ps 时, 化学势  $\mu_c$  为 0.1 eV 时, 石墨烯的方阻为  $900 \Omega/\text{sq}$ , 可将石墨烯视为介质, 在仿真实验中看作截止状态; 当化学势  $\mu_c$  为 4 eV 时, 石墨烯的方阻为  $21 \Omega/\text{sq}$ , 可将其视为金属, 在仿真实验中可看作导通状态。

## 3 可重构微带阵列天线的设计

基于石墨烯贴片的方向图可重构微带阵列天线通过在单元上添加石墨烯贴片, 使用石墨烯贴片代替传统可重构天线中 PIN 二极管的作用<sup>[20]</sup>, 通过调节石墨烯的外界偏置电压调节石墨烯的化学势影响石墨烯表面电阻值, 使石墨烯贴片具备截止和导通的特性, 使微带天线单元在不改变物理特性的前提下实现方向图可重构功能<sup>[21-22]</sup>, 即使用大小、形状完全相同的微带天线单元组成微带天线阵列。

### 3.1 单元设计

#### 3.1.1 单元结构

方向图可重构阵列天线单元的俯视图与截面图如图 1 所示。该天线单元为边长为  $35 \mu\text{m}$  的正方形, 由  $3 \mu\text{m}$  厚的 F4B<sup>[23]</sup> 材料作为介质基板(相对介电常数为 2.65), 辐射贴片由  $0.017 \mu\text{m}$  厚的金属材料 and 金属接地板组成。其中矩形贴片长为  $15.5 \mu\text{m}$ , 宽为  $33 \mu\text{m}$ , 矩形贴片边长为  $15 \mu\text{m}$ , 在矩形贴片和方形贴片之间缝隙的中间位置加载宽度为  $1.5 \mu\text{m}$ 、长度为  $1.5 \mu\text{m}$  的石墨烯贴片。表 1 为微带天线单元的尺寸参数。

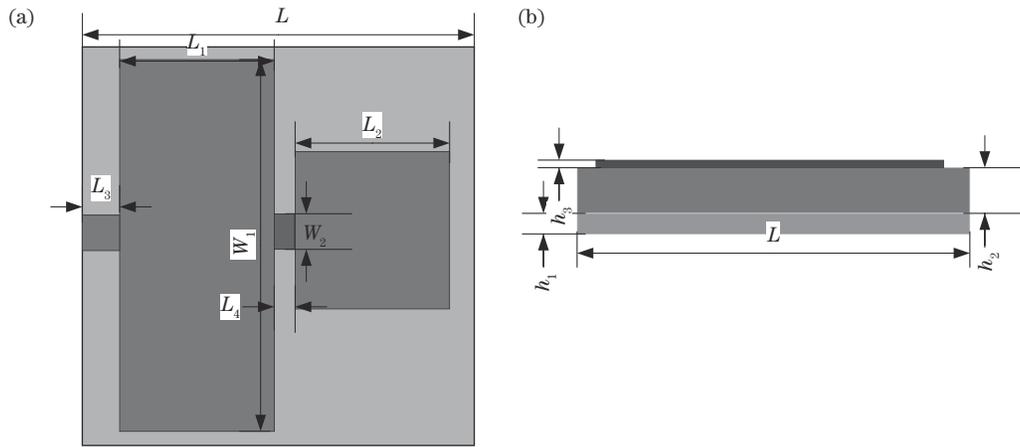


图 1 天线单元几何结构。(a)俯视图;(b)截面图

Fig. 1 Antenna unit geometry. (a) Top view; (b) sectional diagram

表 1 天线单元尺寸参数

Table 1 Antenna unit size parameter

unit:  $\mu\text{m}$

Parameter	$L$	$L_1$	$L_2$	$L_3$	$L_4$	$W_1$	$W_2$	$h_1$	$h_2$	$h_3$
Size	35	15.5	15	4	0.5	33	1.5	0.95	3	0.017

#### 3.1.2 单元仿真结果

通过电磁仿真软件 CST 对微带天线单元进行仿真, 天线单元采用微带馈电方式, 所加载的石墨烯开关仿真通过改变石墨烯的化学势来实现。天线单元的反射系数仿真结果如图 2 所示, 其中: 化学势为 0.1 eV 时石墨烯贴片为截止状态, 绝对带宽为 0.3544 THz, 反射系数最小值为  $-18.843$  dB; 当化学势为 4.0 eV 时石墨烯贴片为导通状态, 绝对带宽为 0.7943 THz, 反射系数最小值为  $-18.234$  dB。图 3 为天线单元反射

相位图, 可知所设计的天线单元在 5.012 THz 时, 随着石墨烯在导通与截止两种状态下的改变, 其反射相位相差  $180^\circ$ , 石墨烯导通时天线单元的反射相位为  $-101^\circ$ , 石墨烯截止时天线单元的反射相位为  $79^\circ$ 。

图 4 是天线单元  $H$  面方向辐射图。在频率为 5.012 THz、石墨烯贴片为截止状态时, 天线单元最大增益为 3.91 dBi, 当石墨烯贴片为导通状态时, 天线单元最大增益为 7.83 dBi。可以看出, 天线单元方向性良好, 波束扫描范围较大, 抗干扰能力较好。

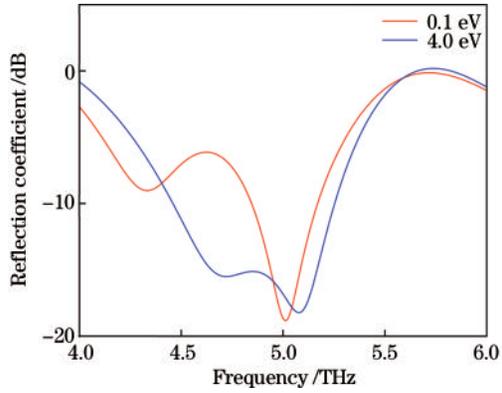


图 2 天线单元反射系数图

Fig. 2 Reflection coefficient of antenna unit

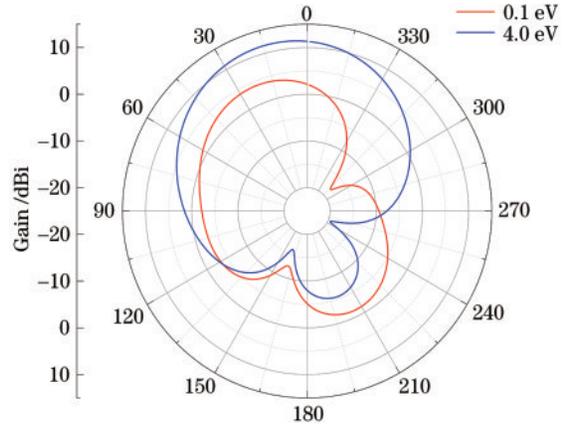


图 4 天线单元H面辐射方向图

Fig. 4 H-plane radiation direction diagram of antenna unit

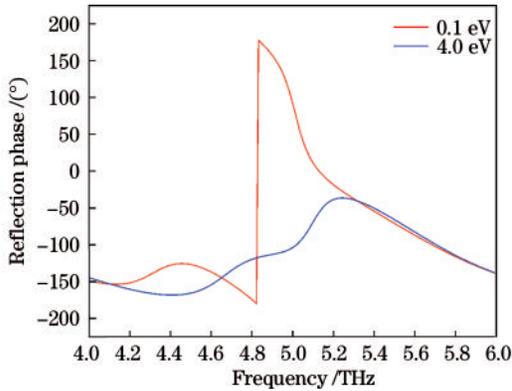


图 3 天线单元反射相位图

Fig. 3 Reflection phase of antenna unit

### 3.1.3 天线单元微调状态仿真

将石墨烯贴片的化学势设置在 0.1~4.0 eV 之间,每隔 0.1 eV 设置一个点,通过 CST 仿真软件在频率为 5.012 THz 处进行仿真,在方向图角度相同的情况下只取增益最大的情况。图 5 是天线单元在微调状态下的 H 面方向图,表 2 为天线单元在微调状态下的性能参数。由图 5 与表 2 可知,随着石墨烯化学势的增加,阵列天线主波束指向从 24° 变化到 12°, H 面辐射方向图的最大辐射角度逐渐偏向 y 轴,天线增益逐渐增加,波束宽度逐渐增大,同时副瓣逐渐降低,表明方向性和抗干扰能力逐渐减弱。证明了微带天线单元加载的石墨烯贴片的化学势变化可以引起辐射相位的变化。

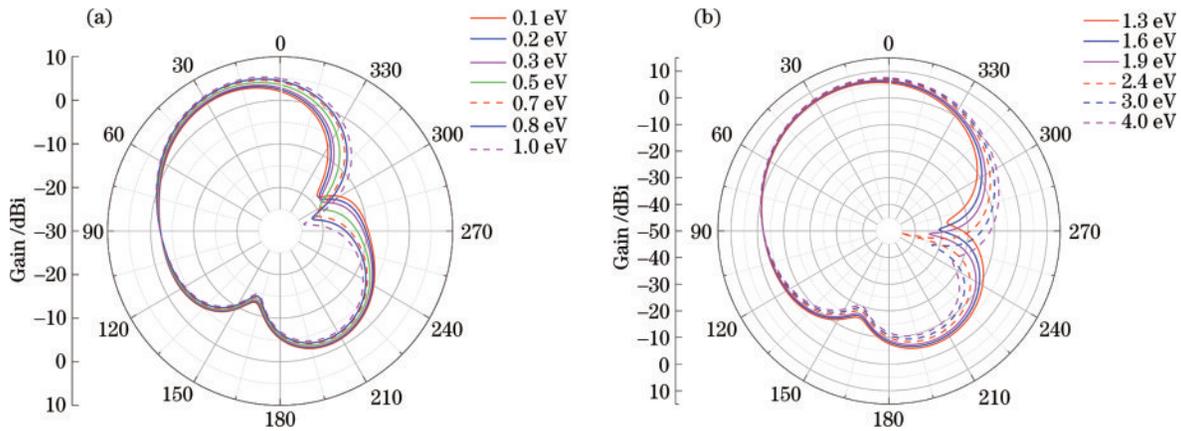


图 5 天线单元微调状态 H 面方向图。(a) 化学势为 0.1~1.0 eV 时天线单元 H 面方向图; (b) 化学势为 1.3~4.0 eV 时天线单元 H 面方向图

Fig. 5 H-plane orientation diagram of antenna unit fine tuning state. (a) H-plane orientation diagram of antenna unit with chemical potential of 0.1~1.0 eV; (b) H-plane orientation diagram of antenna unit with chemical potential of 1.3~4.0 eV

## 3.2 阵列设计

### 3.2.1 阵列设计

本设计中心工作频率为 5.012 THz 的方向图可重构微带阵列天线,阵列天线俯视图如图 6 所示,该微带阵列天线包含 2×2 共 4 个天线单元,天线单元大小为 35 μm×35 μm,阵列天线口径大小为 70 μm×70 μm。将微带阵列天线上的四个天线单元的石墨烯贴片分别

设置为导通或截止状态并进行不同的排列,可进行十种状态的排列,排列结果如图 7 所示。

### 3.2.2 阵列仿真结果分析

按照图 7 中的 10 种状态对阵列天线在频率为 5.012 THz 处进行仿真,10 种状态下微带阵列天线 H 面辐射方向图结果如图 8 所示。可以发现,不同状态下阵列天线的方向图波束角度不同,实现了微带阵列

表 2 微调模式下天线单元的参数

Table 2 Parameters of the antenna unit in fine tuning state

$\mu_c / eV$	Main lobe direction / ( $^{\circ}$ )	Main lobe magnitude / dBi	Angular width (3 dB) / ( $^{\circ}$ )
0.1	24.0	3.91	66.0
0.2	23.0	4.17	66.2
0.3	22.0	3.62	66.6
0.5	21.0	4.90	66.8
0.7	20.0	5.34	67.3
0.8	19.0	5.54	67.6
1.0	18.0	5.91	68.0
1.3	17.0	6.38	68.7
1.6	16.0	6.75	69.3
1.9	15.0	7.04	69.9
2.4	14.0	7.39	70.8
3.0	13.0	7.64	71.6
4.0	12.0	7.83	72.8

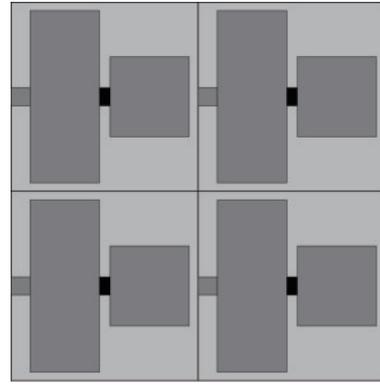


图 6  $2 \times 2$  微带阵列天线结构图

Fig. 6 Structure diagram of  $2 \times 2$  microstrip array antenna

天线的方向图可调功能。

在 5.012 THz 时微带阵列天线 10 种状态下的性能参数如表 3 所示。可以看出,微带阵列天线  $H$  面辐射方向图的主辐射角度分布在  $0^{\circ} \sim 13^{\circ}$  的范围内,增益呈递增趋势,最大增益为 12.5 dBi,最大波束宽度为  $51.4^{\circ}$ ,表明微带阵列天线的方向性良好,抗干扰能力较强。

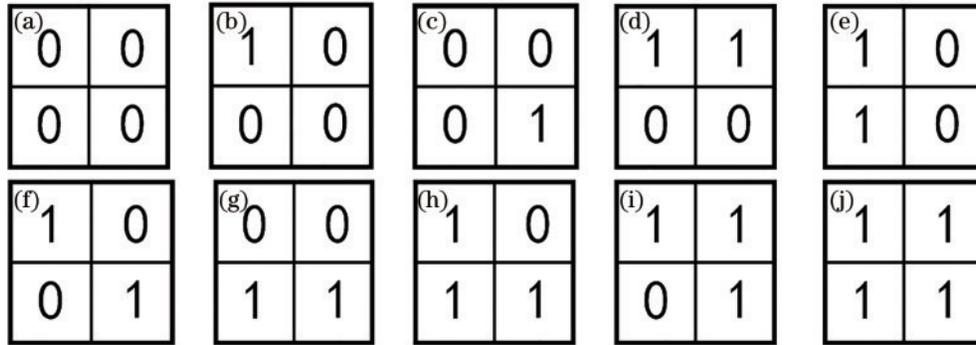


图 7  $2 \times 2$  微带阵列天线状态设定。(a) 状态 1; (b) 状态 2; (c) 状态 3; (d) 状态 4; (e) 状态 5; (f) 状态 6; (g) 状态 7; (h) 状态 8; (i) 状态 9; (j) 状态 10

Fig. 7  $2 \times 2$  microstrip array antenna configuration. (a) State1; (b) state2; (c) state3; (d) state4; (e) state5; (f) state6; (g) state7; (h) state8; (i) state9; (j) state10

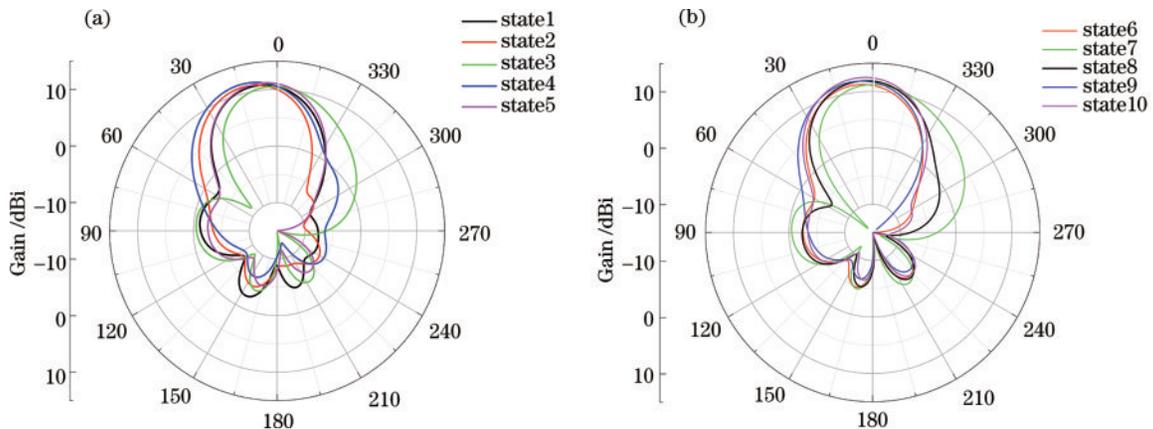


图 8  $2 \times 2$  微带阵列天线  $H$  面辐射方向图。(a) State1~state5  $H$  面辐射方向图; (b) state6~state10  $H$  面辐射方向图

Fig. 8  $H$ -plane radiation direction diagram of  $2 \times 2$  microstrip array antenna. (a)  $H$ -plane radiation direction diagram of state1-state5; (b)  $H$ -plane radiation direction diagram of state6-state10

表 3 微带阵列天线的性能参数

Table 3 Performance parameters of microstrip array antenna

State	Main lobe direction /( $^{\circ}$ )	Main lobe magnitude /dBi	Angular width (3 dB) /( $^{\circ}$ )
State1	8.0	10.9	41.2
State2	12.0	11.1	41.4
State3	2.0	10.5	46.3
State4	13.0	11.7	44.6
State5	6.0	11.3	41.7
State6	6.0	11.3	42.1
State7	0.0	11.2	51.4
State8	4.0	11.9	42.1
State9	7.0	11.9	43.8
State10	4.0	12.5	42.5

## 4 结 论

本文提出了一种太赫兹波段基于石墨烯材料的方向图可重构微带阵列天线,在天线的矩形与方形辐射贴片间嵌入石墨烯贴片,仿真实验中通过调节石墨烯化学势的值实现天线单元的微调状态以及阵列天线中天线单元的开关状态。在微调状态下:当石墨烯化学势介于 0.1~4.0 eV 之间时,天线单元的方向图波束可以在  $12^{\circ}$ ~ $24^{\circ}$  内进行扫描;当化学势为 4.0 eV 时天线单元有最大增益为 7.83 dBi,最大波束宽度为  $72.8^{\circ}$ ,表明天线单元在实现波束可调功能的同时具有良好的辐射特性。由天线单元设计的  $2 \times 2$  的微带阵列天线在主瓣为 5.012 THz 下可实现  $0^{\circ}$ ~ $13^{\circ}$  的方向图可重构,阵列天线的增益介于 10.05 dBi~12.5 dBi 之间,阵列天线具有较高的增益,波束宽度介于  $42.1^{\circ}$ ~ $51.4^{\circ}$  之间,具有更好的方向性、更远的作用距离以及更强的抗干扰能力。

## 参 考 文 献

- [1] 姚建铨, 迟楠, 杨鹏飞, 等. 太赫兹通信技术的研究与展望[J]. 中国激光, 2009, 36(9): 2213-2233.  
Yao J Q, Chi N, Yang P F, et al. Study and outlook of terahertz communication technology[J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36(9): 2213-2233.
- [2] 张紫玉. 可重构阵列天线设计与研究[D]. 北京: 中国传媒大学, 2022.  
Zhang Z Y. Design and research of reconfigurable array antenna[D]. Beijing: Communication University of China, 2022.
- [3] Shoghi Badr N, Moradi G. Design and analysis of graphene-based THz absorber using multi-layer structure based on increasing profile for conductivity of the graphene layers[J]. Optik, 2019, 198: 163239.
- [4] Alwareth H, Ibrahim I M, Zakaria Z, et al. A wideband high-gain microstrip array antenna integrated with frequency-selective surface for sub-6 GHz 5G applications[J]. Micromachines, 2022, 13(8): 1215.

- [5] Malhat H A, Elhenawy A S, Zainud-Deen S H, et al. Planar reconfigurable plasma leaky-wave antenna with electronic beam-scanning for MIMO applications[J]. Wireless Personal Communications: An International Journal, 2023.
- [6] Benlakehal M E, Hocini A, Khedrouche D, et al. Design and analysis of MIMO system for THz communication using terahertz patch antenna array based on photonic crystals with graphene[J]. Optical and Quantum Electronics, 2022, 54(11): 693.
- [7] 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.  
Yuan Y, Xie Y N, Li X. Frequency-tunable graphene patch antenna in terahertz regime[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(2): 0216001.
- [8] 李佳宁, 李春树, 程朝阳, 等. 基于石墨烯的多模式可重构太赫兹微带天线[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(3): 0316006.  
Li J N, Li C S, Cheng Z Y, et al. Multi mode reconfigurable terahertz microstrip antenna based on graphene[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(3): 0316006.
- [9] 张莹莹. 毫米波雷达微带阵列天线的设计与研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2022.  
Zhang Y Y. Design and research of millimeter wave radar microstrip array antenna[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2022.
- [10] 褚宏波, 朱世超, 段晨贺, 等. 一种工作在 X 波段的方向图可重构超表面阵列天线[C]//2022 年全国微波毫米波会议论文集(下册). 上海: 中国电子学会微波分会, 2022: 265-267.  
Chu H B, Zhu S C, Duan C H, et al. A directional pattern reconfigurable metasurface array antenna working in X-band[C]//Proceedings of the 2022 National Conference on Microwave Millimeter Wave (Vol. 2). Shanghai: Microwave Branch of Chinese Institute of Electronics, 2022: 265-267.
- [11] Fuscaldo W, de Simone S, Dimitrov D, et al. Terahertz characterization of graphene conductivity via time-domain reflection spectroscopy on metal-backed dielectric substrates[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2022, 55(36): 365101.
- [12] Tu C, Nagata K, Yan S K. Dependence of electrical conductivity on phase morphology for graphene selectively located at the interface of polypropylene/polyethylene composites[J]. Nanomaterials, 2022, 12(3): 509.
- [13] Kolesnikov D V. Numerical investigation of the electrical conductivity of irradiated graphene[J]. Solid State Communications, 2020, 308: 113834.
- [14] 吕欣蕾. 基于石墨烯的可重构天线设计[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2021.  
Lü X L. Design of reconfigurable antenna based on graphene[D]. Xi'an: Xidian University, 2021.
- [15] Ram P, Masoodhu B N M, Rachel J Light R. Multilayer screen printed flexible graphene antenna for ISM band applications and energy harvesting[J]. Materials Today: Proceedings, 2021, 45: 2508-2513.

- [16] 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.  
Tang W D, Xie Y N, Liu P F. Terahertz band frequency reconfigurable Yagi antenna based on graphene material [J]. Industrial Control Computer, 2020, 33(4): 144-146.
- [17] 王健. 基于石墨烯的小型化和可重构天线的研究[D]. 南京: 东南大学, 2019.  
Wang J. Research on miniaturized and reconfigurable antenna based on graphene[D]. Nanjing: Southeast University, 2019.
- [18] 陈秀艳, 石钠月. 石墨烯 2 种电导率模型的分析与比较[J]. 沈阳师范大学学报(自然科学版), 2022, 40(1): 24-29.  
Chen X Y, Shi N Y. Comparison and analysis of two conductivity models of graphene[J]. Journal of Shenyang Normal University (Natural Science Edition), 2022, 40(1): 24-29.
- [19] Varshney G. Reconfigurable graphene antenna for THz applications: a mode conversion approach[J]. Nanotechnology, 2020, 31(13): 135208.
- [20] Zhang J N, Tao S J, Yan X, et al. Dual-frequency polarized reconfigurable terahertz antenna based on graphene metasurface and TOPAS[J]. Micromachines, 2021, 12(9): 1088.
- [21] Mu Z H, Chen C X, Ma J N, et al. An artificial magnetic conductor loaded, polarization reconfigurable circular patch array antenna[J]. International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering, 2021, 31(11): e22834.
- [22] 穆亚洁. 方向图可重构基站天线及其阵列的研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2021.  
Mu Y J. Research on antenna and its array of reconfigurable base station with pattern[D]. Xi'an: Xidian University, 2021.
- [23] 牛连生, 陆倩, 花磊, 等. 基于 PIN 管的波束可重构双频反射阵列天线[J]. 固体电子学研究与进展, 2022, 42(2): 114-118.  
Niu L S, Lu Q, Hua L, et al. Dual-frequency reconfigurable reflect array antenna based on PIN diodes [J]. Research & Progress of SSE, 2022, 42(2): 114-118.