

基于石墨烯片的频率可调太赫兹天线

刘博文¹, 徐航¹, 张雅婷^{1*}, 李杰¹, 姚建铨^{1,2}

(1. 天津大学光电信息技术教育部重点实验室, 天津 300072; 2. 崂山实验室, 山东青岛 266234)

摘要: 本文设计了一种基于石墨烯片的频率可调太赫兹天线, 采用了折叠缝隙结构并使用共面波导馈电方式, 以更好地实现阻抗匹配. 通过调控在缝隙之间添加的4个石墨烯片的电导率, 改变缝隙天线的等效长度, 使天线在两种不同工作模式下的谐振频率分别为230.5 GHz和270.5 GHz. 除此之外, 在天线下方加载了方形封闭谐振环(Closed-Ring Resonator, CRR)构成的超表面, 并使其谐振频率与天线的谐振频率匹配, 将 z 轴负方向的辐射进行反射, 使天线在两种工作模式下的增益提高至5.41 dBi和7.63 dBi, 与无反射结构时相比分别增长2.48 dBi和3.55 dBi.

关键词: 太赫兹; 石墨烯; 折叠缝隙天线; 可重构天线; 超表面; 共面波导

基金项目: 崂山实验室科技创新项目(No.LSKJ202200801); 国家重点研发计划项目(No.2021YFB2800703); 国家自然科学基金(No.U22A2008); 电磁空间安全全国重点实验室开放基金

中图分类号: TN823+.24

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112(2024)05-1421-11

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20221218

Frequency Tunable Terahertz Antenna Based on Graphene Sheet

LIU Bo-wen¹, XU Hang¹, ZHANG Ya-ting^{1*}, LI Jie¹, YAO Jian-quan^{1,2}

(1. Key Laboratory of Optoelectronic Information Technology Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China;
2. Laoshan Laboratory, Qingdao, Shandong 266234, China)

Abstract: In this paper, we propose a reconfigurable antenna using graphene which can work in terahertz band. The antenna use folded slot structure and coplanar waveguide to achieve impedance matching easily. By adjusting the conductivity of the four graphene sheets added between the slots, we can change the resonant frequencies of the antenna from 230.5 GHz to 270.5 GHz. In addition, a metasurface consisted of square closed-ring resonators (CRR) is under the antenna used to increase the gain of antenna. Because of the reflection of metasurface, the gain of antenna in two work mode increases 2.48 dBi and 3.55 dBi respectively.

Key words: terahertz; graphene; folded slot antenna; reconfigurable antenna; metasurface; coplanar waveguide

Foundation Item(s): Laoshan Laboratory Science and Technology Innovation Project (No.LSKJ202200801); National Key Research and Development Program of China (No.2021YFB2800703); National Natural Science Foundation of China (No.U22A2008); Opening Funding of National Key Laboratory of Electromagnetic Space Security

1 引言

太赫兹(THz)是指频率在100 GHz~10 THz范围内的电磁波^[1-3], 其波长远小于通常的微波和毫米波, 具有低能性、高穿透性、宽带性和瞬态性等特点, 是近年来研究的热点. 太赫兹技术的发展迅速, 使其在太赫兹医学成像^[4,5]、大气环境监测^[6-8]、太赫兹雷达^[9,10]、国家安全和反恐工作^[11-14]等多个领域展现出了广泛的应用. 尤其是在通信领域, 太赫兹天线得益于太赫兹波的优点, 可以使无线设备得以承载更多的信号,

为保证传输速率和信道容量提供了一种解决方案, 对即将到来的超越5G或6G通信系统^[15-17]具有重要意义.

随着现代雷达和通信系统的不断发展, 以现代无线通信和卫星通信为代表的各种电子设备都在朝着小型化、宽频带、高效率、多功能的趋势发展. 因此可调太赫兹天线应运而生, 其也被称为可重构太赫兹天线. 目前, 国内外对可重构天线的研究取得了许多成果, 按照调控的性能不同, 可以将其分为频率可重构^[18-22]、方

向图可重构^[21-23]、极化可重构^[24,25]和多参数可重构^[26,27]四类。以频率可重构天线为例,它一般具有两个或者多个工作频率,能够完成多个谐振频率天线的工作,降低天线的数量和规模,避免多个天线之间产生电磁干扰的情况,从而有效地提高了频谱利用率,降低了终端系统的研发复杂度,在天线的小型化、集成化方面有很大的应用前景。

传统的可重构天线一般采用二极管等电子元件作为开关,改变天线中的电流分布,以实现天线不同性能的调控。然而该方式在太赫兹波段存在切换速度慢、欧姆损耗严重、易产生电磁干扰等问题,极大影响了天线的辐射性能。石墨烯的发现可能是解决传统可重构天线在太赫兹波段问题的关键。石墨烯具有高电流密度、化学惰性、导热性、机械稳定性等性质。与传统的二极管开关相比,用石墨烯进行调控更加方便,并且能克服传统二极管开关在太赫兹波段的问题。通过改变石墨烯的外加偏置电压,就能改变石墨烯的电导率,进而改变天线的谐振频率。

因此,本文设计了一种基于石墨烯片的频率可调太赫兹天线,通过调节缝隙之间4个石墨烯片的电导率,改变缝隙天线的等效长度,可以使天线在两种不同工作模式获得不同的谐振频率。同时,本文还在天线下方加载了3种不同的反射结构,分别为方形封闭谐振环(Closed-Ring-Resonator, CRR)超表面、十字形CRR超表面和纯金属反射面,使其谐振频率与天线的谐振频率进行匹配,并通过仿真验证了加载反射结构可以提高天线的增益,与无反射结构相比均得到了提高,为提

高天线增益提供了另一种方法。

2 结构设计

2.1 天线结构设计

缝隙天线也叫作开槽天线(Single Slot Antenna),是指在一块大的金属板上开一个或几个狭窄的槽,用同轴线或波导馈电,用以辐射或接收电磁波的天线,这种结构使缝隙天线具有结构简单、轻巧,适合作为嵌入式天线的优点。折叠缝隙天线(Folded Slot Antenna, FSA)是将开槽天线折合起来的缝隙天线,这种结构的输入阻抗是简单开槽天线的四分之一^[28]。

周长为 C 的谐振单折缝天线与其谐振频率 f_0 的关系式如式(1)^[29]所示:

$$f_0 \approx \frac{vC_0}{C\sqrt{(\epsilon_r+1)/2}} \quad (1)$$

其中, C 为缝隙的周长; v 为光速; ϵ_r 为介质基板的介电常数;常数 C_0 可以通过商业矩量法(Method of Moments, MoM)代码找到。由式(1)可知天线的谐振频率 f_0 与缝隙的周长 C 呈负相关,周长 C 越大,谐振频率 f_0 越小。

缝隙天线一般使用共面波导馈电(CoPlanar Waveguide, CPW)方式,即信号传输线和接地板在介质基板的同一面,这种结构制作简单,并且具有更好的设计灵活性。如图1所示,通过设计微带信号传输线的宽度 s 和信号线与接地板之间缝隙的宽度 g ,就能更容易地实现阻抗匹配。此外,采用共面波导馈电的天线一般辐射损耗较低,并且介质基板的高度对天线特性阻抗的影响很小^[30]。

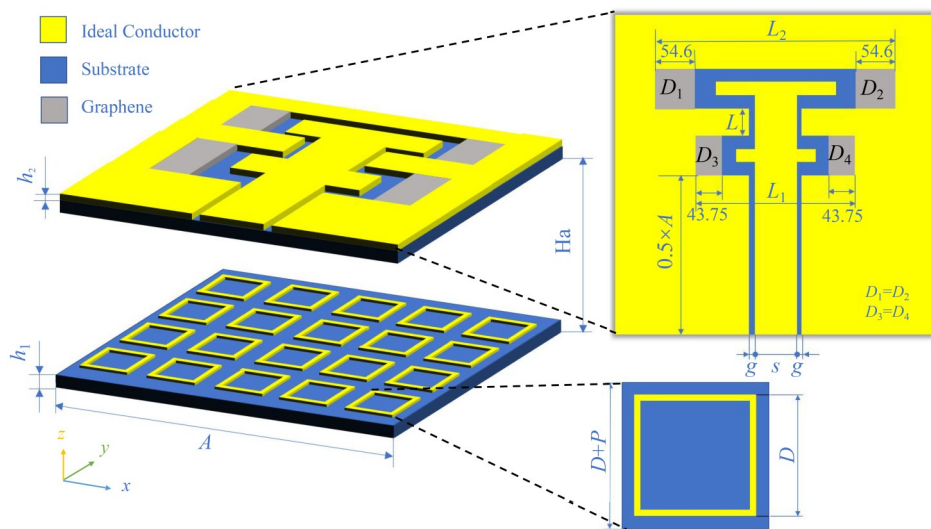


图1 天线与方形环超表面的示意图及其尺寸(单位: μm)

图1所示为折叠缝隙天线结构示意图及尺寸,图中蓝色部分为相对介电常数为3.66的介质基板,其尺寸大小为 $A \times A = 1.3 \text{ mm} \times 1.3 \text{ mm}$,厚度 $h_1 = 9.5 \mu\text{m}$ 。图中黄

色部分为金属贴片,在仿真过程中用理想导体代替,其厚度 $h_2 = 0.44 \mu\text{m}$ 。上下两个缝隙的间距 $L = 87.5 \mu\text{m}$,缝隙长度分别为 $L_1 = 350 \mu\text{m}$, $L_2 = 546 \mu\text{m}$,缝隙中间金属条宽

度分别为 $w_1=12.5 \mu\text{m}$ 和 $w_2=11.25 \mu\text{m}$, 长度分别为 $156.25 \mu\text{m}$ 和 $261.75 \mu\text{m}$, 缝隙宽度分别为 $s_1=18.75 \mu\text{m}$, $s_2=11.25 \mu\text{m}$, 共面波导部分的尺寸为 $g=10 \mu\text{m}$, $s=100 \mu\text{m}$, 此时共面波导结构与传输线可以达到 50Ω 的阻抗匹配. 4 个石墨烯带分别命名为 D_1 、 D_2 、 D_3 和 D_4 , 其尺寸为 $D_1=D_2=54.6 \mu\text{m}$, $D_3=D_4=43.75 \mu\text{m}$.

2.2 超表面的选择

超材料是一种物理功能不同于自然界其他材料的人工材料, 通常是由相同或相似的金属单元结构周期性排列所组成的. 超表面^[31-33]是二维结构的超材料, 在频率选择表面(Frequency Selective Surface, FSS)和 RCS 缩减等方面^[34,35]已经取得许多突破性的研究进展, 是天线领域中越来越热门的研究方向. 频率选择表面可以选择性地反射或透射某一特定频率的电磁波, 如果通过设计使 FSS 与天线的谐振频率达成匹配, 则能够选择性地将天线下方的辐射进行反射, 从而提高天线整体的方向性和增益. Wang 等人^[36]提出了一种基于超表面的双频高增益天线, 它由 2 个相同的方形基板组成, 周围由 4 个塑料螺钉固定, 上层基板上为共面波导馈电的双频天线, 下层则是由均匀金属贴片单元组成的频率选择表面, 这种结构使天线在 4 GHz 和 5.8 GHz 时的最大增益分别从没有频率选择表面时的 5.71 dB 和 6.96 dB 增加到 8.74 dB 和 9.53 dB.

理论上, 当天线与超表面的谐振频率相同时, 天线整体的方向性最好增益最大^[36]. 为了使超表面与天线的谐振频率匹配, 需要选择一种在天线的工作频段反射率比较高的超表面用来提高天线的增益. 本文尝试设计了两种理论可行的结构——十字形 CRR 超表面和方形 CRR 超表面, 来作为天线的反射层提高天线的增益. 图 1 为天线和方形 CRR 超表面的结构示意图, 超表面为 7×7 的方形 CRR 结构, 单元结构为边长 $D=180 \mu\text{m}$ 的正方形金属条, 宽度 $w=5 \mu\text{m}$, 超表面单元间距 $P=5 \mu\text{m}$.

2.3 石墨烯条带的设置

石墨烯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 , 其载流子迁移率在室温下可达到 $200\,000 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$, 适合于太赫兹波段器件的开发应用, 石墨烯的可调电导率也为可重构器件的设计提供理论依据. 在仿真过程中, 石墨烯的表面电导率由带内电导率和带间电导率共同影响. 因为石墨烯的厚度比波长小得多, 所以可以将其看作具有复杂表面电导率的薄膜, 其电导率由 Kubo 公式^[37,38]表示:

$$\sigma_s = \sigma_s^{\text{intra}} + \sigma_s^{\text{inter}} \quad (2)$$

$$\sigma_s(\omega, \Gamma, T, \mu_c) = \frac{ie^2(\omega - i2\Gamma)}{\pi\hbar^2} \times \left\{ \frac{1}{(\omega - i2\Gamma)^2} \int_0^\infty \varepsilon \left[\frac{\partial f_d(\varepsilon)}{\partial \varepsilon} - \frac{\partial f_d(-\varepsilon)}{\partial \varepsilon} \right] d\varepsilon - \int_0^\infty \frac{f_d(-\varepsilon) - f_d(\varepsilon)}{(\omega - i2\Gamma)^2 - 4(\varepsilon/\hbar)} d\varepsilon \right\} \quad (3)$$

式(2)中, σ_s^{intra} 和 σ_s^{inter} 分别为带内电导率和带间电导率. 式(3)中, ω 为角频率; $\Gamma=1/(2\tau)$ 为散射率, τ 为弛豫时间; T 为温度; μ_c 为石墨烯的化学势; ε 为载流子动能; e 为电子电荷; \hbar 为约化普朗克常数; f_d 为费米-狄拉克分布, 可表示为

$$f_d(\varepsilon) = \left[\exp\left(\frac{\varepsilon - \mu_c}{k_B T}\right) + 1 \right]^{-1} \quad (4)$$

其中, k_B 为玻尔兹曼常数. 在太赫兹频段内, 当满足 $\hbar\omega \ll 2\mu_c$ 时, 带间电导率可以忽略不计^[39], 于是石墨烯的表面电导率取决于带内电导率. 因此石墨烯的表面电导率可以由 Drude 模型^[40]近似表示为

$$\sigma_s(\omega, \Gamma, T, \mu_c) = \frac{-ie^2 k_B T}{\pi\hbar^2(\omega - i2\Gamma)} \left\{ \frac{\mu_c}{k_B T} + 2 \ln \left[\exp\left(-\frac{\mu_c}{k_B T}\right) + 1 \right] \right\} \quad (5)$$

可以看出, 石墨烯的表面电导率与石墨烯的化学势 μ_c 有关, 而化学势 μ_c 的大小取决于外加偏置电压^[41,42], 因此可以通过调控外加偏置电压调节石墨烯的电导率^[43]. 石墨烯化学势与外加电压的关系^[44,45]如式(6)所示:

$$V = V_0 + \frac{t\mu_c^2}{\varepsilon_0 \varepsilon_r \pi \hbar^2 v_F^2} \quad (6)$$

其中, 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; $v_F=9.5 \times 10^5 \text{ m/s}$, 为费米速率.

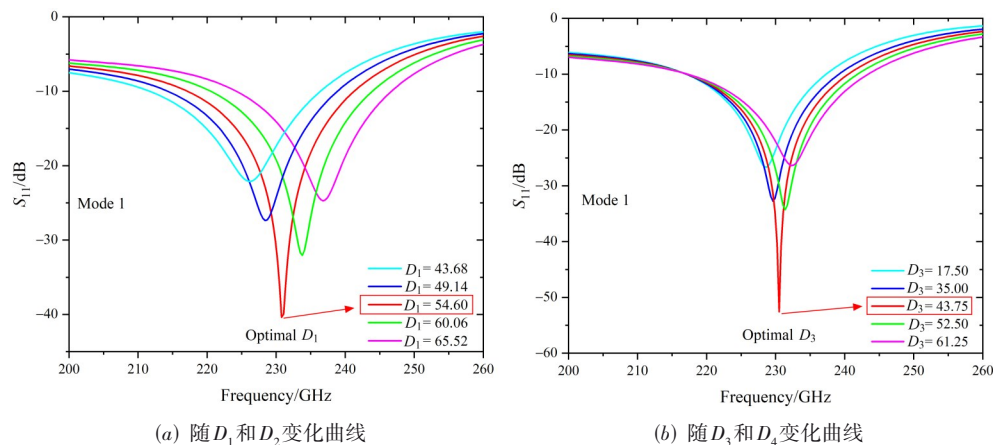
该天线在缝隙之间加载了 4 个石墨烯, 通过控制石墨烯的费米能级可以改变石墨烯的电导率, 从而改变缝隙的等效长度, 使天线的谐振频率实现可调. 通过控制不同石墨烯带的通断组合可以使天线处在两种不同的工作模式. 两种模式状态下 4 个石墨烯带的详细工作情况如表 1 所示, 其中 ON 表示石墨烯导通, OFF 表示石墨烯截止. 在仿真过程中考虑到石墨烯的特性, 石墨烯截止时, 设其化学势能为 0.1 eV ; 当石墨烯导通时, 设其化学势能为 2 eV . 当 4 个石墨烯带均不导通时, 设此时天线工作在模式 1; 当 4 个石墨烯带均导通时, 设此时天线工作在模式 2. 设定工作模式 1 下天线的谐振频率为主谐振频率, 工作模式 2 下天线的谐振频率为副谐振频率.

表 1 天线的两种工作模式

工作状态	D_1	D_2	D_3	D_4
模式 1	OFF	OFF	OFF	OFF
模式 2	ON	ON	ON	ON

3 仿真结果与分析

本文采用 CST 电磁仿真软件对天线和超表面整体进行仿真分析,可以得到天线的 S_{11} 参数图和远场图. S_{11} 参数曲线最低点所对应的频率即为天线的谐振频率,此时天线整体的回波损耗最小,效率最高. 远场图可以显示天线的增益,代表了天线的方向性.

图 2 天线 S 参数随 D_1, D_2, D_3, D_4 尺寸变化曲线(单位: μm)

确定好石墨烯宽度后,先不设置反射结构而是只对天线进行仿真,仿真结果如图 3 所示. 图 3(a)为无反射结构的天线在两种工作模式下的 S_{11} 参数. 模式 1 和模式 2 对应的谐振频率分别为 230.5 GHz 和 270.5 GHz. 图 3(b)为石墨烯带费米能级从 0.1 eV 到 2 eV 变化过程中天线的 S_{11} 参数的变化曲线. 随着石墨烯费米能级增大,天线整体的谐振频率从 230.5 GHz 逐渐增大到 270.5 GHz,调谐跨度为 40.0 GHz. 图 3(c)和(d)分别为无反射结构天线在两种工作模式下的远场图. 由二维远场图可以看出天线辐射在 z 轴正方向和 z 轴负方向的增益相同,为关于 xOy 面对称的形状;由三维远场图可以看出模式 1 对应的增益为 2.6 dBi,模式 2 对应的增益为 4.08 dBi.

将方形 CRR 超表面与天线相结合进行仿真,仿真结果如图 4 所示. 图 4(a)为方形 CRR 超表面与天线整体在两种工作模式下的 S_{11} 参数. 模式 1 对应的红色曲线表面此时天线的谐振频率为 232.6 GHz,模式 2 对应的蓝色曲线表面此时天线的谐振频率为 278.5 GHz. 图 4(b)为石墨烯带费米能级从 0.1 eV 到 2 eV 变化过程中天线整体 S_{11} 参数的变化曲线. 随着石墨烯费米能级增大,天线整体的谐振频率从 232.6 GHz 逐渐增大到 278.5 GHz,调谐跨度为 45.9 GHz. 这是因为随着石墨

首先需要通过参数化扫描来确定石墨烯条带的尺寸,为了不改变天线的对称性,仿真过程中始终保持 $D_1=D_2, D_3=D_4$. 保持石墨烯在不导通状态且 D_3 尺寸不变,对 D_1 进行参数化扫描,仿真结果如图 2(a)所示. 从图中曲线可以看出,随着 D_1 尺寸的增大,天线的 S 参数在 $D_1=54.60 \mu\text{m}$ 处取得最低点,此时天线的回波损耗最小,效率最大,对应的谐振频率为 230 GHz. 接下来保持 D_1 和 D_2 不变,对 D_3 进行参数化扫描,得到的仿真结果如图 2(b)所示,随着 D_3 尺寸的增大,天线的 S 参数在 $D_3=43.75 \mu\text{m}$ 处取得最低点,对应的谐振频率为 230 GHz.

烯费米能级的增加,石墨烯电导率逐渐增加,使缝隙天线的周长减小,对应的谐振频率从而逐渐增大. 图 4(c)和(d)分别为方形 CRR 超表面与天线整体在两种工作模式下的远场方向图. 由二维远场图可以看出天线沿 z 轴负方向的辐射减弱, z 轴正方向的辐射增强,说明方形 CRR 超表面将 z 轴负方向的辐射反射至 z 轴正方向,提高了天线的方向性;由三维远场图可以看出模式 1 对应的增益为 5.41 dBi,模式 2 对应的增益为 7.63 dBi,与无反射结构时的天线相比增益分别增加了 2.81 dBi 和 3.55 dBi.

为了使天线与超表面的谐振频率相匹配以达到最大的增益,将超表面单元的尺寸进行了参数化扫描,得到的仿真结果如图 5 所示,分别为金属板反射面、十字形 CRR 超表面和方形 CRR 超表面的 S 参数,当超表面 S 参数为 0 时超表面反射率最大. 图 5(a)中红色曲线对应的方形 CRR 超表面由边长 $D=180 \mu\text{m}$ 的正方形构成,金属条宽度 $w=5 \mu\text{m}$,间距 $P=5 \mu\text{m}$,此时超表面的谐振频率在 230.5 GHz,与无反射结构的天线在模式一下的谐振频率相同. 图 5(a)中蓝色曲线对应的十字形 CRR 超表面由两个长、宽分别为 $D=240 \mu\text{m}, b=75 \mu\text{m}$ 的矩形构成,金属条宽度 $w=5 \mu\text{m}$,间距 $P=5 \mu\text{m}$,此时超表面的谐振频率在 230.5 GHz,与无反射结构的天线在

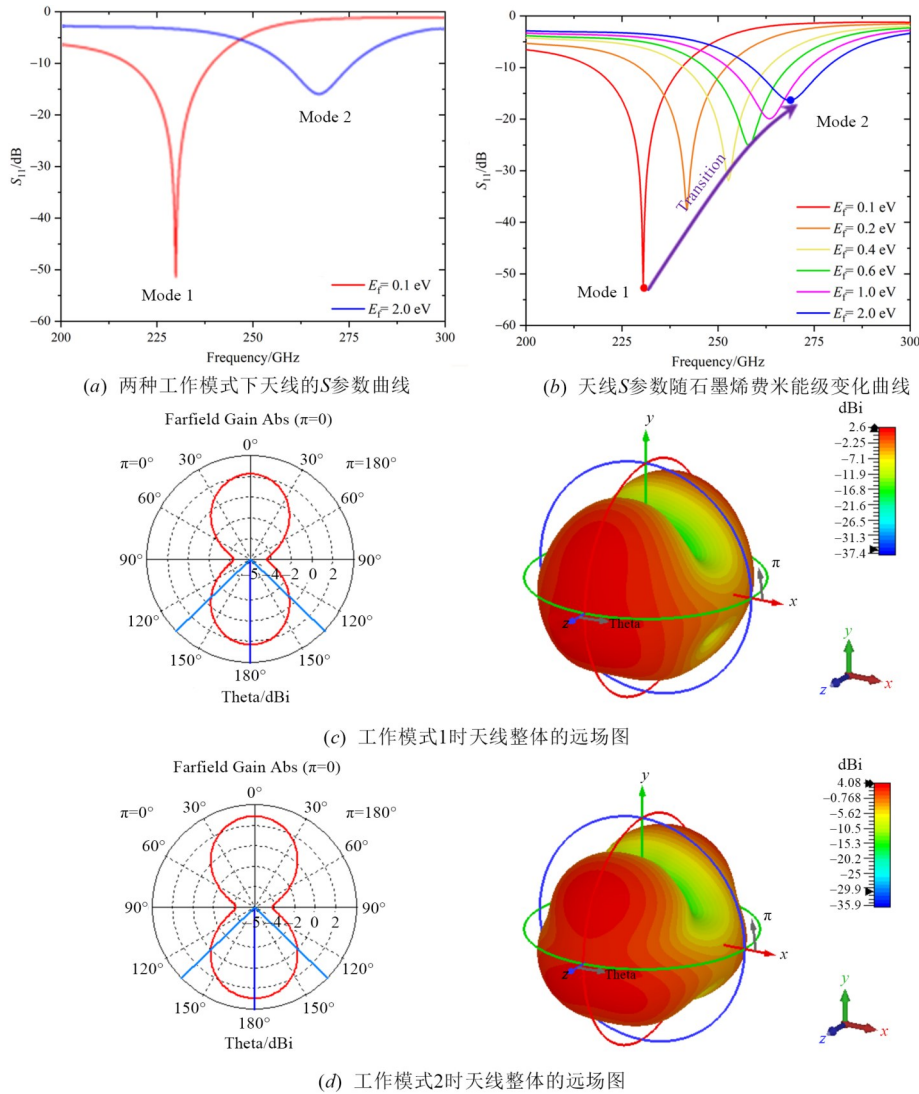


图3 无反射结构的天线仿真结果

模式1下的谐振频率相同。

在仿真的过程中发现,天线与超表面的距离 H_a 对天线整体的 S 参数有一定的影响,于是对 H_a 进行了参数化扫描,从而确定了能使天线整体 S 参数最佳的距离,得到的结果为方形 CRR 超表面最佳的 H_a 为 0.325 mm,十字形 CRR 超表面最佳的 H_a 为 0.55 mm,作为对比的纯金属反射面最佳的 H_a 为 0.4 mm. 图 5(b) 为方框形超表面 H_a 参数化扫描得到的天线整体 S_{11} 参数,从图中可以看出,随着 H_a 逐渐增大,谐振频率逐渐减小,天线整体的 S 参数在 $H_a=0.325$ mm 取得最低点,此时对应的谐振频率为 232.6 GHz. 然而越小的 S 参数意味着越精密的加工工艺和成本,考虑到 S 参数在 -30 dB 左右天线的功率传输效率即可达到 100%,所以 H_a 的数值在实际加工中可以在 0.25~0.40 mm 之间选择.

作为对比,下面将纯金属反射面与天线结合进行

仿真,仿真结果如图 6 所示. 图 6(a) 为金属反射面与天线整体在两种工作模式下的 S_{11} 参数,对应的谐振频率分别为 230.8 GHz 和 275.0 GHz. 图 6(b) 为石墨烯带费米能级从 0.1 eV 到 2 eV 变化过程中天线整体 S_{11} 参数的变化曲线图. 随着石墨烯费米能级增大,天线整体的谐振频率从 230.8 GHz 逐渐增大到 275.0 GHz,调谐跨度为 44.2 GHz. 图 6(c) 和 (d) 分别为金属反射面与天线整体在两种工作模式下的远场图. 由二维远场图可以看出天线沿 z 轴负方向的辐射减弱, z 轴正方向的辐射增强,说明方向性得到了提高;由三维远场图可以看出模式 1 对应的增益为 5.4 dBi,模式 2 对应的增益为 6.92 dBi,与无反射结构时的天线相比增益分别增加了 2.47 dBi 和 2.84 dBi.

同理,仿照着方形 CRR 超表面的流程,将尺寸优化后的十字形 CRR 超表面与天线结合进行仿真,得到的仿真结果如图 7 所示. 图 7(a) 为十字形 CRR 超表面与

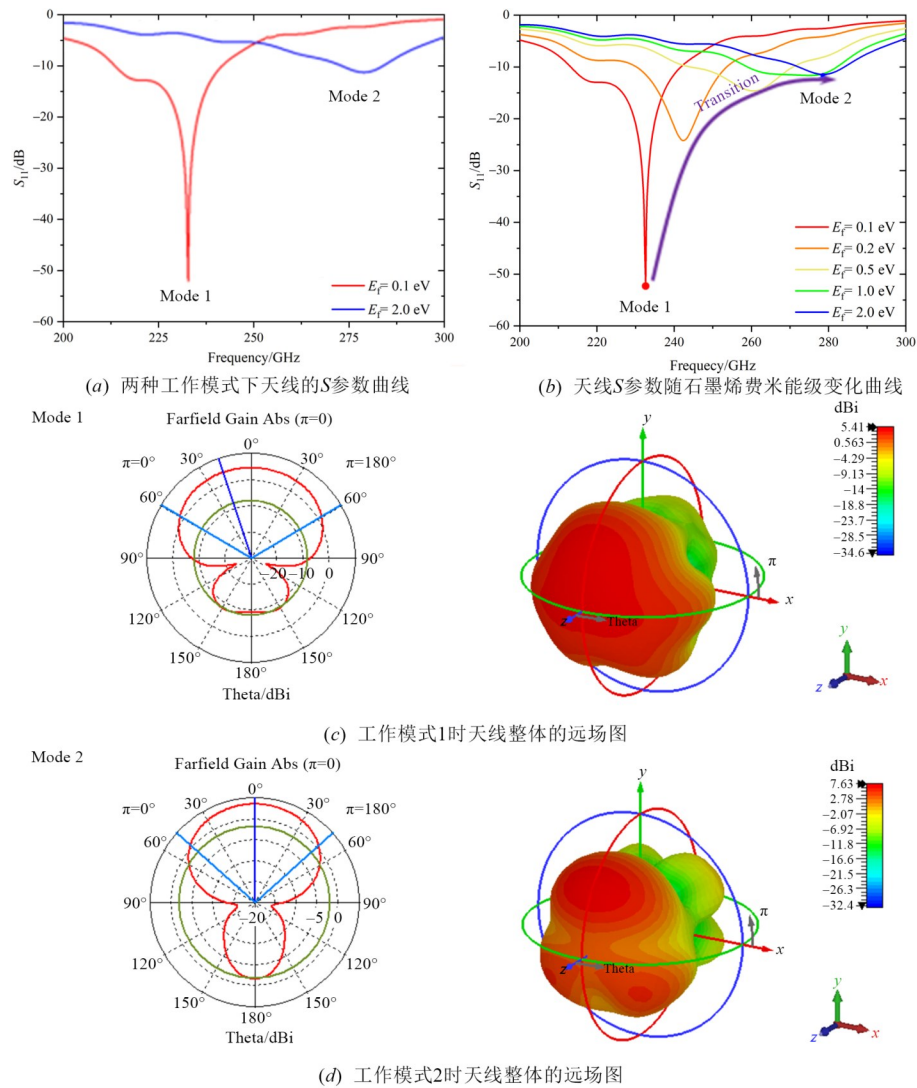


图4 方形CRR超表面与天线结合仿真结果

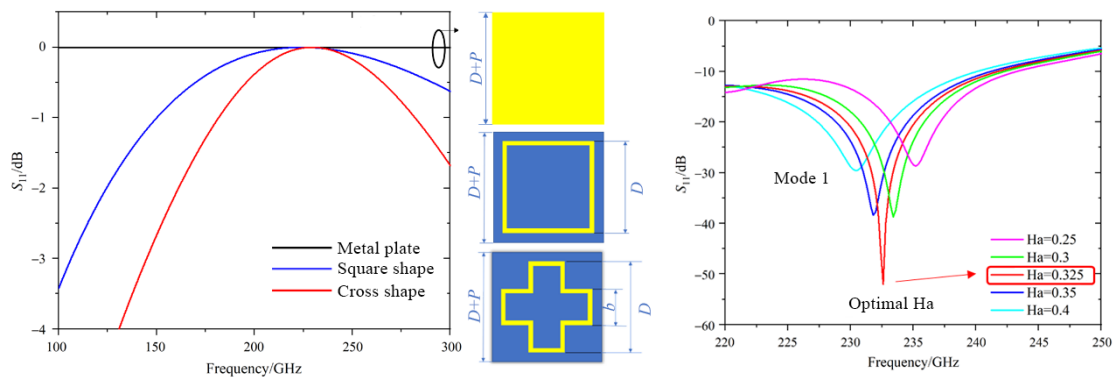


图5 仿真结果

天线整体在两种工作模式下的 S_{11} 参数,对应的谐振频率分别为225.3 GHz和265.0 GHz. 图7(b)为石墨烯带费米能级从0.1 eV到2 eV变化过程中天线整体 S_{11} 参数

的变化曲线图. 随着石墨烯费米能级增大,天线整体的谐振频率从225.3 GHz逐渐增大到265.0 GHz,调谐跨度为39.7 GHz. 图7(c)和(d)分别为十字形CRR超表面

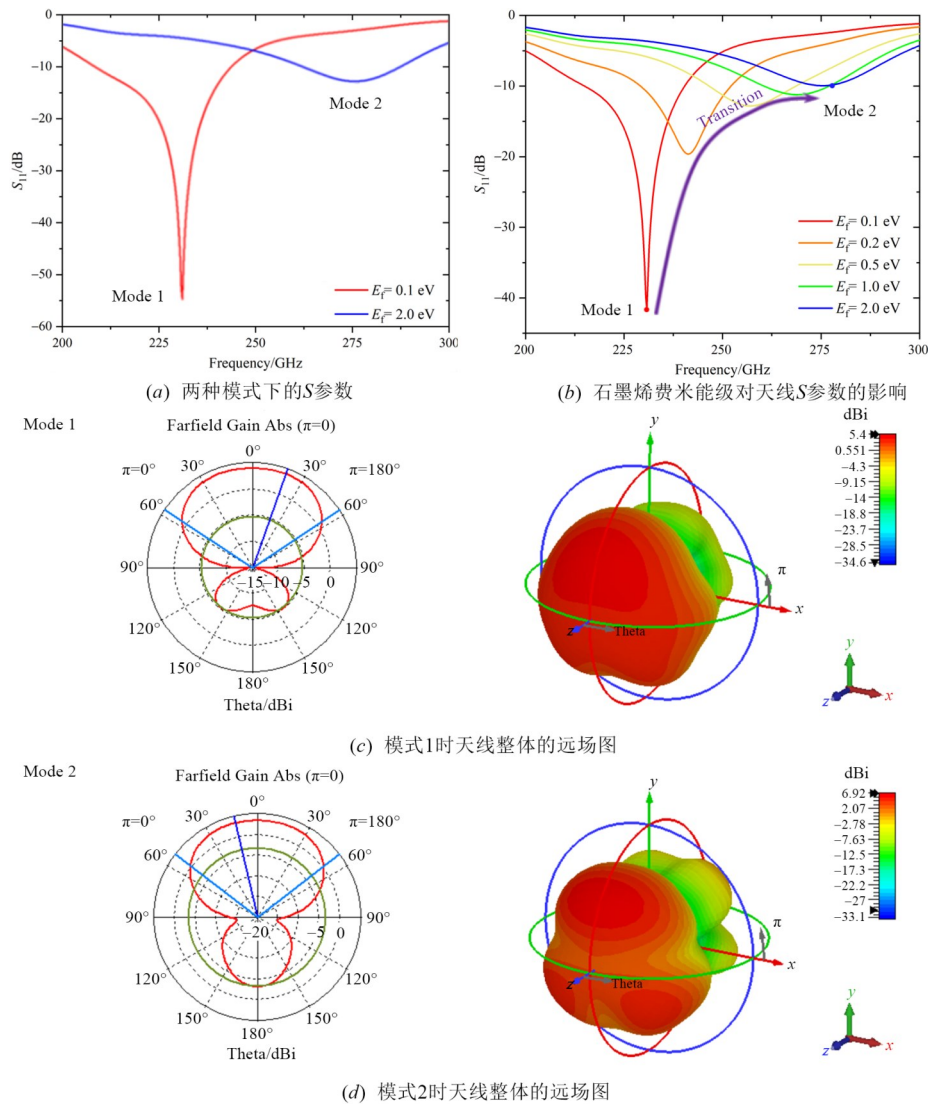


图6 金属反射面与天线结合仿真结果

面与天线整体在两种工作模式下的远场图. 由二维远场图可以看出天线沿z轴负方向的辐射减弱,z轴正方向的辐射增强,说明十字形CRR超表面将z轴负方向的辐射反射至z轴正方向,提高了天线的方向性;由三维远场图可以看出模式1对应的增益为3.99 dBi,模式2对应的增益为6.04 dBi,与无反射结构时的天线相比增益分别增加了1.06 dBi和1.96 dBi.

将4种仿真情况进行汇总得到图8及表2. 4种反射结构与天线结合的S参数如图8所示. 由图可知,在工作模式1时,4种天线的主谐振频率均在230 GHz附近,且方形CRR超表面的增益最大;在工作模式2时,4种天线的副谐振频率均在270 GHz附近,且方形CRR超表面的增益最大. 与无反射结构的天线相比,3种反射面均使天线的增益得到提高.

4 天线印制相关工艺

在太赫兹波段,天线器件的特征结构尺寸正朝着小型化发展,目前已达到亚毫米量级. 以本文设计的天线为例,基底材料和金属厚度均达到了微米量级,如果要印制这种尺寸的天线,需要采用柔性印制电子技术,将功能性的墨水材料沉积在基底材料上来制得,这种墨水材料可以是金属导电墨水,也可以是石墨烯墨水,而基底材料一般要选择柔性基材. 这种技术不需要镀膜、曝光、显影、刻蚀等工序,简化了天线的制造过程,同时降低了成本,为诸多行业带来了进步和创新^[46]. 基于这种技术,2018年,Paracha等人^[47]使用银纳米墨水印制了一种低成本共面波导馈电的Z形柔性平面天线,所印刷的银纳米颗粒层的厚度仅为300 nm. 2020年,Chen等人^[48]使用石墨烯墨水印刷了一种可调谐宽带缝隙天线,并成功通过施加

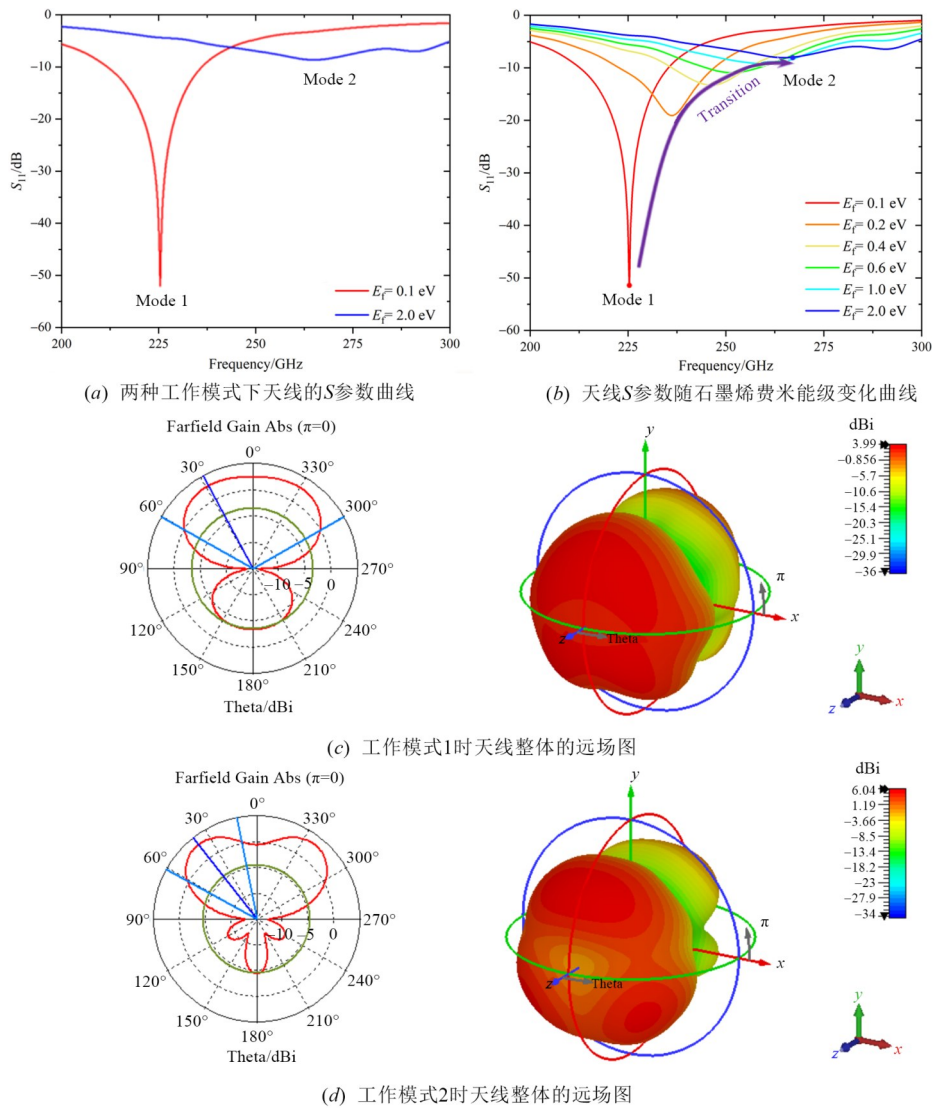


图7 十字形CRR超表面与天线结合仿真结果

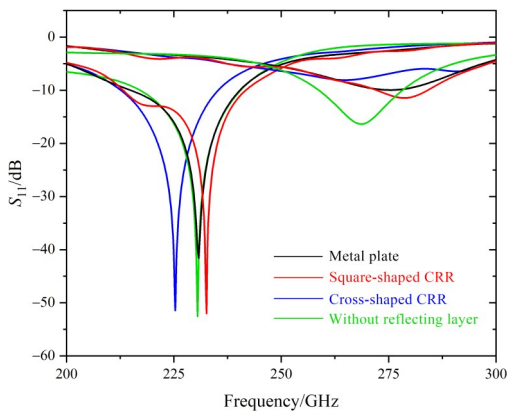


图8 4种反射结构与天线结合的S参数对比

直流电改变了缝隙天线的工作带宽,证明了工作带宽的可调性.

与此同时,太赫兹频率选择表面的制作技术目前

表2 四种天线结果对比

超表面类型	主谐振频率/GHz	增益/dBi	副谐振频率/GHz	增益/dBi
无反射结构	230.5	2.93	270.5	4.08
金属板反射面	230.8	5.40	275.0	6.92
十字形CRR超表面	225.3	3.99	265.0	6.04
方形CRR超表面	232.6	5.41	278.5	7.63

也取得了许多进展. 对于100~300 GHz的太赫兹低频波段的FSS器件,最典型的制作方式是使用激光刻蚀工艺来进行制造^[49-51]. 相比传统的精密机械加工工艺,激光刻蚀的加工精度更高,效率也更高,对于复杂的图形激光刻蚀优势更加明显,也更适用于无变形加工的情况^[52]. 而太赫兹高频波段(300 GHz~1 THz)的FSS器件则大多采用硅基微机械工艺制造方案^[53],通过湿法或干法刻蚀进行制造,其中干法具有更高的精度且

更适用于微米级的薄壁结构和多层结构. 本文设计的天线是属于低频段介质贴片结构的 FSS 器件, 这种结构的天线可以采用印刷、影印制造工艺进行制作^[54]. 基于这两种技术, 本文设计的天线存在制作的可能.

5 结论

本文设计了一种频率可调太赫兹天线, 通过改变 4 个加载的石墨烯带的通断状态实现频率的调谐, 并使用了 2 种不同的超表面来提高天线在谐振频率处的增益. 当采用十字形超表面时, 该天线可以工作在 225.3 GHz、265.0 GHz 两个频段, 阻抗匹配局部性能良好, 在石墨烯不导通时使天线的最大增益从 2.93 dBi 增加到 3.99 dBi, 在石墨烯导通时使天线的最大增益从 4.08 dBi 增加到 6.04 dBi. 当采用方形超表面时, 该天线可以工作在 232.6 GHz、278.5 GHz 两个频段, 阻抗匹配局部性能良好, 在石墨烯不导通时使天线的最大增益从 2.93 dBi 增加到 5.41 dBi, 在石墨烯导通时使天线的最大增益从 4.08 dBi 增加到 7.63 dBi. 由此说明, 频率选择表面在一定程度上可以选择性地提高天线谐振频率处的增益和方向性. 其中方形 CRR 超表面设计得较为合理, 其增益提高较为明显; 而十字形 CRR 超表面设计得不太合理, 其增益程度反而不如金属反射面. 最后介绍了太赫兹天线和太赫兹频率选择表面制作的相关工艺, 论证了本文所设计的天线存在制作的可行性.

参考文献

- [1] SIEGEL P H. Terahertz technology[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2002, 50(3): 910-928.
- [2] SONG H J, NAGATSUMA T. Present and future of terahertz communications[J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2011, 1(1): 256-263.
- [3] PIESIEWICZ R, KLEINE-OSTMANN T, KRUMBHOLZ N, et al. Short-range ultra-broadband terahertz communications: Concepts and perspectives[J]. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 2007, 49(6): 24-39.
- [4] TAYLOR Z D, SINGH R S, BENNETT D B, et al. THz medical imaging: In vivo hydration sensing[J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2011, 1(1): 201-219.
- [5] SIM Y C, AHN K M, PARK J Y, et al. Temperature-dependent terahertz imaging of excised oral malignant melanoma[J]. *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*, 2013, 17(4): 779-784.
- [6] AFSHARINEJAD A, DAVY A, JENNINGS B, et al. Performance analysis of plant monitoring nanosensor networks at THz frequencies[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2016, 3(1): 59-69.
- [7] THOMA P, SCHEURING A, WUNSCH S, et al. High-speed Y-Ba-Cu-O direct detection system for monitoring picosecond THz pulses[J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2013, 3(1): 81-86.
- [8] ZDANEVIČIUS J, ČIBIRAITĖ D, IKAMAS K, et al. Field-effect transistor based detectors for power monitoring of THz quantum cascade lasers[J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2018, 8(6): 613-621.
- [9] GRZYB J, STATNIKOV K, SARMAH N, et al. A 210-270-GHz circularly polarized FMCW radar with a single-lens-coupled SiGe HBT chip[J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2016, 6(6): 771-783.
- [10] DANIEL L, STOVE A, HOARE E, et al. Application of Doppler beam sharpening for azimuth refinement in prospective low-THz automotive radars[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2018, 12(10): 1121-1130.
- [11] GUI S L, LI J, PI Y M. Security imaging for multi-target screening based on adaptive scene segmentation with terahertz radar[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2019, 19(7): 2675-2684.
- [12] KNIPPER R, BRAHM A, HEINZ E, et al. THz absorption in fabric and its impact on body scanning for security application[J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2015, 5(6): 999-1004.
- [13] APPLEBY R, ANDERTON R N. Millimeter-wave and submillimeter-wave imaging for security and surveillance[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2007, 95(8): 1683-1690.
- [14] WANG Z D, HU M H, KURUOGLU E E, et al. How do detected objects affect the noise distribution of terahertz security images?[J]. *IEEE Access*, 2018, 6: 41087-41092.
- [15] KATZ M, PIRINEN P, POSTI H. Towards 6G: Getting ready for the next decade[C]//2019 16th International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS). Piscataway: IEEE, 2019: 714-718.
- [16] DAT P T, KANNO A, INAGAKI K, et al. Hybrid optical wireless-mmWave: Ultra high-speed indoor communications for beyond 5G[C]//IEEE INFOCOM 2019 - IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS). Piscataway: IEEE, 2019: 1003-1004.
- [17] KATZ M, MATINMIKKO-BLUE M, LATVA-AHO M. 6Genesis flagship program: Building the bridges towards 6G-enabled wireless smart society and ecosystem[C]//2018 IEEE 10th Latin-American Conference on Communications (LATINCOM). Piscataway: IEEE, 2018: 1-9.
- [18] HUNG C, CHIU T. Dual-band reconfigurable antenna design using slot-line with branch edge[J]. *IEEE Transac-*

- tions on Antennas and Propagation, 2015, 63(2): 508-516.
- [19] MAHLAOU Z, ANTONINO-DAVIU E, LATIF A, et al. Frequency reconfigurable patch antenna using pin diodes with directive and fixed radiation pattern[C]//2018 International Conference on Selected Topics in Mobile and Wireless Networking (MoWNeT). Piscataway: IEEE, 2018: 1-3.
- [20] ROMPUTTAL A, PHONGCHAROENPANICH C. Frequency reconfigurable multiband antenna with embedded biasing network[J]. IET Microwaves, Antennas & Propagation, 2017, 11(10): 1369-1378.
- [21] DENG W Q, YANG X S, SHEN C S, et al. A dual-polarized pattern reconfigurable yagi patch antenna for micro-base stations[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2017, 65(10): 5095-5102.
- [22] TOWFIQ M A, BAHCECI I, BLANCH S, et al. A reconfigurable antenna with beam steering and beamwidth variability for wireless communications[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2018, 66(10): 5052-5063.
- [23] BILDIK S, DIETER S, FRITZSCH C, et al. Reconfigurable folded reflectarray antenna based upon liquid crystal technology[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2015, 63(1): 122-132.
- [24] ZHANG Y W, LIN S, DING Q, et al. Simulation design of cavity-backed self-phased polarization-reconfigurable antenna based on liquid metal[C]//2021 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP). Piscataway: IEEE, 2021: 1-2.
- [25] YANG W C, CHE W Q, JIN H Y, et al. A polarization-reconfigurable dipole antenna using polarization rotation AMC structure[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2015, 63(12): 5305-5315.
- [26] GE L, LI Y J, WANG J P, et al. A low-profile reconfigurable cavity-backed slot antenna with frequency, polarization, and radiation pattern agility[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2017, 65(5): 2182-2189.
- [27] TAN L R, WU R X, POO Y. Magnetically reconfigurable SIW antenna with tunable frequencies and polarizations [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2015, 63(6): 2772-2776.
- [28] NETO A, MACI S, DE MAAGT P J I. Slot antennas fed by coplanar waveguide[C]//IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium. Piscataway: IEEE, 2002: 1588-1591.
- [29] WELLER T M, KATEHI L P B, REBEIZ G M. Single and double folded-slot antennas on semi-infinite substrates[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1995, 43(12): 1423-1428.
- [30] 宋立众, 丁畅, 尹伟伟, 等. 共面波导馈电折叠缝隙对数周期天线的研究[J]. 微波学报, 2016, 32(4): 27-32, 72.
- SONG L Z, DING C, YIN W W, et al. Research on a log periodic folded slot antenna fed by coplanar waveguide [J]. Journal of Microwaves, 2016, 32(4): 27-32, 72. (in Chinese)
- [31] 孙树林, 何琼, 周磊. 电磁超表面[J]. 物理, 2015, 44(6): 366-376.
- SUN S L, HE Q, ZHOU L. Electromagnetic metasurfaces [J]. Physics, 2015, 44(6): 366-376. (in Chinese)
- [32] 黄新朝, 付全红, 张富利. 超表面研究进展[J]. 航空兵器, 2016, 23(1): 28-34.
- HUANG X C, FU Q H, ZHANG F L. Research advances of metasurface[J]. Aero Weaponry, 2016, 23(1): 28-34. (in Chinese)
- [33] 马向进, 韩家奇, 乐舒瑶, 等. 可重构智能超表面设计及其无线通信系统应用[J]. 无线电通信技术, 2022, 48(2): 258-268.
- MA X J, HAN J Q, LE S Y, et al. Reconfigurable intelligent metasurface design and applications in wireless communication systems[J]. Radio Communications Technology, 2022, 48(2): 258-268. (in Chinese)
- [34] 李培, 刘颖, 李鹏, 等. 基于极化旋转超表面的天线 RCS 减缩方法[J]. 电子信息对抗技术, 2021, 36(5): 84-89.
- LI P, LIU Y, LI P, et al. An antenna RCS reduction method based on polarization conversion meta-surface[J]. Electronic Information Warfare Technolog, 2021, 36(5): 84-89. (in Chinese)
- [35] 朱瑛, 段坤, 杨维旭, 等. 基于超构表面的低散射天线阵列 [J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2022, 23(1): 30-36.
- ZHU Y, DUAN K, YANG W X, et al. A low scattering antenna array based on meta-surface[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2022, 23(1): 30-36. (in Chinese)
- [36] WANG J F, WU Y L, XIE W F, et al. A CPW-fed dual-band high gain antenna using metasurface[C]//2017 International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium (ACES). Piscataway: IEEE, 2017: 1-2.
- [37] 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.
- [38] 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.
- [39] 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.
- [40] 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.
- [41] 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.
- [42] 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. 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. (in Chinese)
- [43] WANG S L. Application Research of Graphene in Antenna Design[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2019.
- [44] 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.
- [45] HU Y. Research on Millimeter Wave and Terahertz Pattern Reconfigurable Antenna[D]. Xi'an: Xidian University, 2019.
- [46] 杨文冬, 孙浩强, 南敬昌, 等. 小型化柔性印制天线: 材料、工艺及应用[J]. *材料导报*, 2023, 37(12): 24-36. YANG W D, SUN H Q, NAN J C, et al. Printed miniaturized flexible antennas: Materials, processes and applications[J]. *Materials Reports*, 2023, 37(12): 24-36. (in Chinese)
- [47] PARACHA K N, RAHIM S K A, CHATTHA H T, et al. Low-cost printed flexible antenna by using an office printer for conformal applications[J]. *International Journal of Antennas and Propagation*, 2018, 2018: 3241581.
- [48] Chen X X, Liu X, Li S H, et al. Tunable wideband slot antennas based on printable graphene inks[J]. *Nanoscale*, 2020, 12(20): 10949-10955.
- [49] 林彬彬. 频率选择表面的仿真、加工与测试研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2015. LIN B B. Research on Simulation, Fabrication and Test of Frequency Selective Surfaces[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2015. (in Chinese)
- [50] DICKIE R, CAHILL R, FUSCO V, et al. THz frequency selective surface filters for earth observation remote sensing instruments[J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2011, 1(2): 450-461.
- [51] DAS S, REZA K M, HABIB M A. Frequency selective surface based bandpass filter for THz communication system[J]. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 2012, 33(11): 1163-1169.
- [52] 刘佳, 万继响, 吴春邦, 等. 太赫兹天线器件制造工艺技术研究[J]. *空间电子技术*, 2021, 18(6): 35-41. LIU J, WAN J X, WU C B, et al. Research on manufacturing technology of terahertz antenna devices[J]. *Space Electronic Technology*, 2021, 18(6): 35-41. (in Chinese)
- [53] DICKIE R, CAHILL R, MITCHELL N, et al. Recent advances in submillimetre wave FSS technology for passive remote sensing instruments[C]//Proceedings of the Fourth European Conference on Antennas and Propagation. Piscataway: IEEE, 2010: 1-5.
- [54] SUSHKO O, PIGEON M, DONNAN R S, et al. Comparative study of sub-THz FSS filters fabricated by inkjet printing, microprecision material printing, and photolithography[J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2017, 7(2): 184-190.

作者简介



刘博文 男, 1998年6月出生于河北省秦皇岛市。现为天津大学精仪学院激光与光电子研究所硕士研究生。主要研究方向为太赫兹可重构天线。

E-mail: 2021202342@tju.edu.cn



张雅婷 女, 博士毕业于南开大学物理学院凝聚态物理专业。现为天津大学精密仪器与光电子工程学院副教授。从事低维光电器件相关领域的研究工作十余年, 尤其是在光电探测器与光电存储器方面做了系统而有特色的研究。先后主持国家973计划项目1项(子课题负责人), 国家863计划项目4项, 国家自然科学基金项目1项。在国内外学术期刊及重要会议上作为第一作者或通讯作者发表论文34篇。

E-mail: yating@tju.edu.cn



姚建铨 男, 1939年1月生于上海市。1965年天津大学研究生毕业, 1997年当选为中国科学院院士。现任天津大学精密仪器与光电子工程学院教授、博士生导师, 院学位委员会主任、名誉院长, 激光与光电子研究所所长。曾获国家发明二等奖、国家教委及天津科技进步二等奖(4次)、军队科技进步奖一等奖、中国科学院特等奖等。在国内外发表论文730余篇, 论文曾被多国学者引用百余次。

E-mail: jqyao@tju.edu.cn