集成石墨烯的太赫兹波束成形 智能超表面



司黎明/SI Liming,汤鹏程/TANG Pengcheng,吕昕/LYU Xin (北京理工大学毫米波与太赫兹技术北京市重点实验室,中国 北京,

(Beijing Key Laboratory of Millimeter Wave and Terahertz Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

DOI:10.12142/ZTETJ.202203003 网络出版地址: https://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20220607.1132.002.html 网络出版日期: 2022-06-07 收稿日期: 2022-05-16

摘要:提出了一种基于石墨烯的太赫兹智能超表面(RIS)。通过调节化学势能,该智能超表面能够实现对线极化太赫兹波的反射相位动态控制, 进而实现太赫兹波束成形。为了获得超单元360°的反射相位调控范围,设计了工字形金属谐振器集成石墨烯的超单元结构,这种集成结构加强 了超表面的局部电场,拓展了反射相位动态调控范围。基于异常反射和编码超材料原理,该智能超表面可具备近场波束偏转和远场波束分裂等波 束成形功能,为灵活调控太赫兹波提供了新的思路,有望运用到6G无线通信、太赫兹遥感、空间态势感知等领域。

关键词:太赫兹;智能超表面;石墨烯;异常反射;编码超材料;波束成形

Abstract: A graphene-based reconfigurable intelligent surface (RIS) is proposed for terahertz beamforming. By adjusting the chemical potential energy, the reflection phase of linearly polarized incident electromagnetic wave can be controlled. In order to obtain the 360° reflection phase control range, a Gong-shaped metal resonator integrated graphene structure is designed. The Gong-shaped metal resonator strengthens the local electric field of metasurface, widening the regulation range of reflection phase. According to the principle of anomalous reflection and coding metasurface, the deflection of near-field beam and splitting of far-field beam are realized, which could be a new idea for flexible regulation of terahertz beamforming. The results show that the proposed graphene-based terahertz RIS can be expected to play a key role in 6G communication, terahertz remote sensing, and space situational awareness.

Keywords: terahertz; reconfigurable intelligent surface; graphene; anomalous reflection; coding metasurface; beamforming

林兹 (Terahertz, THz) 波是指频率在0.1~10 THz之间 的电磁波。相较于微波和毫米波,太赫兹波能够为无 线通信提供更宽的绝对频谱带宽^[1]。太赫兹技术有望成为未 来6G通信和空间态势感知的关键技术。近年来,研究者们 提出利用智能超表面 (RIS)来动态传输和接收电磁波,实 现波束成形^[2]。集成有源器件使得由亚波长人工电磁结构二 维周期排布形成的超表面,具备主动调控电磁波的功能。 RIS对电磁波的主要调控功能包括波束偏转、波束分裂、极 化变换、轨道角动量调控、幅度和相位控制等,旨在以智能 方式重新配置无线环境,将在非视距通信场景中得到广泛应 用,可以有效弥补无线通信中的一些不足,有利于实现无线

信号的多用户覆盖。

受限于较低的截止频率和较高的损耗,传统有源器件难 以高效率地工作于太赫兹波段。研究者们探索了集成肖特基 二极管、互补金属氧化物半导体(CMOS)晶体管、光活性 半导体材料、二氧化钒等可调谐器件和材料在太赫兹可重构 超表面上的应用^[3]。石墨烯作为一种新兴的二维晶格结构材 料,拥有载流子迁移率高、机械强度大、可调谐性能强等优 点,可以高效调节电磁波,具有巨大的应用潜力^[4]。电磁特 性可以通过改变化学势能来实现轻松调谐,因此石墨烯越来 越多地被运用于衰减器、可调谐天线、吸波器等可重构射频 器件的设计和制作中^[5]。相位是电磁波的一个重要基本属 性,是RIS实现波束调控和波束成形的核心参数。在集成石 墨烯太赫兹智能超表面的研究方面,MIAO Z. Q.等所设计的 具有栅极调控功能的反射型石墨烯超表面实现了 243°的动 态相位调控范围^[6], ZHANG Z.等提出的石墨烯-金属杂化超

基金项目: 国家重点基础研究项目(2019-JCJQ-349); 国家重点研发计划 (2018YFF0212103); 国家自然科学基金(61527805); 高等学校学科创新引智 计划项目(B14010); 北京理工大学国际合作项目(BITBLR2020014)

表面在 4.5 THz 实现了 295°的动态相位调控范围⁽⁷⁾,但是这些成果都没有实现 360°的动态相位调控范围。

本文提出一种集成石墨烯太赫兹智能超表面,其特点是 能够实现更宽的动态相位调控范围(可达到360°),可以更 灵活有效地调控太赫兹反射相位。更宽的动态相位调控范围 是应对各种复杂波束成形需求的前提。基于所设计的超单元 (Meta-Atom),本文探究了太赫兹波束成形 RIS 前端设计思 路,实现了对太赫兹电磁波的近场和远场波束调控。本文的 结构安排如下:首先对所设计的超表面的结构和可重构机制 进行阐述,随后讨论基于所设计的集成石墨烯智能超单元实 现的电磁波近场波束偏转和远场波束分裂功能,最后对文章 内容进行总结。

1 集成石墨烯智能超表面结构设计

智能超表面由二维周期排列的超单元所构成。本文设计的集成石墨烯超表面及单元结构如图1所示。超单元沿着 x 轴和 y 轴周期分布,由高度为 h 的 TOPAS(指环烯烃类共聚物)介质基板支撑。TOPAS(相对介电常数为2.34,损耗角 正切为0.000 07)在太赫兹频段上能够保持稳定的介电常数,并且拥有较低的吸收损耗,是理想的太赫兹介质基板材料^[8]。最上层是厚度为 t 的工字形金属谐振器,介质基板和工字形谐振器之间为石墨烯条带,最下层为金属地板。工字形谐振器和金属地板均为 Ag(电导率为4.56 × 10⁷ S/m)材质。超单元的具体结构参数如表1 所示。该超表面可以采用先进微制造工艺进行加工制造。首先在 SiO₂衬底上沉积一层厚的金薄膜,在顶部旋涂 TOPAS;然后通过湿法转移石墨 烯层,并使用光刻和等离子体刻蚀技术对石墨烯进行蚀刻,



▲图1集成石墨烯太赫茲智能超表面和超单元结构

得到条带结构;最后,使用光刻和剥离工艺对金结构进行图

▼表1集成石墨烯太赫茲智能超表面结构参数

参数	а	b	С	d	W	р	h	t
数值/μm	100	84	20	8	110	120	78	0.2
a:工字形谐振器沿x轴方向的长度 c:工字形谐振器末端加载的长度 h:介质基板的高度 t:工字形谐振器的金属厚度				b:工字形谐振器连接臂的长度 d:工字形谐振器的金属宽度 p:超单元的晶格长度 w:石墨烯条带的宽度				

案化处理。

本文所设计的超表面的可重构特性源于选用的石墨烯材 料导电特性可调。单层石墨烯的厚度很薄,仅为0.35 nm。 为了便于计算和分析,我们通常选用复电导率面模型表征。 石墨烯的导电特性由载流子带内跃迁和带间跃迁共同产生, 可以由Kubo公式来描述^[9]:

$$\sigma_g = \sigma_{intra} + \sigma_{inter}, \tag{1}$$

$$\sigma_{intra} = \frac{i}{\omega + i\tau^{-1}} \frac{e^2}{\pi\hbar^2} \cdot 2k_B T \cdot \ln\left[2\cosh\left(\frac{\mu}{2k_B T}\right)\right],\tag{2}$$

$$\sigma_{\rm inter} = i \frac{e^2}{4\pi\hbar} \ln \left[\frac{2|\mu| - (\hbar\omega + i\tau^{-1})}{2|\mu| + (\hbar\omega + i\tau^{-1})} \right], \tag{3}$$

其中, ω 表示角频率, τ 表示弛豫时间,e表示基本电荷常数, \hbar 表示普朗克常数, k_B 表示玻尔兹曼常数,T表示温度, μ 表示化学势能。

根据 Pauli 不相容原理, 红外线频率以下波段上石墨烯的 导电特性主要由带内跃迁产生。如果 $\mu >> k_BT$ 且 $\mu < \hbar \omega/2$, 公式(2)可以继续简化为 Drude模型:

$$\sigma_s = \frac{\mathrm{i}e^2\mu}{\pi\hbar^2(\omega + \mathrm{i}\tau^{-1})_{\circ}} \tag{4}$$

石墨烯的化学势能由载流子密度 n_s决定,如公式(5) 所示:

$$n_{s} = \frac{2}{\pi \hbar^{2} v_{f}^{2}} \int_{0}^{\infty} \varepsilon \left[f_{d} (\varepsilon - \mu) - f_{d} (\varepsilon + \mu) \right] \partial \varepsilon, \qquad (5)$$

其中, ε 表示电子(空穴)的动力学能量, $f_d(\varepsilon)$ 表示费米狄 拉克分布函数, v_i 表示电子速度。

偏置电压 E_{bias} 对石墨烯载流子密度的影响可由公式(6) 描述:

$$n_s = \frac{E_{\text{bias}}\varepsilon_r \varepsilon_0}{eh},\tag{6}$$

其中, ε_r 表示绝缘层的相对介电常数, ε_0 表示真空介电常数,h表示绝缘层的厚度。

当施加于石墨烯的偏置电压改变时,载流子密度会随之 发生变化,因此可以进一步推导得出偏置电压*E*_{bias}和化学势 能*µ*之间关系:

$$\frac{\varepsilon_r \varepsilon_0 \pi \hbar^2 v_f^2}{2eh} E_{\text{bias}} = \int_0^\infty \varepsilon \left[f_d(\varepsilon - \mu) - f_d(\varepsilon + \mu) \right] \partial \varepsilon$$
(7)

如图1(a)所示,沿着y轴方向延伸的石墨烯条带将超单元分成了一排排子阵。石墨烯条带的宽度为w。在石墨烯条带的末端设置一系列独立的金属电极,并在金属电极和地板之间构造偏置电路。当对每一列超单元施加不同的栅极电压 V_i(*i*=1,2,3…)时,同一列中石墨烯的化学势将同时被对应调整^[10]。选用条带形石墨烯可以有效减小相邻超单元子阵之间的耦合。

2 超单元反射特性研究

我们使用CST 微波工作室的频域求解器,对本文提出的 集成石墨烯超单元的反射幅度和相位进行仿真计算。激励为 沿着-z轴方向垂直入射的y轴方向线极化电磁波。在仿真过 程中,超单元的x和y方向均设置为单元边界,以模拟二维 周期排布的情形。石墨烯的弛豫时间设置为1ps,温度为 293 K,化学势能范围为0~0.6 eV。

图2描绘了不同化学势能条件下,超单元在0.5~1.5 THz 频段上的反射幅度和反射相位。图2(a)显示,当化学势 能为0 eV时,0.85 THz和1.3 THz附近超单元的反射幅度较 低。这说明超单元在这两个频点上,对电磁波的吸收能力较 强,并产生了谐振。随着化学势能的提高,低频点处的吸收 峰发生蓝移,吸收带宽变窄,吸收峰值变高,高频点处的吸 波峰逐渐消失。超单元的谐振特性会对反射相位特性产生影 响,反射幅度的变化趋势同样体现在反射相位上。由图2(b) 可知,当化学势能为0 eV,反射相位在0.85 THz附近发生接 近 360°的陡峭变化,在1.3 THz附近发生微扰。随着化学势 能的提高,低频点处相位陡峭变化的范围缩小,斜率变大, 并发生蓝移,同时高频处的相位扰动消失。超单元的谐振频 点不断偏移,使得1 THz频点处反射相位经历了接近 360°的 非线性变化。

图3(a)对比了1THz频点处,传统石墨烯条带和本文 提出的集成石墨烯超单元在化学势能0~0.6 eV变化区间归一 化的相位变化特性。传统石墨烯条带的反射相位变化范围为 0°~251°。复合金属谐振器的集成石墨烯超单元的反射相位 变化范围为0°~360°,相位变化范围相较于前者拓宽了 43%。图3(b)和图3(c)展示了石墨烯复合金属超表面 xoz横截面的电场分布,可以看出,相邻的超单元之间产生 了较强的局部电场。图3(d)和图3(e)表明石墨烯条带 超表面的电场主要集中在石墨烯层和地板之间。石墨烯复合 金属超表面中的工字形谐振器引入新的金属谐振模式,拓宽 了超表面反射相位的变化范围。

3 RIS 实现太赫兹波束成形

RIS的总辐射场可以被看作构成它的超单元的辐射场总和。因此,对每个单元的散射特性独立控制,便可以实现对 波束的自由调控,即波束成形。常见超表面波束调控原理包 括异常反射原理、编码超材料原理等。

3.1 太赫兹波近场调控

异常反射原理首先由美国哈佛大学的F. CAPASSO教授团队于2011年在《科学》期刊上提出^[11]。在媒质分界面利



▲图2 超单元反射特性热力图



▲图3 超单元在1 THz 频点的反射相位及电场分布

用金属平面谐振器可实现电磁波的相位跳变,突破传统光学 元件依靠光程差积累逐渐相位变化的设计框架限制。相位的 不连续性为电磁波的波束设计提供了极大的灵活性。在媒质 分界面上引入成线性变化的传播相位,能够实现对电磁波束 前进方向的控制。相位梯度和角度偏转之间存在的对应关系 可以用广义斯涅尔定律来描述:

$$n_r \sin \theta_r - n_i \sin \theta_i = \frac{\lambda_0}{2\pi} \frac{\mathrm{d}\varphi}{\mathrm{d}x}, \qquad (8)$$

其中, θ_i 和 θ_i 分别表示反射角和入射角(与超表面法线方向的夹角), n_i 表示介质的折射率, $d\varphi/dx$ 表示单位长度上反射相位的变化, λ_0 表示工作频率上电磁波对应的真空中的波长。

如果以等相位周期的排布方式形成梯度相位超表面,一 旦周期长度确定,则可以根据公式(9)计算出反射角度。

$$\theta_r = \arcsin\left(\frac{\lambda_0}{L}\right),\tag{9}$$

其中, *L*表示一个反射相位变化周期(360°)对应超单元的 排布长度。在实际过程中, *L*不能小于波长, 否则将会产生 表面波。由于超表面是由具有离散反射相位的超单元构成 的,所以*L* = *np*,其中*p*表示单元的晶格长度, *n*表示一个 反射相位变化周期对应的单元个数。

由公式(9)反推,根据需要的反射角度,可以计算超 单元反射相位梯度(相邻单元反射相位差)。

$$\Delta \varphi = \frac{2\pi p}{\lambda_0} \sin \theta_r \tag{10}$$

例如,在1 THz频点处,当反射波发生10°、20°和30° 的近场波束偏转时,对应的相位梯度可以由公式(10)计算 得出,约为25°、50°、72°。如果沿着 x轴方向,将超材料 子阵顺序标号,根据图2(b)仿真出的化学势能与超单元 反射相位的对应关系,可以得到不同编号子阵对应的需要设 置的化学势能,如图4所示。需要注意的是,图4仅给出一 个反射相位变化周期内超表面子阵的化学势能设置情况。

按照计算得出的化学势能排布顺序可实现 28×28规模的超表面构建。激励设置为沿-z轴方向入射的y方向线极化 平面波,y极化反射电磁波的近场电场瞬时值可通过仿真获 得。图5展示了仿真结果。反射电磁波的等相位面分别发生 9.8°、19.5°和 30.1°的偏转,与理论值相符。反射波之所以 为非均匀平面波,是因为随着化学势能的改变,在反射相位 发生变化的同时,反射幅度也发生了变化。

近场波束偏转可以有效解决非视距通信发生的信号衰减 问题。多个可重构智能超表面相互配合,将使得空间电磁环 境的调控自由度变得更大。

3.2 基于1 bit 编码原理的太赫兹波远场调控

编码超材料的概念由崔铁军院士在2014年首次提出^[12]。 超材料的数字编码表征能有效建立起超材料物理世界和数字 世界之间的桥梁。由于超单元结构的亚波长特性,超材料可 以由连续的等效媒质参数来描述。类比于电路,具有连续媒 质参数的超材料可以称为模拟超材料。模拟超材料的缺点在 于当系统结构变得复杂时,分析和设计难度会变得很大。用 数字编码的思路来表征超材料的电磁特性,和通过改变数字 编码的空间排布来控制电磁波,有利于后续与可编程器件 (例如FPGA)的结合。



司黎明 等



▲图4 不同偏转角度需求下,智能超表面化学势能的设置情况

编码超表面的远场调控原理可以用天线阵列原理来解释。对于垂直入射的平面电磁波,散射场远场函数为:

$$f(\theta,\varphi) = f_e(\theta,\varphi) \sum_{m=1}^{N} \sum_{n=1}^{N} \exp\left\{-i\left\{\psi(m,n) + KD\sin\theta\left[\left(m - \frac{1}{2}\right)\cos\varphi + \left(n - \frac{1}{2}\right)\sin\varphi\right]\right\}\right\},$$
(11)



▲图5 反射电磁波近场电场瞬时值

式中, θ 表示俯仰角, φ 表示方位角, $f_e(\theta,\varphi)$ 表示反射幅度 (假设每个单元的反射幅度相等), $\psi(m,n)$ 表示每个单元的 反射相位,D表示单元间距,K表示相位常数。

反射相位相差为180°的两种超单元(以数字"0"和 "1"表示),通过编码构成阵面。该类超表面被称为1 bit编码 超表面。数字编码0和1排列组合方式有2ⁿ种,理论上可以实 现2ⁿ种散射方向图。这里我们将化学势能分别为0.15 eV和 0.33 eV条件下的本文所设计的超单元映射为数字编码"0" 和"1"。图6展示了1 bit编码超单元的反射特性曲线。其



▲图61bit编码超单元的反射特性

中,1 THz频点处编码0和编码1单元反射相位相差182°,反射幅度接近,分别为0.61和0.6。

4 组 超表面子阵可以组成更大的子阵。对此按照000000、010101和001011的编码方式设置化学势能,并构成24×24规模的超表面。仿真得到1 THz频点超表面的远场散射方向图如图7所示。其中,000000对应的阵面实现了单波束反射,010101对应的阵面实现了双波束反射,001011对应的阵面实现了四波束反射。

基于编码超材料思想的远场波束分裂有利于实现空间维 度上多用户接入。实际实现中,通常提前将不同电磁响应的 编码序列存储于控制单元。通过加载切换序列,可完成多种 不同功能的切换。

4 结束语

本文所设计的集成石墨烯的太赫兹智能超表面具备反射 相位 360°的动态相位调控范围,可以应用于太赫兹波束成 形。利用该特性,本文将该单元应用于梯度相位超表面和



▲图7 编码超表面排布方式及散射远场图

1 bit 编码超表面的设计中。在不同化学势能条件下,梯度相 位超表面对应的反射波的偏转角度动态可调,1 bit 编码超表 面的远场散射方向图可以在单波束、双波束和四波束之间自 由切换。数值仿真与理论计算结果一致性较好,证明了该设 计方案的有效性。集成石墨烯的智能超表面对太赫兹波近场 和远场均具有优异的动态调控性能,是一种有效的太赫兹 RIS构筑方法,有望运用到6G无线通信、太赫兹遥感、空间 态势感等领域。

参考文献

- [1] LIU K X, JIA S, WANG S W, et al. 100 Gbit/s THz photonic wireless transmission in the 350 GHz band with extended reach [J]. IEEE photonics technology letters, 2018, 30(11): 1064–1067. DOI: 10.1109/ LPT.2018.2830342
- [2] LI L L, TIE J C, JI W, et al. Electromagnetic reprogrammable codingmetasurface holograms [J]. Nature communications, 2017, 8: 197. DOI: 10.1038/s41467-017-00164-9
- [3] YANG F Y, PITCHAPPA P, WANG N. Terahertz reconfigurable intelligent surfaces (RISs) for 6G communication links [J]. Micromachines, 2022, 13(2): 285. DOI: 10.3390/mi13020285
- [4] ZHU W R, RUKHLENKO I D, SI L M, et al. Graphene-enabled tunability of optical fishnet metamaterial [J]. Applied physics letters, 2013, 102(12): 121911. DOI: 10.1063/1.4799281
- [5] RYZHII V, OTSUJI T, SHUR M. Graphene based plasma-wave devices for terahertz applications [J]. Applied physics letters, 2020, 116(14): 140501. DOI: 10.1063/1.5140712
- [6] MIAO Z Q, WU Q, LI X, et al. Widely tunable terahertz phase modulation with gate-controlled graphene metasurfaces [J]. Physical review X, 2015, 5 (4): 041027. DOI: 10.1103/physrevx.5.041027
- [7] ZHANG Z, YAN X, LIANG L J, et al. The novel hybrid metal-graphene metasurfaces for broadband focusing and beam-steering in farfield at the terahertz frequencies [J]. Carbon, 2018, 132: 529–538. DOI: 10.1016/j. carbon.2018.02.095
- [8] ZHANG Y, FENG Y J, ZHAO J M. Graphene-enabled tunable multifunctional metamaterial for dynamical polarization manipulation of broadband terahertz wave [J]. Carbon, 2020, 163: 244–252. DOI: 10.1016/j. carbon.2020.03.001
- [9] 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. DOI: 10.1063/1.2891452
- [10] WANG Y, WANG Y, YANG G H, et al. All-solid-state optical phased arrays of mid-infrared based graphene-metal hybrid metasurfaces [J]. Nanomaterials (Basel, Switzerland), 2021, 11(6): 1552. DOI: 10.3390/ nano11061552
- [11] YU N F, GENEVET P, KATS M A, et al. Light propagation with phase discontinuities: generalized laws of reflection and refraction [J]. Science,

2011, 334(6054): 333-337. DOI: 10.1126/science.1210713

[12] CUI T J, QI M Q, WAN X, et al. Coding metamaterials, digital metamaterials and programmable metamaterials [J]. Light: science & applications, 2014, 3(10): e218. DOI: 10.1038/lsa.2014.99



作者简介

司黎明,北京理工大学副教授、博士生导师,集 成电路与电子学院副院长;主要从事电磁场与微 波技术的教学和研究工作,研究领域包括超材料/ 超表面、新型天线技术、太赫兹技术与应用、人 工智能与优化算法、雷达仿真与目标识别等;主 持和参与国家重点基础研究发展计划("973" 计划)、国家高技术研究发展计划、国家自然科

学基金、GF预研及横向科研项目数十项;发表论文80余篇。



汤鹏程,北京理工大学在读博士研究生;主要研 究领域为电磁场与微波技术、超材料技术。



吕昕,北京理工大学教授、博士生导师,中国电 子学会会士,中国电子学会学术委员会委员,中 国电子学会微波分会副主任委员,中国测试计量 学会副主任委员;主要从事电磁场与微波技术的 教学和研究工作,研究领域包括毫米波太赫兹技 术与系统、毫米波太赫兹集成电路、射频微波集 成电路等;主持"高灵敏度毫米波太赫兹波双频 共口径联合相参云雷达仪"等多项重点项目,长

期开展太赫茲器件、太赫茲成像、太赫茲通信系统的研制工作,相 关成果已经成功应用在太赫茲高速通信系统上;发表学术论文100 余篇,拥有多项国家专利。