

引文格式

罗小青, 黄文礼, 王彬旭, 等. 基于石墨烯超表面天线的太赫兹动态相位调控及波束扫描[J]. 集成技术, 2023, (?):??

Citing format

Luo XQ, Huang WL, Wang BX, et.al. Terahertz graphene antennas for dynamic phase modulation and beam steering[J]. Journal of Integration Technology, 2023, (?):??

基于石墨烯超表面天线的太赫兹动态相位调控及波束扫描

罗小青¹, 黄文礼¹, 王彬旭¹, 李光元^{1,*}

¹ (中国科学院深圳先进技术研究院)

摘要: 太赫兹波处于毫米波和红外光之间, 具有诸多优异特性。太赫兹天线是太赫兹通信、雷达和成像等应用系统中的核心元器件。然而, 目前报道的太赫兹天线均无法满足大动态范围的相位扫描、高效率辐射和大偏转角度的需求。本文首先设计了三种太赫兹石墨烯天线, 最小尺寸为 5 微米, 研究了其辐射效率和相位调控特性。进而提出了具有双共振模式的石墨烯-金属太赫兹超表面天线, 缓解了传统的基于单共振模式的相位动态调控范围和辐射效率之间存在的矛盾, 实现了 0~360° 内的动态相位调控, 同时辐射效率高于 60%。采用微加工工艺进行了样品加工, 通过改变栅极电压, 在实验上获得了 1.03 THz 的太赫兹动态相位调控, 同时反射率高于 23%, 与仿真结果基本吻合。在此基础上, 采用连续相位编码方案设计了石墨烯超表面相控阵天线, 在理论上实现了太赫兹波束在 -25°~25° 范围的实时波束偏转。本文为解决超表面相控阵天线的相位动态调控范围小、辐射效率低等难题提供了新的研究思路。

关键词 太赫兹天线; 石墨烯超表面; 相控阵; 相位动态调控; 波束扫描

中图分类号: doi: 10.12146/j.issn.2095-3135.20221122001

Terahertz graphene antennas for dynamic phase modulation and beam steering

LUO Xiaoqing¹, HUANG Wenli¹, WANG Binxu¹, LI Guangyuan^{1,*}

¹ Shenzhen Institute of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences, Shenzhen, 518055, China

来稿日期: yyyy-mm-dd 修回日期: yyyy-mm-dd

基金项目: 深圳市基础研究学科布局项目(JCYJ20180507182444250), 深圳市基础研究面上项目(JCYJ20220531100206014)。

作者简介: 罗小青, 助理研究员, 博士, 研究方向为动态调控超表面器件; 黄文礼, 王彬旭, 硕士研究生, 研究方向为太赫兹石墨烯超表面天线; 李光元(通讯作者), 副研究员, 博士, 研究方向为超高性能的智能光子元器件, E-mail: gy.li@siat.ac.cn。

Corresponding Author: Guangyuan LI, Shenzhen Institute of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences, Shenzhen, 518055, China. Email: gy.li@siat.ac.cn.

Abstract: Terahertz wave is defined as the far-infrared electromagnetic (EM) radiation between 0.1 and 10 THz. It has attracted increasing attention in both fundamental research and technological applications for its unique characteristics. In terahertz telecommunication, radar and imaging systems, terahertz antenna is key for the performance. To date, reported terahertz antennas suffer from limited phase modulation, relatively low efficiency and small beaming angle. Here we address these challenges by first designing three types of terahertz graphene antennas with the smallest size of 5 μm . We then propose a novel type of antenna with dual resonances, and achieve dynamic phase modulation within the full 2π range and meanwhile high efficiency above 20%. This performance surpasses antennas with single resonance since dual resonances alleviate the contradiction between large phase modulation range and high efficiency. We prepared terahertz graphene antennas with standard micro-fabrication processes, and experimentally obtained terahertz dynamic phase modulation of 1.03 THz with reflection efficiency above 23%, which agree with the simulation results. Making use of the phase modulation metasurfaces tuned according to continuous phase coding, we numerically realized terahertz beam steering with dynamic range of $-25^\circ\sim 25^\circ$. We expect this work will provide a strategy for achieving large-range phase modulation and beam steering beyond the terahertz regime.

Key words: terahertz antenna; graphene metasurface; phased array; dynamic phase modulation; beam steering

Funding: This project is supported by the Shenzhen Research Foundation (JCYJ20180507182444250, JCYJ20220531100206014).

1 引言

太赫兹波是指频率在 0.1~10 THz、对应波长在 3 mm~30 μm 范围内的电磁辐射。它介于毫米波与红外光之间,具有传输速率高、容量大、方向性强、安全性高及穿透性好等许多独特的优异性质,在安检反恐、无损检测、小微目标探测、末端制导、烟尘环境探测、生命特征检测、宽带无线通信等领域有着广阔的应用前景[1,2],已成为世界各国前沿研究的热点。太赫兹天线是诸多太赫兹应用系统中的一个核心元器件,要求能够将能量高效率地集中向某个方向辐射,并且进行快速的扫描[3]。然而,在太赫兹成像、雷达和通信系统中,目前所使用的太赫兹天线还主要是喇叭口天线或微带天线,无法满足快速扫描和高效率辐射的需求,极大地限制了这些系统的发展[4]。

近些年来,超表面受到了国内外的广泛关注,在光场调控和局域场增强等方面展现了极大的潜力[5,6]。例如,基于相位调控超表面,研究人员实现了平面透镜和全息显示等光学应用[7,8]。石墨烯作为一种单层碳原子层形成的二维材料,由于具有独特的能带结构、超高的电子迁移率和易于与硅基技术集成,是调制太赫兹波的理想材料。基于石墨烯超表面天线,通过栅极电控或光控方式来改变石墨烯的化学势,可以改变超表面的共振模式,从而实现对太赫兹波相位或波前的动态调控[9,10]。

近年来,国内外研究人员对基于石墨烯超表面天线的太赫兹相位调控和波束扫描进行了大量的研究,并取得了重要进展。目前已得到的实验验证的相位调制超表面的相位范围达不到 360° ,同时辐射效率较低,难以满足实际应用要求[11-22]。例如,人们基于完美吸收原理实现了最大 243° 的动态相位调节,但反射效率只有 5% 左右[11];基于透射峰移动效应,实现了高达 40% 的透射率,但相位的动态调控范围仅有 68° [18]。人们设计了石墨烯微带反射式天线阵列,通过优化使辐射效率从 28% 提高到了 60%[19],并在理论仿真上实现了栅控电压对天线辐射方向的动态改变[20,21];基于完美吸收原理的反射式蝶形天线,实现了高达 180° 的动态相位调控,但反射效率不超过 6%,进而采用 01 编码,实现了反射波束从 -5° 偏转到 18° ,共 23° 角度范围的动态波束偏转[22]。

针对文献中太赫兹石墨烯天线存在的相位动态调控范围与辐射效率之间的矛盾问题,

以及动态波束偏振角度范围小的问题, 本文首先研究了多种石墨烯微带结构超表面天线的辐射和相位调控特性, 进而基于双共振特性设计了一种金属-石墨烯混合超表面天线, 在共振频点附近产生 720° 相位突变, 通过外加背栅压调控石墨烯费米能级, 可以实现 360° 动态范围, 有望解决相位和幅度的解耦难题, 实现高效率、大相位调控范围的太赫兹相控阵天线。然后进行了金属-石墨烯混合超表面天线的微加工和测试, 在实验上实现了 260° 动态相位调制范围, 效率高于 23%。最后, 采用连续相位编码方案, 设计了一种石墨烯相控阵天线。

2 相位超表面结构单元

2.1 石墨烯太赫兹天线

本文共设计了三种石墨烯太赫兹天线, 其中之一是透射式石墨烯天线, 如图 1 所示。石墨烯天线处于折射率为 1.45 的均匀介电环境中, 当石墨烯费米能级 E_F 从 0 增加到 1 eV, 远场辐射特性发生显著变化, 辐射幅度由接近 1 减少到 0.5, 然后增加到 1, 相位变化范围为 $0 \sim 50^\circ$ 。通过外界激励 (栅压或光泵浦等) 改变石墨烯费米能级, 可以实现石墨烯天线辐射特性的动态调控, 本文主要研究辐射电磁波的相位和幅度特性, 如图 1 (b) 所示。

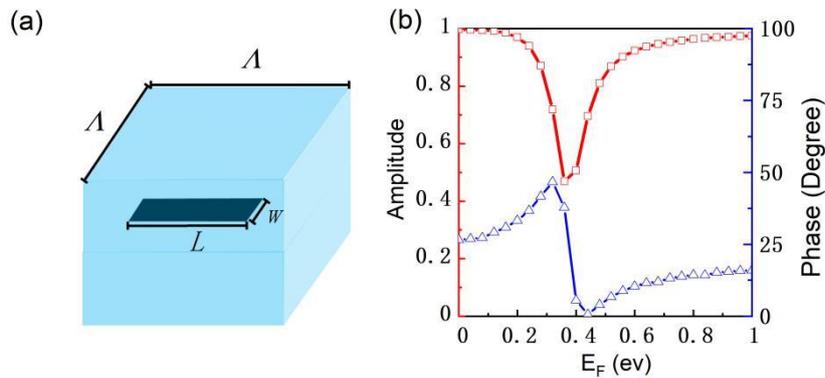


图 1.透射式石墨烯太赫兹天线, (a) 天线结构示意图, 周期 $\Lambda = 30 \mu\text{m}$, 石墨烯长度 $L = 8 \mu\text{m}$, 石墨烯宽度 $W = 5 \mu\text{m}$, 天线位于折射率为 1.45 的均匀介电环境中, (b) 天线的相位和幅度的动态调控特性。

为了增强石墨烯天线的动态调控范围, 本文设计了一种反射式的石墨烯天线如图 2 所示, 其由石墨烯、介质层和金属反射镜三层组成, 其中石墨烯层采用光刻、刻蚀工艺等工艺图形化, 结构参数为: 周期 $\Lambda = 30 \mu\text{m}$, 介质层厚度 $H = 28 \mu\text{m}$, 石墨烯长度 $L = 8 \mu\text{m}$, 石墨烯宽度 $W = 5 \mu\text{m}$ 。通过外界激励 (栅压或光泵浦等) 改变石墨烯费米能级, 可以实现石墨烯天线辐射特性的动态调控, 本文主要研究辐射电磁波的相位和幅度特性, 如图 2 (b) 和 (c) 所示。但 $E_F = 0 \text{ eV}$ 时, 天线辐射谱没有明显波谷, 幅度平坦, 不存在突变相位, 随着 E_F 的增加, 共振峰逐渐增强, 当 $E_F = 0.3 \text{ eV}$, 幅度谱波谷达到最低值 (0.56), 总的来说, 共振峰位随着 E_F 的增加逐渐蓝移。如果把最优工作频率设定在 1.45 THz, 可以得到幅度和相位随 E_F 变化时的变化趋势, 如图 2 (d) 所示。当 E_F 从 0 增加到 1 eV, 石墨烯天线的辐射相位从 0° 连续增加到 270° 左右, 而幅度保持在 58% 以上, 幅度在 $E_F = 0.5 \text{ eV}$ 有一个波谷, 这是由于 F-P 腔共振吸收引起的。接着, 进一步分析了改变介质厚度 H 和石墨烯宽度 W , 如图 2 (e) 和 (f) 所示。当 $H = 24 \mu\text{m}$ 时, 石墨烯天线辐射波的相位变化范围只有 245° , 幅度大于 60%, 幅度波谷右移到 0.6 eV。当 $W = 3 \mu\text{m}$, 石墨烯天线辐射波的相位变化范围达到 280° , 但幅度仅大于 54%。

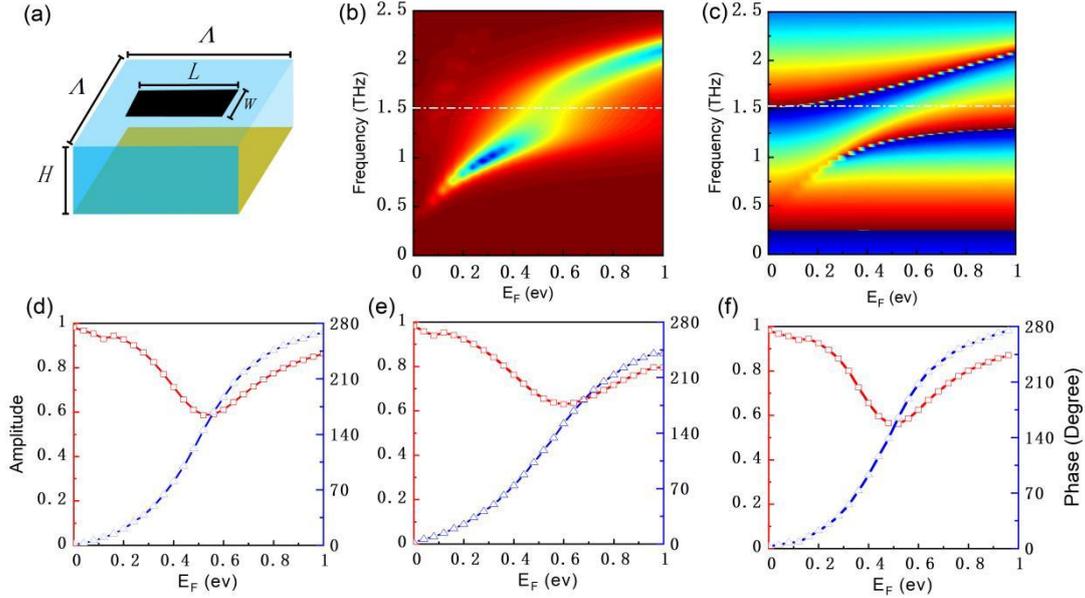


图 2. 石墨烯天线结构与数值仿真研究，(a) 石墨烯天线结构示意图，(b) 石墨烯费米能级为 $0 \sim 1$ eV 时电磁波的相位及 (c) 幅度，白色虚线标注最优的工作频率 1.5 THz，(d) 当石墨烯天线工作在 1.5 THz 时，电磁波的幅度和相位随费米能级的变化趋势，当天线一个结构参数改为 (e) $H = 24 \mu\text{m}$ 或 (f) $W = 3 \mu\text{m}$ 时电磁波的幅度和相位随费米能级的变化趋势。

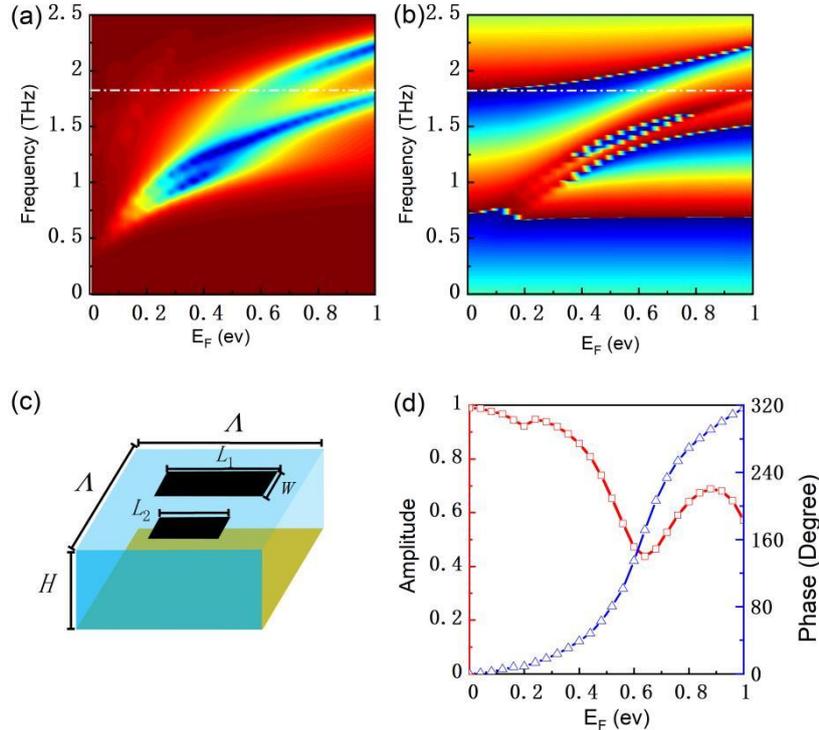


图 3. 双石墨烯条反射式太赫兹天线，(a) 石墨烯费米能级为 $0 \sim 1$ eV 时电磁波的相位及 (b) 幅度，白色虚线标注最优的工作频率 1.8 THz，(c) 石墨烯天线结构示意图，(d) 当石墨烯天线工作在 1.8 THz 时，电磁波的幅度和相位随费米能级的变化趋势。

为了进一步增加相位调控范围，突破单条石墨烯相位调控范围的极限，本文设计了一种双条石墨烯太赫兹天线，如图 3 所示。结构参数为：周期 $A = 30 \mu\text{m}$ ，介质层厚度 $H = 28 \mu\text{m}$ ，石墨烯长度 $L_1 = 20 \mu\text{m}$ ， $L_2 = 28 \mu\text{m}$ ，石墨烯宽度 $W = 5 \mu\text{m}$ 。当 E_F 为 $0 \sim 0.5$ eV 时，天线存

在一个谐振峰，当 E_F 逐渐增加时，谐振峰蓝移，当 E_F 为 $0.5 \sim 1$ eV 时，谐振峰由一个劈裂成两个，两个谐振峰的线宽大致相等，并随着 E_F 的增加继续蓝移，如图 3 (a) 所示。图 3 (b) 给出了谐振点的相位变化情况，在双谐振峰位置具有更大的相位突变。具有最大动态相位调控范围的频率工作点为 $f = 1.8$ THz，相位调控范围高达 320° ，比一个谐振点的石墨烯天线具有更大的相位调控范围，但是幅度随 E_F 改变波动很大，最小幅值低至 0.42 ，如图 3 (d) 所示。尽管双共振石墨烯天线具有更大的相位范围，但是幅度波动更大。纯石墨烯的天线对电磁波的调控特性仍然有限，很难真正对两个共振峰进行自由地设计，因此相位仍然达不到 360° 且幅度也很难保持均匀。

总的来说，纯石墨烯天线对电磁波的调控特性有限，单共振石墨烯天线的动态相位的极限远小于 360° ，同时由于相位和幅度的一一关联的，很难对调控效率以及幅度的均匀性进行进一步的优化。而双共振的石墨烯天线对电磁波的调控，双共振的独立设计受限，从而无法解决幅度大则相位小、相位大则幅度小的内在矛盾，难以实现高效率的 360° 相位的动态调控，大大地限制其在相关领域的应用，例如波束调控、相控阵雷达等。

2.2 金属/石墨烯开口圆太赫兹天线

为了解决幅度和相位完全耦合问题，从而实现高效率的全相位范围的太赫兹天线，本文提出了一种半解耦思路，即基于石墨烯-金属混合超表面的具有双共振模式的太赫兹天线，其一双共振模式可以覆盖更大的相位，其二通过优化两个共振的相对频率位置，可以同时兼顾大相位和高幅度。

如图 4 所示，金属开口圆-石墨烯微带天线由三层结构组成，顶层金属-石墨烯微结构层、介质层以及金属反射镜，中间介质层起着绝缘层和纵向 F-P 共振层的作用。具体参数为：单元结构的周期 $p_x = p_y = 210 \mu\text{m}$ ，两条平行的金属栅极宽度 $W_s = 5 \mu\text{m}$ ，且间隔距离 $W_y = 190 \mu\text{m}$ ，扇形结构 $R = 75 \mu\text{m}$ ，扇形左右间隔距离 $W_b = 4 \mu\text{m}$ ，上下间距 $g = 14 \mu\text{m}$ ，连接金属扇形与两条栅极的石墨烯的宽度 $W_x = 8 \mu\text{m}$ ，长度 $W_y = 190 \mu\text{m}$ ，所有的金厚度 $t_M = 200 \text{nm}$ ，厚度为 $t = 36 \mu\text{m}$ 。

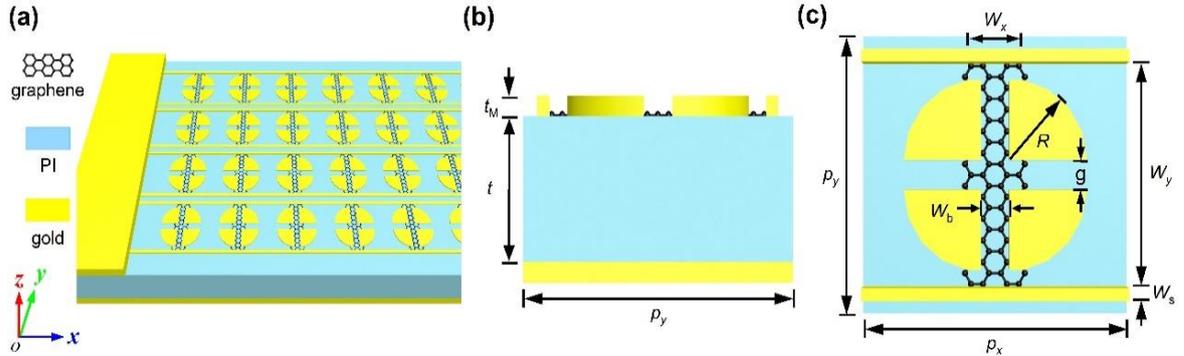


图 4. 金属开口圆/石墨烯微带超表面结构图。

这种结构具有双共振特性，可以引起 720° 的突变相位，因此通过改变石墨烯的费米能级，可以实现 360° 的动态相位调控。图 4 (a) 为石墨烯 $E_F = 0$ eV 时的幅度谱，可以看到具有两个共振峰分别在 $f_1 = 1.159$ 和 $f_2 = 1.23$ THz，其中第一个共振峰的波谷较深而第二个共振峰波谷较浅，对应的共振电场分布如图 5 (b) 和 (c) 所示，第一个共振峰对应的电场较强。由于每组金属半圆对可以形成一个共振天线结构，而结构由两组完全相同的金属半圆对构成，而可以预期，这两组金属半圆对靠近后，这两个在相同频率 f_0 处共振的模式会进一步发生近场耦合，劈裂为上述两个不同频率处的共振峰（如图 5 (d) 所示）。因此，在频率 f_0 ($f_1 < f_0 < f_2$) 附近，有望利用双共振来实现幅度和相位的解耦。

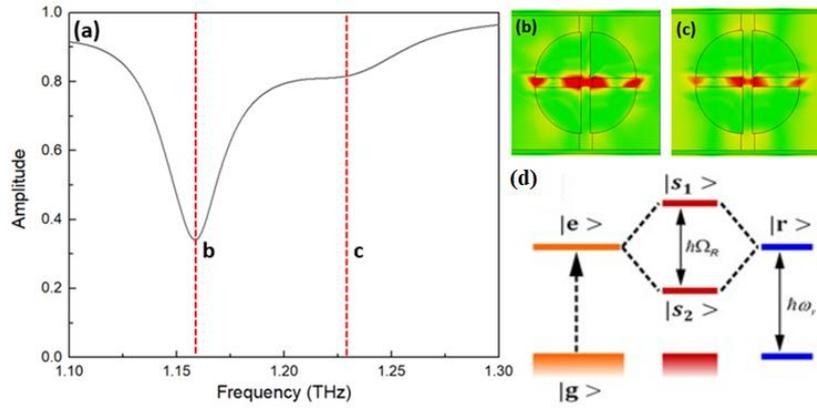


图 5. 开口圆/石墨烯微带超表面的双共振特性，（a）开口圆/石墨烯微带超表面的反射谱，（b）和（c）共振频点的电场图，（d）近场耦合劈裂产生的双共振峰的原理示意图。

然后扫描石墨烯 E_F ，研究双共振金属-石墨烯混合超表面天线的工作特性的变化趋势，仿真结果如图 6 所示。当石墨烯费米能级 $E_F \leq 0.3$ eV 时，存在两个一高一低的共振低谷，当 E_F 更大时，位于低频的共振低谷消失不见，只在高频存在另一段共振低谷。两个共振低谷的频率也均随着石墨烯费米能级的增加而蓝移，其中位于低频的共振低谷从 1.085 THz 逐渐蓝移到 1.106 THz 并最终消失，位于高频的共振低谷从 1.135 THz 逐渐蓝移到 1.1877 THz 并更为明显（反射振幅低谷变得更小）；同样的，通过外加电压调节结构表面石墨烯的费米能级可以对该结构的共振特性进行调制。在低频范围内（1.085 THz 到 1.106 THz），石墨烯 E_F 所对应的相位中最大经历了 100° 的相移，不同 E_F 之间最大的相位差也达到了 100° ；在高频范围内（1.135 THz 到 1.1877 THz），石墨烯 E_F 对应的相位中最大的相移达到了 200° ，不同 E_F 之间最大的相位差则达到了 350° 。在 1.15 THz 处，当石墨烯的费米能级从 0 eV 增加到 1.1 eV 时，相应的反射幅度也都在 0.57（对应的效率为 $0.57 \times 0.57 \times 100\% = 32.5\%$ ）以上，相位动态连续变化达到了 360° 。与之对应的因为有金反射镜的存在，所以不存在透射，故剩余的能量（少于 68%）被超构表面所吸收，如图 7 所示。

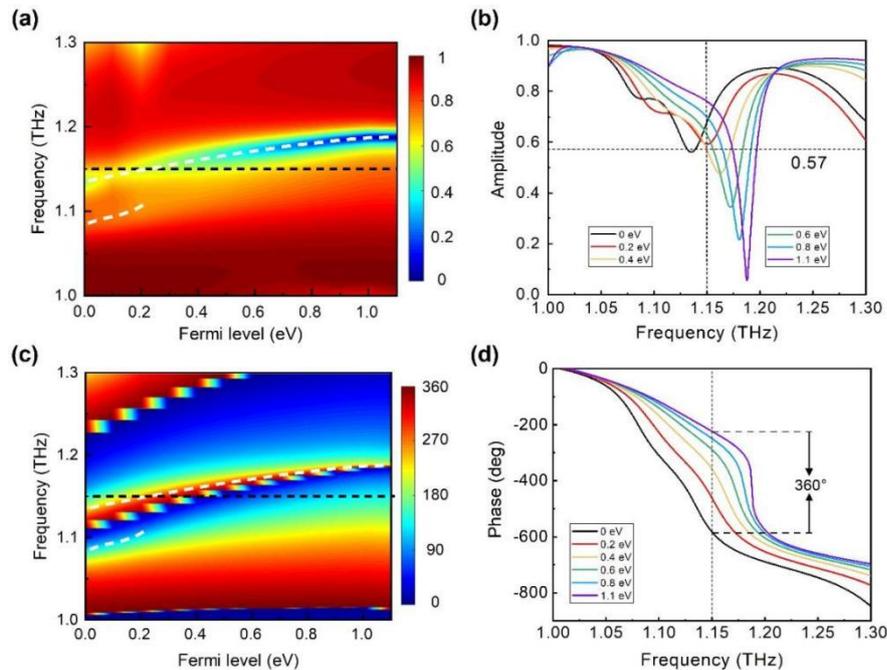


图 6. 所设计的金属开口圆/石墨烯微带超构材料的反射幅度谱（a）（b）和相位谱（c）（d）随着石墨烯费米能级的变化图。

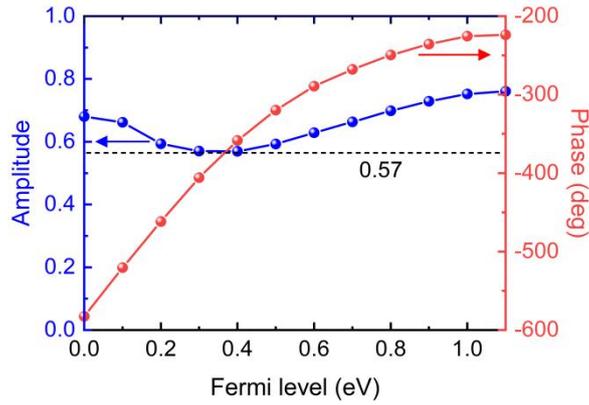


图 7. 1.15 THz 处振幅和相位随石墨烯费米能级变化图。

可以看到，当 $E_F = 0.2 \text{ eV}$ 时，1.1 THz 处的表面电流主要分布在水平栅极和扇形的水平边与弧形边上，如图 8(a) 所示；1.15 THz 处的表面电流则主要分布在水平栅极和整个扇形面上，如图 8(b) 所示。当 $E_F = 0.6 \text{ eV}$ 时，1.118 THz 处的表面电流主要分布在水平栅极和扇形弧形边上，此时对应的共振已几乎消失，双共振变为单共振，如图 8(c) 所示。1.1675 THz 处的表面电流也主要分布在水平栅极和整个扇形面上，如图 8(d) 所示。对比这两次不同费米能级在共振低谷时的表面电流可以发现：低频的共振低谷随着费米能级的增加，开始消失；高频的共振低谷随着费米能级的增加则逐渐增强；由此可以推定低频的共振对相位的调制能力较弱，高频的较强，与上述分析的对相位的调控性能一致。通过设计两组相同且相近的微天线结构，并使之发生近场耦合，形成一强一弱两个共振，可以实现幅度和相位解耦，从而同时获得了大的相位动态调控范围 ($>180^\circ$) 和高的光学效率 ($>20\%$)。

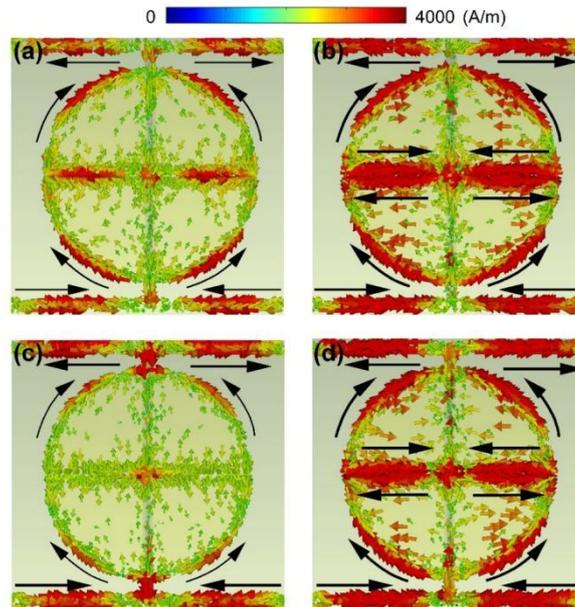


图 8. $E_F = 0.2 \text{ eV}$ 时, 1.1 THz (a) 和 1.15 THz (b) 下的电流分布图, $E_F = 0.5 \text{ eV}$ 时, 1.118 THz (c) 和 1.1675 THz (d) 下的电流分布图。

以上天线的理论和仿真研究表面，基于 F-P 腔的天线比透射式的天线具有更大的相位调控范围，采用双共振天线（即双石墨烯天线或双石墨烯-金属天线）可以实现完美的 360° 的相位动态调控范围，同时保持较高的调控效率。尽管石墨烯天线已经有非常好的效果，但

不利于设计单元可以独立调控的阵列天线，因此此部分研究了石墨烯-金属混合天线，利用金属电极可以对阵列单元进行独立的调控，为实现相控阵天线奠定基础。

2.3 器件加工与实验验证

2.3.1 基于 SOI 晶片的加工方法（PDMS 作为介质层的加工方法）

SOI 晶片由底层硅、氧化硅、顶层高阻硅构成，顶层硅的厚度可达 $50\ \mu\text{m}$ ，相比化学沉积生长的硅具有更好的结晶特性，满足太赫兹频段 F-P 腔介质厚度。本文金属-石墨烯超表面天线的具体加工流程如图 9 所示。以 SOI 片为基片，首先在顶层硅镀一层银和铝金属作为反射镜，然后顶层与硅片衬底键合作为支撑衬底，接着采用研磨、ICP 刻蚀以及湿法刻蚀等工艺去除掉 SOI 的两层，采用原子层沉积 ALD 生长一层高质量三氧化二铝作为栅极绝缘层，至此得到了超表面的 F-P 腔结构。然后在 F-P 腔上制作电极、转移石墨烯、图形化石墨烯和金属结构，最后采用激光刻蚀技术打孔引出背栅电极，完成整个电路系统制作。但是这种加工方法存在 SOI 晶片价格昂贵、工艺流程复杂等不足，因此进一步开发基于 PDMS 有机材料作为介质层的加工方法。

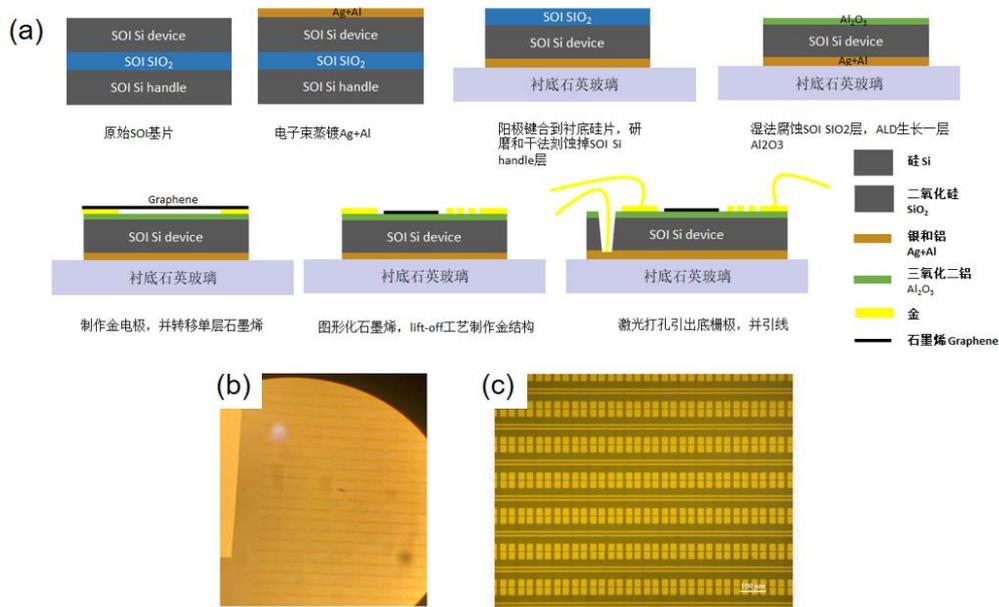


图 9. (a) 金属-石墨烯超表面器件加工流程示意图，(b) 和 (c) 加工样品显微镜图。

2.3.2 PI 作为介质层的器件加工制作与实验测量

基于 PI 介质层的石墨烯-金属混合超构表面的微纳加工流程，首先在扇形硬质衬底（四分之一四英寸片，本实验选择高阻硅）上镀一层金作为反射镜，然后在金镜上面通过旋涂法制作一层 PI 薄膜，并加热固化，接着采用湿法转移 $2\times 2\ \text{cm}$ 单层石墨烯，紫外光刻和 RIE 刻蚀对石墨烯进行图形化，然后采用 lift-off 工艺制作超构表面结构，最后制作引线电极。考虑到降低实验的加工难度，本文采用了矩形结构的金属-石墨烯天线设计，如图 10 所示。

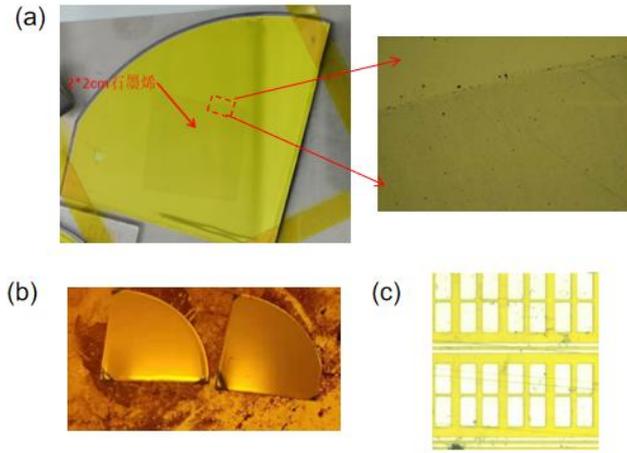


图 10. 以 PI 作为介质层的加工方法，（a）PDMS 介质层上面转移单层石墨烯，（b）在金薄膜上制作 $36\pm 4\ \mu\text{m}$ 厚度的 PI 层，（c）加工完成的石墨烯-金属混合超表面太赫兹天线

本文采用反射式太赫兹时域光谱（THz-TDS）系统对器件进行表征其相位动态调控特性，如图 11（a）所示。

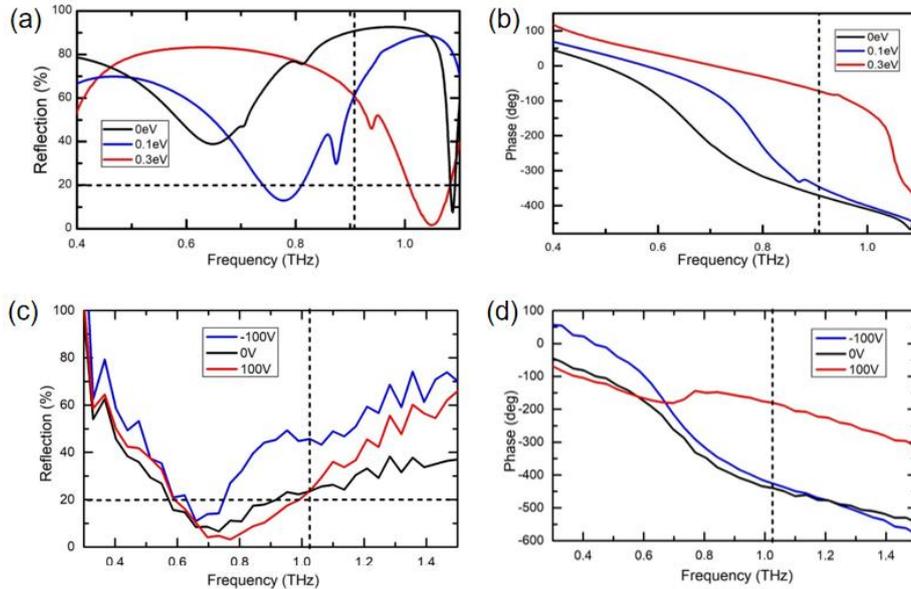


图 11. 基于 THz-TDS 系统的太赫兹相位调制天线的实验测量幅度（a）和相位（c），以及仿真结果的幅度（b）和相位（d）。

由反射率谱可见，通过除以参考样品的频谱，水汽吸收的影响被极大减弱。石墨烯超构材料在加压 -100V、0V 和 100V 时的反射谷分别位于 0.66 THz, 0.73 THz 和 0.77 THz 处。在低于 0.7 THz 的低频段，三种电压下石墨烯超构材料的相位差别较小；而在高于 0.8 THz 的高频段，石墨烯超构材料在加压 0 V 和 100 V 的相位差高达 190° 以上，而在加压 0 V 和 100 V 的相位差很小。特别地，我们发现在 1.03 THz 处，黑色曲线（0 V）和红色曲线（100 V）重叠，反射率达到 23.9%。相应的，反射相位的差别高达 260° 。这意味着，所制备的石墨烯超构材料在 1.03 THz 频率处，通过调节栅极电压在 0 V 和 100 V 之间变化，在实验上可以获得高达 23.9% 的反射率，同时相位调控范围高达 260° 。仿真与实验的误差主要来自于背栅极的加压方式受到衬底厚度的影响，实验中采用的衬底厚度达到 $36\ \mu\text{m}$ ，石墨烯上的栅压远低于实际所加的电压，为了降低衬底厚度对栅压的影响，后续将采用基

于 SOI 基片的器件设计，提高器件的栅控能力。

3 基于准连续编码的太赫兹波束扫描研究

3.1 离散编码与准连续编码性能对比

相控阵天线设计中的阵列因子 (Array Factor, AF) 可用于计算天线的辐射方向图，超结构单元一维均匀排列，并近似为偶极子阵列，并假定每个单元具有相同的辐射特性，其 AF 可以表示为，

$$AF = \sum_{n=1}^N e^{j(n-1)(kd \cos \theta + \beta)}$$

其中 k 是波矢， d 是相邻单元的间距， θ 是波束出射方向， β 是相邻单元的相位差。相位差 β 为 $0 \sim 180^\circ$ 时反射光束的偏转角。最大辐射方向满足，其中 $m = 0, \pm 1, \dots$ ，分别对应不同衍射级。采用连续编码方案，如图 12 (a) 所示，对应不同的相位采样间隔 β ，可以计算不同方位角的辐射强度。当相位采样间隔 β 从零慢慢增加 150° 时，辐射强度最大波束方向从零慢慢增加到 40° ，且仅有一个偏转方向。随着 β 继续增加，出现两个辐射最强方向，且两个方向正负相反，这意味着此时的工作效率大大降低。如果相位调制器单元的相移范围大于 180° 而远小于 360° ，则只能采用 0 (相位为 0°) 和 1 (相位为 180°) 编码 (如图 13 所示)，实验已验证可以实现太赫兹波束的离散偏转调控，也可以实现可调波束分束和偏振转换等功能。通过对比可以看到，准连续编码具有更高的偏束性能：高偏转效率，低衍射杂波干扰，连续偏转角。如果相位范围达不到 360° ，而采用准连续编码，偏转角与相位差呈现无规律的关系，偏转效率低且波动很大，如图 12 (c) 和 (d) 所示。因此为实现高效率高分辨的光束偏转，采用基于 360° 相位范围的准连续编码是可行而且必要的。

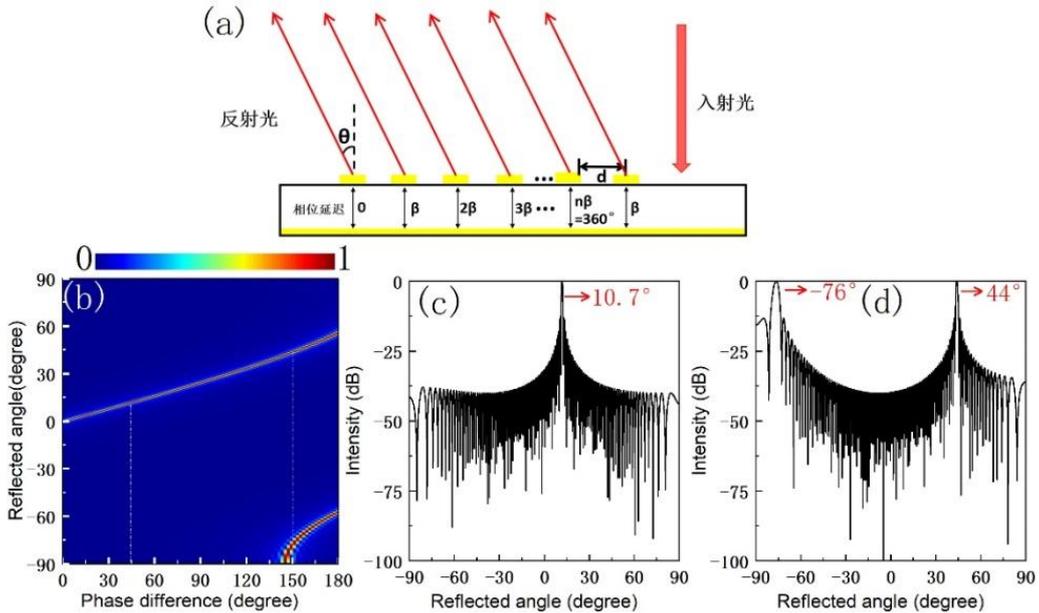


图 12. 准连续扫描编码示意图以及计算得到的光束偏折角 (频率 $f=1\text{THz}$, 间距 $d=200\ \mu\text{m}$)，(a) 等间隔相位差编码，(b) 相邻单元相位差分别为 $0 \sim 180^\circ$ 编码时计算得到的反射光束的偏转角，(c) 和 (d) 分别是相位差为 44° 和 150° 时不同方向的强度。

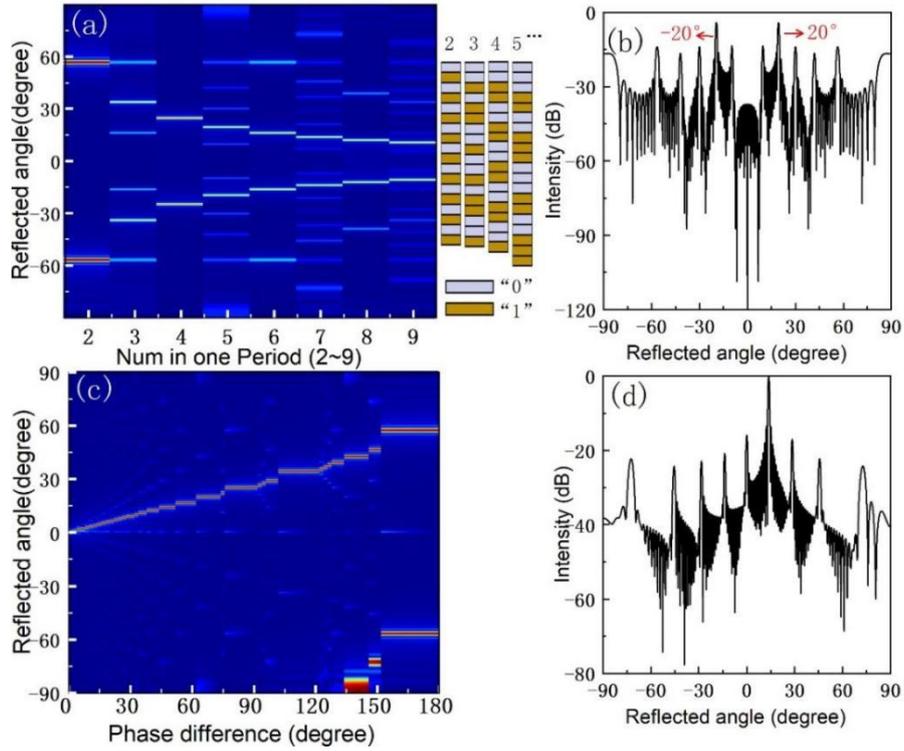


图 13. 采用其他编码模式的计算结果，（a）采用 0 和 1 编码，反射光束偏转角与编码周期的关系，（b）编码周期为 5 时不同方向的光强，（c）相位范围只有 300° 时采用连续编码，不同相位差时的光束偏转角，（d）相位差为 44° 时不同方向光强。

3.2 太赫兹波束动态调控仿真研究

采用双共振超表面天线能够实现 360° 全相位动态调控，在 2.2 节设计的石墨烯-金属混合天线的基础上，根据连续相位编码方案设计了太赫兹动态波束调控相控阵天线。相控阵列由超构表面沿着 Y 轴的 N 行子阵列组成，每个子阵列的单元都可以通过栅极电压 V_i , $i = 1, 2, 3, \dots$ 来动态调节石墨烯的费米能级从而达到调控子阵列的反射波特性的目的。为了验证超构表面相控阵调控性能，我们设计了 THz 垂直入射时的三个偏转角： $\theta = -6^\circ, -12^\circ, -25^\circ$ （若想 θ 为正，只需反转每个单元的相位）。两个相邻单位单元之间的距离均为 $\Delta y = P = 210 \mu\text{m}$ 。相邻单位单元之间对应的相位差应分别为 $\Delta\phi = \pi/6, \pi/3$ 和 $2\pi/3$ 。因此，每个子阵列中单位单元的理论数量分别为 $N = 12, 6$ 和 3 。

图 14 是设计的不同偏转角度的相控阵天线的仿真研究结果。从电场近场分布可以看到，垂直入射的太赫兹波的波前平行于 y 轴，经过天线调制之后波前是与 y 轴呈一定夹角的斜线，意味着光束的波矢方向发生了偏折，分别与 y 轴呈 $-6^\circ, -12^\circ, -25^\circ$ 夹角，如图 14 (a) ~ (c) 所示。当角度偏折方向较小时 (-6°)，光场分布均匀，波前清晰平行，意味着器件的性能优异，当角度偏折方向较大时 (-25°)，光场分布有较大起伏，波前弯曲，意味着光束调控方向不是很理想。图 14 (d) ~ (f) 给出了相应的远场辐射方向图，进一步定量地分析相控阵的偏束性能。当偏折角为 -6° 时，最大辐射方向远大于其他方向的辐射强度 ($>10 \text{ dB}$)，只存在一个最大辐射方向，偏折角度增加到 -12° 时，出现了较多 -10 dB 的旁瓣，而当偏折角达到 -25° 时，存在一个很强的相反角度的旁瓣，仅比设计的主瓣小 2 dB 。

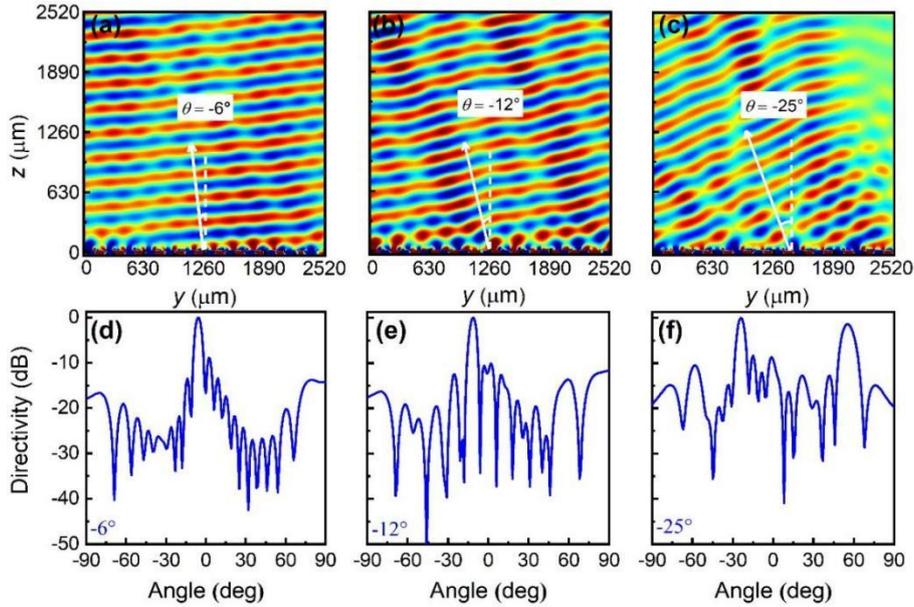


图 14. $\theta = -6^\circ$ 、 -12° 、 -25° 时, (a-c) 近场的分布, (d-f) 远场辐射方向图[23]。

表 1 波束动态扫描超表面的编码方式的研究动态

调控材料	编码方式	最大偏束角	扫描角度	偏转效率	特征尺寸 L/λ
石墨烯[13]	69 级编码	30°	准连续	23%	0.64
ITO[12]	0、1 编码	75°	离散	较低	1.03
变容二极管[19]	3、4、6 级编码	43°	离散	中等	1.44
石墨烯[16]	0、1 编码	50°	离散	中等	1.3
石墨烯[17]	准连续编码	60°	准连续	较高	1.2
石墨烯[15]	0、1 编码	60°	离散	较低	1.1

表 1 列出了目前的基于相位调控超表面的偏束调控方案。目前实验报道的石墨烯-金属超表面的相位范围都没达到 360° , 因此大部分都采用 0、1 编码方式。研究人员在相位范围只有 237° 基础上采用 69 级准连续编码, 实现了分辨率高于 2° 的波束动态扫描, 然而与理想的 360° 相位调控相比偏转效率从 30% 降为 23%, 且随偏转角波动非常大, 会引入杂波衍射噪声并大大地降低系统的信噪比。当相位范围低于 200° 时, 旁瓣的辐射能量将会超过主瓣方向的能量。因此, 本文所提出的方案同比具有更优越的调控性能。

4 结论

本文研究了具有动态相位调控功能的石墨烯太赫兹天线, 实现了 360° 内任意相位的调控, 仿真效率高于 60%, 并基于这种全相位天线设计了一种基于连续相位编码的太赫兹波束扫描相控阵天线, 结果优于基于 180° 的二进制编码波束扫描相控阵。首先研究了三种纯石墨烯太赫兹天线, 这类天线无法实现 360° 相位调制, 无法对幅度和相位进行独立调控, 存在幅度小、波动大等难题。接着本文提出了双共振型金属-石墨烯混合超表面太赫兹天线, 实现了幅度和相位的部分解耦, 在实现 360° 相位调控的同时幅度高于 60% 且波动较小。最后仿真研究了连续相位编码方案实现太赫兹波束扫描, 当偏转角度较小时 ($<12^\circ$) 旁瓣小于 10dB。本文的研究工作有望应用在高性能的太赫兹偏束相控阵天线, 推动超表面在太赫兹科技领域的应用。

参考文献

- [1] Tonouchi M. Cutting-edge terahertz technology [J]. *Nature Photonics*, 2007, 1(1): 97-105.
- [2] Federici J, Lothar Moeller L. Review of terahertz and subterahertz wireless communications [J]. *Journal of Applied Physics*, 2010, 107: 111101.
- [3] He Y, Chen Y, Zhang L, Wong S-W, Chen ZN. An overview of terahertz antennas [J]. *China Communication*, 2020, 17(7): 124-165.
- [4] 王宏强,邓彬,秦玉亮, 太赫兹雷达技术 [J]. *雷达学报*, 2018, 7(1): 1-21.
Wang HQ, Deng B, Qin YL. Review of Terahertz Radar Technology [J]. *Journal of Radars*, 2018, 7(1): 1-21.
- [5] Hsiao H-H, Chu CH, Tsai DP. Fundamentals and Applications of Metasurfaces [J]. *Small Methods*, 2017, 1(4): 1600064.
- [6] Quevedo-Teruel O, Chen H, Díaz-Rubio A, et al. Roadmap on metasurfaces [J]. *Journal Optics*, 2019, 21: 073002.
- [7] Li X, Ma X, Luo X. Principles and applications of metasurfaces with phase modulation [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2017, 44(3): 255-275.
- [8] He J, Dong T, Chi B, Zhang Y. Metasurfaces for Terahertz Wavefront Modulation: a Review [J]. *J. Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 2020, 41: 607–631.
- [9] Hashemi MR, Cakmakyapan S, Jarrahi M. Reconfigurable metamaterials for terahertz wave manipulation [J]. *Reports On Progress In Physics*, 2017, 80: 094501.
- [10] He Q, Sun S, Zhou L. Tunable/Reconfigurable Metasurfaces: Physics and Applications [J]. *Research*, 2019: 1849272.
- [11] Miao Z, Wu Q, Li X, He Q, Ding K, An Z, Zhang Y, and Zhou L. Widely tunable terahertz phase modulation with gate-controlled graphene metasurfaces [J]. *Physics Review X*, 2015, 5(4):041027.
- [12] Yao-Wei Huang, Ho Wai Howard Lee, Ruzan Sokhoyan, Ragip A. Pala, Krishnan Thyagarajan, Seunghoon Han, Din Ping Tsai, and Harry A. Atwater. Gate-Tunable Conducting Oxide Metasurfaces. *Nano Letters*, 2016, 16, 5319–5325.
- [13] Michelle C. Sherrott, Orcid, Philip W. C. Hon, Katherine T. Fountaine, Juan C. Garcia, Samuel M. Ponti, Victor W. Brar, Luke A. Sweatlock, and Harry A. Atwater. Experimental Demonstration of $>230^\circ$ Phase Modulation in Gate-Tunable Graphene–Gold Reconfigurable Mid-Infrared Metasurfaces. *Nano Letters*, 2017, 17, 3027–3034.
- [14] Yuze Hu, Tian Jiang, Junhu Zhou, Hao Hao, Hao Sun, Hao Ouyang, Mingyu Tong, Yuxiang Tang, Han Li, Jie You, Xin Zheng, Zhongjie Xu and Xiangai Cheng. Ultrafast Terahertz Frequency and Phase Tuning By all Optical Molecularization of Metasurfaces. *Advanced Optics Materials*, 2019, 18, 1901050.
- [15] Hao Chen, Wei-Bing Lu, Zhen-Guo Liu, and Ming-Yang Geng. Microwave Programmable Graphene Metasurface. *ACS Photonics*, 2020, 7, 1425-1435.
- [16] N Kakenov, M S Ergoktas, O Balci and C Kocabas. Graphene based terahertz phase modulators. *2D Materials*, 2018, 5, 035018.
- [17] Liming Liu, Yair Zarate, and Haroldo T. Hattori. Dynamic Terahertz Beam Steering Based on Graphene Metasurfaces. *arXiv preprint*, 2015, 1512-05425.
- [18] Jung H, Koo J, Heo E, et al. Electrically Controllable Molecularization of terahertz

meta-atoms [J]. *Advanced Materials*, 2018, 30:1802760.

[19] Hum SV and Perruisseau-Carrier J. Reconfigurable reflectarrays and array lenses for dynamic antenna beam control: A review [J]. *IEEE Transactions On Antennas And Propagation*, 2014, 62(1):183-198.

[20] Huang Y, Wu LS, Tang M, Mao J. Design of a beam reconfigurable THz antenna with graphene-based switchable high-impedance surface [J]. *IEEE Transactions On Nanotechnology*, 2012, 11(4):836–842.

[21] Liang F, Yang ZZ, Xie YX, Li H, Zhao D, Wang BZ. Beam-scanning microstrip quasi-Yagi-Uda antenna based on hybrid metal-graphene materials [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2018, 30(12):1127-1130.

[22] Tamagnone M, Capdevila S, Lombardo A, et al. Graphene reflectarray metasurface for terahertz beam steering and phase modulation [J]. *arXiv preprint*, 2018, 1806-02202.

[23] Wang BX, Luo XQ, Lu YL, Li GY, Full 360° Terahertz Dynamic Phase Modulation Based on Doubly Resonant Graphene-Metal Hybrid Metasurfaces [J]. *Nanomaterials*, 2021, 11:3157.