第 12 卷 第 4 期
2023 年 7 月

集 成 技 术
JOURNAL OF INTEGRATION TECHNOLOGY

Vol. 12 No. 4
Jul. 2023

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, 12(4): 77-90.
Luo XQ, Huang WL, Wang BX, et al. Terahertz graphene metasurfaces antennas for dynamic phase modulation and beam steering [J]. Journal of Integration Technology, 2023, 12(4): 77-90.

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 黄文礼 王彬旭 李光元*

（中国科学院深圳先进技术研究院 深圳 518055）

摘 要 太赫兹波频段介于毫米波和红外光之间，具有诸多优异特性，太赫兹天线更是太赫兹通信、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较大动态范围的相位扫描、高效率辐射和大偏转角度的需求。该文设计了 3 种石墨烯太赫兹天线，最小尺寸为 5 μm，并对其辐射效率和相位调控特性进行研究，进而提出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的矛盾，实现了 0～360°的动态相位调控，且辐射效率高于 20%。该研究采用微加工工艺进行样品加工，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，反射率高于 23%，与仿真结果基本吻合。在此基础上，该文基于连续相位编码设计了石墨烯超表面相控阵天线，理论上实现了太赫兹波束在－25°～25°范围内的实时波束偏转。该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 O 43 **文献标志码** A doi: 10.12146/j.issn.2095-3135.20221122001

Terahertz Graphene Metasurfaces Antennas for Dynamic Phase Modulation and Beam Steering

LUO Xiaoqing HUANG Wenli WANG Binxu LI Guangyuan*

(*Shenzhen Institute of Advanced Technology*, *Chinese Academy of Sciences*, *Shenzhen* 518055, *China*)
**Corresponding Author*: *gy.li@siat.ac.cn*

Abstract Terahertz wave is the electromagnetic field with frequencies between that of infrared and millimeter

收稿日期：2022-11-22 修回日期：2023-05-12
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，硕士研究生，研究方向为太赫兹石墨烯超表面天线；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。

waves. 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 these challenges are addressed by first designing three types of terahertz graphene antennas with the smallest size of 5 μm. Then a novel type of antenna with dual resonances is proposed, 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. Terahertz graphene antennas are fabricated with standard micro-fabrication processes, and experimentally obtained terahertz dynamic phase modulation of 1.03 THz with reflection efficiency above 23%, which agree basically with simulation results. Making use of the phase modulation metasurfaces tuned according to continuous phase coding, terahertz beam steering is numerically realized with dynamic range of −25°～25°. This work will provide a strategy for achieving large-range phase modulation and beam steering beyond the terahertz regime..

Keywords terahertz antenna; graphene metasurface; phased array; dynamic phase modulation; beam steering
Funding This work is supported by Shenzhen Research Foundation for Basic Research (JCYJ20180507182444250, JCYJ20220531100206014)

1 引 言

太赫兹波指频率在 0.1～10 THz，对应波长在 3 mm～30 μm 范围的电磁辐射。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。太赫兹天线是太赫兹应用系统中的核心元器件，可将能量高效率地集中向某个方向辐射，并进行快速扫描[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主要是喇叭口天线或微带天线，无法满足高效率快速扫描的需求，极大地限制了这些系统的发展[4]。

近年来，超表面受到国内外广泛关注，在光场调控和局域场增强等方面展现出极大潜力[5-6]。如基于相位调控超表面，研究人员已实现平面透镜、全息显示等领域的应用[7-8]。石墨烯作为一种由单层碳原子层形成的二维材料，具有独特的能带结构和超高的电子迁移率，以及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改变石墨烯的化学势，可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研究，并取得了重要进展[11-16]。目前，已得到实验验证的相位调控超表面的范围小于 360°，且辐射效率较低，难以满足实际应用要求[17-22]。例如：Huang 等[11]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；Jung 等[18]基于透射峰移动效应，实现了高达 40%的透射率，但相位的动态调控最大仅有 68°。人们设计的石墨烯微带反射式天线阵列，

使辐射效率从 28%提高至 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 0、1 编码，实现了反射波束从−5°偏转至 18°，共 23°的动态波束偏转[22]。

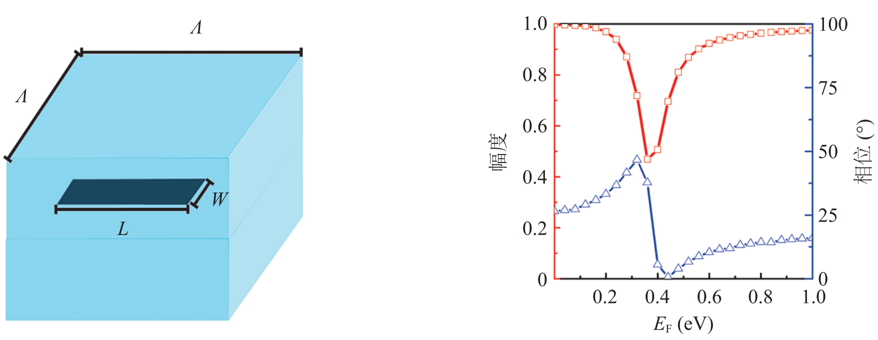
针对石墨烯太赫兹天线相位动态调控范围与辐射效率之间的矛盾问题，以及动态波束偏振角度范围小的难题，本文首先研究了多种石墨烯微带结构超表面天线的辐射和相位调控特性，进而基于双共振特性设计了一种金属-石墨烯混合超表面天线，在共振频点附近产生 720°相位突变，通过外加背栅压调控石墨烯费米能级，可实现 360°动态范围，有望解决相位和幅度的解耦难题，实现高效率、大相位调控范围的太赫兹相控阵天线；然后，进行了金属-石墨烯混合超表面天线的微加工和测试，在实验上实现了 260°动态相位调控范围，效率高于 23%；最后，采用连续相位编码方案，设计了一种石墨烯相控阵天线。

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 3 种石墨烯太赫兹天线，其一是透射式石墨烯太赫兹天线，如图 1 所示，周期 Λ＝30 μm，石墨烯长度 L＝8 μm，石墨烯宽度 W＝5 μm。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 eV 增加到 1 eV 时，远场辐射特性发生显著变化，辐射幅度由接近 1 减少至 0.5，然后增加至 1，相位变化范围为 0～50°。通过外界激励(栅压或光泵浦等)改变石墨烯费米能级，可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。

为增强石墨烯天线的动态调控范围，本文同时设计了一种反射式的石墨烯天线(由石墨烯、介质层和金属反射镜 3 层组成)，如图 2 所示。其中，石墨烯层采用光刻、刻蚀等工艺进行图形化。结构参数包括周期 Λ＝30 μm，介质层厚度 H＝28 μm，石墨烯长度 L＝8 μm，石墨烯宽度 W＝5 μm。当 E_F＝0 eV 时，天线辐射谱无明显波谷，幅度平坦，不存在突变相位，随着 E_F 增加，共振峰逐渐增强，当 E_F＝0.3 eV 时，幅度波谷达到最低值(56%)，共振峰位随 E_F 增加逐渐蓝移，如图 2(b)～(c)所示。若把最优工作频率设为 1.5 THz，则可得到幅度和相位随 E_F 的变化趋势，如图 2(d)所示。当 E_F 从 0 eV 增至 1 eV 时，石墨烯天线的辐射相位从 0°连续增加至 270°左右，而幅度保持在 58%以上，幅度在 E_F＝0.5 eV 处有一个波谷，是 F-P 腔共振吸收引起的。当改变介质厚度 H 和石墨烯宽度 W 时，



(a) 天线结构示意图　　(b) 天线的相位和幅度的动态调控特性

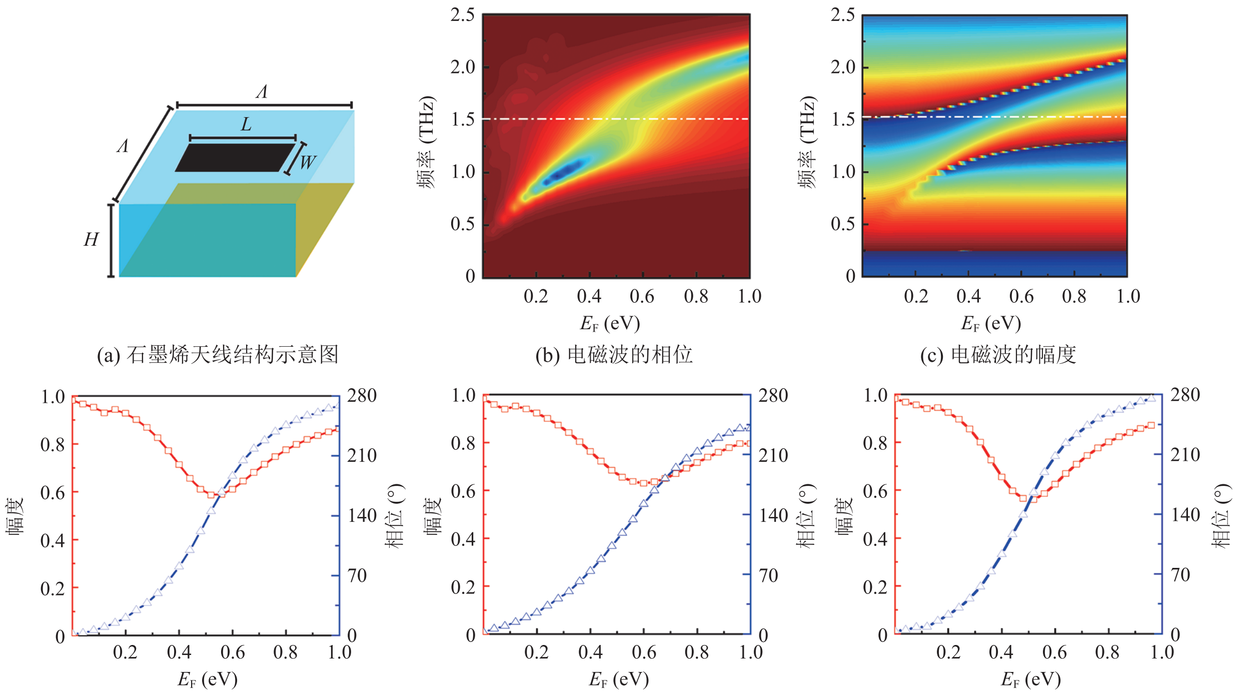
图 1　透射式石墨烯太赫兹天线

Fig. 1　Transmission-type graphene based terahertz antenna

电磁波的幅度和相位随费米能级的变化趋势如图 2(e)～(f)所示。当 H=24 μm 时，石墨烯天线辐射波的相位变化仅为 245°，幅度大于 60%，幅度波谷右移至费米能级为 0.6 eV。当 W=3 μm 时，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%。

为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，本文又设计了一种双条石墨烯太赫兹天线，如图 3 所示。结构参数包括周期 Λ=30 μm，介质层厚度 H=28 μm，石墨烯长度 L_1=20 μm，L_2=28 μm，石墨烯宽度 W=5 μm。当 E_F 为 0～0.5 eV 时，天线存在一个谐振峰，并随 E_F 逐渐增加，谐振峰蓝移；当 E_F 为 0.5～1 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)为谐振点的幅度变化情况，在双谐振峰处有更大的相位突变。f=1.8 THz 时石墨烯太赫兹天线的相位调控范围高达 320°，比一个谐振点的石墨烯天线具有更大的相位调控范围，但幅度随 E_F 改变波动很大，幅度低至 42%，如图 3(d)所示。双共振石墨烯天线虽具有更大的相位范围，但幅度波动更大。纯石墨烯天线对电磁波的调控特性仍然有限，难以对两个共振峰进行自由设计，因此，相位仍达不到 360°，且幅度很难保持均匀。

综上所述，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极限远小于 360°。此外，由于相位和幅度是相互耦合的，因此很难进一步优化调控效率及幅度的均匀性。对于双共振的石墨烯天线而言，由于其双共振特性无法独立设计，因此无法解决幅度大则相位小、相位大则幅度小的矛盾，难以实现高效率的 360°相位动态调控，限制了其在相关领域的应用，如波束调控、相控阵雷达等。



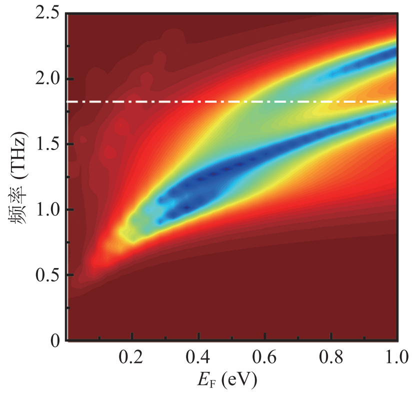
(a) 石墨烯天线结构示意图 (b) 电磁波的相位 (c) 电磁波的幅度

(d) 工作频率为 1.5 THz 时，电磁波的幅度和相位随费米能级的变化趋势 (e) H=24 μm 时，电磁波的幅度和相位随费米能级的变化趋势 (f) W=3 μm 时，电磁波的幅度和相位随费米能级的变化趋势

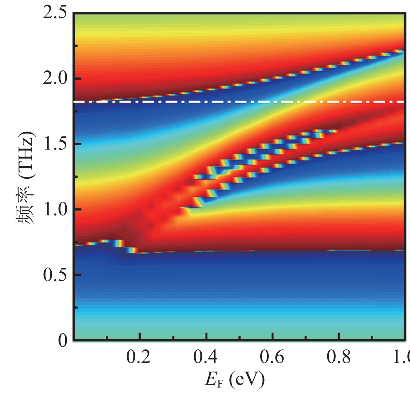
注：白色虚线——标注最优的工作频率 1.5 THz

图 2 石墨烯天线结构与数值仿真研究

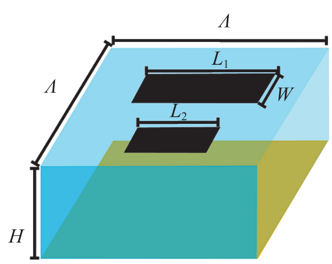
Fig. 2 The structure and simulations of the graphene antenna



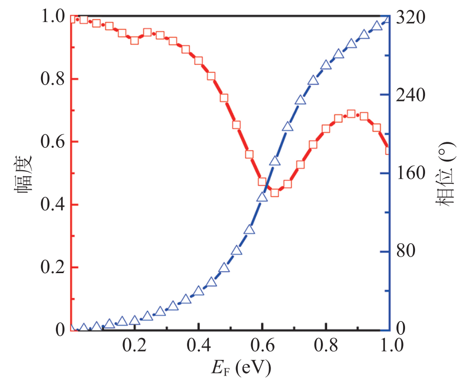
(a) 电磁波的相位



(b) 电磁波的幅度



(c) 石墨烯天线结构示意图



(d) 当石墨烯天线工作频率为 1.8 THz 时，电磁波的幅度和相位随费米能级的变化趋势

注：白色虚线——标注最优的工作频率 1.8 THz

图 3　双条石墨烯反射式太赫兹天线

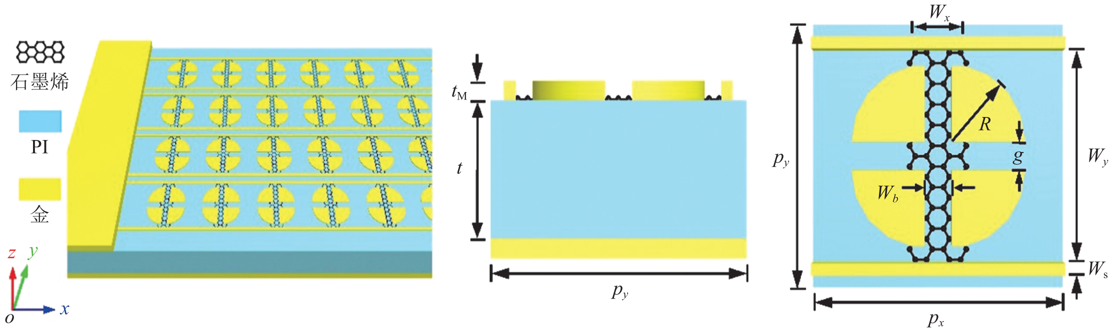
Fig. 3　Reflection-type terahertz antenna based on double-strip graphene

2.2　金属开口圆-石墨烯微带天线

为解决幅度和相位完全耦合问题，实现高效率、全相位范围的太赫兹天线，本文提出一种半解耦思路，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。此种太赫兹天线具有两个优点：其一，双共振模式可覆盖更大的相位；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 3 层结构组成，即金属-石墨烯微结构层、介质层及金属反射镜层，中间介质层起着绝缘层和纵向 F-P 腔层的作用。具体参数如下：单元结构的周期 $p_x=p_y=210$ μm，两条平行的金属栅极宽度 $W_s=5$ μm，间隔距离 $W_y=190$ μm，扇形结构 $R=75$ μm，扇形左右间隔距离 $W_b=4$ μm，上下间距 $g=14$ μm，连接金属扇形与两条栅极的石墨烯的宽度 $W_x=8$ μm，长度 $W_y=190$ μm，所有金的厚度 $t_M=200$ nm，谐振腔厚度 $t=36$ μm。

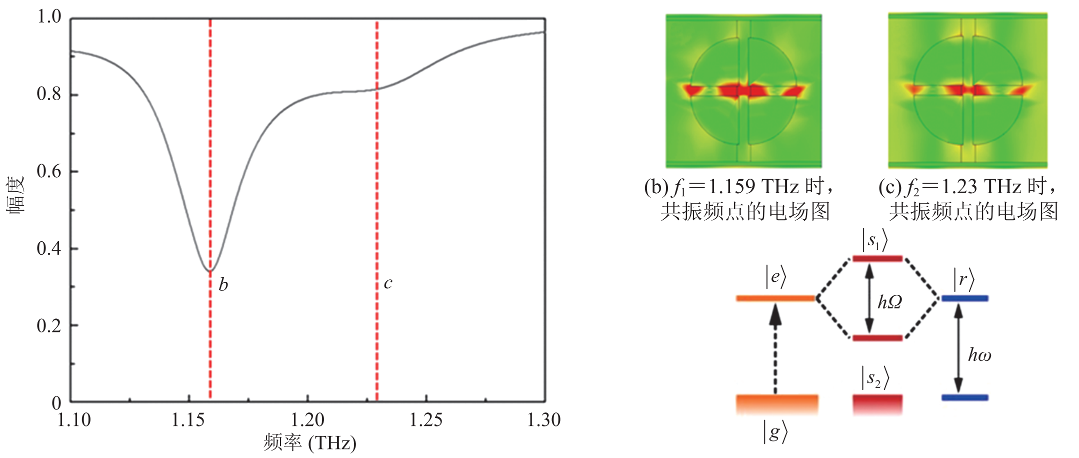
金属开口圆-石墨烯微带天线结构具有双共振特性，可引起 720°的突变相位，因此，可通过改变石墨烯的费米能级，实现 360°的动态相位调控。图 5(a)为石墨烯的费米能级 $E_F=0$ eV 时的幅度谱，有两个共振峰，分别在 $f_1=1.159$ THz 和 $f_2=1.23$ THz 处。其中，第一个共振峰的波谷较深，而第二个共振峰的波谷较浅，对应的共振电场分布如图 5(b)～(c)所示，第一个共振峰对应的电场较强。由于每组金属半圆对可形成一个共振天线结构，而金属开口圆-石墨烯微带天线



(a) 天线阵列示意图 (b) 结构单元左视图 (c) 结构单元俯视图

图 4 金属开口圆-石墨烯微带天线

Fig. 4 Graphene microstrip antenna based on split cylinder nanostructures



(a) 开口圆-石墨烯微带超表面的反射谱

(b) f_1=1.159 THz 时，共振频点的电场图

(c) f_2=1.23 THz 时，共振频点的电场图

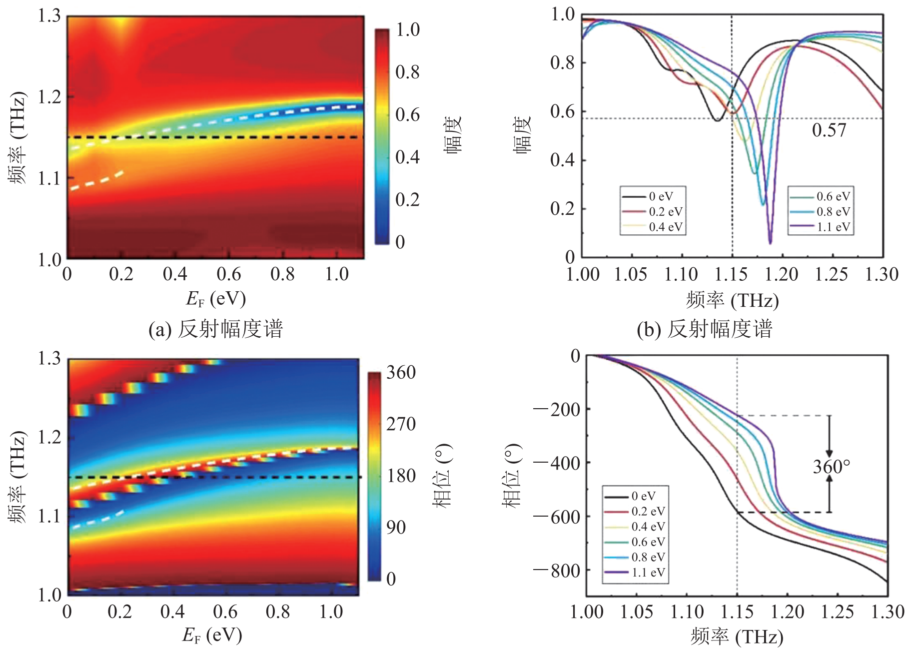
(d) 近场耦合劈裂产生的双共振峰的原理示意图

图 5 金属开口圆-石墨烯微带天线的双共振特性

Fig. 5 The double -resonance characteristics of graphene microstrip antenna based on split cylinder nanostructures

由两组完全相同的金属半圆对构成，可以预期这两组金属半圆对靠近后，在频率 f_0 处的两个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。

扫描石墨烯的费米能级 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 $E_F \leqslant 0.3$ eV 时，存在两个一高一低的共振低谷，当 $E_F>0.3$ eV 时，位于低频的共振低谷消失，仅在高频存在另一个共振低谷。两个共振低谷的频率均随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 逐渐蓝移至 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 1.188 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对该结构的共振特性进行调制。在低频范围内(1.085～1.106 THz)，石墨烯的费米能级 E_F 所对应的相位经历了最大 100°的相移，不同 E_F 之间，最大相位差为 100°；在高频范围内(1.135～1.188 THz)，石墨烯的费米能级 E_F 对应的相位中最大的相移达到 200°，不同 E_F 之间，最大相位差为 350°。在 1.15 THz 处，当石墨烯的费米能级从 0 eV 增至 1.1 eV 时，相应的反射幅度均在 0.57(对应的效率为



(a) 反射幅度谱　(b) 反射幅度谱

(c) 相位谱　(d) 相位谱

图 6　金属开口圆-石墨烯微带天线的反射幅度谱和相位谱随石墨烯费米能级的变化图

Fig. 6　The magnitude and phase of reflection spectrum of graphene microstrip antenna based on split cylinder nanostructures for different E_F of graphene

0.57×0.57×100%=32.5%）以上，相位动态连续变化达到 360°。与之相对，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%）被超构表面吸收，如图 7 所示。

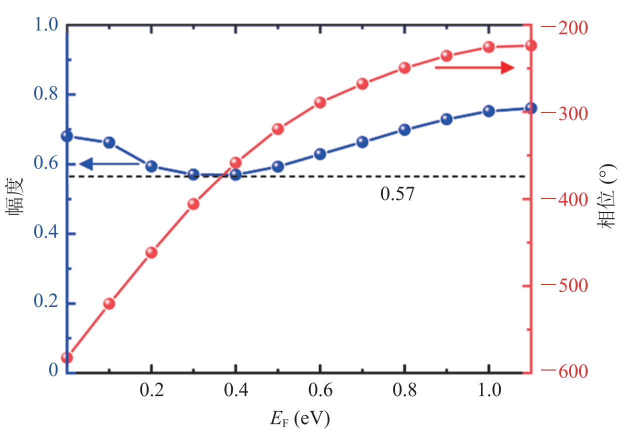


图 7　1.15 THz 处的振幅和相位随石墨烯费米能级的变化图

Fig. 7　The magnitude and phase of reflection spectrum at 1.15 THz for different E_F of graphene

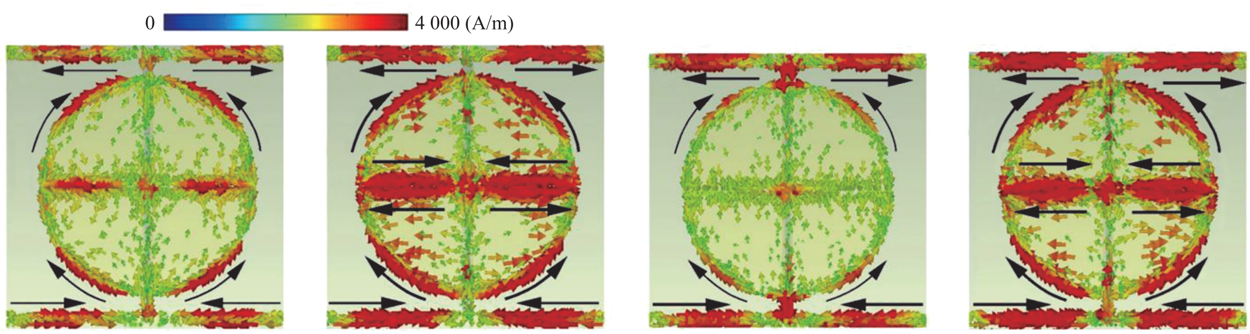
如图 8（a）所示，当 E_F=0.2 eV 时，1.1 THz 处的表面电流主要分布在水平栅极和扇形的水平边与弧形边上；如图 8（b）所示，当 E_F=0.2 eV 时，1.15 THz 处的表面电流主要分布在水平栅极和整个扇形面上；如图 8（c）所示，当 E_F=0.5 eV 时，1.118 THz 处的表面电流主要分布在水平栅极和扇形弧形边上，此时，对应的共振已几乎消失，双共振变为单共振；如图 8（d）所示，当 E_F=0.5 eV 时，1.167 5 THz 处的表面电流主要分布在水平栅极和整个扇形面上。对比两个费米能级在共振低谷时的表面电流可发现：低频的共振低谷随费米能级的增加开始消失；高频的共振低谷随费米能级的增加逐渐增强。由此推定，低频共振对相位的调控能力较弱，高频共振对相位的调控能力较强，与透射谱仿真结果中的相位调控性能一致。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，可实现幅度和相位解耦，从而获得大的相位动态调控范围（>180°）和高的光学效率（>20%）。

综上所述，在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)可实现 360°线相位动态调控范围，并保持较高的调控效率。由于石墨烯天线不利于设计单元可独立调控的阵列天线，因此研究了石墨烯-金属混合天线，利用金属电极对阵列单元进行独立调控，为实现相控阵天线奠定了基础。

2.3 器件加工与实验验证

2.3.1 基于绝缘体上硅晶片的加工方法(PDMS 作为介质层的加工方法)

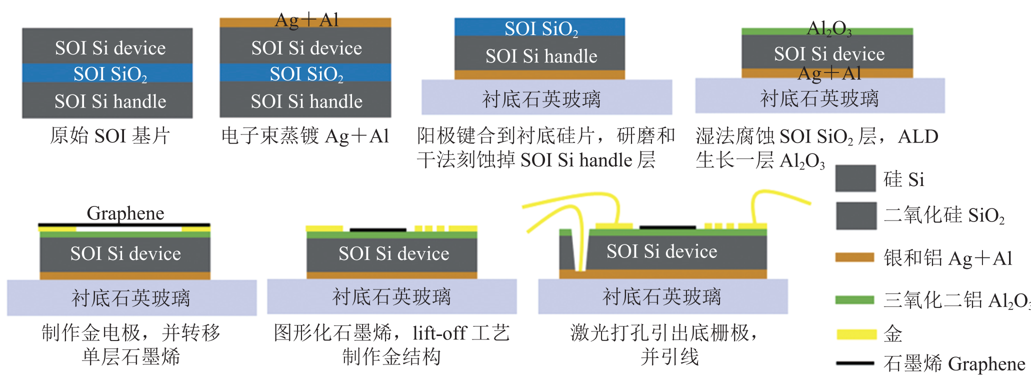
绝缘体上硅(silicon on insulator，SOI)晶片由底层硅、氧化硅、顶层高阻硅构成。顶层硅的厚度可达 50 μm，与化学沉积法生长的硅相比，具有更好的结晶特性，满足太赫兹频段 F-P 腔的介质厚度。本文的金属-石墨烯超表面天线的加工流程如图 9 所示。以 SOI 片为基片，首先，



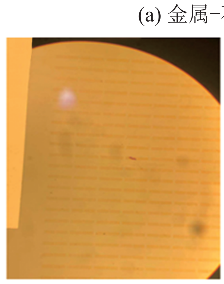
(a) E_F=0.2 eV，f=1.1 THz (b) E_F=0.2 eV，f=1.15 THz (c) E_F=0.5 eV，f=1.118 THz (d) E_F=0.5 eV，f=1.167 5 THz

图 8　天线结构表面的电流分布图

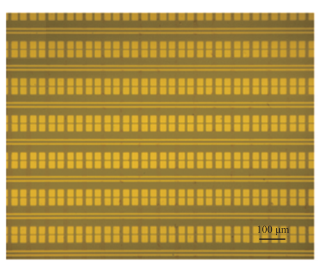
Fig. 8　Current distributions on the surface of the antenna



(a) 金属-石墨烯超表面器件加工流程示意图



(b) 加工样品显微镜图



(c) 加工样品显微镜图

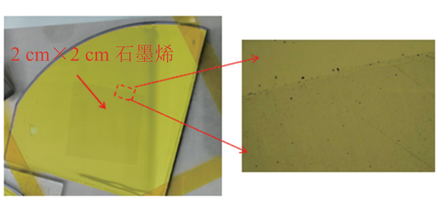
图 9　金属-石墨烯超表面天线的加工流程及样品显微镜图

Fig. 9　The fabrication process of metal-graphene antennas and optical microscope images

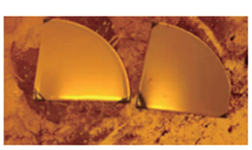
在顶层硅上镀一层银和铝作为反射镜；然后，顶层与硅片衬底键合，作为支撑衬底；接着，采用研磨、感应耦合等离子体刻蚀及湿法刻蚀等工艺去除 SOI 的两层，采用原子层沉积(atom layer deposition，ALD)生长一层高质量三氧化二铝，作为栅极绝缘层，至此得到超表面的 F-P 腔结构。在 F-P 腔上制作电极，转移石墨烯，图形化石墨烯和金属结构，最后采用激光刻蚀技术打孔，引出背栅电极，完成整个电路系统制作。由于该加工方法存在 SOI 晶片价格昂贵、工艺流程复杂等不足，因此需进一步开发基于 PDMS 的有机材料作为介质层的加工方法。

2.3.2 聚酰亚胺作为介质层的器件加工制作与实验测量

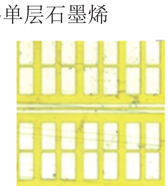
基于聚酰亚胺介质层的石墨烯-金属混合超构表面的微纳加工流程如下：首先，在扇形硬质衬底(1/4 四英寸片，本实验选择高阻硅)上镀一层金，作为反射镜；然后，在金镜上通过旋涂法制作一层 PI 薄膜，并加热固化；接着，采用湿法转移 2 cm×2 cm 的单层石墨烯，通过紫外光刻和反应离子刻蚀对石墨烯进行图形化，采用 lift-off 工艺制作超构表面结构；最后，制作引线电极。为降低实验的加工难度，本文采用矩形结构的金属-石墨烯天线设计，如图 10 所示。



(a) 在 PDMS 介质层上转移单层石墨烯



(b) 在金薄膜上制作厚度为 (36±4) μm 的 PI 层

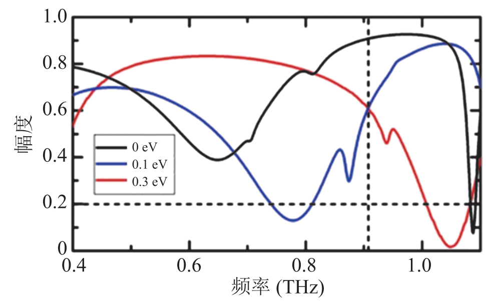


(c) 加工完成的石墨烯-金属混合超表面太赫兹天线

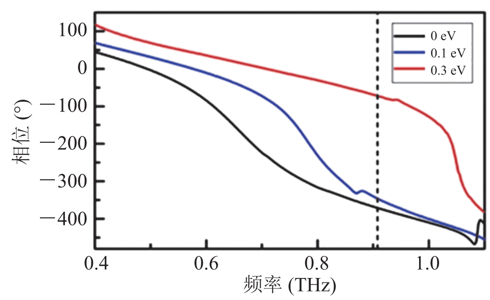
图 10　以 PI 为介质层的加工方法

Fig. 10　The fabrication process based on PI film

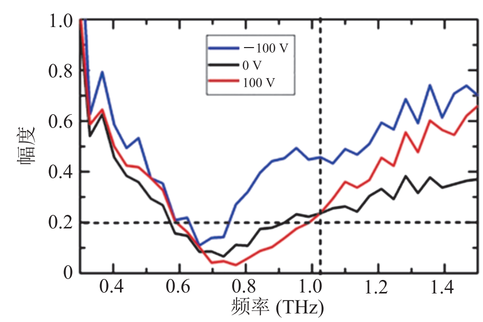
本文采用反射式太赫兹时域光谱(THz-TDS)系统对器件进行表征，其相位动态调控特性如图 11(a)所示。



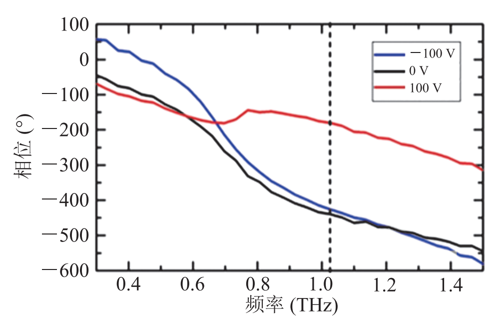
(a) 实验测量幅度



(b) 实验测量相位



(c) 仿真结果幅度



(d) 仿真结果相位

图 11　基于 THz-TDS 系统的太赫兹相位调控天线的幅度和相位测试结果

Fig. 11　The experimental results of terahertz phase-modulation antenna based on THz-TDS system

如图 11(c)所示，石墨烯超构材料在加压−100 V、0 V 和 100 V 时的反射谷分别位于 0.66 THz、0.73 THz 和 0.77 THz 处。如图 11(d)所示，在低于 0.7 THz 的频段，3 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 的频段，石墨烯超构材料在加压 0 V 和 100 V 时的相位差高达 290°，而在加压 0 V 和−100 V 时的相位差很小。如图 11(c)所示，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，反射相位的差高达 260°，如图 11(d)所示。即制备的石墨烯超构材料在 1.03 THz 处，通过调节栅极电压在 0 V 和 100 V 之间变化，在实验上可获得高达 23.9%的反射率，同时，相位调控范围高达 260°。仿真结果与实验的误差主要来自背栅极的加压方式受衬底厚度的影响，实验采用的衬底厚度达 36 μm，石墨烯上的栅压远低于实际所加的电压，为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，以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，假设超结构单元是一维均匀排列的，并且每个单元近似为一个偶极子，则 AF 可表示为

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

其中，k 为波矢；d 为相邻单元的间距；θ 为波束出射方向；β 为相邻单元的相位差；n 为阵列单元；j 为复数单位。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 可计算不同方位角的辐射强度。当相位采样间隔 β 从 0 慢慢增加到 150°时，辐射强度最大的波束方向从 0 慢慢增加到 40°，且仅有一个偏转方向。随着 β 继

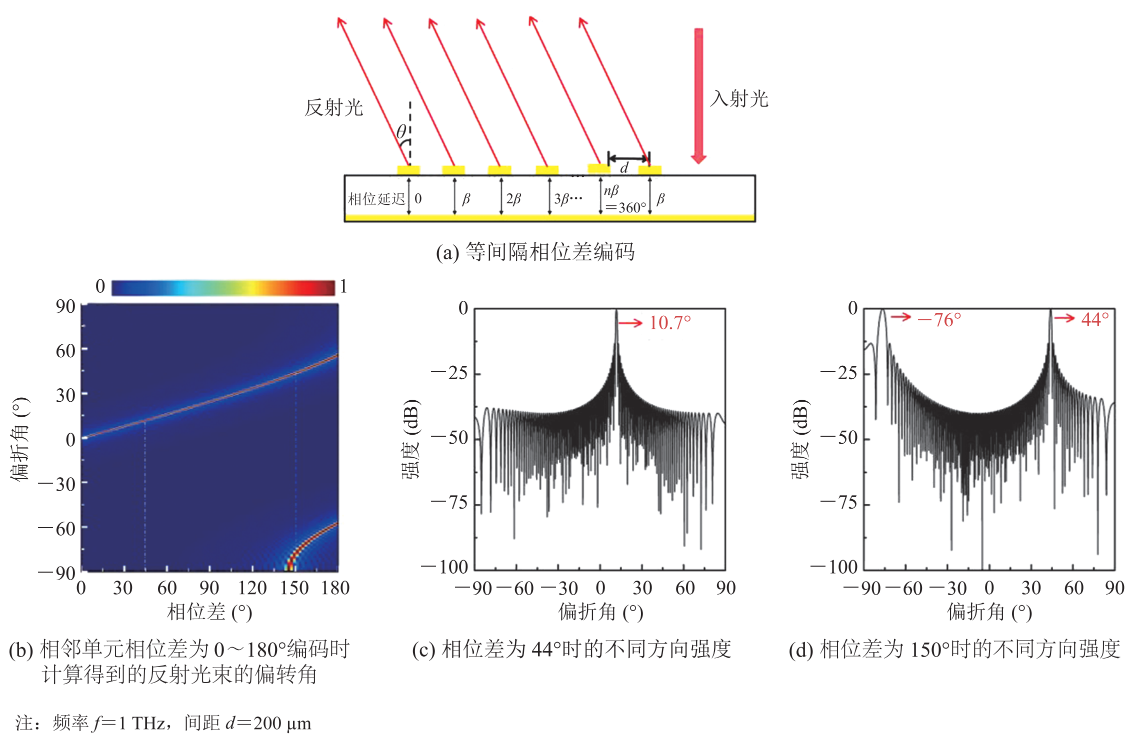


图 12 准连续扫描编码示意图及计算得到的光束偏折角

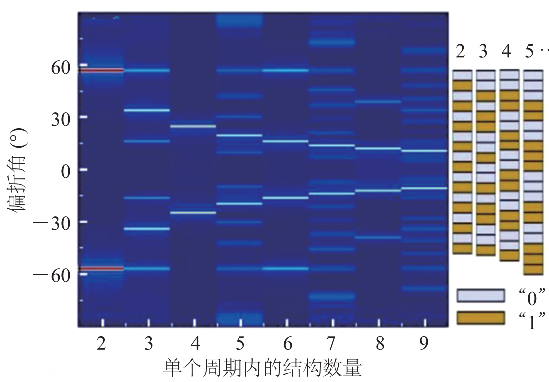
Fig. 12 The scheme diagram of quasi-continuous beam-steering and calculated results of deflection angles

续增加，出现两个辐射最强方向，且两个方向正负相反，此时，工作效率降低较大。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°)的编码方式(如图 13 所示)。已通过实验证明，该编码方式也可实现太赫兹波束的离散偏转调控以及可调波束分束、偏振转换等功能。通过对比可知，准连续编码具有较高的偏束性能：高偏转效率，低衍射杂波干扰，连续偏转角。若因相位范围达不到 360°而采用准连续编码，则偏转角与相位差呈无规律关系，偏转效率低且波动大，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且必要的。

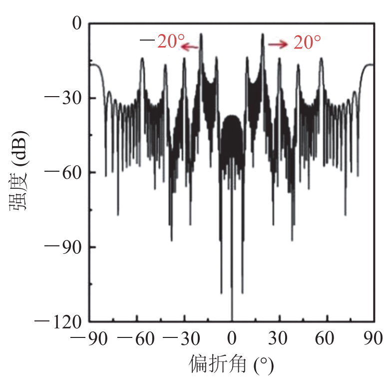
3.2　太赫兹波束动态调控仿真研究

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通过栅极电压 $V_i(i=1,2,3,\cdots)$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。为验证超构表面相控阵的调控性能，本研究设计了太赫兹波垂直入射时的 3 个偏转角：$\theta=-6°$、$-12°$、$-25°$(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 $\Delta y=P=210\ \mu m$。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，在每个子阵列中，单位单元的理论数量分别为 $N=12$、6 和 3。

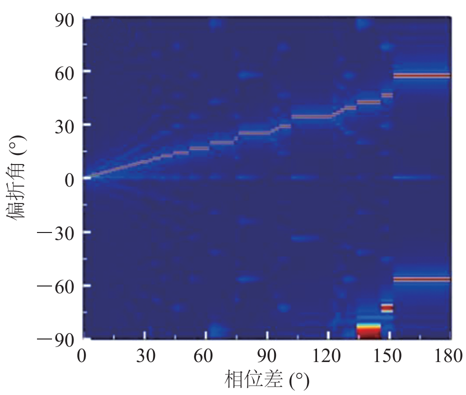
图 14 为不同偏转角度相控阵天线的仿真研究结果。由电场近场分布可知，垂直入射的太赫兹波的波前平行于 y 轴，经天线调制后，



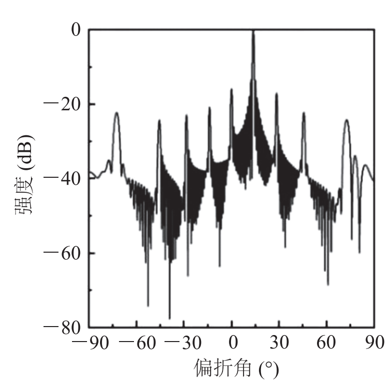
(a) 采用 0 和 1 编码，反射光束偏转角与编码周期的关系



(b) 编码周期为 5 时的不同方向光强



(c) 相位范围为 0～300°时采用连续编码，不同相位差的光束偏转角



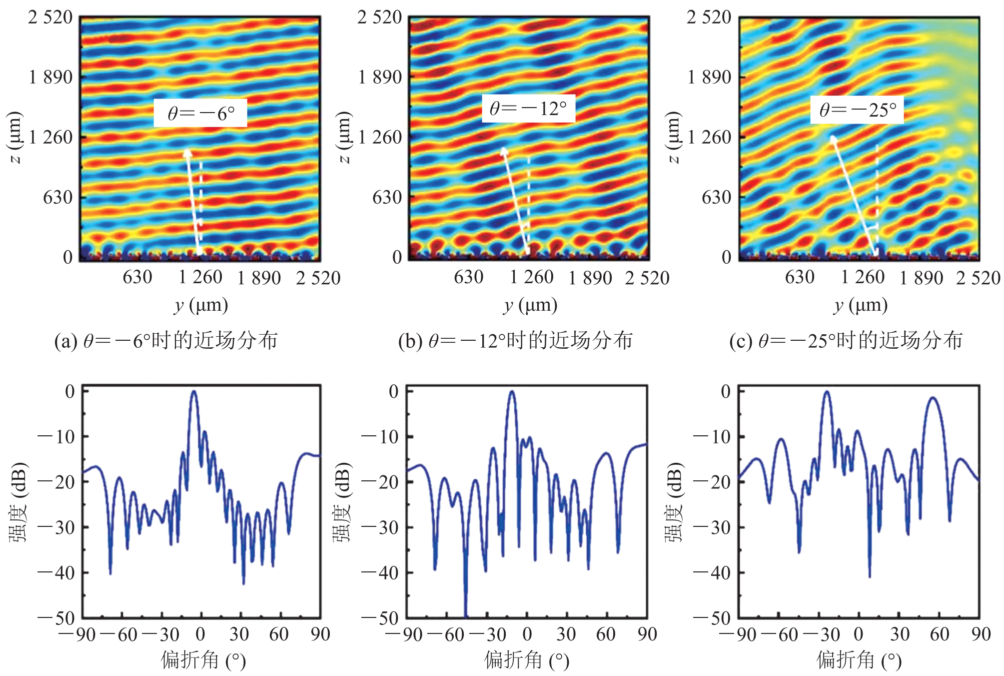
(d) 相位差为 44°时的不同方向光强

图 13　其他编码模式的计算结果

Fig. 13　The calculated results of other coding scheme

波前是与 y 轴呈一定夹角的斜线，即光束的波矢方向发生了偏折，分别与 y 轴呈－6°、－12°、－25°夹角，如图 14(a)～(c)所示。当角度偏折方向较小(－6°)时，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(－25°)时，光场分布有较大起伏，波前弯曲，意味着光束调控方向较差。图 14(d)～(f)为相应的远场辐射方向图，可进一步定量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 dB)，只存在一个最大辐射方向；当偏折角增加到－12°时，出现了较多－10 dB 的旁瓣；而当偏折角达到－25°时，将存在一个很强的相反角度的旁瓣，仅比设计的主瓣小 2 dB。

表 1 为部分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均未达到 360°，因此大多数基于石墨烯的相控阵天线都采用 0、1 编码方式。在相位范围为 237°的基础上，研究人员采用 69 级准连续编码，实现了分辨率高于 2°的波束动态扫描，



(a) θ=－6°时的近场分布 (b) θ=－12°时的近场分布 (c) θ=－25°时的近场分布

(d) θ=－6°时的远场辐射方向图 (e) θ=－12°时的远场辐射方向图 (f) θ=－25°时的远场辐射方向图

图 14 设计的不同偏转角度的相控阵天线的仿真研究结果[23]

Fig. 14 The simulated results of the phased array antenna with different deflection angles[23]

表 1 波束动态扫描超表面的编码方式

Table 1 The main features of recent works on dynamic beam-steering metasurface

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	1.30
石墨烯[17]	准连续编码	60	准连续	较高	1.20
石墨烯[15]	0、1 编码	60	离散	较低	1.10

然而，与理想的 360°相位调控相比，偏转效率从 30%降为 23%，且随偏转角波动较大，会引入杂波衍射噪声，并较大程度地降低系统的信噪比。当相位范围低于 200°时，旁瓣的辐射能量将超过主瓣方向的能量。因此，本文提出的方案具有较优的调控性能。

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 20%，并基于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，本文研究了 3 种纯石墨烯太赫兹天线，这类天线无法实现 360°相位调控，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。其次，本文提出双共振型金属-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，实现 360°相位调控的同时，幅度高于 60%，且波动较小。最后，本文仿真研究了连续相位编码，实现了太赫兹波束扫描，当偏转角度较小(＜12°)时，旁瓣小于 10 dB。本文的研究结果有望应用于高性能的太赫兹偏束相控阵天线领域，并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(2): 97-105.

[2] Federici J, Moeller L. Review of terahertz and subterahertz wireless communications [J]. Journal of Applied Physics, 2010, 107(11): 111101.

[3] He YJ, Chen YL, Zhang L, et al. An overview of terahertz antennas [J]. China Communications, 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 HH, Chu CH, Tsai DP. Fundamentals and applications of metasurfaces [J]. Small Methods, 2017, 1(4): 1600064.

[6] Quevedo-Teruel O, Chen HS, Díaz-Rubio A, et al. Roadmap on metasurfaces [J]. Journal of Optics, 2019, 21(7): 073002.

[7] Li X, Ma XL, Luo XG. Principles and applications of metasurfaces with phase modulation [J]. Opto-Electronic Engineering, 2017, 44(3): 255-275.

[8] He JW, Dong T, Chi BH, et al. Metasurfaces for terahertz wavefront modulation: a review [J]. Journal of 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(9): 094501.

[10] He Q, Sun SL, Zhou L. Tunable/reconfigurable metasurfaces: physics and applications [J]. Research, 2019, 2019: 1849272.

[11] Miao ZQ, Wu Q, Li X, et al. Widely tunable terahertz phase modulation with gate-controlled graphene metasurfaces [J]. Physical Review X, 2015, 5(4): 041027.

[12] Huang YW, Lee HWH, Sokhoyan R, et al. Gate-tunable conducting oxide metasurfaces [J]. Nano Letters, 2016, 16(9): 5319-5325.

[13] Sherrott MC, Hon PWC, Fountaine KT, et al. Experimental demonstration of ＞230° phase modulation in gate-tunable graphene-gold reconfigurable mid-infrared metasurfaces [J]. Nano Letters, 2017, 17(5): 3027-3034.

[14] Hu YZ, Jiang T, Zhou JH, et al. Ultrafast terahertz frequency and phase tuning by all-optical

molecularization of metasurfaces [J]. Advanced Optical Materials, 2019, 7(22): 1901050.

[15] Chen H, Lu WB, Liu ZG, et al. Microwave programmable graphene metasurface [J]. ACS Photonics, 2020, 7(6): 1425-1435.

[16] Kakenov N, Ergoktas MS, Balci O, et al. Graphene based terahertz phase modulators [J]. 2D Materials, 2018, 5(3): 035018.

[17] Liu LM, Zarate Y, Hattori HT. Dynamic terahertz beam steering based on graphene metasurfaces [Z/OL]. arXiv Preprint, arXiv: 1512.05425, 2015.

[18] Jung H, Koo J, Heo E, et al. Electrically controllable molecularization of terahertz meta-atoms [J]. Advanced Materials, 2018, 30(31): 1802760.

[19] Hum SV, 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, et al. 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, et al. 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 [Z/OL]. arXiv Preprint, arXiv: 1806.02202, 2018.

[23] Wang BX, Luo XQ, Lu YL, et al. Full 360° terahertz dynamic phase modulation based on doubly resonant graphene-metal hybrid metasurfaces [J]. Nanomaterials, 2021, 11(11): 3157.