

文章编号: 2095-4980(2024)04-0365-08

基于石墨烯太赫兹超表面的特殊波束动态调控

鲁金梁^{a,b}, 王序峰^{a,b}, 王东杰^{a,b}, 贺训军^{*a,b}

(哈尔滨理工大学 a. 电气与工程学院; b. 工程电介质及其应用教育部重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要: 现有的大多数特殊波束(聚焦波束、艾里光束等)超表面通常采用金属结构单元, 通过改变单元结构的尺寸和旋转角度等方式进行单一的波前调控, 但对动态调谐波前的特殊波束超表面的研究很少。本文突破传统结构的壁垒, 利用石墨烯独特的电可调性, 构造出利用石墨烯费米能级动态调控波前的特殊波束超表面, 可在动态调控波前上实现更灵活的自由性, 满足更多、更复杂的相位需求。通过调控石墨烯费米能级获得不同的相位分布, 动态调控焦点的空间位置、聚焦开关与焦点个数之间的切换以及影响艾里光束的参数等。所提出的动态调控波前特殊波束超表面可为太赫兹在高分辨成像、聚焦可调平面透镜、光学显微操作、激光微加工、光学子弹成型等方面的应用提供参考。

关键词: 太赫兹; 石墨烯; 超表面; 特殊光束; 波前调控**中图分类号:** TB34; O441.4**文献标志码:** A**doi:** 10.11805/TKYDA2023399

Graphene terahertz metasurfaces for dynamic manipulation of special beams

LU Jinliang^{a,b}, WANG Xufeng^{a,b}, WANG Dongjie^{a,b}, HE Xunjun^{*a,b}

(a.School of Electrical and Electronic Engineering; b.Key Laboratory of Engineering Dielectric and Applications(Ministry of Education), Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China)

Abstract: Most existing special beams(focused beams, Airy beams, etc.) metasurfaces usually use metallic materials for a single wavefront modulation by changing the dimensions of the cell structure, the angle of rotation, etc. There are fewer researches on metasurfaces for special beams with dynamically tunable wavefronts. Therefore, breaking the barrier of traditional structures, special beam metasurfaces which utilize Fermi energy levels of graphene to dynamically modulate the wavefront are constructed. Stronger freedom in dynamically modulating the wavefront can be realized in order to achieve more and more complex phase requirements. Focusing metasurfaces with tunable wavefront and tunable Airy beam metasurfaces are designed, different phase distributions are obtained by tuning the Fermi energy levels of graphene. Utilizing the dynamic wavefront, the spatial position of the focal point, the switching of the focusing switch with the number of focal points, and the parameters affecting the Airy beam can be regulated. The proposed dynamic tunable wavefront special beam metasurfaces are helpful for terahertz applications in high-resolution imaging, focus-tunable planar lenses, optical micromanipulation, laser micromachining, and optical bullet molding.

Keywords: terahertz; graphene; metasurface; special beams; wavefront modulation

太赫兹波处于毫米波和远红外光之间, 频率为 0.1~10 THz^[1-2]。由于太赫兹波介于电子学和光子学之间, 具有能量低、波长短、频带宽、穿透力强等特点, 在信息与通信技术、生物与药物科学、安保、食品与农作物质量控制等方面具有巨大的应用前景, 得到极大的关注与研究^[3-8]。但由于大多数天然材料对太赫兹波的电磁响应都极其微弱, 难以实现有效的太赫兹调控。超材料是由周期性排列结构单元构成的人工复合电磁材料, 通过合理设计结构单元的尺寸和形状, 可呈现天然材料所不具备的特异电磁特性, 如负折射、负介电常数和负磁导率等^[9-11]。超材料的提出标志着人们可在认识天然材料的基础上, 按照自己的意愿设计和制备出新型功能器件, 在

收稿日期: 2023-12-01; 修回日期: 2023-12-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(62075052)

*通信作者: 贺训军 email: hexunjun@hrbust.edu.cn

材料科学、电磁学、光学等领域具有深远意义^[12-15]。作为超材料的二维平面化形式，超表面对太赫兹波的调控不再依赖于空间相位的累积，而是通过改变超表面上单元的形状、大小和排布方式调整入射波的振幅和相位，进行波前调控^[16-19]。在过去 10 年里，研究者们设计出各种基于超表面的特殊波束波前控制器件^[20-26]，但大多数现有的特殊波束超表面通常使用金属材料，通过改变单元结构尺寸、旋转角度等进行单一的波前调控，一旦阵列固定，功能也随之固定，功能单一且欧姆损耗大，这极大地阻碍了多功能特殊波束控制器件的发展^[27-31]。石墨烯作为一种新型的可调光子材料，因其电导率可调、超薄的厚度和偏振不敏感特性，尤其是快速响应时间的优势，可完美地用于可调太赫兹波前控制器件^[32-33]。本文设计了一种双层十字型石墨烯太赫兹超表面结构，通过添加外部偏置电压，分别独立控制两层石墨烯的费米能级，实现对不同特殊光束的动态波前调控。仿真结果表明，超表面可以灵活地对不同焦点聚焦、不同弯曲程度的艾里光束进行整形。

1 单元结构设计

图 1 为所设计的超表面单元及其幅相特性示意图，设计的线极化反射多功能超表面由底部金属、中间聚酰胺层和两层十字形石墨烯组成，两层石墨烯之间夹杂一层聚酰亚胺层，见图 1(a)和图 1(b)。结构边长 $p=40\text{ }\mu\text{m}$ 、十字石墨烯尺寸 $L=30\text{ }\mu\text{m}$ 、 $W=10\text{ }\mu\text{m}$ ，两层石墨烯 C_1 和 C_2 的厚度($t_1=0.02\text{ }\mu\text{m}$)相同，聚酰亚胺层厚度 $D=20\text{ }\mu\text{m}$ ，底部金属板厚度 $t=1\text{ }\mu\text{m}$ 。选取石墨烯在 0.2~1.0 eV 几个费米能级点进行测试，发现在 1.5~3.5 THz 的带宽内，双层石墨烯在不同 E_F 下的相位存在相位差，见图 1(c)。表明所设计的结构能实现相位的覆盖，只要找出所需相位对应的费米能级，就能实现预期的功能。此外，进行波前调控除满足相位的条件还不够，还需满足振幅条件，即单元的反射率。图 1(d)中，单元整体反射率高于 80%，但在个别谐振点处发生了低反射率现象，这是由等离子共振吸收产生的效果。考虑到单元的相位覆盖和振幅强弱，本文选择 2.04 THz 作为研究的谐振点展开研究。

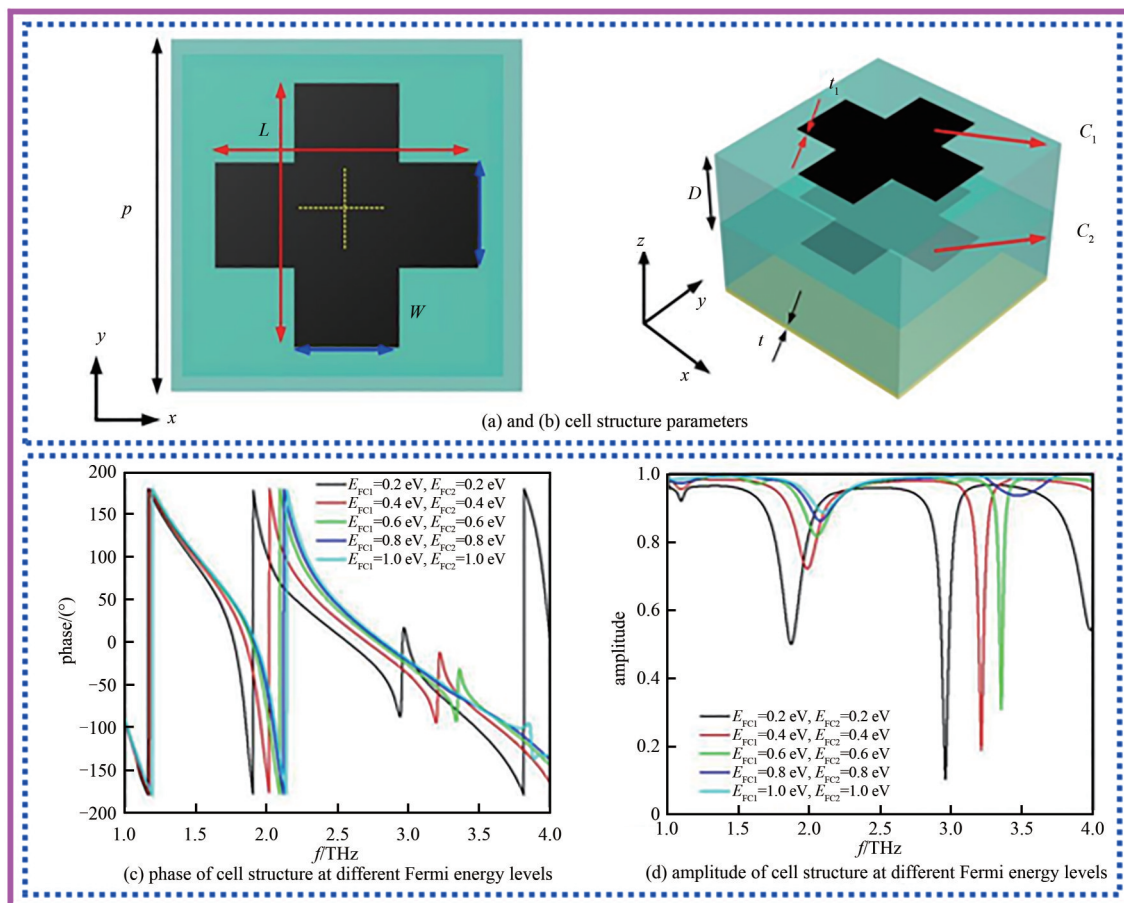


Fig.1 Schematic diagram of the unit structure and reflection characteristics

图 1 单元结构示意图以及反射特性

2 可调谐单焦点聚焦透镜

入射的电磁波经过具有相位梯度的超表面时会发生偏折, 可以将2个沿着 x 方向且相位梯度相反的超表面复合, 让2个偏折的光束在某一点汇聚, 见图2(a), 将聚焦的相位分布以抛物线的形式进行排列:

$$\phi_x = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{(\pm x_i)^2 + f^2} - f \quad (1)$$

式中: λ 为工作波长; f 为焦距, 设 $f=400 \mu\text{m}$; x_i 为单元结构在 x 方向的位置坐标, 单位是 μm 。通过 Matlab 计算式(1), 得出每一个单元对应的相位值, 见图2(b)。根据石墨烯的主动调谐性, 利用计算出的相位分布寻找对应的两层石墨烯的费米能级, 见图2(c)。对设置好的排列阵列进行仿真, y 方向的边界条件设置为周期(periodic)边界条件, x 方向为开放(open)边界条件, 将频率为2.04 THz的线极化波入射超表面, 仿真结果见图2(d)。图中可清楚地看到, 反射的电磁波在 $400 \mu\text{m}$ 左右收敛, 这与预期设定的焦距吻合很好。这是因为每一个石墨烯带之间都存在相位梯度, 且满足聚焦相位分布, 实现了聚焦功能。如果将所有的石墨烯费米能级设定为 $E_F=0 \text{ eV}$, 则打破了原有的波前排列状态, 导致原有的聚焦功能失效, 进而可实现聚焦的开关功能。

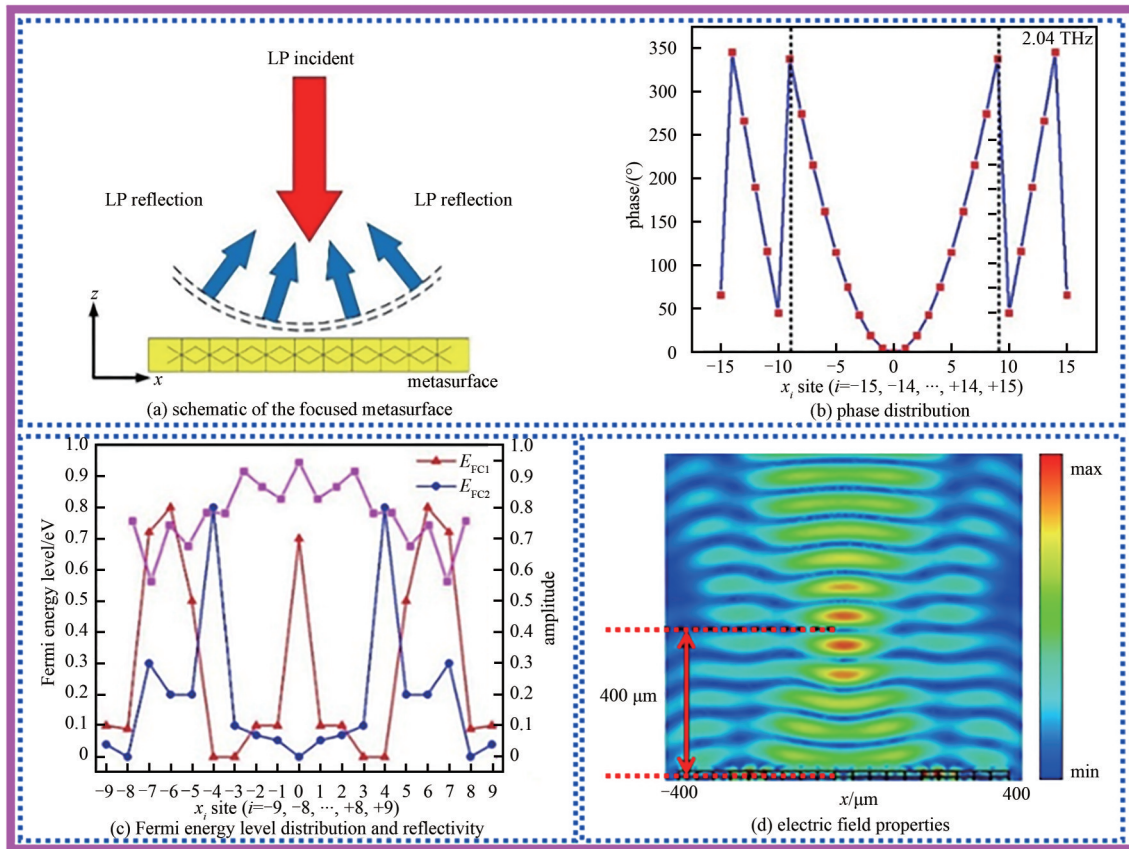


Fig.2 Schematic illustration of the principle and function of single focal point focusing

图2 单焦点聚焦的原理和功能示意

设计的超表面不仅可以实现简单的光束聚焦, 还可以对焦点的位置进行改变, 如动态调控焦点位置。利用石墨烯单元动态可重构特性, 分别实现 $600 \mu\text{m}$ 和 $800 \mu\text{m}$ 的焦距, 同时保证相位独立调控。计算出抛物线相位分布的区间, 对超过部分的数据忽略不计, 见图3(a)和图3(d)。同样, 在图3(b)和图3(e)中, 找到了满足2种焦距的石墨烯费米能级, 全部结构单元的反射率均高于70%。通过线极化波入射, 模拟仿真得到如图3(c)和图3(f)所示的聚焦电场能量分布, 太赫兹波在 $600 \mu\text{m}$ 和 $800 \mu\text{m}$ 处收敛, 和预先设定的结果一致。

超表面不仅可以调控焦距(垂直方向焦点位置), 还可以调控焦点的水平位置, 将式(1)改写为具有水平变量的式(2):

$$\phi(x) = \frac{2\pi}{\lambda} \left[\sqrt{(\pm x_i - \Delta x)^2 + f^2} - f \right] \quad (2)$$

式中 Δx 为水平变化量。为简单实现这种功能,取焦距 $f=400\ \mu\text{m}$,水平变化量 $\Delta x=\pm 100\ \mu\text{m}$,根据式(2)计算出抛物线相位,见图4(a)和图4(d)。抛物线相位的极小值不在 x 轴的0点处,而是向左或向右偏移约 $100\ \mu\text{m}$ 。选取不同的石墨烯点进行测试,得到其双层石墨烯的费米能级和反射率,见图4(b)和图4(e)。选取的结构单元反射率均高于70%,表示单元具有很好的传输效率。通过数值仿真得出图4(c)和图4(f)的电场强度,相应的焦点也向左或向右平移了约 $100\ \mu\text{m}$ 。

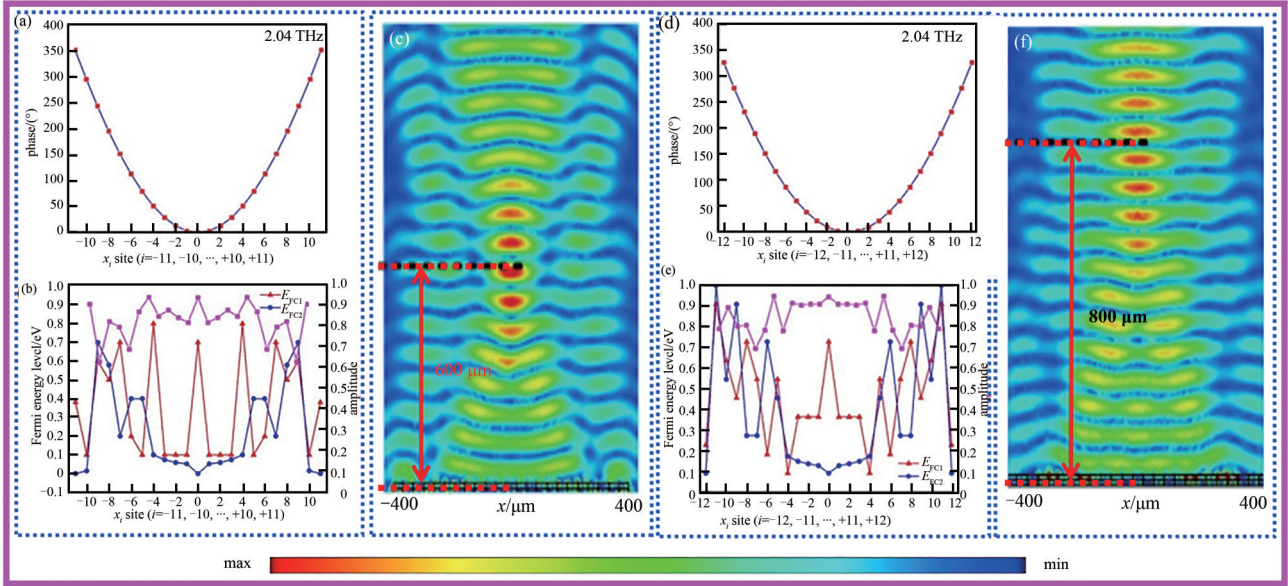


Fig.3 Schematic illustration of the principles and functions of focus modulation; (a),(d) focus-tunable metasurface phase distribution; (b),(e) Fermi energy level distribution and reflectivity; (c),(f) electric field properties
图3 焦点调控的原理和功能示意图

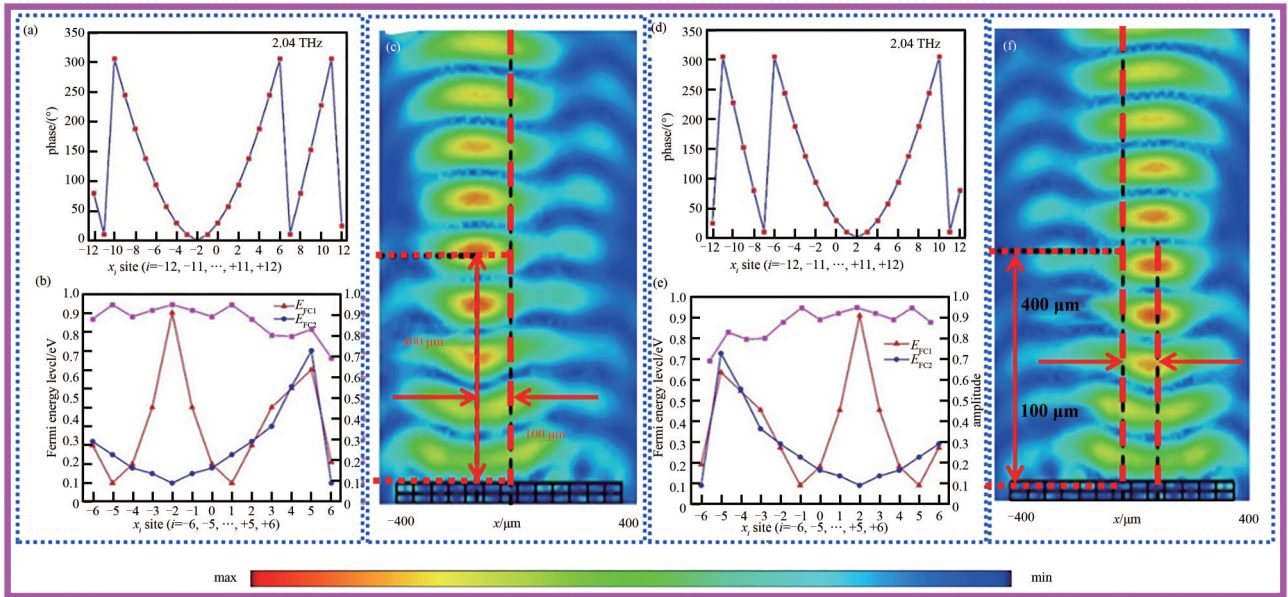


Fig.4 Schematic illustration of the principle and function of focal point translation; (a) and (d) phase distribution; (b) and (e) Fermi energy level distribution, reflectivity; (c) and (f) electric field characteristics of the focal horizontal tuning metasurface
图4 焦点平移的原理和功能示意图

3 可调谐双焦点聚焦透镜

图5(a)展示了2个焦点为 $400\ \mu\text{m}$ 的双焦点相位排布,可看作是单焦点周期扩大一倍得到双焦点功能的超表面,因此对于图5(b)的反射率和石墨烯费米能级,均是在单焦点的基础上进行周期扩大得到的。从图5(c)的仿真结果看,双焦点在 $400\ \mu\text{m}$ 处成功实现收敛聚焦。可以得出结论,周期扩大一倍并不会对2个焦点的形成产生影响,而是相互独立,互不干涉。

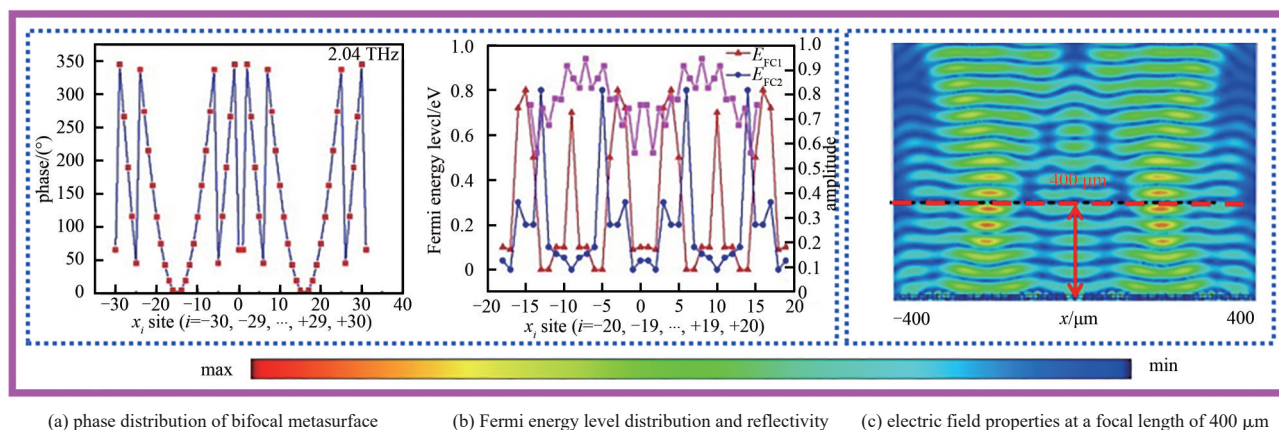


Fig.5 Schematic of principle and function of bifocal point

图5 双焦点的原理和功能示意图

4 可调谐艾里光束发生器

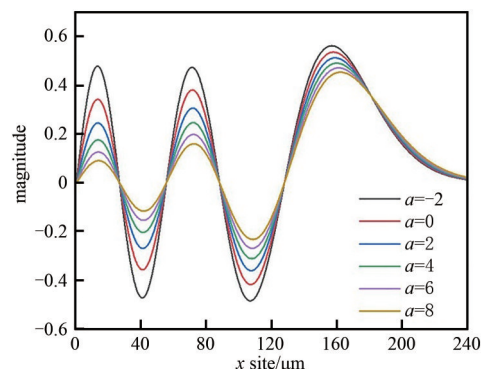
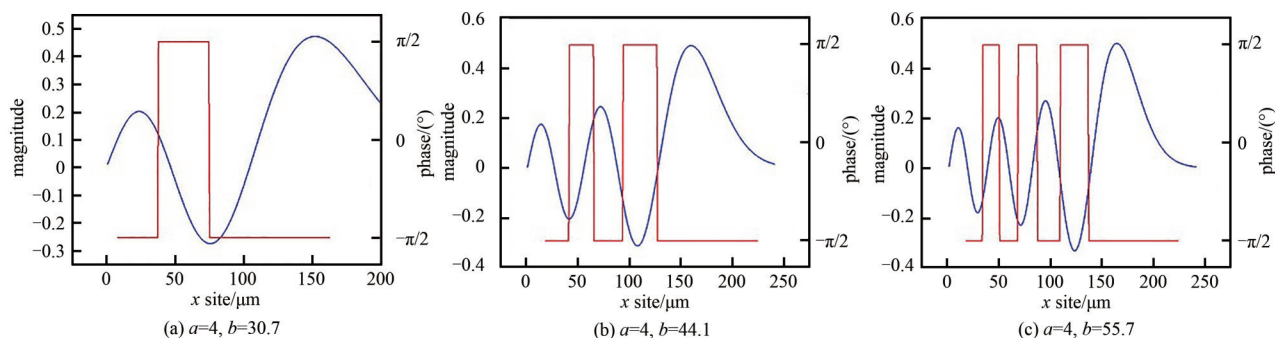
艾里光束是近几年来出现的一种无衍射光束，理想情况下艾里光束的能量是无限的，但无限能量的艾里光束在物理学中很难实现，因此只考虑有限能量的艾里光束。艾里光束一般在红外域或可见光域研究较多，在太赫兹领域的相关报道较少。本文将利用双层石墨烯结构，在太赫兹波入射下探究艾里光束的产生及相位调控。艾里光束被认为是薛定谔方程的解，通过考虑衍射的归一化近轴方程(无势薛定谔方程)进行理论分析。艾里光束的初始场相位可表示为：

$$\phi(x, \zeta=0) = Ai(ax) \exp(bx) \quad (3)$$

式中： $a=c/x_0$ ， c 为衰减因子， x_0 为横向常数； $b=1/x_0$ ； a 和 b 值需预先设定，是艾里光束的重要参数。根据式(3)可知，艾里光束可以通过调制超表面的相位来生成。本文采用一位编码生成艾里光束，当艾里函数的幅度为正时，将相位固定为 $\pi/2$ ；反之，当艾里函数的幅度为负时，相位为 $-\pi/2$ 。

保证参数 b 不变($b=44.1$)，对可调节艾里光束的不同 a 值进行探究，结果见图6。从图6中可以看出，不同 a 值的艾里曲线存在着相同的零点，与 a 值的大小和正负基本无关。这意味着， a 值对艾里函数的正负区间并无影响，不同 a 值计算出的相位排列也是相同的， a 值对艾里光束调控的影响不大，可忽略不计。

将 b 值作为调控参数，选择 b 为30.7、44.1和55.7这3个值用于模拟艾里光束，图7为不同 b 值对应的艾里光束曲线和相位分布。由于横坐标的长度小于设计结构的边长，因此将横坐标之间的差值作为数量比进行结构排列。随着不同 b 值的变化，相位分布和艾里光束曲线的分布都会发生变化， b 值越大，相位包含的一位编码单元的矩形峰会增加，说明参数 b 值影响超表面结构设计。

Fig.6 Airy beam curves corresponding to different a values图6 不同 a 值对应的艾里光束曲线Fig.7 Airy beam profile(blue line) and phase distribution(red line) for different b values图7 不同 b 值的艾里光束曲线(蓝线)和相位分布(红线)

基于石墨烯的超表面的每一列都使用适当费米能级状态, 见表 1, 以确保 $\pm\pi/2$ 的相位和足够高的振幅调制。

表 1 艾里光束一位编码相位对应的费米能级分布

Table 1 Airy beam distribution of Fermi energy levels corresponding to one coded phase

phase	E_{FC1}/eV	E_{FC2}/eV	reflection amplitude
$\pi/2$	0.21	0.2	0.875 535 24
$-\pi/2$	0.80	0.9	0.877 294 27

根据图 7 中的相位曲线排列超表面, 给出了排列示意图, 见图 8(a)~图 8(c), 仿真结果见图 8(d)~图 8(f)。电场强度符合理想的艾里光束, 并表现出完美的非衍射特性, 具有指数衰减特征。 x 轴正方向展示了无限艾里尾, 并且随着 b 值的增加, 艾里光束的衍射条数增加。这些结果表明参数 b 对一维艾里光束传播轨迹的影响, 并验证了可重构超表面的动态控制能力。

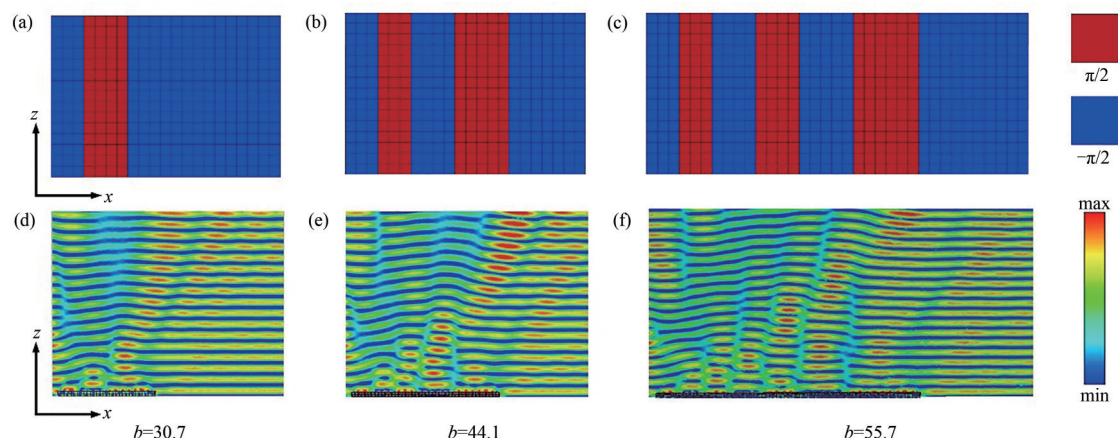


Fig.8 Schematic diagram of different number of arrangements of Airy beam arrays with the same parameters and electric field characteristics

图 8 同参数下不同数量排列的艾里光束阵列示意图以及电场特性

影响艾里光束特性的除了参数 b 外, 排列数量对艾里尾的弯曲程度也会产生影响, 如图 9 所示。根据同一参数 b 的不同单元数进行试验, 排列的单元数依次增加, 导致了不同的艾里光束。从图 9(d)~图 9(f)的仿真结果可以看出, 随着单元数的增加, 右侧具有艾里尾的弯曲程度会发生明显的改变, 单元数越多, 弯曲程度越小。此外, 单元数的增加会改变每一条衍射光束的能量, 这一结论为一维艾里光束在太赫兹领域的研究提供了可行性基础。

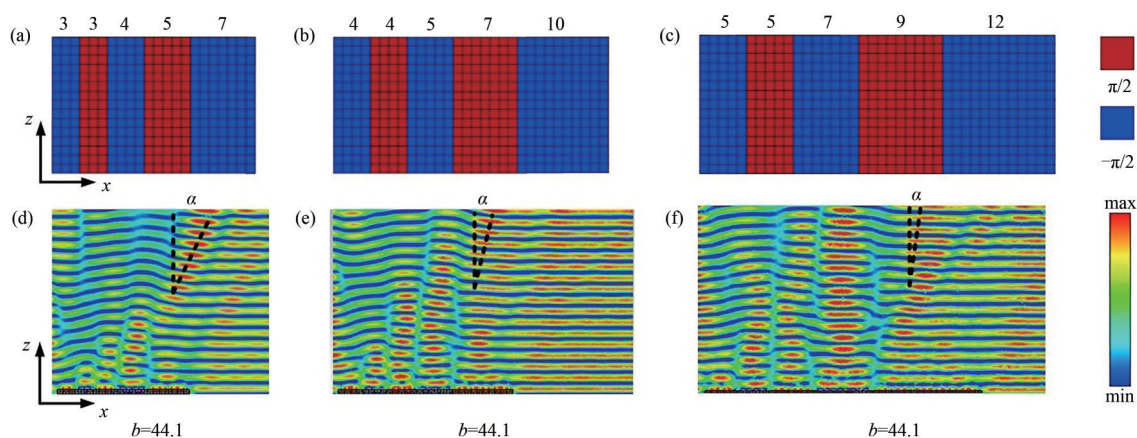


Fig.9 Schematic diagram of Airy beam array with different number of arrangements under the same parameter and electric field characteristics

图 9 同参数下不同数量排列的艾里光束阵列示意图以及电场特性

5 结论

本文设计了一种基于双层十字石墨烯的可调谐超表面, 实现对特殊波束的动态波前调控。通过对结构中双层石墨烯的费米能级进行独立控制, 实现了太赫兹波段的聚焦功能和艾里光束功能。其中, 在焦点 $f=400\ \mu\text{m}$ 处实现聚焦, 通过控制石墨烯的费米能级使超表面实现了焦点开关功能; 并分别实现了焦距 $f=600\ \mu\text{m}$ 与 $f=800\ \mu\text{m}$ 的焦距调谐以及左右分别偏移 $\Delta x=100\ \mu\text{m}$ 的位置调谐, 通过扩大相位周期实现双焦点功能。此外, 在太赫兹领域实现了艾里光束的艾里尾生成, 并对可调控艾里光束的参数值 a 和 b 进行了理论分析, 分别调控参数 b 和阵列周期包含数量, 进行可调谐功能的实现。由于结构可重构特性, 这些功能在工作频率 $2.04\ \text{THz}$ 下都可以集成在相

同的超表面阵列中，利用石墨烯电压与费米能级之间的关系可实现各种功能的切换。提出的超表面为多功能可调谐器件在太赫兹领域的发展提供了可行性。

参考文献：

- [1] SIEGEL P H. Terahertz technology[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2002, 50(3): 910–928. doi: 10.1109/22.989974.
- [2] MANJAPPA M, SINGH R. Materials for terahertz optical science and technology[J]. Advanced Optical Materials, 2020, 8(3): 1901984. doi:10.1002/adom.201901984.
- [3] YANG Yihao, YAMAGAMI Y, YU Xiongbin, et al. Terahertz topological photonics for on-chip communication[J]. Nature Photonics, 2020, 14(7): 446–451. doi:10.1038/s41566-020-0618-9.
- [4] DENG Wentao, CHEN Liao, ZHANG Hongqi, et al. On-chip polarization-and frequency-division demultiplexing for multidimensional terahertz communication[J]. Laser & Photonics Reviews, 2022, 16(10): 2200136. doi:10.1002/lpor.202200136.
- [5] PENG Yan, HUANG Jieli, LUO Jie, et al. Three-step one-way model in terahertz biomedical detection[J]. Photonix, 2021, 2(1): 12. doi:10.1186/s43074-021-00034-0.
- [6] YANG Xiang, ZHAO Xiang, YANG Ke, et al. Biomedical applications of terahertz spectroscopy and imaging[J]. Trends in Biotechnology, 2016, 34(10): 810–824. doi:10.1016/j.tibtech.2016.04.008.
- [7] MA Jianjun, SHRESTHA R, ADELBERG J, et al. Security and eavesdropping in terahertz wireless links[J]. Nature, 2018, 563(7729): 89–93. doi:10.1038/s41586-018-0609-x.
- [8] AFSAH-HEJRI L, AKBARI E, TOUDESCHI A, et al. Terahertz spectroscopy and imaging: a review on agricultural applications[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020(177): 105628. doi:10.1016/j.compag.2020.105628.
- [9] VESELAGO V G. The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ [J]. Soviet Physics Uspekhi, 1968, 10(4): 509–514. doi:10.1070/PU1968v010n04ABEH003699.
- [10] PENDRY J B, HOLDEN A J, STEWART W J, et al. Extremely low frequency plasmons in metallic mesostructures[J]. Physical Review Letters, 1996, 76(25): 4773–4776. doi:10.1103/PhysRevLett.76.4773.
- [11] PENDRY J B, HOLDEN A J, ROBBINS D J, et al. Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1999, 47(11): 2075–2084. doi:10.1109/22.798002.
- [12] ZHU Shining, ZHANG Xiang. Metamaterials: artificial materials beyond nature[J]. National Science Review, 2018, 5(2): 131. doi: 10.1093/nsr/nwy026.
- [13] SILALAH H M, CHIANG W F, SHIH Y H, et al. Folding metamaterials with extremely strong electromagnetic resonance[J]. Photonics Research, 2022, 10(9): 2215–2222. doi:10.1364/PRJ.465746.
- [14] KARVOUNIS A, GHOLIPOUR B, MACDONALD K F, et al. Photonic metamaterials: giant electro-optical effect through electrostriction in a nanomechanical metamaterial[J]. Advanced Materials, 2019, 31(1): 1970001. doi: 10.1002/adma.201970001.
- [15] STAV T, FAERMAN A, MAGUID E, et al. Quantum entanglement of the spin and orbital angular momentum of photons using metamaterials[J]. Science, 2018, 361(6407): 1101–1104. doi:10.1126/science.aat9042.
- [16] YU Nanfang, 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.
- [17] CHEBEN P, HALIR R, SCHMID J H, et al. Subwavelength integrated photonics[J]. Nature, 2018, 560(7720): 565–572. doi: 10.1038/s41586-018-0421-7.
- [18] ZHANG Xueqian, TIAN Zhen, YUE Weisheng, et al. Broadband terahertz wave deflection based on c-shape complex metamaterials with phase discontinuities[J]. Advanced Materials, 2013, 25(33): 4567–4572. doi:10.1002/adma.201204850.
- [19] WEI Zeyong, CAO Yang, SU Xiaopeng, et al. Highly efficient beam steering with a transparent metasurface[J]. Optics Express, 2013, 21(9): 10739–10745. doi:10.1364/OE.21.010739.
- [20] JEON D, SHIN K, MOON S W, et al. Recent advancements of metalenses for functional imaging[J]. Nano Convergence, 2023, 10(1): 24. doi:10.1186/s40580-023-00372-8.
- [21] JIANG Qiang, LIU Jianghong, LI Junyi, et al. Multiwavelength achromatic metalens in visible by inverse design[J]. Advanced Optical Materials, 2023, 11(15): 2300077. doi:10.1002/adom.202300077.
- [22] SONG Qinghua, LIU Xingsi, QIU Chengwei, et al. Vectorial metasurface holography[J]. Applied Physics Reviews, 2022, 9(1): 011311. doi:10.1063/5.0078610.
- [23] YANG Jiazhi, ZHAO Ruizhe, MENG Zhe, et al. Quantum metasurface holography[J]. Photonics Research, 2022, 10(11): 2607–2613. doi:10.1364/PRJ.470537.

- [24] YANG Hui, HE Peng, OU Kai, et al. Angular momentum holography via a minimalist metasurface for optical nested encryption[J]. *Light, Science & Applications*, 2023, 12(1):79. doi:10.1038/s41377-023-01125-2.
- [25] ZHOU Hongqiang, LI Xin, XU Zhentao, et al. Correlated triple hybrid amplitude and phase holographic encryption based on a metasurface[J]. *Photonics Research*, 2022, 10(3):678–686. doi:10.1364/PRJ.443063.
- [26] SO S, KIM J, BADLOE T, et al. Multicolor and 3D holography generated by inverse-designed single-cell metasurfaces[J]. *Advanced Materials*, 2023, 35(17):2208520. doi:10.1002/adma.202208520.
- [27] KIM Y, WU P C, SOKHOYAN R, et al. Phase modulation with electrically tunable vanadium dioxide phase-change metasurfaces[J]. *Nano Letters*, 2019, 19(6):3961–3968. doi:10.1021/acs.nanolett.9b01246.
- [28] BOYCE A M, STEWART J W, AVILA J, et al. Actively tunable metasurfaces via plasmonic nanogap cavities with sub-10-nm VO₂ films[J]. *Nano Letters*, 2022, 22(9):3525–3531. doi:10.1021/acs.nanolett.1c04175.
- [29] PARK J, KIM S J, LANDREMAN P, et al. An over-coupled phase-change metasurface for efficient reflection phase modulation[J]. *Advanced Optical Materials*, 2020, 8(20):2000745. doi:10.1002/adom.202000745.
- [30] ABDOLLAHRAHEZANI S, TAGHINEJAD H, FAN Tianren, et al. Reconfigurable multifunctional metasurfaces employing hybrid phase-change plasmonic architecture[J]. *Nanophotonics*, 2022, 11(17):3883–3893. doi:10.1515/nanoph-2022-0271.
- [31] LIU Shuo, ZHANG Lei, YANG Quanlong, et al. Frequency-dependent dual-functional coding metasurfaces at terahertz frequencies[J]. *Advanced Optical Materials*, 2016, 4(12):1965–1973. doi:10.1002/adom.201600471.
- [32] CAI Ziqiang, LIU Yongmin. Near-infrared reflection modulation through electrical tuning of hybrid graphene metasurfaces[J]. *Advanced Optical Materials*, 2022, 10(6):2102135. doi:10.1002/adom.202102135.
- [33] LI Qingge, ZHANG Jin, RUKHLENKO I D, et al. Graphene-enabled metasurface with independent amplitude and frequency controls in orthogonal polarization channels[J]. *Carbon*, 2023(206):260–267. doi:10.1016/j.carbon.2023.02.050.

作者简介:

鲁金梁(1997–), 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向为多功能太赫兹石墨烯超表面波前调控研究 .email: 67578252@qq.com.

王序峰(1998–), 男, 在读博士研究生, 主要研究方向为基于石墨烯太赫兹超表面的波前动态调控研究.

王东杰(1999–), 男, 在读博士研究生, 主要研究方向为基于双调控超表面的多功能太赫兹器件研究.

贺训军(1977–), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事太赫兹超材料/超表面及功能器件的研究.

(上接第 359 页)

- [22] WANG Yue, ZHANG Xiang, ZHANG Xiaojun, et al. A novel terahertz metasurface based on a single-walled carbon nanotube film for sensing application[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2022, 10(4):1780–1787. doi:10.1039/D1TA09396G.
- [23] HOFMANN T, SCHMIDT D, BOOSALIS A, et al. THz dielectric anisotropy of metal slanted columnar thin films[J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 99(8):081903. doi:10.1063/1.3626846.
- [24] DRISCOLL T, ANDREEV G O, BASOV D N, et al. Tuned permeability in terahertz split-ring resonators for devices and sensors[J]. *Applied Physics Letters*, 2007, 91(6):062511. doi:10.1063/1.2768300.
- [25] ZHU Lei, MENG Fanyi, DONG Liang, et al. Magnetic metamaterial analog of electromagnetically induced transparency and absorption[J]. *Journal of Applied Physics*, 2015, 117(17):17D146. doi:10.1063/1.4916189.

作者简介:

张 向(1996–), 男, 在读博士研究生, 主要研究方向为太赫兹超材料吸收器及其传感应用 .email: zhangxianglv@163.com.

罗 帆(2000–), 女, 在读硕士研究生, 主要研究方向为碳纳米管太赫兹超表面吸收器.

任铭欣(2001–), 女, 在读硕士研究生, 主要研究方向为单壁碳纳米管薄膜的可控制备.

宋博晨(1998–), 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向为太赫兹超表面共振特性及其应用.

王 玥(1979–), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为碳基纳米材料的太赫兹脉冲光谱、天线与传播、表面等离子体极化子、太赫兹超材料及其应用.