



DOI: 10.12086/oe.2021.200319

基于石墨烯超表面的效率可调太赫兹聚焦透镜

王俊瑶, 樊俊鹏, 舒好, 刘畅, 程用志*

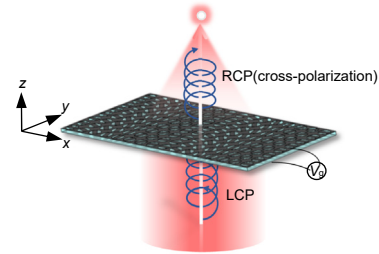
武汉科技大学信息科学与工程学院, 湖北 武汉 430081

摘要: 本文提出了一种基于石墨烯超表面的效率可调太赫兹聚焦透镜。该超表面单元结构由两层对称的圆形镂空石墨烯和中间介质层组成, 其中镂空圆形中间由长方形石墨烯片连接。该结构可实现偏振转换, 入射到超表面的圆偏振波将以其正交的形式出射, 如左旋圆到右旋圆偏振转换。利用几何相位原理, 通过旋转长方形条的方向, 透射波会携带额外的附加相位并能满足 2π 范围内覆盖。合适地排列石墨烯超表面的单元结构, 以实现太赫兹聚焦透镜。仿真结果表明: 通过改变石墨烯的费米能级, 可以对超表面圆偏振转换幅度进行调节, 进而超透镜的聚焦效率也可以动态调节。因此, 这种基于石墨烯超表面的效率可调聚焦透镜不用改变单元结构的尺寸, 只需通过改变费米能级便可实现, 可以广泛地应用到能量收集、成像等太赫兹应用领域。

关键词: 超表面; 聚焦透镜; 石墨烯; 太赫兹

中图分类号: TH74; TQ127.11

文献标志码: A



王俊瑶, 樊俊鹏, 舒好, 等. 基于石墨烯超表面的效率可调太赫兹聚焦透镜[J]. 光电工程, 2021, 48(4): 200319

Wang J Y, Fan J P, Shu H, et al. Efficiency-tunable terahertz focusing lens based on graphene metasurface[J]. *Opto-Electron Eng*, 2021, 48(4): 200319

Efficiency-tunable terahertz focusing lens based on graphene metasurface

Wang Junyao, Fan Junpeng, Shu Hao, Liu Chang, Cheng Yongzhi*

School of Information Science and Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430081, China

Abstract: This paper proposes an efficiency-tunable terahertz focusing lens based on the graphene metasurface. The unit cell is composed of two symmetrical circular graphene hollows and an intermediate dielectric layer, wherein the hollow circular middle is connected by a rectangular graphene sheet. This structure can realize polarization conversion, for example, when an incidence with left-hand circular polarization emitted on the metasurface the polarization of the transmitted light is right-hand circular polarization. According to the principle of geometric phase, by rotating the direction of the rectangular bar, the transmitted wave will carry an additional phase and can cover the range of 2π . An THz focusing lens can be realized by properly arranging the unit structure of the graphene metasurface. The simulation results show that the conversion amplitude of circular polarized light can be adjusted by changing the Fermi level of graphene, and the focusing efficiency of the metalens can also be dynamically adjusted.

收稿日期: 2020-08-27; 收到修改稿日期: 2020-10-26

基金项目: 湖北省教育厅科技研究计划重点项目(D20181107); 武汉科技大学研究生创新基金项目(JCX201959); 大学生创新基金项目资助课题(20ZA083)

作者简介: 王俊瑶(2000-), 女, 主要从事电子科学与技术专业。E-mail: wjy19972405100@163.com

通信作者: 程用志(1984-), 男, 博士, 副教授, 主要从事电磁场与微波技术, 电磁超材料/超表面及其相关电子器件设计与应用。

E-mail: chengyz@wust.edu.cn

版权所有©2021 中国科学院光电技术研究所

Therefore, this graphene metasurface-based efficiency-tunable focusing lens can be realized by changing the Fermi level without changing the size of the unit cell, and can be widely used in terahertz applications such as energy harvesting and imaging.

Keywords: metasurface; focusing lens; graphene; terahertz

1 引言

透镜是光学系统中极具代表性的光波调制器件,在光学显微镜、高清晰成像、光学光刻以及生物医疗等领域中都扮演着重要的角色。然而由于自然界中的光学材料的选择范围较为有限,传统曲面透镜笨重的材料层和复杂的几何形状已不能顺应当前器件小型化、光学系统集成化的发展趋势。超材料是典型的基于亚波长结构(也称人工原子或超原子, meta-atom)构建的人工结构材料,它具有传统天然材料望尘莫及的奇特光学性质^[1],例如:负折射率、逆切伦科夫效应、反多普勒效应等。然而超材料的三维加工问题以及金属损耗问题(尤其在光波段)严重影响了其应用的进一步拓展。超表面的提出弥补了超材料的缺陷。超表面是由亚波长人工单元排布组成的平面材料,不同材料和形状的人工单元结构对应着超表面不同的功能和效果,相对于超材料,超表面的厚度缩减到了亚波长量级。超表面一经提出,就吸引了众多国内外研究者的注意,不同工作波段、不同功能的超表面被设计出来,包括超透镜^[2-8]、光全息^[6,9-11]、异常反射和透射^[12-13]、偏振转换^[14-16]、完美吸收^[17]等。超表面透镜利用亚波长谐振单元的相位突变取代传统透镜的传输相位累积来实现波前整形,利用极薄的平面结构便可达到波束聚焦的效果,很好地解决了传统器件在重量和体积上存在的问题,使曲面结构平面化,更易于系统小型和集成化^[4,18-21]。但是,大多数金属超表面的性质、工作波段依赖于其结构参数,结构一经设定,工作性质也就受到了限制。因此设计出一种新型的、可以进行灵活调控的超表面结构在光电功能器件领域具有十分重要的意义。

2004年, Geim 和 Novoselov 首次在高定向热解石墨上用微机械剥离的方法成功从石墨中分离得到了石墨烯^[22],石墨烯从此走进了人们的视野。这种新兴石墨烯材料有很多优良的性质,在光学、电学性能上可以弥补金属和介质的缺陷,这使得石墨烯在超表面领域得到了广泛关注。在太赫兹和中红外波段,石墨烯超表面可与电磁波之间互相发生作用,激发表面等离子共振。而且石墨烯的光学特性受控于其表面电导

率,它的表面电导率可以通过一些手段被灵活地操控,比如外加电压和化学掺杂等,表现出异于寻常材料的可调性。许多科研工作者利用不同方法研究石墨烯超表面在光电领域的应用^[23-26],取得了不少研究成果。2013年,瑞士联邦理工学院的 Eduardo^[27]等人证明通过改变方形石墨烯块阵列的化学势能够控制反射电磁波的相位,进而构建波前控制器件。研究者利用不同宽度或者不同化学势的石墨烯条实现了红外波前调控器件。2015年, Yatooshi^[28]等人通过结构互补的石墨烯单元结构引入 Pancharatnam-Berry(PB)相位,在中红外波段实现了一种宽带可调控的圆偏振光异常反射器。同年,南开大学的 Cheng^[29]等证明将石墨烯块与空间几何相位相结合,可以实现可调的圆偏振电磁波的异常折射。2018年, Liu^[30]等人提出了一种基于石墨烯的电可调太赫兹透镜,通过改变石墨烯的费米能级,可实现对焦距的调控。因此,设计可调控的石墨烯基超表面有重要的学术意义和应用价值^[31-33]。

本文提出了一种基于石墨烯超表面的效率可调太赫兹聚焦透镜。该超表面结构由石墨烯-介质-石墨烯三层结构组成,将入射的圆偏振波转换为偏振正交的透射波。利用几何相位理论,通过简单地改变微结构中长方形的旋转角度,使透射的交叉圆偏振携带额外的 2π 范围的突变相位,并通过合适的排列单元结构实现波束聚焦。通过改变费米能级,石墨烯基超表面的圆偏振转换幅度可以在 0~0.55 范围内调控。我们提出的石墨烯基超表面结构简单,调控方式灵活,在纳米成像、显微镜和检测等方面表现出广阔的应用前景。

2 基本原理

本文设计了一种基于石墨烯超表面的太赫兹效率可调聚焦透镜,该平面超透镜分别由两层对称的石墨烯结构、中介质层组成。两层石墨烯是通过电磁诱导透明的功能性材料,用来构成透射型聚焦透镜,中间电介质层的材料选择相对介电常数 $\epsilon_r=3.5(1+0.05i)$ 的聚酰亚胺薄膜(Polyimide),主要用于太赫兹波的传输。另外,安置一个可控偏压设备作为桥梁连向两层石墨烯结构,用以控制石墨烯超表面的费米能级^[33]。

此超表面能够在太赫兹波段宽频带范围内操纵光的波前。如图 1(a)所示, 向石墨烯超表面垂直入射电磁波时, 该电磁波在超表面上会引入相位梯度, 产生额外的人工波矢, 从而有效地调控透射波的波前。

图 1(b)为超透镜单元的三维立体模型, 其特点在于, 对称的石墨烯表层的圆形镂空结构, 镂空圆形中间由长方形石墨烯片连接。在石墨烯超透镜的设计中, 引入几何相位(Pancharatnam-Berry 相位)来调制圆偏振波^[34]。入射的圆偏振波在通过所提出的超表面后可以转换为相反的螺旋度, 并且在出射波上附加一个 $\varphi=\pm 2\theta$ 的相变, 其中, θ 是单元结构中长方形的旋转角, 符号“+”或“-”对应于右旋圆偏振(right circular polarization, RCP)或左旋圆偏振(left circular polarization, LCP)入射的螺旋度。入射的平面波沿着法向入射, 通过石墨烯超单元之后, 透射场可以描述为

$$E_{out}^t = T_{CP}^* \cdot E_{in} = \frac{1}{2}(t_{xx} + t_{yy} + t_{xy} + t_{yx}) \begin{pmatrix} 1 \\ i \end{pmatrix} + \frac{1}{2}(t_{xx} - t_{yy} + t_{xy} - t_{yx}) e^{i2\theta} \begin{pmatrix} i \\ 1 \end{pmatrix}, \quad (1)$$

式中: t_{xx} , t_{xy} , t_{yx} 和 t_{yy} 对应于线性分量的透射系数。在式(1)中, 第一项对应于共偏振分量, 第二项对应于交叉偏振分量, 其具有附加的相位 2θ 。因此, 通过简单地改变长方形的旋转角, 超单元就可以将入射的 LCP(RCP)波转换为透射的 RCP(LCP)波, 且具有 $0\sim 2\pi$ 的完全相位覆盖范围和恒定的透射幅度。

超表面几何结构及参数已经设定, 则透射的交叉圆偏振波聚焦特性将由石墨烯的电导率决定^[35-38], 而石墨烯能在众多材料中脱颖而出是归功于其电导率的可调性, 通过调节电压的方式就能灵活地改变石墨烯

的费米能, 进而操控石墨烯电导率的变化。电压调控石墨烯表面费米能 E_F 的关系式可近似为

$$E_F = \hbar v_F \sqrt{\frac{\pi \epsilon_0 \epsilon_r V_g}{e t_s}}, \quad (2)$$

其中: \hbar 是约化普朗克常数, 费米速度 $v_F=10^6$ m/s, ϵ_r 与 t_s 为二氧化硅的相对介电常数及绝缘层厚度, ϵ_0 是真空介电常数, e 是电子电荷, V_g 表示偏置电压, 已在图 1(a)中标示。

在数值仿真时, 电磁波入射的石墨烯层可看成表面电流层, 电流密度表达式为 $J = \sigma E$, σ 为石墨烯的电导率, 用公式表示为^[39]

$$\sigma = \frac{-ie^2}{\pi \hbar^2 (\omega + i\tau^{-1})} \int_0^\infty \epsilon \left[\frac{\partial f_D(\epsilon)}{\partial \epsilon} - \frac{\partial f_D(-\epsilon)}{\partial \epsilon} \right] d\epsilon + \frac{ie^2 (\omega + i\tau^{-1})}{\pi \hbar^2} \int_0^\infty \frac{f_D(\epsilon) - f_D(-\epsilon)}{(\omega + i\tau^{-1})^2 - 4(\epsilon/\hbar)^2} d\epsilon. \quad (3)$$

可以看到, 石墨烯电导率由前一项能带内电子跃迁和第二项能带间电子跃迁得到。式中: $f_D(\epsilon) = (e^{(\epsilon - E_F)/k_B T} + 1)^{-1}$ 为费米-狄拉克分布, τ 表示弛豫时间, 它由载流子散射引起的, $\omega = 2\pi f$ 为角频率, k_B 是玻尔兹曼常数。该公式可揭示从亚太赫兹到近红外波段石墨烯超表面特性的变化以及不同的调制机制。特别是在太赫兹波段, 价带中电子的能级跃迁不易被激发, 所以此时只涉及电子带内跃迁一项, 公式近似简化为

$$\sigma \approx i \frac{e^2 k_B T}{\pi \hbar^2 (\omega + i\tau^{-1})} \left(\frac{E_F}{k_B T} + 2 \ln(e^{-E_F/k_B T} + 1) \right). \quad (4)$$

设置环境温度为 $T=300$ K, 固定弛豫时间 $\tau=1$ ps, 绘出式(4)中费米能 E_F 从 0.1 eV~0.9 eV 的电导率—频率曲线。如图 2(a)、2(b)所示, 当 E_F 固定不变、频率

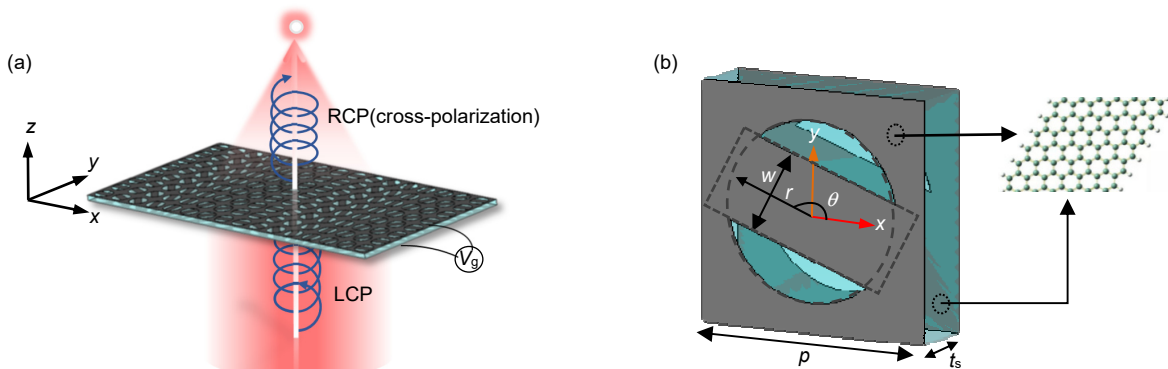


图 1 (a) 电磁波束垂直入射超表面的聚焦示意图; (b) 超表面单元结构视图
Fig. 1 (a) Focusing schematic diagram of the electromagnetic beam perpendicularly incident on the metasurface; (b) The schematic diagram of the unit cell

逐渐增加时, 石墨烯表面电导率的实部和虚部也随之减小。当频率固定不变时, 电导率的实部和虚部会随着 E_F 的增大而增大。依据以上公式呈现的关系和电导率变化曲线, 石墨烯的电导率依赖于 E_F 而改变。基于本身灵活可控的光学特性, 石墨烯在构造动态可调谐超表面时具有明显的优势, 这是金属和电介质材料所不及的。

本文利用时域有限元算法模拟仿真石墨烯超单元, 在 x - y 方向, 边界条件为周期性边界, z 方向为 open 边界, 入射波为圆偏振波, 沿 z 轴正向垂直入射。为了获得最佳的聚焦性能, 石墨烯超透镜所有结构的几何参数都经过了优化设计, 最终确定单元结构几何参数: 超透镜单元格的长、宽皆为 $p=120 \mu\text{m}$, 石墨烯层厚度为 $t_m=0.001 \mu\text{m}$, 镂空圆形的直径 $r=90 \mu\text{m}$, 长方形的宽为 $w=45 \mu\text{m}$, 介质层聚酰亚胺的厚度为 $t_s=35 \mu\text{m}$ 。石墨烯的层与层之间安装了可控偏压设备, 通过施加不同栅压, 石墨烯的费米能级能相应地发生改变, 进而动态调控超表面的透射效率。将单元结构沿 x 轴横向排列, 按预设相位分布, 可以完成超表面对出射交叉圆偏振波的聚焦, 并且通过改变石墨烯费米能可以实现对透镜效率的调控。

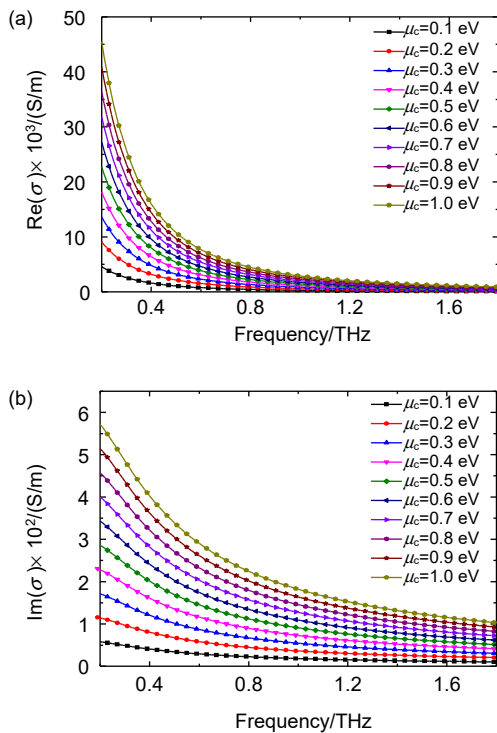


图2 弛豫时间 $\tau=1 \text{ ps}$ 时不同 E_F 下电导率的 (a) 实部; (b) 虚部

Fig. 2 The (a) real and (b) imaginary parts of the conductivity at different E_F when the relaxation time τ is 1 ps

3 结果分析和讨论

3.1 仿真结果分析

基于以上设计的石墨烯聚焦超透镜, 为了进一步阐明其表面谐振频率随费米能级变化而发生改变的物理机制, 我们使用基于时域有限元算法对其基本单元结构进行数值模拟仿真, 从而获得长方形方位角固定在 $\theta=0^\circ$ 和不同费米能级 ($E_F=0.1 \text{ eV}, 0.3 \text{ eV}, 0.5 \text{ eV}, 0.7 \text{ eV}, 0.9 \text{ eV}$) 时在 LCP 波激励下仿真的透射系数。如图 3 所示, 当费米能级等于 0.9 eV 时, 超表面的交叉偏振透射系数在 1.42 THz 达到最大值 0.55 ; 且在此频率下, 超表面的透射幅度会随着费米能级的增大而逐步增大。此外, 基于石墨烯超表面的圆偏振转换谐振频率随着费米能级的降低而呈现一定程度的蓝移, $E_F=0.1 \text{ eV}, 0.3 \text{ eV}, 0.5 \text{ eV}, 0.7 \text{ eV}, 0.9 \text{ eV}$ 时超表面的透射幅度在谐振频率分别为: $0.62 \text{ THz}, 1.07 \text{ THz}, 1.2 \text{ THz}, 1.35 \text{ THz}, 1.42 \text{ THz}$, 其透射幅度在此处分别达到最大。我们在相位梯度设计的基础上, 成功实现了工作在 1.4 THz 频点上的聚焦透镜。入射的太赫兹圆偏振波通过我们设计的超表面透射后, 转化为其正交偏振的圆偏振波, 并且实现聚焦功能。通过改变石墨烯的费米能级, 超透镜的工作效率实现了动态调节, 这是传统金属超透镜所不能实现的。

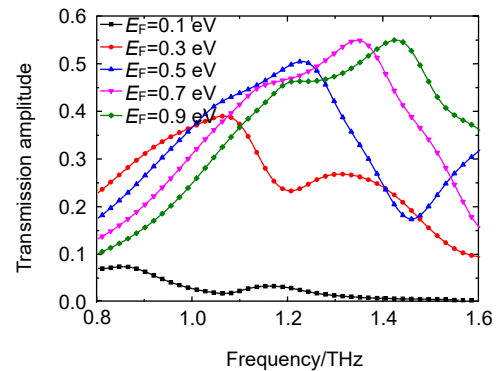


图3 在固定的旋转角 $\theta=0^\circ$ 时不同 E_F 下的透射幅度
Fig. 3 The transmission amplitude at different Fermi levels at a fixed rotation angle $\theta=0^\circ$

为了更好地理解所设计的超表面如何产生聚焦现象, 图 4(a)、4(b) 给出了表层石墨烯费米能级为 0.9 eV 和长方形旋转角度 $\theta=0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ, 150^\circ$ 时的透射波幅度和相位图。图 4(a) 显示, 由于费米能级固定, 不同旋转角下仿真和计算得到的超透镜谐振频率值基本保持不变, 其中, $\theta=0^\circ$ 和 $\theta=90^\circ$ 时的透射幅度相对最高, 其它旋转角下交叉偏振波的振幅稍低

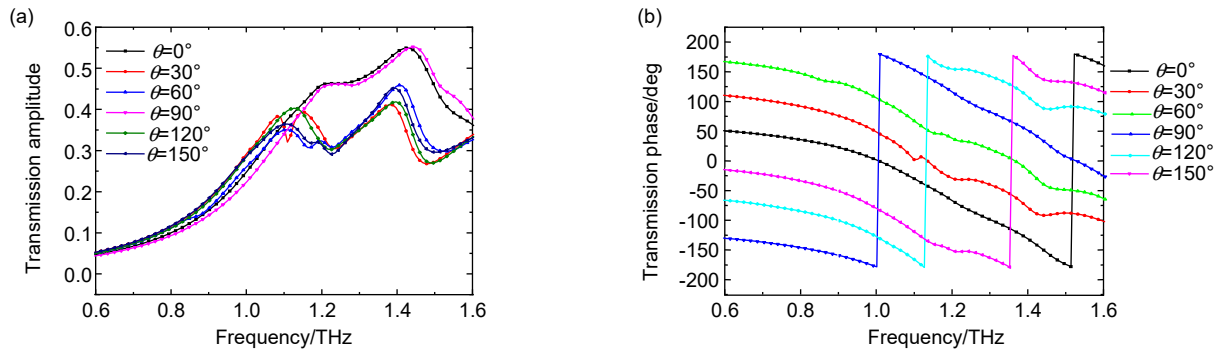


图 4 费米能级为 0.9 eV 时长方形旋转角度不同下的(a)透射幅度和(b)相位图

Fig. 4 (a) The transmission amplitude and (b) the phase diagram at different rectangular rotation angles when Fermi level is 0.9 eV

于最高透射幅度，总体而言，此六个单元的交叉偏振振幅透射谱由 0.4 到 0.55，在 1.4 THz 频点处达到理想的偏振转换效果。图 4(b)中，从纵向分析，以入射波频率为 1.4 THz 的数据进行举例说明： $\theta=0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ, 150^\circ$ 的单元结构使透射波相对入射波产生的相位突变分别为 $-130^\circ, -70^\circ, -10^\circ, 50^\circ, 110^\circ, 170^\circ$ 左右，其相位突变角度符合几何相位和偶极子相位调制原理。另外，从 0.6 THz 到 1.6 THz 每个单元使透射波产生突变的相位值可以被近似认为是线性变化的，并且每个相邻结构单元之间引起的相位突变间隔几乎是恒定的，这表明我们设计的单元在一个较宽的 THz 范围内近似保持交叉偏振圆偏振波的相位突变间隔，并且覆盖 0 到 2π 的范围，保证了该结构能够在较宽的频带范围实现对 THz 波相位的控制。

3.2 物理机制及聚焦效果分析

石墨烯超表面-电介质层-石墨烯超表面三层结构组成的平面聚焦透镜，它的物理作用是按照特定规则调整入射波的波前，对于 LCP 波的入射，会使透射波产生相位突变，是将透过的光波等相位面调控成抛物

线型的一种聚焦模式。透镜功能的实现需要满足一定的要求，对于超表面 x 轴方向，平面内各点附加相位与其坐标的关系应满足：

$$\phi(x) = \frac{2\pi}{\lambda} (\sqrt{x^2 + F^2} - F) \quad (5)$$

式中： λ 是入射波波长， x 是各个单元结构的位置， F 是设计的焦距，式(5)对应于图 4(b)所示的透射波相位变化图。由偶极子相位调制原理 $\phi=2\theta$ 可知，每个单元结构的长方形方位角为

$$\theta = \frac{\phi(x)}{2} = \frac{\pi}{\lambda} (\sqrt{x^2 + F^2} - F) \quad (6)$$

在实际操作中，我们先预设费米能级为 0.9 eV，超透镜工作频率为 1.4 THz 时的焦距为 2 mm；然后计算单元结构金属条方位角 θ ，再以该角度沿 x 轴两边依次旋转排列，直至结构在 x 方向达到需求长度，最后将此向 y 轴正负方向延伸，这可确保通过超透镜透射波在设计的焦点处发生相长干涉。

图 5(a)、5(b)分别为石墨烯超表面的费米能级为 0.1 eV、0.9 eV 时，频率为 1.4 THz 的左旋圆偏振光入射下的一维聚焦图。由仿真结果可知，当石墨烯费米

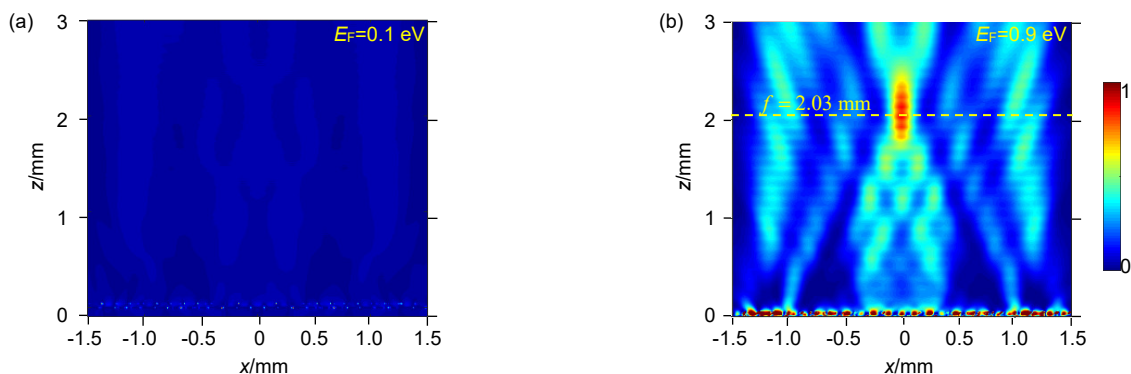


图 5 (a) 费米能级为 0.1 eV; (b) 费米能级为 0.9 eV 入射光频率为 1.4 THz 下仿真得到的聚焦效果图

Fig. 5 The simulation results of Fermi levels are (a) 0.1 eV and (b) 0.9 eV at the working frequency of 1.4 THz

能级为 0.1 eV 时, 透过石墨烯超表面的交叉圆偏振波几乎为 0, 即无法将入射的电磁波转换为球面波。当石墨烯费米能级为 0.9 eV 时, 入射的左旋圆偏振波将部分转化为右旋圆偏振波, 并汇聚到预设的焦点处。由于波长本身的制约, 聚焦的光斑具有一定大小, 该超表面在 x 轴的横向方向实现了聚焦, 焦点在 y 轴方向一直延伸成线。

进一步地, 为研究基于石墨烯超表面的效率可调太赫兹聚焦透镜的聚焦能力, 图 6(a)、6(b)给出了 x - o - z 焦平面的光强归一化曲线。图 6(a)为 $E_F=0.1$ eV、0.9 eV 下沿 x -轴的交叉偏振光强度分布, 可计算出费米能级 0.9 eV 下的半峰全宽(FWHM)为 0.196 mm, 这表明超透镜实现了亚波长聚焦。图 6(b)描述了 $E_F=0.1$ eV、0.9 eV 下沿 z -轴的交叉偏振光强度分布。可以看出, 当费米能级等于 0.9 eV 时, 仿真的焦距为 2.03 mm, 这与预设的理论值 2 mm 相吻合。我们把这种效率可调的石墨烯超表面设计成开关式聚焦透镜。从图 6(a)、6(b)

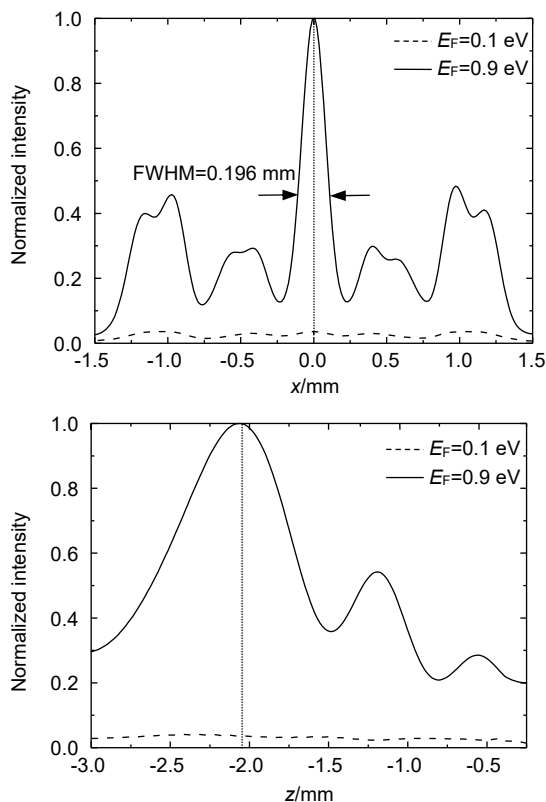


图 6 x - o - z 平面中模拟 $E_F=0.1$ eV、0.9 eV。

(a) 沿 x -轴的交叉偏振光强度分布;

(b) 沿 z -轴的交叉偏振光强度分布

Fig. 6 The profile distributions of the intensity at $E_F=0.1$ eV, 0.9 eV in the x - o - z plane, when the cross polarized light is along (a) x and (b) z axes

中可以看出, 当石墨烯费米能级为 0.1 eV 时, x - o - z 焦平面的光强分布都接近 0, 这种情况则不能表现出聚焦功能, 此时的状态为“关”; 当费米能级为 0.9 eV 时, 表现出良好的聚焦效果, 则此时的状态为“开”。这种开关式的聚焦透镜通过改变石墨烯的费米能级实现, 而不用改变超表面的物理结构, 这是传统超表面所不能实现的。

4 结论

本文设计并研究分析了一种基于石墨烯超表面的效率可调太赫兹聚焦透镜。该透镜采用两层对称的石墨烯表面, 形成类似多层超表面级联结构。数值仿真结果表明, 在改变单元结构中长方形的旋转角度的基础上组合设计超单元, 沿 z -轴正向入射的圆偏振波将转化为其正交偏振的圆偏振波, 且在较宽的 THz 波段内, 透射的交叉偏振圆偏振波的相位突变可覆盖 0 到 2π 的范围。通过充分利用石墨烯电导率可调的特性, 石墨烯超表面无需改变物理尺寸, 便可在不同费米能级(0.1 eV~0.9 eV)下实现不同强度的圆偏振转换, 从而实现可重构的开关式聚焦透镜。当石墨烯费米能级为 0.1 eV 时, 透射交叉偏振系数接近于 0, 此时没有聚焦效果; 当费米能级为 0.9 eV 时, 透射的交叉偏振系数接近 0.55, 入射圆偏振波将部分转化为其正交偏振分量, 并汇聚到预设的焦点处。仿真结果表明, 在 0.9 eV 时仿真的焦距为 2.03 mm, 和预设值 2 mm 基本吻合, 其沿 x -轴的交叉偏振光强度分布曲线的半峰全宽(FWHM)为 0.196 mm, 显示了超透镜出色的聚焦性能。我们设计的超表面可以实现较理想的光束聚焦, 在太赫兹成像、高分辨率太赫兹显示器、太赫兹通讯等方面具有潜在的应用价值, 同时为设计可重构透射型聚焦透镜提供了良好的指导意义。

参考文献

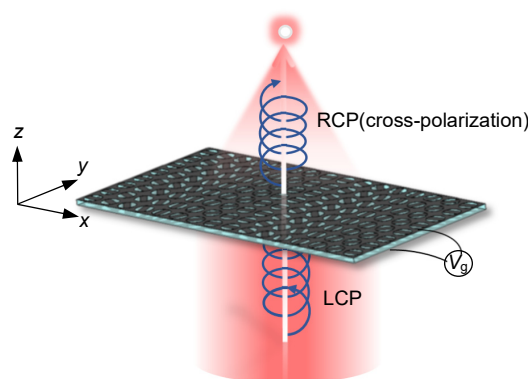
- [1] Zheludev N I. The road ahead for metamaterials[J]. *Science*, 2010, **328**(5978): 582–583.
- [2] Chen X Z, Huang L L, Mühlenbernd H, et al. Dual-polarity plasmonic metalens for visible light[J]. *Nat Commun*, 2012, **3**: 1198.
- [3] Ni X J, Ishii S, Kildishev A V, et al. Ultra-thin, planar, Babinet-inverted plasmonic metalenses[J]. *Light: Sci Appl*, 2013, **2**(4): e72.
- [4] Wang W, Guo Z Y, Li R Z, et al. Ultra-thin, planar, broadband, dual-polarity plasmonic metalens[J]. *Photonics Res*, 2015, **3**(3): 68–71.
- [5] Zheng G X, Mühlenbernd H, Kenney M, et al. Metasurface holograms reaching 80% efficiency[J]. *Nat Nanotechnol*, 2015, **10**(4): 308–312.

- [6] Pors A, Nielsen M G, Eriksen R L, *et al.* Broadband focusing flat mirrors based on plasmonic gradient metasurfaces[J]. *Nano Lett*, 2013, **13**(2): 829–834.
- [7] Li R Z, Guo Z Y, Wang W, *et al.* Arbitrary focusing lens by holographic metasurface[J]. *Photonics Res*, 2015, **3**(5): 252–255.
- [8] Khorasaninejad M, Chen W T, Devlin R C, *et al.* Metalenses at visible wavelengths: diffraction-limited focusing and subwavelength resolution imaging[J]. *Science*, 2016, **352**(6290): 1190–1194.
- [9] Ni X J, Kildishev A V, Shalaev V M. Metasurface holograms for visible light[J]. *Nat Commun*, 2013, **4**(1): 2807.
- [10] Huang L L, Chen X Z, Mühlenbernd H, *et al.* Three-dimensional optical holography using a plasmonic metasurface[J]. *Nat Commun*, 2014, **4**: 2808.
- [11] Li X, Chen L W, Li Y, *et al.* Multicolor 3D meta-holography by broadband plasmonic modulation[J]. *Sci Adv*, 2016, **2**(11): e1601102.
- [12] 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.
- [13] Ni X J, Emani N K, Kildishev A V, *et al.* Broadband light bending with plasmonic nanoantennas[J]. *Science*, 2012, **335**(6067): 427.
- [14] Grady N K, Heyes J E, Chowdhury D R, *et al.* Terahertz metamaterials for linear polarization conversion and anomalous refraction[J]. *Science*, 2013, **340**(6138): 1304–1307.
- [15] Fan J P, Cheng Y Z. Broadband high-efficiency cross-polarization conversion and multi-functional wavefront manipulation based on chiral structure metasurface for terahertz wave[J]. *J Phys D: Appl Phys*, 2020, **53**(2): 025109.
- [16] Cheng Y Z, Fan J P, Luo H, *et al.* Dual-band and high-efficiency circular polarization converter based on anisotropic metamaterial[J]. *IEEE Access*, 2019, **8**: 7615–7621.
- [17] Hao J M, Wang J, Liu X L, *et al.* High performance optical absorber based on a plasmonic metamaterial[J]. *Appl Phys Lett*, 2010, **96**(25): 251104.
- [18] Zhang Q, Zhang X Y, Xing Y Y, *et al.* Tunable terahertz structure based on the ferromagnetic film[J]. *Opto-Electron Eng*, 2020, **47**(6): 190447.
章强, 张晓渝, 邢园园, 等. 基于铁磁薄膜可调谐太赫兹微结构的研究[J]. 光电工程, 2020, **47**(6): 190447.
- [19] Deng H L, Zhou S L, Cen G T. Progress on infrared and terahertz electro-magnetic absorptive metasurface[J]. *Opto-Electron Eng*, 2019, **46**(8): 180666.
邓洪朗, 周绍林, 岑冠廷. 红外和太赫兹电磁吸收超表面研究进展[J]. 光电工程, 2019, **46**(8): 180666.
- [20] Zhang H T, Cheng Y Z, Huang M L. Broadband terahertz tunable metasurface linear polarization converter based on graphene[J]. *Opto-Electron Eng*, 2019, **46**(8): 180519.
张洪滔, 程用志, 黄木林. 基于石墨烯的宽带太赫兹可调谐表面线偏振转换器[J]. 光电工程, 2019, **46**(8): 180519.
- [21] Li X, Ma X L, Luo X G. Principles and applications of metasurfaces with phase modulation[J]. *Opto-Electron Eng*, 2017, **44**(3): 255–275.
李雄, 马晓亮, 罗先刚. 超表面相位调控原理及应用[J]. 光电工程, 2017, **44**(3): 255–275.
- [22] Novoselov K S, Geim A K, Morozov S V, *et al.* Electric field effect in atomically thin carbon films[J]. *Science*, 2004, **306**(5696): 666–669.
- [23] Vakil A, Engheta N. Transformation optics using graphene[J]. *Science*, 2011, **332**(6035): 1291–1294.
- [24] Othman M A K, Guclu C, Capolino F. Graphene-based tunable hyperbolic metamaterials and enhanced near-field absorption[J]. *Opt Express*, 2013, **21**(6): 7614–7632.
- [25] Ritter K A, Lyding J W. The influence of edge structure on the electronic properties of graphene quantum dots and nanoribbons[J]. *Nat Mater*, 2009, **8**(3): 235–242.
- [26] Castro E V, Novoselov K S, Morozov S V, *et al.* Biased bilayer graphene: semiconductor with a gap tunable by the electric field effect[J]. *Phys Rev Lett*, 2007, **99**(21): 216802.
- [27] Li Z B, Yao K, Xia F N, *et al.* Graphene plasmonic metasurfaces to steer infrared light[J]. *Sci Rep*, 2015, **5**: 12423.
- [28] Yatooshi T, Ishikawa A, Tsuruta K. Terahertz wavefront control by tunable metasurface made of graphene ribbons[J]. *Appl Phys Lett*, 2015, **107**(5): 053105.
- [29] Cheng H, Chen S Q, Yu P, *et al.* Dynamically tunable broadband infrared anomalous refraction based on graphene metasurfaces[J]. *Adv Opt Mater*, 2015, **3**(12): 1744–1749.
- [30] Liu W G, Hu B, Huang Z D, *et al.* Graphene-enabled electrically controlled terahertz meta-lens[J]. *Photonics Res*, 2018, **6**(7): 703–708.
- [31] Cao G Y, Gan X S, Lin H, *et al.* An accurate design of graphene oxide ultrathin flat lens based on Rayleigh-Sommerfeld theory[J]. *Opto-Electron Adv*, 2018, **1**(7): 180012.
- [32] Yang J, Wang Z, Wang F, *et al.* Atomically thin optical lenses and gratings[J]. *Light: Sci Appl*, 2016, **5**(3): e16046.
- [33] Feng W, Zhang R, Cao J C. Progress of terahertz devices based on graphene[J]. *Acta Phys Sin*, 2015, **64**(22): 229501.
冯伟, 张戎, 曹俊诚. 基于石墨烯的太赫兹器件研究进展[J]. 物理学报, 2015, **64**(22): 229501.
- [34] Cai T, Wang G M, Xu H X, *et al.* Bifunctional pancharatanam-berry metasurface with high-efficiency helicity-dependent transmissions and reflections[J]. *Ann Phys*, 2017, **530**(1): 1700321.
- [35] Shi X, Han D Z, Dai Y Y, *et al.* Plasmonic analog of electromagnetically induced transparency in nanostructure graphene[J]. *Opt Express*, 2013, **21**(23): 28438–28443.
- [36] Cheng H, Chen S Q, Yu P, *et al.* Dynamically tunable plasmonically induced transparency in periodically patterned graphene nanostrips[J]. *Appl Phys Lett*, 2013, **103**(20): 203112.
- [37] Fallahi A, Perruisseau-Carrier J. Manipulation of giant Faraday rotation in graphene metasurfaces[J]. *Appl Phys Lett*, 2012, **101**(23): 231605.
- [38] Ding J, Arigong B, Ren H, *et al.* Tuneable complementary metamaterial structures based on graphene for single and multiple transparency windows[J]. *Sci Rep*, 2014, **4**: 6128.
- [39] Cheng J R, Fan F, Chang S J. Recent progress on graphene-functionalized metasurfaces for tunable phase and polarization control[J]. *Nanomaterials*, 2019, **9**(3): 398.

Efficiency-tunable terahertz focusing lens based on graphene metasurface

Wang Junyao, Fan Junpeng, Shu Hao, Liu Chang, Cheng Yongzhi*

School of Information Science and Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430081, China



Focusing schematic diagram of the electromagnetic beam perpendicularly incident on the metasurface

Overview: An efficiency-adjustable terahertz (THz) focusing lens based on the graphene metasurface is proposed. The unit cell is composed of two symmetrical circular graphene hollows and an intermediate dielectric layer, wherein the middle of the hollow circular is connected by a rectangular graphene sheet. This structure can realize circular polarization conversion, for example, the left-handed circularly polarized wave incident on the metasurface will exude in the right-handed polarized form. According to the principle of geometric phase, the full 2π additional phase-shift of transmitted cross-polarized wave can be obtained by rotating the direction of the rectangular graphene. Thereby, a focusing lens with a good performance can be realized by arranging these unit cells properly. Because of the flexible and controllable optical characteristics, graphene has obvious advantages in the construction of dynamically tunable metasurfaces. By adjusting the voltage, the Fermi level of the graphene can be changed, and the conductivity can also be manipulated artificially. The numerical simulation was carried out based on the time-domain finite-element method. The simulation results show that the conversion amplitude of the circular polarization can be adjusted by changing the Fermi level of the graphene. When the Fermi level is 0.9 eV, the cross-polarization transmission coefficient of the proposed graphene metasurface reaches a maximum of 0.55 at 1.42 THz, and the transmission amplitude of the metasurface increases with the increase of the Fermi level at 1.42 THz. In addition, the resonance frequency of the circular polarization conversion based on the graphene metasurface shows a certain blue shift with the decrease of Fermi level. By arranging the unit cells of the metasurface properly, we can construct an efficiency-adjustable metalens. When the Fermi level is 0.9 eV, the simulate focal length of the proposed metalens is 2.03 mm, which is consistent well with the preset theoretical of 2 mm. However, when the graphene Fermi level is 0.1 eV, the cross-circularly polarized wave passing through the graphene metalens is almost 0, which means the incident THz wave cannot be converted into spherical wave. This adjustable graphene metasurface turns into an on-off focusing lens. Different from other traditional lens, such an efficiency-adjustable THz focusing lens based on graphene metasurface has many advantages, such as simple device structure, adjustable efficiency, reconfigurable, and it has potential application value in THz imaging, high-resolution terahertz displays, communications and so on.

Wang J Y, Fan J P, Shu H, *et al.* Efficiency-tunable terahertz focusing lens based on graphene metasurface[J]. *Opto-Electron Eng*, 2021, 48(4): 200319; DOI: 10.12086/oe.2021.200319

Foundation item: Science and Technology Research Program of Hubei Education Department (D20181107), Wuhan University of Science and Technology Graduate Innovation Fund (JCX201959), and the University Student Innovation Fund (20ZA083)

* E-mail: chengyz@wust.edu.cn