中国光学
Chinese Optics
核心期刊

基于柔性基底动态调焦石墨烯超表面聚焦反射镜的仿真研究

李向军 候小梅 程钢 裘国华 严德贤 李九生

Simulation on tunable graphene metasurface focusing mirror based on flexible substrate

LI Xiang-jun, HOU Xiao-mei, CHENG Gang, QIU Guo-hua, YAN De-xian, LI Jiu-sheng

引用本文:
李向军, 候小梅, 程钢, 裘国华, 严德贤, 李九生. 基于柔性基底动态调焦石墨烯超表面聚焦反射镜的仿真研究[J]. 中国光学, 2021, 14(4): 1019–1028. doi: 10.37188/CO.2020–0171
LI Xiang-jun, HOU Xiao-mei, CHENG Gang, QIU Guo-hua, YAN De-xian, LI Jiu-sheng. Simulation on tunable graphene metasurface focusing mirror based on flexible substrate[J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(4): 1019-1028. doi: 10.37188/CO.2020-0171

在线阅读 View online: https://doi.org/10.37188/CO.2020–0171

文章编号　2095-1531(2021)04-1019-10

基于柔性基底动态调焦石墨烯超表面聚焦反射镜的仿真研究

李向军[1,2], 侯小梅[1,2], 程　钢[1,2], 裘国华[1,2], 严德贤[1,2*], 李九生[1,2]

(1. 中国计量大学 信息工程学院 浙江省电磁波信息技术与计量检测重点实验室，浙江 杭州 310018;
2. 中国计量大学 太赫兹研究所，浙江 杭州 310018)

摘要: 焦距范围可调的超薄聚焦反射镜在片上太赫兹光谱和成像等紧凑型系统中有重要应用价值。通过改变几何尺寸和调节化学势可以使石墨烯亚波长反射结构获得 0~2π 的相位, 结合聚二甲基硅氧烷(PDMS)柔性基底的动态拉伸可以实现大动态范围的超薄太赫兹聚焦反射镜。本文设计了一个工作频率为 1.0 THz, 宽度为 12 mm, 焦距为 60 mm, 厚度为 75 μm 的柔性基底动态调焦石墨烯超表面聚焦反射镜。首先在基底自然状态下通过掺杂调节单元石墨烯条的化学势和改变宽度使其反射相位覆盖 0~2π 相位, 并按照预定设计的相位空间分布达到反射聚焦效果。然后通过横向拉伸柔性基底实现反射镜焦距的动态调节。仿真结果表明: 柔性基底长度在 100%~140% 内范围变化时, 反射镜的焦距由 53.4 mm 增加到 112.1 mm, 动态调焦范围可达到最小焦距的 109.7%, 同时聚焦效率从 69.7% 减小到 46.8%。此外, 本文还研究了该反射镜在宽频带范围的工作性能。仿真结果表明: 其对于在 0.85~1.0 THz 范围内的入射平面波都能实现良好的动态聚焦。

关　键　词: 太赫兹; 石墨烯; 超表面; 柔性基底; 动态聚焦

中图分类号: TN29　　**文献标志码:** A　　**doi:** 10.37188/CO.2020-0171

Simulation on tunable graphene metasurface focusing mirror based on flexible substrate

LI Xiang-jun[1,2], HOU Xiao-mei[1,2], CHENG Gang[1,2], QIU Guo-hua[1,2], YAN De-xian[1,2*], LI Jiu-sheng[1,2]

(1. *Key Laboratory of Electromagnetic Wave Information Technology and Metrology of Zhejiang Province, College of Information Engineering, China Jiliang University, Hangzhou* 310018, *China*;
2. *Centre for THz Research, China Jiliang University, Hangzhou* 310018, *China*)

* *Corresponding author, E-mail: yandexian*1991*@cjlu.edu.cn*

Abstract: Ultra-thin focusing mirror with adjustable focal length has important applications in compact systems, especially for on-chip terahertz spectroscopy, imaging systems and communication systems. By changing the geometric size and adjusting the chemical potential, the graphene subwavelength reflective structure

收稿日期: 2020-09-25; **修订日期:** 2020-10-13

基金项目: 国家自然科学基金(No. 62001444, No. 61871355, No. 61831012); 浙江省自然科学基金(No. LQ20F010009, No. LY18F010016); 浙江省基础公益研究计划项目(No. LGF19F010003)

Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 62001444, No. 61871355, No. 61831012); Natural Science Foundation of Zhejiang Province (No. LQ20F010009, No. LY18F010016); Basic Public Welfare Research Project of Zhejiang Province (No. LGF19F010003)

can achieve a phase of 0~2π. Combined with the above properties and the dynamic stretching of polydimethylsiloxane (PDMS) flexible substrate, the ultra-thin terahertz focusing reflector with large dynamic adjustment range can be realized. In this paper, a dynamic focusing graphene metasurface focusing reflector based on flexible substrate with a working frequency of 1.0 THz, a width of 12 mm, a focal length of 60 mm and a thickness of 75 μm is designed and investigated. Firstly, by adjusting the chemical potential and width of the graphene unit strips, the reflective phase covers the 0~2π, and the reflective focusing effect can be achieved according to the predesigned phase spatial distribution. Then, the dynamic adjustment of the focal length of the reflective mirror can be realized by laterally stretching the flexible substrate. The simulation results demonstrate that when the length of the flexible substrate varies from 100% to 140%, the focal length of the reflective mirror increases from 53.4 mm to 112.1 mm, the dynamic focus range can reach 109.7% of the minimum focal length, and the focus efficiency decreases from 69.7% to 46.8%. In addition, the performance of the reflective mirror in a wide frequency range has also been investigated, and the simulation results demonstrate that the good dynamic focusing for incident plane waves in the frequency range of 0.85~1.0 THz can be achieved. The proposed tunable metasurface design is highly versatile in the development of ultra-thin, multifunctional and tunable terahertz devices for various applications.

Key words: terahertz; graphene; meta-surface; flexible substrate; dynamic focusing

1 引 言

太赫兹波(0.1~10 THz)的频率位于微波和红外波之间,因其频率位置特殊,故太赫兹波拥有众多优势,如指纹性、活体安全以及非极性材料透射性等,其在 6G 通信、无损检测、国土安全、天文探测和医疗诊断等众多领域具有巨大的应用潜力[1]。然而,在太赫兹技术迈向广泛应用过程中不仅缺少高功率的太赫兹源和高灵敏度的太赫兹探测器,还缺少紧凑高效的太赫兹波片、调制器,以及透镜、棱镜和反射镜等功能器件。近年来,基于亚波长散射体阵列的超表面在波束调控方面显示出超灵活和超轻薄的巨大优势,有望实现太赫兹系统的小型化与集成化[2]。与传统折射型光学器件不同,二维超表面利用亚波长结构控制电磁波的幅度、相位和偏振[3]。尤其是 2011 年,哈佛大学 Capasso 课题组设计了一种新型光波段静态超表面,并确立了广义斯涅耳定律,有力促进了超表面的研究[4]。然而,在许多实际应用场合,静态超表面结构不能够实时动态地调制太赫兹波。目前动态超表面的调控原理主要分两种[5]:一种是基于电[6]、磁[7]、热[8]、光[9]以及化学反应[10] 等效应去改变超表面单元结构的材料参数实现可调谐超表面,包括零维材料(量子点[11] 等)、一维材料(如碳纳米管[12] 等)、二维材料(如石墨烯[6] 等)、相变材料(如 GST[8]、VO_2[13]等)、半导体[14] 和液晶材料[15] 等;另一种是基于动态改变超表面结构几何参数,如介电弹性体[16]、MEMS[3]、微流体[17] 等实现几何可重构超表面。

在众多可调材料中石墨烯具有优异的可调性能,可通过电[18]、光[19]、磁[20] 效应实现超表面对电磁波的动态调控,也可以通过化学掺杂实现静态调控。与金属在可见光和近红外波段可以实现对电磁场有很强束缚作用的表面等离子体类似,石墨烯在太赫兹波段也可以产生表面等离子体,从而实现低损耗、高效和动态调控电磁波波前[21],而且相位调控的自由度更大、效率更高[22]。在利用超表面实现超透镜方面,由于石墨烯表面等离子体单元结构在透射方式下利用交叉极化覆盖 0~2π 相位时透射效率较低[23],因此研究人员较多地使用反射方式实现石墨烯平面聚焦反射镜[21, 24-25]。然而,利用外加电压动态调节石墨烯直接实现超表面的动态调焦非常困难[26],这需要对每个单元进行特殊设计,而且调焦范围非常有限。Pei Ding 等利用几何相位调控原理设计了工作在 5.0 THz 的石墨烯平面聚焦反射镜,动态调焦范围只有 35%[21]。

此外,基于动态改变超表面结构几何参数,特

别是基于聚二甲基硅氧烷 (PDMS) 等柔性基底的超透镜具有设计简单、焦点动态范围大的特点[27-28]。Ritesh Agarwal[27] 将金属条状微结构嵌入 PDMS 基底中, 实现了光波段柔性可拉伸的变焦超构透镜, 拉伸范围可达到 130%, 动态调焦范围为 66%。Andrei Faraon 等在近红外波段将亚波长硅纳米柱的超表面封装在 PDMS 中, 拉伸范围可达到 150%, 动态调焦范围为 130%[28]。此外, 2018 年 F. Callewaert 等人利用 3D 打印技术制备了毫米波段 (36 GHz) 可拉伸全介质的调焦超透镜[29], 可以实现 4 倍调焦, 拉伸系数仅为 75%。然而, 基于 PDMS 基底的太赫兹动态调焦超表面还鲜见研究。

本文结合石墨烯等离子响应可以通过结构和化学势灵活调控的特点以及 PDMS 柔性薄膜可大范围动态调焦的优势, 设计了工作频率为 1.0 THz, 宽度为 12 mm, 焦距为 60 mm, 厚度为 75 μm 的柔性基底动态调焦石墨烯超表面聚焦反射镜。首先在基底自然状态下通过掺杂调节单元石墨烯条的化学势和改变宽度使其反射相位覆盖 0~2π, 并按照设计的空间分布实现预定的反射聚焦效果。然后研究了该超表面聚焦反射镜横向拉伸柔性基底时的动态调节焦距性能。此外, 本文还研究了该反射镜在宽频带范围的工作性能, 结果表明当入射平面波在 0.85~1.0 THz 范围内时, 都能够实现良好的动态聚焦。

2　设计原理和仿真结果

超表面的相位调控原理主要包括基于光程差的传输相位型、基于 PB 效应的几何相位型、基于阻抗变换电路相位型及三者的任意组合覆盖 0~2π 相位, 以生成任意波前形状[30]。在太赫兹波段利用单层介质超表面的复杂偶极子谐振可以在透射方式下实现传输相位和几何相位调控, 而包括金属和石墨烯在内的表面等离子体单层结构在透射情况下仅能实现几何相位或用交叉极化实现电路型相位调控, 如果要实现线偏振波的相位调控则需要多层结构, 使得设计加工复杂, 同时工作频带窄、透射效率低。通过增加金属底层反射面, 太赫兹波段的单层表面等离子体结构可以方便实现几何和电路型相位调控。

本文利用宽度和化学势可调节的单层石墨烯条状结构、PDMS 柔性基底以及导电聚合物 (Pedot:PSS) 设计了一种可聚焦 1.0 THz 线偏振太赫兹入射波且焦距可调的超表面反射镜。图 1 为反射超表面的单元结构, 为防止石墨烯条状结构在拉伸过程中剥落, 将其嵌入两层 PDMS 薄膜中间, 底层为喷涂的导电聚合物。垂直入射的太赫兹波电场为 x 方向; 单元周期在 x 方向为 p=150 μm, y 方向为无限大; PDMS 分两层, 上层厚度 d_1=25 μm, 下层厚度 d_2=50 μm, 在 1.0 THz 的折射率为 1.53[31]; 单层石墨烯宽度为 w。在周期 p 不变的情况下, 可通过调整宽度 w 和化学势 μ_c 改变石墨烯电导率 σ_g 及其对应的介电常数 ε_g, 从而调控反射波的出射相位。在太赫兹波段石墨烯介电常数 ε_g 与电容率 σ_g 的关系满足[5]

$$\varepsilon_g = 1 + \frac{i\sigma_g}{\omega\varepsilon_0 t_g} \quad , \qquad (1)$$

其中 ε_0 为真空介电常数, ω 为入射光的角频率, 石墨烯的厚度通常取 t_g=0.3 nm。电导率 σ_g 是带间电导率 σ_{inter} 和带内电导率 σ_{intra} 的总和。在太赫兹频率内, 因为 $h\omega<2\mu_c$, 可以通过泡利不相容原理忽略带间跃迁, 故石墨烯的电导率 σ_g 满足 Kubo 公式[5]

$$\sigma_g \approx \sigma_{intra} = i\frac{e^2 k_B T}{\pi h^2(\omega - i\Gamma)}\left[\frac{\mu_c}{k_B T} + 2\ln\left(e^{\mu_c/k_B T}+1\right)\right] \quad , \qquad (2)$$

其中, e 为电子电荷, μ_c 为石墨烯的化学势, h 为约化普朗克常数。k_B 为玻尔兹曼常数, T 为环境温度, Γ 表示弛豫时间。

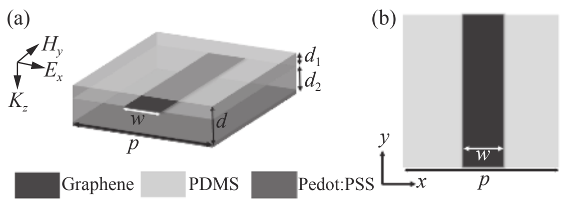


图 1　石墨烯反射超表面单元结构图

Fig. 1　The structure of one unit cell graphene reflective metasurface

目前研究已知, 可以利用电弧放电添加 B_2H_6 或 NH_3 制备 P 型或 N 型石墨烯[32], 或化学气相沉积法添加 CH_4+NH_3 制备 N 型石墨烯[33]。在 0~1 eV 内, 掺杂浓度和化学势可以保持线性关系[34]。另一方面, 石墨烯在机械力拉伸时, 变形可以达到 25% 以上, 而电导率变化不超过 2%[35]。本文中,

虽然假设 PDMS 衬底变形达到 40%，但石墨烯横向没有充满整个单元，实际拉伸没超过 25%。可认为电导率近似保持不变。

参考实验结果，文中 T 设为 300 K，Γ 设为 1 ps。Pedot:PSS 是 EDOT（3, 4-乙烯二氧噻吩单体）的聚合物和 PSS(聚苯乙烯磺酸盐) 混合构成的高分子聚合物，导电率很高，根据不同的配方，可以得到不同导电率，主要应用于有机发光二极管 (OLED)、有机太阳能电池、有机薄膜晶体管、超级电容器等的空穴传输层等领域，在太赫兹波段导电能力可以与金属结构相媲美[32]。本文把 Pedot:PSS 喷涂到 PDMS 表面作为导电层反射入射太赫兹波，并可以在 PDMS 拉伸时保持良好的反射性能。

本文设计的 1.0 THz 柔性基底动态调焦石墨烯太赫兹超表面聚焦反射镜沿 x 方向不同位置超表面单元对应的相位分布满足公式[36]:

$$\varphi(x)=\frac{2\pi}{\lambda}\left(\sqrt{r^2+f^2}-f\right)\approx\frac{\pi r^2}{f\lambda}\quad , \qquad (3)$$

其中，f=60 mm 是初始设定的焦距，λ=300 μm 是入射波长，r 是离散的单元结构距透镜原点的位置，由于 $r\leqslant L$=12 mm，则 $r\ll f$，式 (3) 中的约等号此时成立。

柔性基底动态调焦石墨烯太赫兹超表面聚焦反射镜工作原理如图 2 所示。其中图 2(a) 为拉伸前反射镜的工作状态，PDMS 衬底距原点的横向距离为 r，基底厚度为 d，焦距为 f。当 PDMS 衬底沿 x 方向拉伸 ε 后（如图 2(b) 所示），拉伸后的衬底长度为 L'=(1+ε)L，衬底厚度为 d/(1+ε)，焦距变为 f'=(1+ε)^2f。

PDMS 柔性基底拉伸范围可达到初始值的 150% 以上，拉伸之后的相位满足公式[28]:

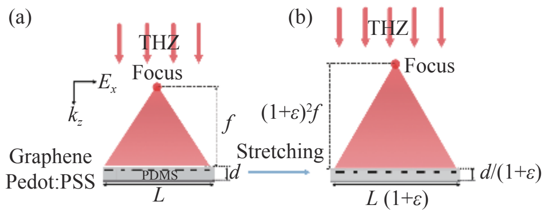


图 2　柔性基底动态调焦石墨烯太赫兹超表面聚焦反射镜工作示意图。(a) 为拉伸前反射镜，衬底横向长度为 L，基底厚度为 d，焦距为 f; (b) 为衬底 PDMS 沿 x 轴拉伸 ε 后反射镜，横向长度变为 L(1+ε)，基底厚度为 d/(1+ε)，焦距 f' 变为 (1+ε)^2f

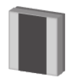
Fig. 2　Schematic of the dynamic focusing graphene terahertz metasurface focusing on a flexible substrate. (a) is the encapsulated in a flexible polymer, the lateral length of the substrate is L, the thickness of the base is d, and the focal length is f; (b) is the reflector after the substrate PDMS stretches ε along the x axis, the lateral length becomes L(1+ε), the substrate thickness is d/(1+ε), and the focal length f' becomes (1+ε)^2f

$$\varphi'(r)\approx\frac{\pi r^2}{\lambda f'}=\frac{\pi r^2}{\lambda(1+\varepsilon)^2 f}\quad . \qquad (4)$$

在讨论了柔性基底石墨烯超表面聚焦反射镜的工作原理后，下面具体设计组成反射镜的超表面亚波长单元结构。为了减小仿真设计的运算量，这里选择亚波长单元周期 p=λ/2，利用电磁有限时域差分 (FDTD) 方法扫描计算石墨烯的化学势 μ_c 和宽度 w，得到单元结构的反射系数和反射相位，如图 3(a) 和 3(b) 所示。经过优化计算，8 个单元结构覆盖 0~2π 相位，相位差为 π/4，如图 3(c) 所示。这些单元在保持线性相位梯度的同时具有较高的反射率，最高为 99%，最低为 77%，详细参数设计结果见表 1。图 3(d) 为 PDMS 衬底横向拉伸前后单元相位随位置变化情况。

表 1　柔性基底动态调焦石墨烯太赫兹超表面单元结构参数设计结果

Tab. 1　The design results of structural parameters of graphene terahertz metasurface units for dynamic focusing on flexible substrates

Cell(#)								
Parameter	w=110 μm u_c = 1.00 eV	w=140 μm u_c = 0.35 eV	w=135 μm u_c = 0.14 eV	w=75 μm u_c = 0.13 eV	w=20 μm u_c = 0.03 eV	w=37 μm u_c = 0.30 eV	w=40 μm u_c = 0.45 eV	w=85 μm u_c = 0.30 eV
Phase(rad)	−3.14	−2.31	−1.50	−0.76	0.02	0.74	1.56	2.37
Reflection	0.93	0.83	0.78	0.77	0.96	0.99	0.85	0.99

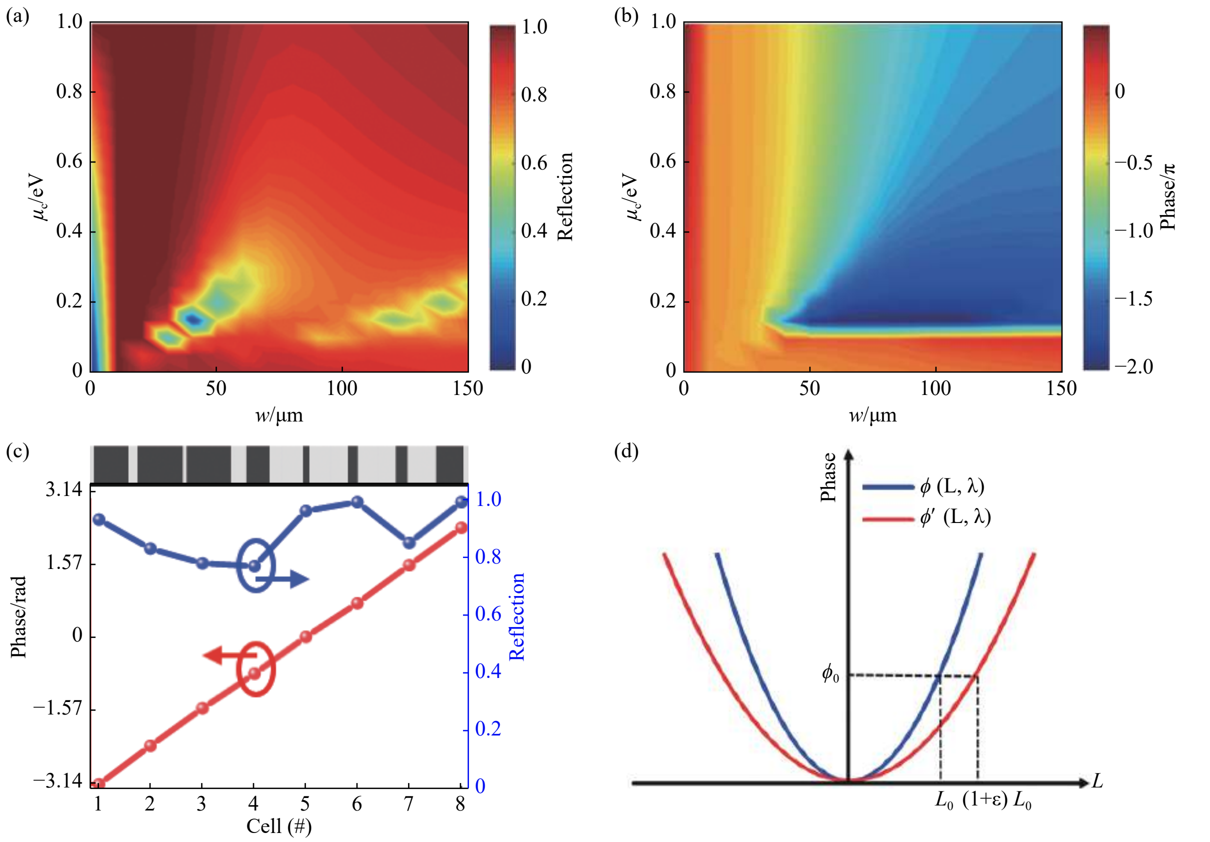


图 3　柔性基底动态调焦石墨烯太赫兹超表面单元结构设计。(a) 和 (b) 是单元结构的反射系数和相位随石墨烯的化学势 μ_c 和宽度 w 变化情况; (c) 为经过优化计算得到的 8 个单元结构的反射系数和相位响应; (d) 为拉伸前后 PDMS 衬底横向距原点距离与相位关系图

Fig. 3　The design of graphene terahertz metasurface unit structure for dynamic focusing on flexible substrate. (a) and (b) is the change of the reflection coefficient and phase of the unit structure with the chemical potential μ_c and width w of graphene; (c) is the reflection coefficient and phase response of the eight unit structure obtained through optimization calculation; (d) is a diagram of the relationship between the PDMS substrate lateral distance from the origin and the phase before and after stretching

在合适的覆盖 0~2π 相位的超表面单元基础上(如表 1 所示), 利用 FDTD 方法仿真计算了不同拉伸比时的柔性基底石墨烯太赫兹超表面反射镜的聚焦效果, 图 4(a)~4(e) 是 PDMS 衬底拉伸比率分别为 100%、110%、120%、130%、140% 时电磁场分布情况, 可以看到反射镜焦距随着拉伸幅度增大而变长。当基底的伸展长度由 100% 变为 140% 时, 反射镜的焦距由 53.4 mm 增加到 112.1 mm, 动态调焦范围可达到最小焦距的 109.7%, 同时聚焦效率从 69.7% 减小到 46.8%, 这里聚焦效率的定义是焦点处三倍半高全宽反射光强度与整个入射光强度的比值[37]。由于石墨烯在太赫兹波段下欧姆损耗小于其他金属材料, 因此使用石墨烯材料获得的聚焦效率将高于使用金属的聚焦效率 2.71%[22]。

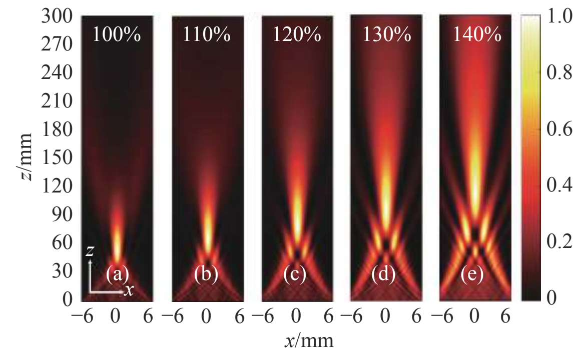


图 4　柔性基底动态调焦石墨烯太赫兹超表面聚焦反射镜在入射波频率为 1.0 THz, 衬底拉伸时归一化的电场分布。其中 (a)~(e) 对应衬底拉伸 100%~140%

Fig. 4　The normalized electric field distribution of the dynamic focusing graphene terahertz metasurface focusing mirror on the flexible substrate when the incident wave frequency is 1.0 THz and the substrate is stretched. (a)~(e) correspond to 100%~140% of the substrate stretch

图 5 给出了 PDMS 基底拉伸幅度从 100% 到 140% 时公式 $f' = (1+\varepsilon)^2 f$ 的理论焦距长度与 FDTD 仿真焦距长度对比情况，两者之间最小相差 4.6%，最大相差 11.1%，说明衬底拉伸和焦点变化之间的关系较为准确。两者出现不一致的原因是通过 FDTD 设计的单元反射相位与理论值之间存在误差。

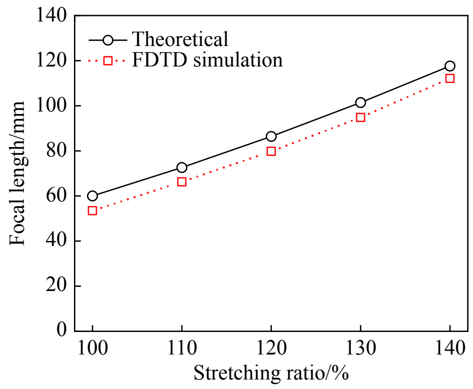


图 5 柔性基底动态调焦石墨烯太赫兹超表面聚焦反射镜入射波频率为 1.0 THz，衬底拉伸时理论焦距（黑色圆圈）与仿真计算焦距（红色方块）对比情况

Fig. 5 The theoretical focal length (black circle) given by formula (4) when the substrate is stretched is compared with the simulated focal length (red square). The frequency of the incident wave of the dynamic focusing graphene terahertz metasurface focusing mirror on the flexible substrate is 1.0 THz

3 宽带性能分析与结果讨论

在实际应用中往往希望反射镜具有较宽的工作频带。本节将讨论反射镜在 0.85~1.0 THz 宽频带范围内的焦距动态可调性能。图 6 为不同工作频率下，拉伸范围为 100% 到 140% 时沿 z 轴 (x=0) 的电场强度分布图，其中图 6(a)~6(d) 对应频率分别为 0.85、0.90、0.95 和 1.0 THz。当频率为 0.85 THz 时，焦点电场强度随衬底拉伸增加先增大后减小，拉伸为 120% 时强度达到最大；当频率为 0.90 THz 时，衬底拉伸范围为 100% 到 120% 时，焦点电场强度没有明显变化，然后随着拉伸幅度的增大而逐渐减小；当频率为 0.95 THz 时，焦点电场强度变化呈现先增加后减少的趋势；当频率为 1.0 THz 时，随衬底拉伸范围从 100% 到 140% 逐渐增大，

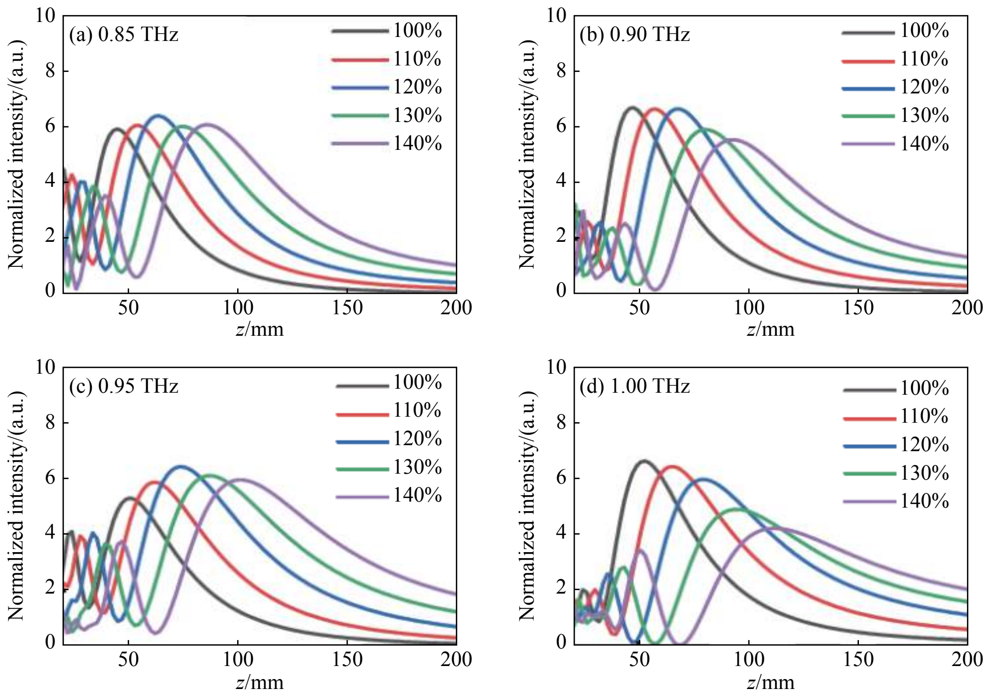


图 6 柔性基底动态调焦石墨烯太赫兹超表面聚焦反射镜在 0.85~1.0 THz 宽频工作频率下，PDMS 拉伸幅度为 100% 到 140% 时，沿 z 轴 (x=0) 的电场强度分布图。其中 (a)~(d) 对应频率为 0.85 THz、0.90 THz、0.95 THz 和 1.0 THz

Fig. 6 The electric field intensity distribution of the graphene terahertz meta-surface focusing mirror with flexible substrate dynamic focusing along the z-axis (x=0) at 0.85~1.0 THz broadband operating frequency when the PDMS stretching range is 100% to 140%. Among them (a)~(d) correspond to frequencies 0.85 THz, 0.90 THz, 0.95 THz and 1.0 THz, respectively

焦点电场强度逐渐变小。当频率为 0.9 THz、衬底拉伸为 120% 时, 焦点电场强度达到最大值。

为了更好地分析透镜的聚焦质量, 本文进一步研究了沿 x 轴焦平面的电场强度分布, 结果如图 7 所示。可以看出, 工作频率在 0.85~1.0 THz 之间变化时, 焦点宽度随频率变化不明显。衬底拉伸范围在 100% 到 140% 时, 焦点宽度逐渐增加, 这与反射镜横向距离增加相一致。当衬底拉伸为 140% 时, 焦点半高全宽 (FWHM) 随频率的增加而加大, 工作频率为 0.85、0.90、0.95、1.0 THz 对应的 FWHM 的数值分别为 1.44、1.58、1.69 和 1.76 mm。因此焦斑直径在工作波长的 4~6 倍左右, 还有较大的优化设计空间。

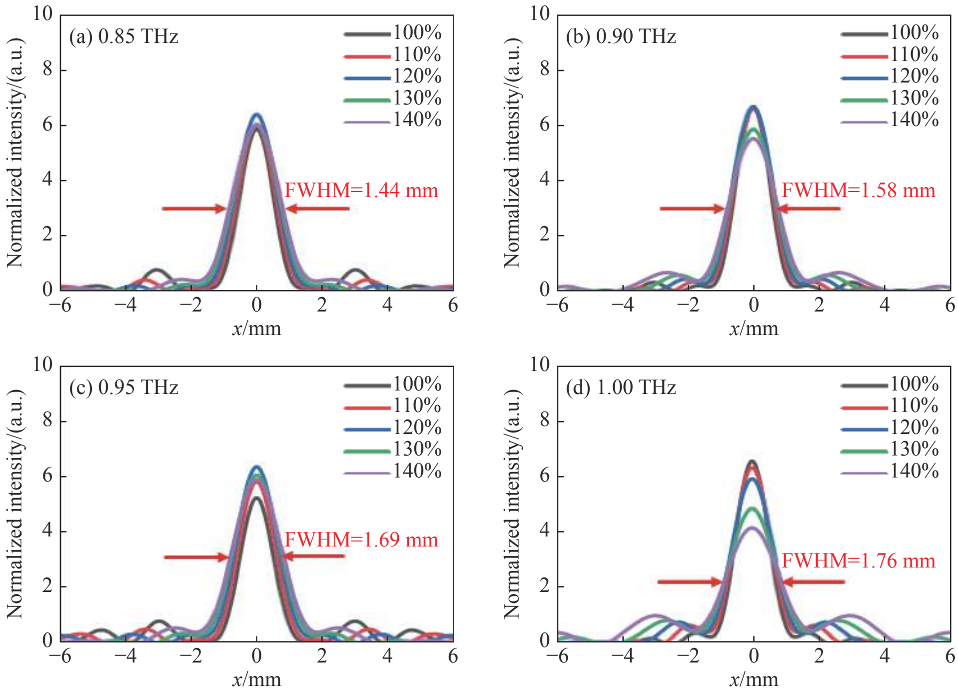


图 7　柔性基底动态调焦石墨烯太赫兹超表面聚焦反射镜在 0.85~1.0 THz 宽频工作频率内, PDMS 拉伸幅度为 100%~140% 的焦平面的电场强度分布图。其中 (a)~(d) 对应频率为 0.85 THz、0.90 THz、0.95 THz、1.0 THz。

Fig. 7　The electric field intensiy distributiton of the focal plane of the graphene terahertz meta-surface focusing mirror with flexible substrate dynamic focusing at 0.85~1.0 THz broadband operating frequency when the PDMS stretching range is 100%~140%. (a)~(d) correspond to frequencies of 0.85 THz, 0.90 THz, 0.95 THz, 1.0 THz.

通过电场分布虽然可以研究聚焦反射镜的聚焦能力, 但还不够全面, 焦点位置变化和聚焦效率是更为全面研究聚焦效果的定量指标。为了研究反射镜在宽频带范围内的性能, 本文研究了不同频率下电场分布随柔性衬底拉伸的变化情况, 从而进一步研究透镜的聚焦效率和焦点位置的动态变化情况。由图 8(a) 可看出: 不同频率的反射镜在衬底拉伸为 100%~140% 时焦距呈非线性增加的趋势, 这与公式 $f' = (1+\varepsilon)^2 f$ 的拉伸后焦距与原焦距为拉伸系数平方增加关系相符。同时, 当频率从 0.85 THz 增加到 1.0 THz 时, 绝对调焦范围从 39.5 mm 增加到 58.6 mm。而相对调焦范围, 即动态焦距与最小焦距的比值从 85.2% 增加到 109.6%。图 8(b) 则表明不同衬底拉伸幅度下焦距随频率增加呈线性增加趋势, 而且拉伸幅度越大, 焦点在 0.85~1.0 THz 内变化越大, 从拉伸 100% 时相差 7.5 mm, 到拉伸 140% 时相差 26.3 mm。

图 8(c) 给出了不同频率下的反射镜在衬底拉伸 100%~140% 时, 聚焦效率的变化情况。结果表明, 在 0.85 THz 和 0.90 THz 时聚焦效率随衬底拉伸的变化不大, 在 57%~67% 之间。对于 0.95 THz 和 1.0 THz 工作频率, 聚焦效率随衬底拉伸而减小, 特别是频率为 1.0 THz 时聚焦效率从 69.2% 降为 46.7%, 降幅明显。图 8(d) 则说明在相同的拉伸幅度下, 0.85~1.0 THz 范围聚焦效率除拉伸 100% 时波动较大外, 总体变化比较平稳。

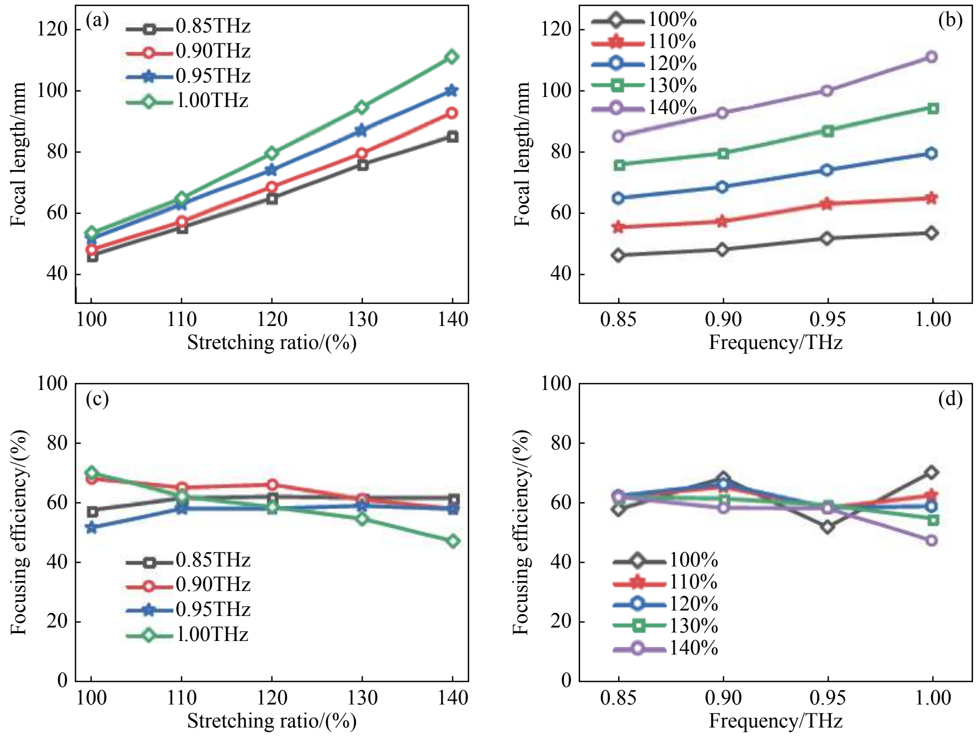


图 8 石墨烯太赫兹超表面聚焦反射镜在 0.85~1.0 THz 宽频工作频率下的焦点位置 (a, b) 和聚焦效率 (c, d) 随柔性基底伸长 100%~140% 变化情况

Fig. 8 The focus position (a, b) and focusing efficiency (c, d) of the graphene terahertz meta-surface focusing mirror at 0.85~1.0 THz broadband operating frequency varying with the elongation of the flexible substrate in the range of 100%~140%

以上结果说明该反射镜在 0.85~1.0 THz 较宽频率范围内衬底拉伸时都具有很好的聚焦性能，聚焦效率均在 46.7% 以上，最高可达 69.1%。调焦范围从 46.3 mm 到 112 mm，动态范围大。同时，焦斑直径还比较大，有进一步优化的空间。

4 结 论

本文结合石墨烯反射相位可通过几何形状及化学势灵活调控，以及 PDMS 柔性基底可大幅度拉伸的原理设计了一种工作在太赫兹波段可大范围动态调焦的表面聚焦反射镜。该反射镜设计中心工作频率为 1.0 THz，焦距为 60 mm，基底厚度仅为 75 μm，单元结构较为简单，焦距动态调控范围大。当柔性基底由 100% 拉伸到 140% 时，利用 FDTD 仿真计算可得反射镜的焦距由 53.4 mm 增加到 112.1 mm，动态调焦范围可达到最小焦距的 109.7%，同时聚焦效率从 69.7% 减小到 46.8%。随着石墨烯制造技术的成熟，可以制造不同宽度的石墨烯条，利用化学掺杂可以实现其化学势的调控，使得该类型柔性超表面制作更为便利。该反射镜可在宽频带范围内工作。仿真结果表明：当入射平面波的频率位于 0.85~1.0 THz 范围时，能实现良好的动态聚焦效果，在太赫兹波段的无线通信、雷达、动态成像及全息显示等应用中有很好的应用潜力。

参考文献:

[1] MANJAPPA M, SINGH R. Materials for terahertz optical science and technology[J]. *Advanced Optical Materials*, 2020, 8(3): 1901984.

[2] HE J W, DONG T, CHI B H, *et al*.. Metasurfaces for terahertz wavefront modulation: a review[J]. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 2020, 41(6): 607-631.

[3] ARBABI E, ARBABI A, KAMALI S M, *et al*.. MEMS-tunable dielectric metasurface lens[J]. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 812.

[4] 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.

[5] 林雨, 蒋春萍. 可调谐超构透镜的发展现状[J]. 中国光学, 2020, 13(1): 43-61.
LIN Y, JIANG CH P. Recent progress in tunable metalenses[J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(1): 43-61. (in Chinese)

[6] SHERROTT M C, HON P W C, FOUNTAINE K T, *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.

[7] BELOTELOV V I, KREILKAMP L E, AKIMOV I A, *et al*.. Plasmon-mediated magneto-optical transparency[J]. *Nature Communications*, 2013, 4: 2128.

[8] LI L L, CUI T J, JI W, *et al*.. Electromagnetic reprogrammable coding-metasurface holograms[J]. *Nature Communications*, 2017, 8(1): 197.

[9] LIU P X, ZHAO Y, QIN R X, *et al*.. Photochemical route for synthesizing atomically dispersed palladium catalysts[J]. *Science*, 2016, 352(6287): 797-800.

[10] KOCH U, HOESSBACHER C, EMBORAS A, *et al*.. Optical memristive switches[J]. *Journal of Electroceramics*, 2017, 39(1-4): 239-250.

[11] WANG K H, LI J SH, YAO J Q. Sensitive terahertz free space modulator using $CsPbBr_3$ perovskite quantum dots–embedded metamaterial[J]. *Journal of Infrared*, *Millimeter*, *and Terahertz Waves*, 2020, 41(5): 557-567.

[12] WANG Y, CUI Z J, ZHU D Y, *et al*.. Tailoring terahertz surface plasmon wave through free-standing multi-walled carbon nanotubes metasurface[J]. *Optics Express*, 2018, 26(12): 15343-15352.

[13] HE J W, XIE ZH W, SUN W F, *et al*.. Terahertz tunable metasurface lens based on vanadium dioxide phase transition[J]. *Plasmonics*, 2016, 11(5): 1285-1290.

[14] GUO J Y, WANG T, ZHAO H, *et al*.. Reconfigurable terahertz metasurface pure phase holograms[J]. *Advanced Optical Materials*, 2019, 7(10): 1801696.

[15] LI SH Q, XU X W, VEETIL R M, *et al*.. Phase-only transmissive spatial light modulator based on tunable dielectric metasurface[J]. *Science*, 2019, 364(6445): 1087-1090.

[16] SHE A L, ZHANG SH Y, SHIAN S, *et al*.. Adaptive metalenses with simultaneous electrical control of focal length, astigmatism, and shift[J]. *Science Advances*, 2018, 4(2): eaap9957.

[17] ZHU W M, SONG Q H, YAN L B, *et al*.. A flat lens with tunable phase gradient by using random access reconfigurable metamaterial[J]. *Advanced Materials*, 2015, 27(32): 4739-4743.

[18] BEHROOZINIA S, RAJABALIPANAH H, ABDOLALI A. Real-time terahertz wave channeling via multifunctional metagratings: a sparse array of all-graphene scatterers[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(4): 795-798.

[19] FAN Y CH, SHEN N H, ZHANG F L, *et al*.. Photoexcited graphene metasurfaces: significantly enhanced and tunable magnetic resonances[J]. *ACS Photonics*, 2018, 5(4): 1612-1618.

[20] HUANG Y C, LIN M F, CHANG C P. Landau levels and magneto-optical properties of graphene ribbons[J]. *Journal of Applied Physics*, 2008, 103(7): 073709.

[21] DING P, LI Y, SHAO L, *et al*.. Graphene aperture-based metalens for dynamic focusing of terahertz waves[J]. *Optics Express*, 2018, 26(21): 28038-28050.

[22] HUANG Z G, HU B, LIU W G, *et al*.. Dynamical tuning of terahertz meta-lens assisted by graphene[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2017, 34(9): 1848-1854.

[23] CHEN D B, YANG J B, HUANG J, *et al*.. The novel graphene metasurfaces based on split-ring resonators for tunable polarization switching and beam steering at terahertz frequencies[J]. *Carbon*, 2019, 154: 350-356.

[24] YIN ZH P, ZHENG Q, WANG K Y, *et al*.. Tunable dual-band terahertz metalens based on stacked graphene metasurfaces[J]. *Optics Communications*, 2018, 429: 41-45.

[25] 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.

[26] HAN S J, KIM S, KIM S, *et al*.. Complete complex amplitude modulation with electronically tunable graphene plasmonic metamolecules[J]. *ACS Nano*, 2020, 14(1): 1166-1175.

[27] KAMALI S M, ARBABI E, ARBABI A, *et al*.. Highly tunable elastic dielectric metasurface lenses[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2016, 10(6): 1002-1008.

[28] CALLEWAERT F, VELEV V, JIANG SH ZH, *et al*.. Inverse-designed stretchable metalens with tunable focal

distance[J]. *Applied Physics Letters*, 2018, 112(9): 091102.

[29] 杨渤, 程化, 陈树琪, 等. 基于傅里叶分析的超表面多维光场调控[J]. 光学学报, 2019, 39(1): 86-104.

YANG B, CHENG H, CHEN SH Q, *et al*.. Multi-dimensional manipulation of optical field by metasurfaces based on Fourier analysis[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(1): 86-104. (in Chinese)

[30] CHEN M K, WU Y, FENG L, *et al*.. Principles, Functions and Applications of Optical Meta-lens[J]. *Advanced Optical Materials*, 2021, 9(4): 2001414.

[31] 都妍, 武亚君, 张元, 等. 基于导电聚合物的太赫兹频率选择表面[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2019, 17(2): 205-208.

DU Y, WU Y J, ZHANG Y, *et al*.. Terahertz frequency selective surface based on DMSO-doped PEDOT: PSS films[J]. *Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology*, 2019, 17(2): 205-208. (in Chinese)

[32] PANCHAKARLA L S, SUBRAHMANYAM K S, SAHA S K, *et al*.. Synthesis, structure, and properties of boron- and nitrogen- doped graphene[J]. *Advanced Materials*, 2009, 21(46): 4726-4730.

[33] WEI D CH, LIU Y Q, WANG Y, *et al*.. Synthesis of N-doped graphene by chemical vapor deposition and its electrical properties[J]. *Nano Letters*, 2009, 9(5): 1752-1758.

[34] GUO B D, FANG L, ZHANG B H, *et al*.. Graphene doping: a review[J]. *Insciences Journal*, 2011, 1(2): 80-89.

[35] CHHIKARA M, GAPONENKO I, PARUCH P, *et al*.. Effect of uniaxial strain on the optical Drude scattering in graphene[J]. *2D Materials*, 2017, 4(2): 025081.

[36] YU N F, CAPASSO F. Flat optics with designer metasurfaces[J]. *Nature Materials*, 2014, 13(2): 139-150.

[37] ARBABI A, HORIE Y, BALL A J, *et al*.. Subwavelength-thick lenses with high numerical apertures and large efficiency based on high-contrast transmitarrays[J]. *Nature Communications*, 2015, 6(1): 7069.

作者简介：

李向军(1976—), 男, 山西长治人, 博士, 副教授, 2011 年于浙江大学获得博士学位, 主要从事太赫兹器件研究。E-mail: xiangjun_li@cjlu.edu.cn

严德贤(1991—), 男, 甘肃武威人, 博士, 讲师, 2018 年于天津大学获得博士学位, 主要从事太赫兹源及器件研究。E-mail: yandexian1991@cjlu.edu.cn