

doi:10.3788/gzxb20184702.0223002

臂型网格结构增强石墨烯电调制太赫兹透射

邹仪宣^{1,2},董连和¹,夏良平^{2,3},刘松林^{1,2}

(1 长春理工大学 光电工程学院, 长春 130022)

(2 中国科学院重庆绿色智能技术研究院 跨尺度制造技术重庆市重点实验室, 重庆 400714)

(3 长江师范学院 电子信息工程学院, 重庆 400814)

摘要:为提高单层石墨烯薄膜电控太赫兹调制器的调制深度,提出一种臂型金属网格微结构与石墨烯结合的太赫兹波透射调制器件.通过臂型金属网格结构激发的共振耦合场增强石墨烯与太赫兹波的相互作用,使石墨烯在外加电压调制下对太赫兹波透射幅度的调制深度获得大幅提升.通过有限元仿真分析了金属结构参数对石墨烯与太赫兹波相互作用增强规律的影响,理论结果表明,臂型网格结构使石墨烯对太赫兹波透射幅度调制深度从 7.7% 提升到了 28.2%.在理论结果的基础上,基于光刻工艺完成了器件的结构制作,实验测试中获得了 24% 的太赫兹幅度调制深度,且调制深度曲线与理论仿真规律基本一致.

关键词:应用光学;太赫兹波;有限元分析;石墨烯;金属结构;调制;共振

中图分类号:O439

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2018)02-0223002-6

Graphene Electrically Modulating Terahertz Transmission Enhanced by Arm Type Metal Mesh Structure

ZOU Yi-xuan^{1,2}, DONG Lian-he¹, XIA Liang-ping^{2,3}, LIU Song-lin^{1,2}

(1 School of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

(2 Chongqing Key Laboratory of Multi-scale Manufacturing Technology, Chongqing Institute of Green and Intelligent Technology, Chinese Academy of Sciences, Chongqing 400714, China)

(3 School of Electronic Information Engineering, Yangtze Normal University, Chongqing 400814, China)

Abstract: In order to improve the modulation depth of the single layered graphene electronic controlled terahertz modulator, a terahertz transmission modulator with an arm type metal mesh structure combined with graphene is proposed. The resonant coupling field excited by the arm type metal mesh structure enhances the interaction between graphene and terahertz wave, which greatly improves the modulation depth of the terahertz modulator when the modulation voltage is applied. The influences on the interaction enhancement of graphene and terahertz wave at different metal structure parameters are analyzed by finite element method simulation. The theoretical results indicate that the arm type metal grid structure increases the modulation depth from 7.7% to 28.2%. On the basis of the theoretical results, the device is fabricated with the photolithography process. The 24% modulation depth is obtained in the experimental measurements, and the experimental modulation depth curve is basically in agreement with the theoretical simulation.

Key words: Applied optics; Terahertz wave; Finite element analysis; Graphene; Metal structures; Modulation; Resonance

OCIS Codes: 250.4110; 260.5740; 230.3990; 300.6495; 060.4080

基金项目:国家自然科学基金(Nos.61775213, 61504147)和中科院西部之光项目资助

第一作者:邹仪宣(1992-),女,硕士研究生,主要研究方向为微纳光学器件制造理论与工艺技术. Email: zouyixuan@cigit.ac.cn

通讯作者:董连和(1953-),男,教授,博士,主要研究方向为光学微纳制造理论与工艺技术. Email: custdong@126.com.

导师:夏良平(1986-),男,副研究员,博士,主要研究方向为微纳光学、太赫兹技术. Email: xialp@cigit.ac.cn

收稿日期:2017-08-28;录用日期:2017-10-23

<http://www.photon.ac.cn>

0 引言

太赫兹波作为介于微波与红外波段之间的电磁波,拥有高穿透、高方向性、高通信容量等独特性质.太赫兹波调制器是太赫兹通信、雷达等应用领域的基本器件之一^[1-2].传统的太赫兹调制主要采用半导体材料来实现,然而传统半导体较低的载流子迁移率限制了太赫兹调制器的调制速率^[3-4].石墨烯是近年来发现的一种具有优异的电学、光学特性的二维材料.相对于传统半导体材料,其具有高载流子迁移速率、零带隙以及单原子层等显著物理特性^[5-7].基于这些特性,石墨烯材料在高速电子器件、集成光子器件^[8-10]及光电子器件等领域具有重大应用潜力^[11-13],也使提升太赫兹调制器的调制速率成为可能,并掀起了石墨烯太赫兹调制研究热潮^[14-16].然而,由于石墨烯只有单原子层厚度,其与太赫兹波的相互作用较弱,导致石墨烯太赫兹调制器的调制深度较低.

为了提升石墨烯太赫兹调制器的调制深度,目前的研究主要集中在以下几种方式:1)调整石墨烯层与电极间的介质层材料种类与工艺质量^[17-19],尽可能地增大石墨烯层费米能级的调制范围,但该方式对介质层的工艺要求较高;2)引入泵浦激光^[20-21],通过光注入的方式增加石墨烯层中载流子浓度的调制范围,但光注入会增加调制功耗和系统复杂性.此外,通过引入金属微纳结构,利用金属微纳结构的局域增强效应增强单层石墨烯薄膜与太赫兹波的相互作用,也可大幅提升石墨烯太赫兹调制器的调制深度,目前已有大量理论研究报道了这一方式^[22-24],显示其调制深度的提升与金属微纳结构形态、结构参数等密切相关.

本文提出一种臂型金属网格结构的石墨烯太赫兹透射幅度调制器件.在该器件中,通过臂型结构的谐振作用激发太赫兹局域增强场,该增强场与石墨烯相互作用,达到提升其太赫兹透射调制深度的目的.通过有限元仿真手段分析臂型金属网格结构对单层石墨烯太赫兹透射调制深度的性质和参数影响规律,并进行实验验证.

1 结构与理论

1.1 器件结构

提出的基于臂型金属网格结构增强的石墨烯太赫兹透射幅度调制器的结构示意图如图 1.其中,图 1(a)为该器件的侧视图,器件最下方的衬底采用在太赫兹频段内损耗小的聚对苯二甲酸乙二醇酯(Polyethyleneterephthalate, PET)聚合物薄膜作为器件支撑层.臂型金属网格结构位于 PET 衬底表面,该结构既是电磁增强层,也是整个太赫兹调制器的一个调制电极.位于金属结构层与石墨烯层间的介质层选用聚甲基丙烯酸甲酯(PolymethylMethacrylate, PMMA)材料,石墨烯与另一个调制电极相连.图 1(b)展示了臂型金属网格结构的一个单元,其中 p 为单元周期, b 为金属臂的宽度, c 为金属网格两线条之间的间距, d 为相对的两臂之间的间距.该单元重复展开,即形成如图 1(c)所示的臂型金属网格阵列.

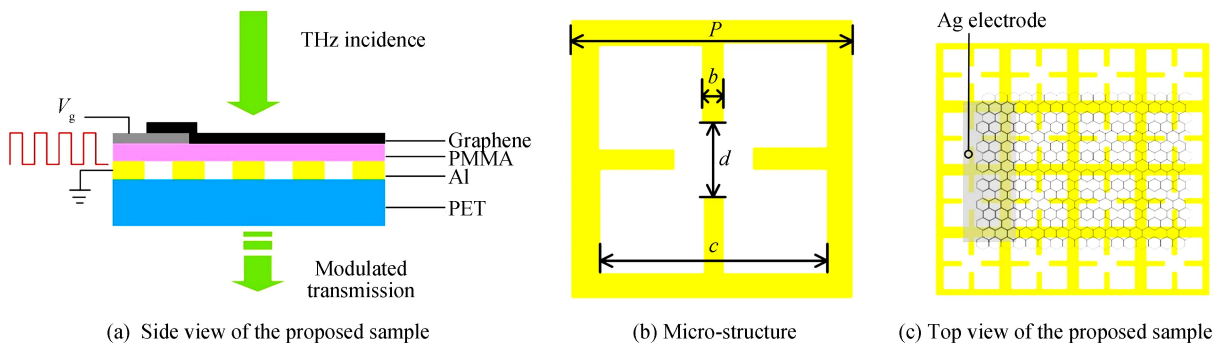


图 1 装置结构示意图

Fig.1 Schematic illustration of proposed sample

当太赫兹波入射到该器件上时,将激发臂型金属网格结构产生电磁耦合共振效应,形成异常透射.同时由于结构中存在断开的金属臂,其电磁耦合共振将在相对的金属臂间激发局域增强场,由于隔离石墨烯与金属结构的介质层厚度薄,这一激发的局域增强场将与石墨烯相互作用,即达到增强太赫兹波与单层石墨烯相互作用的效果.在这一增强作用下,当石墨烯的费米能级被外加调制电压改变时,其对穿透的太赫兹波的影响也将被扩大,最终实现太赫兹透射调制深度的提升.

1.2 仿真分析

为了验证该臂型金属网格结构的石墨烯太赫兹透射幅度调制器的调制增强效果,首先采用有限元方法对其太赫兹透射光谱进行仿真.考虑到结构的周期性,仿真只针对图 1(b)所对应的一个周期,结合周期边界条件开展.仿真过程中 PET 支撑层厚度为 $36 \mu\text{m}$,介电常数为 4,臂型金属网格结构层采用铝,其厚度为 100 nm ,电导率 $3.56 \times 10^7 \text{ S/m}$,PMMA 介质层厚度为 150 nm ,介电常数为 4,石墨烯薄膜厚度设为 1 nm , $\Gamma=1 \times 10^{12} \text{ Hz}$,在温度为 300 K 下其介电常数通过 Drude 模型获得^[25-27].为了使臂型金属结构共振频率位于太赫兹波段内,其结构参数设为 $p=150 \mu\text{m}$, $b=12 \mu\text{m}$, $c=120 \mu\text{m}$, $d=40 \mu\text{m}$.为了获得臂型金属网格结构的太赫兹调制增强效果,对不含臂型网格结构的对比结构进行相同的仿真计算.

石墨烯的电控调制过程等效为其费米能级的变化,当其费米能级在 $0 \sim 0.1 \text{ eV}$ 变化时,仿真得到的两种结构模型的太赫兹透射谱如图 2(a),对于臂型金属网格结构模型,其透射光谱在 0.6 THz 附近存在明显的透射峰,表示在该频率下臂型金属网格结构激发了耦合共振,在共振峰附近该器件的透射率随石墨烯费米能级增大而显著减小,而对于没有臂型金属网格结构的对比模型,其透射光谱中没有共振峰,且其太赫兹透射强度随石墨烯费米能级改变的变化量显著低于含臂型网格增强结构的器件.为了将臂型金属网格结构的调制增强定量,在共振峰值处计算了两种调制器件的调制深度 M ,即

$$M = \frac{|T(V_g) - T_{\max}|}{T_{\max}} \times 100\% \quad (1)$$

式中, $T(V_g)$ 为不同费米能级下的透射率, T_{\max} 为最大透射率.计算结果显示,在臂型金属网格结构的共振频点处调制深度为 28.2% ,其太赫兹透射幅度调制深度相较于其对比结构的太赫兹调制器 7.7% 的调制深度提升了近 4 倍,说明该结构在其共振频率下对石墨烯太赫兹调制器调制深度的提升作用显著.

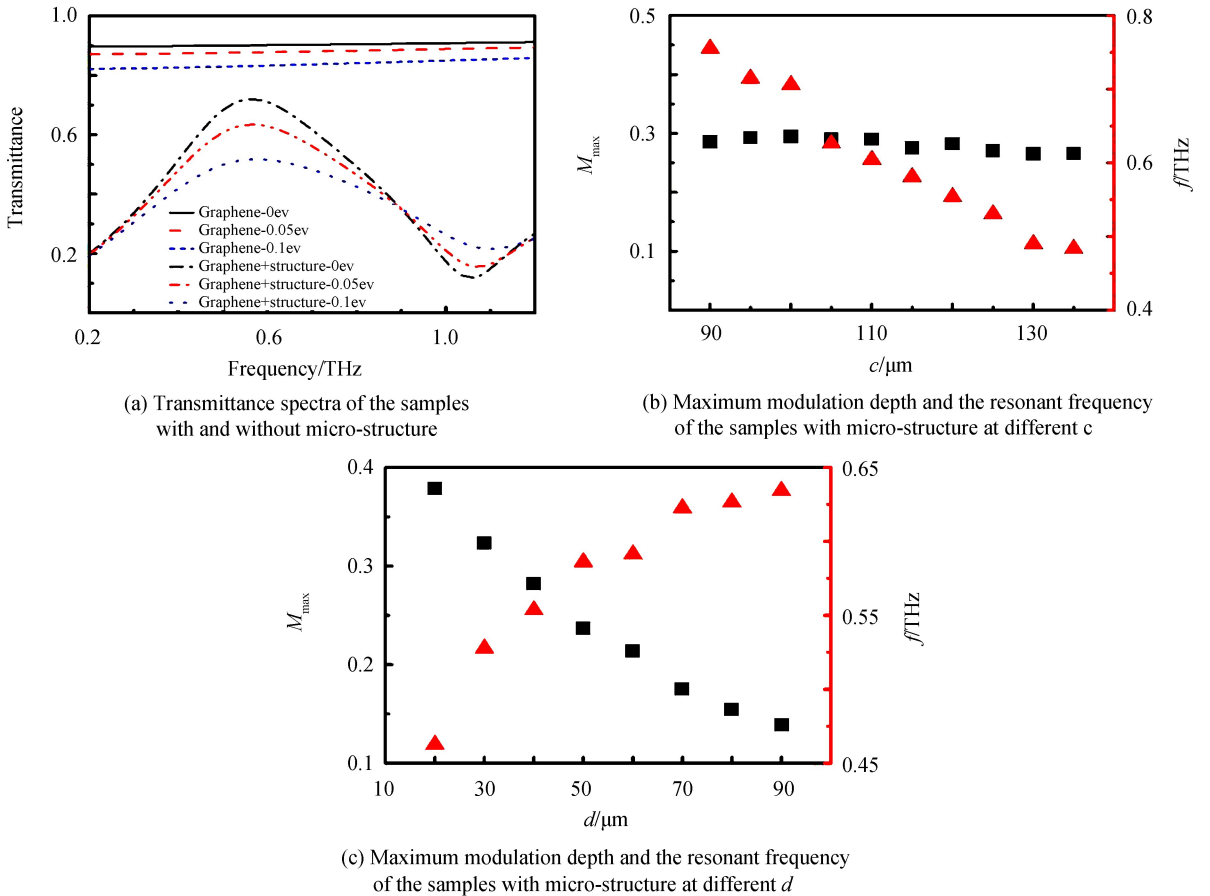


图 2 仿真结果

Fig.2 Simulation results

为了分析臂型金属网格结构对石墨烯调制太赫兹波的调制增强规律,对不同臂型金属网格结构参数下的模型进行了仿真.首先改变金属网格相邻线条之间的间距 c ,其他参数保持不变,当 c 从 $90 \mu\text{m}$ 增加到

135 μm 时,其耦合共振频率和共振频率下器件的幅度调制深度的变化规律如图 2(b).随着 c 的增大共振频率 f 呈线性趋势降低,但共振频率下对应的太赫兹幅度调制深度 M 基本保持不变,说明通过调整臂型金属网格结构中网格线的距离可调整调制器的工作频率,且不会对其太赫兹透射幅度调制深度产生显著影响.当改变结构中相对的两臂之间的间距 d 时,其对应的计算结果如图 2(c).该结果显示随着 d 的增大中心频率 f 呈对数升高,但共振频率下对应的太赫兹调制深度 M 呈指数下降.表明为了通过臂型金属网格结构实现调制深度的大幅提升,相对臂之间的距离应尽可能小.

针对臂型金属网格结构参数对太赫兹透射幅度调制深度增强的影响规律,进一步地对不同结构参数下石墨烯层中在共振频率处的电场分布进行了仿真,其结果如图 3.表明在不同参数下,臂型金属网格结构所激发的耦合共振增强场在石墨烯层中的分布一致,且耦合增强的电场主要集中在相对的臂之间.因此,当金属网格相邻的线距 c 发生变化时,其耦合增强电场的强度变化不大,表明该结构参数对金属结构增强石墨烯与太赫兹的相互作用的影响较小,如图 3(a),这一结果与图 2(b)中太赫兹透射幅度调制深度增强效果对该结构参数不敏感的规律一致.但当相对的金属臂之间的距离 d 增大时,如图 3(b),电磁耦合共振在金属臂间激发局域增强场逐渐减弱,太赫兹波与单层石墨烯相互作用增强效果逐渐减小,与图 2(c)中太赫兹调制深度 M 随着 d 的增大而减小的仿真结果保持一致.

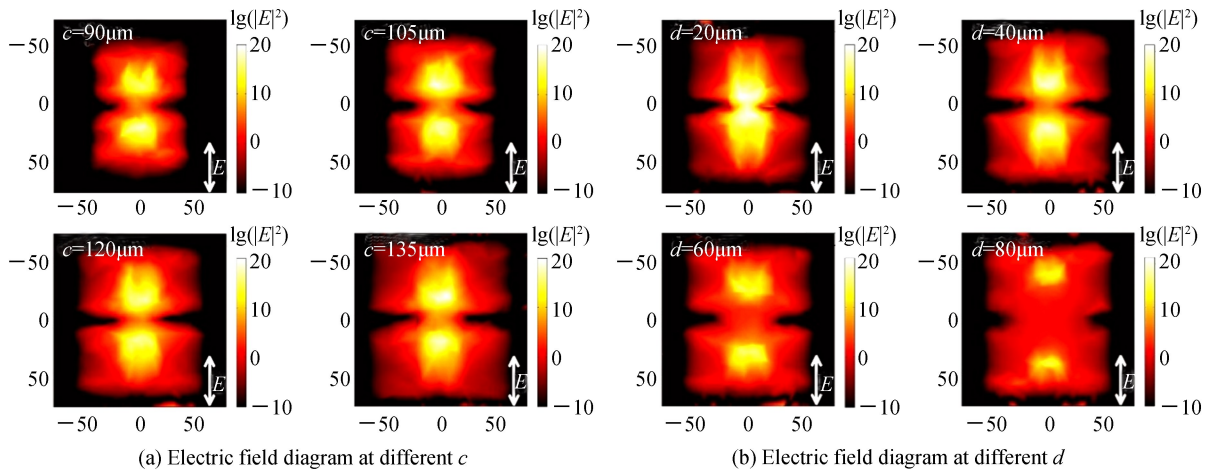


图 3 不同 c 、 d 下的电场图

Fig.3 Electric field diagram at different c and d

2 实验与结果

在理论仿真分析结果的基础上,考虑工艺的易实现性,在器件的实验制作上选择结构参数为: $p = 150 \mu\text{m}$ 、 $b = 12 \mu\text{m}$ 、 $c = 120 \mu\text{m}$ 、 $d = 40 \mu\text{m}$.在实验过程中首先将 100 nm 的铝采用磁控溅射的方式沉积到厚度为 36 μm 的 PET 薄膜表面,随后采用微光刻技术将铝层加工成所设计的臂型金属网格结构,加工结果如图 4(a).PMMA 层选用浓度为 4% 的 PMMA 溶液 3000 r/min 旋涂 40 s 制成,在 PMMA 层上方,采用磁控

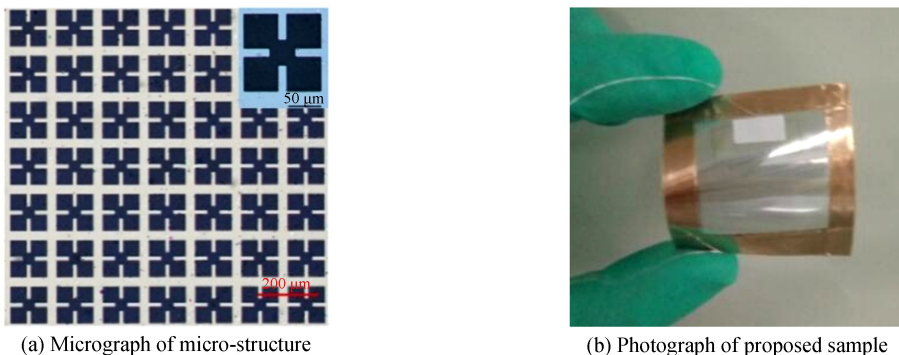


图 4 实验实物

Fig.4 Illustration of proposed sample

溅射的方法获得厚度为 40 nm 的银电极,然后将化学气相沉积法生长的单层石墨烯薄膜采用湿法转移技术转移到 PMMA 层上方,同时保证石墨烯一部分与银电极重叠.最后从臂型金属结构表面和银电极表面分别引出调制电极,形成如图 4(b)所示的石墨烯太赫兹透射幅度调制器件.

在完成器件制备后,选用太赫兹时域光谱系统(API T-Ray5000)进行调制器的太赫兹透射光谱测量.首先,将调制器放置在样品架上,随后将两根导线分别连入直流电压源,太赫兹脉冲从太赫兹发射器射出,最后由太赫兹接收器接收.控制调制电压从 $-20 \sim +20$ V 变动,从而改变石墨烯的费米能级,然后探测器件在不同调制电压下的太赫兹透射光谱,结果如图 5(a).该结果显示太赫兹透射幅度在共振频点 0.6 THz 处变化明显,共振频点处太赫兹透射率随电压的变化规律如插图所示,随着电压的增大透射率呈线性递减.根据式(1)计算获得其太赫兹幅度调制深度的实验结果如图 5(b)中点线所示,最大透射幅度调制深度达到 24%,其调制深度随频率的变化规律与实线表示的理论仿真规律一致,完成了臂型金属网格结构增强石墨烯太赫兹调制器调制深度的实验证明.

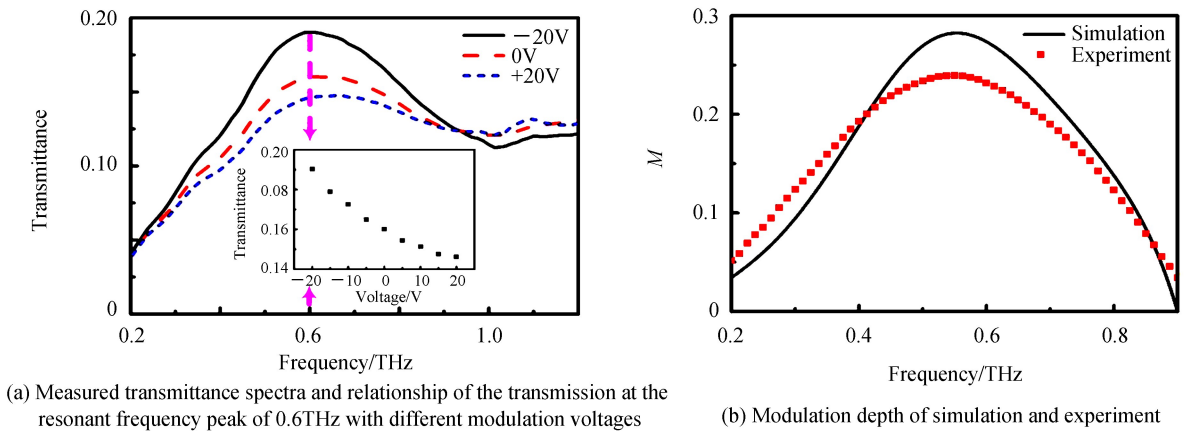


图 5 实验结果

Fig.5 Experiment results

3 结论

本文提出了一种臂型金属网格结构的石墨烯太赫兹透射幅度调制器件,通过有限元仿真手段分析了臂型金属网格结构增强单层石墨烯调制太赫兹透射幅度调制深度的机理和规律,在其共振频点处获得了近 4 倍的调制深度提升.实验结果显示了与理论一致的调制规律,证明了该金属结构在增强石墨烯太赫兹调制器调制深度方面的作用.

参考文献

- [1] SIEGEL P H. Terahertz technology[J].*IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques*, 2002, **50**(3):910-928.
- [2] TONOUCHI M. Cutting-edge terahertz technology[J].*Nature Photonics*, 2007, **1**(2):97-105.
- [3] BAIG S A, BOLAND J L, DAMRY D A, *et al.* An ultrafast switchable terahertz polarization modulator based on III-V semiconductor nanowires[J]. *Nano Letters*, 2017, **17**(4):2603-2610.
- [4] CHEN H T, PADILLA W J, CICH M J, *et al.* A metamaterial solid-state terahertz phase modulator [J]. *Nature Photonics*, 2009, **3**(3):148-151.
- [5] GEIM A K, NOVOSELOV K S. The rise of graphene[J]. *Nature Materials*, 2007, **6**(3): 183-191.
- [6] FERRARI A C. Graphene photonics and optoelectronics[J].*Nature Photonics*, 2010, **4**(9): 611-622.
- [7] XU W, DONG H M, LI L L, *et al.* Optoelectronic properties of graphene in the presence of optical phonon scattering [J].*Physical Review B*, 2010, **82**(12):1303-1307.
- [8] ANDRYIEUSKI A, LAVRINENKO A V. Graphene metamaterials based tunable terahertz absorber: effective surface conductivity approach[J].*Optics Express*, 2013, **21**(7): 9144-9155.
- [9] LIU M, YIN X, ULIN-AVILA E, *et al.* A graphene-based broadband optical modulator[J]. *Nature*, 2011, **474**(7349): 64-67.
- [10] ZHU Y, MURALI S, STOLLER M D, *et al.* Carbon-based supercapacitors produced by activation of graphene.[J]. *Science*, 2011, **332**(6037):1537
- [11] JU L, GENG B, HORNG J, *et al.* Graphene plasmonics for tunable terahertz metamaterials [J]. *Nature*

- Nanotechnology, 2011, **6**(10): 630-634.
- [12] LEE S H, CHOI J, KIM H D, *et al.* Ultrafast refractive index control of a terahertz graphene metamaterial[J]. *Scientific Reports*, 2013, **3**(7456):2135.
- [13] LEE C C, SUZUKI S, XIE W, *et al.* Broadband graphene electro-optic modulators with sub-wavelength thickness[J]. *Optics Express*, 2012, **20**(5): 5264-5269.
- [14] FARAJI M, MORAVVEJ-FARSHI M K, YOUSEFI L. Tunable THz perfect absorber using graphene-based metamaterials[J]. *Optics Communications*, 2015, **355**: 352-355.
- [15] SENSALER-RODRIGUEZ B, YAN R, RAFIQUE S, *et al.* Extraordinary control of terahertz beam reflectance in graphene electro-absorption modulators[J]. *Nano Letters*, 2012, **12**(9): 4518-4522.
- [16] KOCABAS C, POLAT E O, ALTAN H, *et al.* Broadband terahertz modulators using self-gated graphene capacitors [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2015, **32**(9):1861-1866.
- [17] LOCATELLI A, TOWN G E, ANGELIS C D. Graphene-based terahertz waveguide modulators[J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2016, **6**(4): 351-357.
- [18] LIANG G, HU X, YU X, *et al.* Integrated terahertz graphene modulator with 100% modulation depth [J]. *ACS Photonics*, 2015, **2**(11): 1559-1566.
- [19] LIU J, LI P, CHEN Y, *et al.* Flexible terahertz modulator based on coplanar-gate graphene field-effect transistor structure[J]. *Optics Letters*, 2016, **41**(4): 816-819
- [20] WEN Q Y, TIAN W, MAO Q, *et al.* Graphene based all-optical spatial terahertz modulator[J]. *Scientific Report*, 2014, **4**(7409): 1-5.
- [21] LI Q, TIAN Z, ZHANG X, *et al.* Active graphene - silicon hybrid diode for terahertz waves [J]. *Nature Communication*, 2015, **6**(7082): 1-6.
- [22] SHI S F, ZENG B, HAN H L, *et al.* Optimizing broadband terahertz modulation with hybrid graphene/metasurface structures[J]. *Nano Letters*, 2015, **15**(1) : 372-377.
- [23] DEGL'INNOCENTI R, JESSOP D S, SHAH Y D, *et al.* Terahertz optical modulator based on metamaterial split-ring resonators and graphene[J]. *Optical Engineering*, 2014, **53**(5):057108.
- [24] YAN R, AREZOOMANDAN S, SENSALER-RODRIGUEZ B, *et al.* Exceptional terahertz wave modulation in graphene enhanced by frequency selective surfaces[J]. *ACS Photonics*, 2016, **3**(3):315-323.
- [25] DAWLATY J M, SHIVARAMAN S, STRAIT J, *et al.* Measurement of the optical absorption spectra of epitaxial graphene from terahertz to visible[J]. *Applied Physics Letters*, 2008, **93**(13):197-203.
- [26] WANG Qi-chao, WANG Jia-chun, WANG Ke-wei, *et al.* Transmission characteristic of fabricin Terahertz band[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2016, **37**(6):737-743.
王启超,汪家春,王科伟,等.布料的太赫兹波投射性研究[J].*发光学报*, 2016, **37**(6):737-743.
- [27] ZHANG Y, FENG Y, ZHU B, *et al.* Graphene based tunable metamaterial absorber and polarization modulation in terahertz frequency.[J]. *Optics Express*, 2014, **22**(19):22743.