

## 双层石墨烯电控开关设计

史叶欣, 李九生

(中国计量大学 信息工程学院, 浙江 杭州 310018)

**摘要:** 提出并设计了一种基于双层石墨烯结构的电控太赫兹波开关。该开关结构由棱镜-石墨烯-二氧化硅-石墨烯-铟化铟组成。太赫兹波从棱镜左侧以特定角度入射, 棱镜右侧固定有太赫兹波探测器, 通过外加电场改变石墨烯介电常数, 影响等离子体波矢匹配, 进而控制太赫兹波反射率, 实现太赫兹开关目的。实验运用 COMSOL 软件对双层石墨烯电控开关进行仿真模拟, 将 1 THz 的太赫兹波以  $35.42^\circ$  从棱镜左上方入射, 在无外加电场时, 太赫兹波反射率为 2.63%, 此时为太赫兹波开关的“关”状态。施加外加电场时, 石墨烯的介电常数发生变化, 太赫兹波反射率改变并达到 93.01%, 棱镜结构接近全反射, 此时为太赫兹波开关的“开”状态。研究结果表明该结构具有良好的太赫兹波强度控制性能, 电控太赫兹波开关消光比为 15.5 dB。

**关键词:** 太赫兹波; 多层结构; 石墨烯; 开关

中图分类号: O436.2 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201847.0520003

## Design of double layer graphene electronic controlled switch

Shi Yexin, Li Jiusheng

(School of Information Engineering, China University of Metrology, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** An electrically controlled terahertz wave switch was designed and proposed based on double layer graphene structure. The switch was made up of prism - graphene -  $\text{SiO}_2$  - graphene - InSb. The terahertz wave was incident from the left side of the prism at a specific angle, and the terahertz wave detector was fixed on the right side of the prism. By adjusting the external voltage bias, the refractive index of the graphene layers was changed in order to control the reflectance to achieve the purpose of terahertz switching. COMSOL software was used to simulate the double-layer graphene electronic switch. Terahertz wave with frequency of 1 THz was incident at  $35.42^\circ$  from the top of the prism in experiment. When there was no external electric field, the reflectivity of terahertz wave was 2.63%, which was defined as the "off" state of the terahertz wave switch. When the applied electric field was applied, the dielectric constant of graphene changed, and the reflectivity of terahertz wave changed to 93.01%. The structure of prism was close to total reflection, which was defined as the "open" state of terahertz wave switch. The simulation results show that the device has good performance in controlling the intensity of the terahertz wave. Extinction ratio of the switch was 15.5 dB.

**Key words:** terahertz wave; multilayer structure; graphene; switch

收稿日期: 2017-12-10; 修订日期: 2018-01-20

基金项目: 国家自然科学基金(61379024)

作者简介: 史叶欣(1995-), 女, 硕士生, 主要从事太赫兹波技术方面的研究。Email: 15757176682@163.com

导师简介: 李九生(1976-), 男, 教授, 博士, 主要从事太赫兹波技术方面的研究。Email: lijsh@126.com

## 0 引言

太赫兹(Terahertz)辐射是对频率位于 0.1 THz 和 10 THz 区域之间的电磁辐射统称,由于太赫兹独特的研究价值和广阔的应用前景,太赫兹波产生和检测技术得到迅速发展,使得太赫兹技术在许多领域的应用<sup>[1-3]</sup>也得到相应开发。常见的太赫兹功能器件包括探测器<sup>[4]</sup>、开关<sup>[5]</sup>、滤波器<sup>[6]</sup>、传感器<sup>[7]</sup>和调制器<sup>[8]</sup>等。在太赫兹系统中太赫兹开关最为重要,备受国内外学者关注。J.Li<sup>[9-10]</sup>提出了基于光子晶体结构的太赫兹波开关和光控硅平板结构的太赫兹波开关,消光比为 29.9 dB,开关的响应时间小于 50 ms。Y. Morteza<sup>[11]</sup>提出了波导结构的太赫兹波开关,该开关用于频率 6 THz 太赫兹波。H. Zhang<sup>[12]</sup>提出了基于液晶/光子晶体结构的太赫兹波开关,消光比达到 16 dB。J.Gómez-Díaz<sup>[13]</sup>提出基于石墨烯材料的太赫兹开关,隔离度达到 80 dB。J. Sun<sup>[14]</sup>提出了由石墨烯波导和环谐振器组成的太赫兹波开关,通过外加偏置电压改变结构中心石墨烯环的费米能级,从而控制波导和石墨烯环等离子体激元耦合,该开关消光比为 17 dB。K.Song<sup>[15]</sup>提出了波导-腔-波导通道型结构太赫兹开关,消光比为 3 dB。近几年,随着新型功能材料不断发掘与发展,为设计新型多控制方式太赫兹开关提供了新思路,但是高性能太赫兹开关仍有很大发展空间。

双层石墨烯电控开关利用棱镜-石墨烯-石英玻璃-石墨烯-铋化铟多层结构实现高性能的太赫兹波开关。特定频率的太赫兹波以固定的角度从棱镜左侧入射,在棱镜右侧的太赫兹波全反射方向上固定一个太赫兹波探测器。当无外加电场时,石墨烯化学势为 0 eV,入射太赫兹波满足波矢匹配,太赫兹波反射率为 2.63%,探测器几乎接收不到反射太赫兹波,此时开关为“关”状态。当施加外电场,增加石墨烯化学势,表面等离子体共振现象就会消失,反射太赫兹波按照几何光学反射方向实现对太赫兹波的反射传输,通过偏压调节,太赫兹波反射率可增大到 93.01%,探测器能接收到反射能量,此时开关为“开”状态。该结构通过外加电场改变石墨烯介电常数进而改变太赫兹波反射率,实现对太赫兹波的开关控制。研究表明,该太赫兹波开关

消光比为 15.5 dB,设计达到了预期目的。

## 1 结构与理论分析

文中结合棱镜耦合衰减全反射技术设计了一种新型电控太赫兹开关,该太赫兹波开关结构如图 1 所示,共五层。第一层是由高阻硅构成的棱镜,其折射率  $n_1=3.41$ ,第二层为石墨烯薄膜,厚度为  $d_2=0.33$  nm,第三层为石英玻璃层,厚度为  $d_3=220$   $\mu\text{m}$ ,第四层为单层石墨烯薄膜,厚度为  $d_4=0.33$  nm,第五层是厚度为  $d_5=100$   $\mu\text{m}$  的铋化铟(InSb)薄膜。铋化铟具有很好的光电导特性,在室温下,本征光电导的波长限为 7.8  $\mu\text{m}$ 。而且,与许多其它非晶态半导体材料一样,非晶态铋化铟材料的吸收边可以分为三个区域,高吸收区 A,指数吸收区 B,弱吸收区 C。在 0~0.6 eV 范围内,铋化铟薄膜处于 C 区,有效降低了太赫兹波的透过率,与材料的结构性能关系密切。实验将一定频率的太赫兹波从棱镜左侧以一定角度( $\theta$ )入射,在棱镜右侧固定一个太赫兹波探测器。无外加电场时,入射太赫兹波满足波矢匹配,结构产生等离子体共振,入射太赫兹波能量几乎全部在石墨烯与上、下电介质的分界面上传输,棱镜右侧反射率接近零,探测器接收不到反射太赫兹波,开关为“关”状态。表面等离子体激光元对石墨烯的介电常数变化十分敏感,当外加电场使石墨烯介电常数发生变化不满足共振匹配条件时,表面等离子体共振现象消失,结构发生全反射,反射太赫兹波按照几何光学反射方向实现对太赫兹波的反射传输,探测器能接收到反射能量,此时开关为“开”状态。此结构通过外加电场改变石墨烯介电常数进而控制太赫兹波反射率,实现对太赫兹波开关的控制。

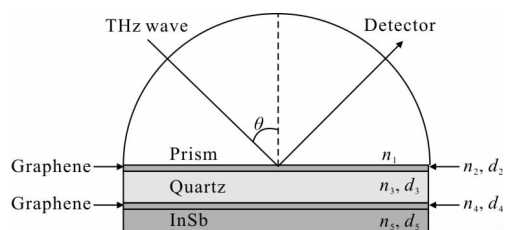


图 1 基于双层石墨烯结构的太赫兹波开关  
Fig.1 Terahertz wave switch based on double layer graphene structure

文中采用转移矩阵法求多层结构的反射系数的表达式,  $U_1$  代表在第一层边界电场的切向分量, 第  $N$  层边界电场的切向分量由  $U_{N-1}$  表示。  $V_1$  和  $V_{N-1}$  分别表示第一层边界磁场和第  $N$  层边界磁场的切向分量。第一边界的切向场与最终边界的切向场关系表达式如下:

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ V_1 \end{bmatrix} = M_2 M_3 M \cdots M_{N-1} \begin{bmatrix} U_{N-1} \\ V_{N-1} \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} U_{N-1} \\ V_{N-1} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中:  $M_{ij} = \left( \prod_{k=2}^{N-1} M_k \right)_{ij}$ ,  $i, j=1, 2, \dots, M$  表示多层体系结构的特征矩阵,  $M_k$  表达式如下:

$$M_k = \begin{bmatrix} \cos\beta_k & -i\sin(\beta_k/q_k) \\ -iq_k \sin\beta_k & \cos\beta_k \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中:  $q_k = (\epsilon_k - n_1^2 \sin^2 \theta_1)^{1/2} / \epsilon_k$ ;  $\beta_k = 2\pi d_k / \lambda \cdot (\epsilon_k - n_1^2 \sin^2 \theta_1)^{1/2}$ ,  $\lambda$  为入射光的波长,  $\theta$  为 TM 偏振太赫兹波的入射角,  $d_k$  为任意介质层的厚度,  $\epsilon_k$  为任意介质层介电常数,  $n_k$  为任意介质层介折射率。每层结构的介电常数与折射率的关系为  $n_k = \sqrt{\epsilon_k}$ 。根据菲涅耳公式, 得出反射系数公式如下:

$$r_p = \frac{(M_{11} + M_{12} q_N) q_1 - (M_{21} + M_{22} q_N)}{(M_{11} + M_{12} q_N) q_1 + (M_{21} + M_{22} q_N)} \quad (3)$$

该多层结构的太赫兹波反射率( $R_p$ )可以表示为

$$R_p = |r_p|^2$$

## 2 计算与仿真结果分析

文中在室温下  $T=300$  K, 石墨烯化学势分别取 0、0.15、0.3 eV, 计算得到各个太赫兹频率与石墨烯电导率关系如图 2 所示。从图中可以看出随着化学势的增加, 石墨烯电导率的虚部为正, 因此石墨烯在太赫兹频段支持 TM 模式表面等离子体波传输。

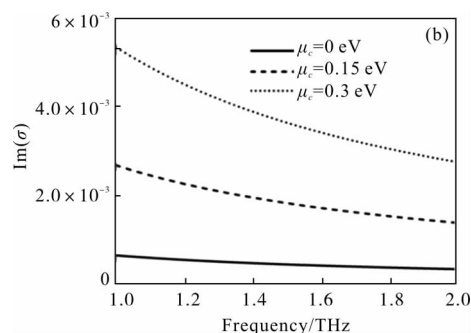
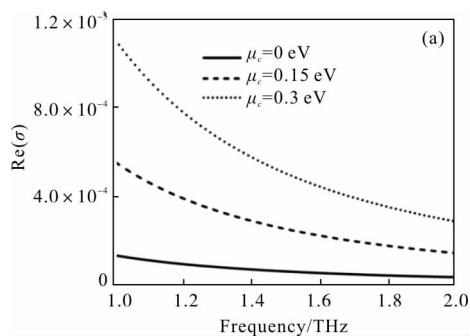


图 2 (a) 不同化学势时石墨烯电导率  $\sigma$  实部随频率变化关系;

(b) 不同化学势时石墨烯电导率  $\sigma$  虚部随频率变化关系

Fig.2 (a) Real part of graphene conductivity  $\sigma$  as a function of frequency for different chemical potential;

(b) Imaginary part of graphene conductivity  $\sigma$  as a function of frequency for different chemical potential

由于单层的石墨烯不足以屏蔽外加电场所带来的表面电荷, 所以可以通过外加电场改变石墨烯化学势, 石墨烯化学势的改变会导致其电导率变化, 从而改变了石墨烯介电常数。文中在频率为 1 THz 时, 石墨烯厚度为  $d=0.33$  nm, 石墨烯化学势分别为  $\mu_c=0, 0.1, 0.2$  eV, 计算得到太赫兹频率随石墨烯介电常数变化关系如图 3 所示。从图中可以看

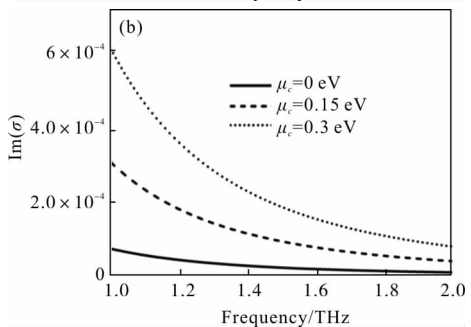
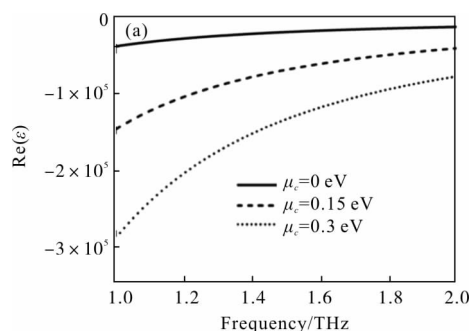


图 3 (a) 不同化学势时石墨烯介电常数  $\epsilon$  实部随频率变化关系;

(b) 不同化学势时石墨烯介电常数  $\epsilon$  虚部随频率变化关系

Fig.3 (a) Real part of  $\epsilon$  as a function of frequency for different chemical potential; (b) Imaginary part of  $\epsilon$  as a function of frequency for different chemical potential

出,随着化学势的增加,石墨烯介电常数的实部逐渐减小,介电常数的虚部不断增加。图 4 表示石墨烯化学势随外加电场变化曲线,外加电场会改变石墨烯的化学势,当外加偏压  $E_0$  增大时,其化学势  $\mu_c$  随之变大。

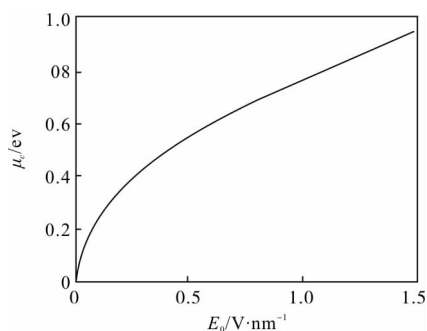


图 4 石墨烯化学势与外加电场关系

Fig.4 Relationship between graphene chemical potential and applied electric field

上层石墨烯要激发下层石墨烯产生表面等离子体共振,必定要经过中间层介质,因此介质层的厚度对太赫兹波传输的影响不能忽视。此结构中表面等离子体激元对界面参数变化十分敏感,所以两层石墨烯中间的  $\text{SiO}_2$  薄膜厚度会直接影响该开关性能,需要确定最合适的  $\text{SiO}_2$  薄膜厚度。无外加电场时,设定入射频率为 1 THz,改变  $\text{SiO}_2$  薄膜厚度,计算得到产生等离子体时的共振角  $\theta_{spr}$  和共振时太赫兹波反射率  $R$  关系如图 4 所示。

由图 5(a)可以看出随着  $\text{SiO}_2$  薄膜厚度从 160  $\mu\text{m}$  变化到 320  $\mu\text{m}$ ,入射太赫兹辐射的倏逝波与 SPPs 耦合产生石墨烯表面等离子体共振。当  $\text{SiO}_2$  薄膜厚度  $d_3 < 160 \mu\text{m}$  时,两层石墨烯间距过小使表面等离子体激发受到限制;而  $d_3 > 320 \mu\text{m}$  时两层石墨烯间距太大,太赫兹无法传输到下层石墨烯。当  $d_3 = 160 \mu\text{m}$  时,太赫兹波反射率最小值为  $R = 39.42\%$ 。随着  $\text{SiO}_2$  薄膜厚度增加,共振角的基本不变,太赫兹波反射率  $R$  逐渐变小,在  $d_3 = 220 \mu\text{m}$  时太赫兹波反射率达到最低后反射率又逐渐增大。图 5(b)是  $\text{SiO}_2$  薄膜厚度分别为 160、220、300  $\mu\text{m}$  时,太赫兹开关的反射率关系曲线。 $\text{SiO}_2$  薄膜厚度为  $d_3 = 160 \mu\text{m}$ ,太赫兹波反射率最小值为  $R = 39.42\%$ ;  $\text{SiO}_2$  薄膜厚度为  $d_3 = 220 \mu\text{m}$ ,扫描入射角得到共振角  $\theta_{spr} = 35.42^\circ$  时(图 5(b)中细直虚线箭头

所指的),太赫兹波反射率最小为  $R = 2.63\%$ ,并且其半高全宽为  $0.37^\circ$ ,此时入射能量几乎都转化为表面等离子体共振,棱镜右上方几乎接收不到反射能量;  $\text{SiO}_2$  薄膜厚度为  $d_3 = 300 \mu\text{m}$ ,太赫兹波反射率最小值为  $R = 53.35\%$ ,这是因为传播常数降低使匹配条件被破坏,石墨烯表面约束减弱及能量耦合的效率变低,才出现反射能量增加的现象。从图 5(a)和(b)可以确定最佳  $\text{SiO}_2$  薄膜厚度为  $d_3 = 220 \mu\text{m}$ 。

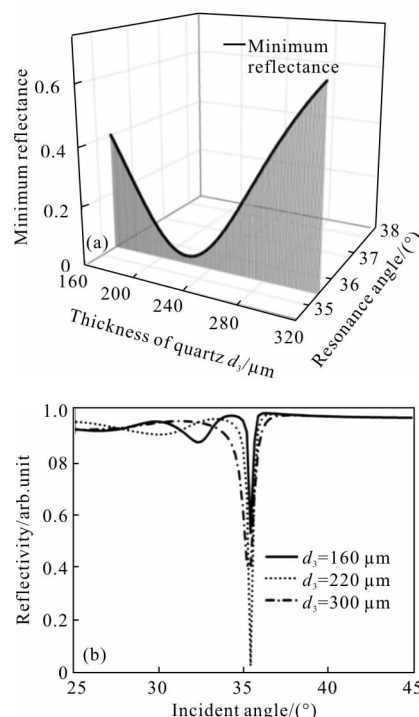


图 5 (a) 不同  $\text{SiO}_2$  薄膜厚度时的共振角及共振时的太赫兹波反射率关系;(b) 太赫兹波反射率与  $\text{SiO}_2$  薄膜厚度的关系

Fig.5 (a) Relationship between the resonance angle of different  $\text{SiO}_2$  film thickness and the reflectivity of terahertz wave at resonance; (b) Relationship between the terahertz wave reflectivity and  $\text{SiO}_2$  film thickness

该结构利用石墨烯层上下表面以及石英玻璃层上面来分别作为上电极和基电极,当在石墨烯层与石英玻璃层之间施加偏置电压时,石墨烯电导率会改变,介电常数随之变化,从而实现太赫兹波反射率强度控制。图 6 为太赫兹波反射率随上层石墨烯化学势变化关系。保持下层石墨烯化学势不变,只改变上层石墨烯化学势分别为 0、0.15、0.3 eV。由图 6 可见,随着化学势增加,反射率曲线共振峰



数量增加, 多个入射角对应的反射率有减小趋势, 但入射角为  $\theta=35.42^\circ$  时, 反射率始终保持最低值  $R=2.63\%$ , 因此改变上层石墨烯化学势对开关整体性能影响较小。图 7 为太赫兹波反射率随下层石墨烯化学势变化关系, 改变下层石墨烯化学势分别为 0、0.15、0.3 eV。随着石墨烯化学势增加, 共振角变小, 所对应的反射率也有明显变化。当无外加偏压 ( $\mu_c=0$  eV) 时, 固定入射角等于共振角  $\theta=\theta_{spr}=35.42^\circ$  时(图 7(a)中细直虚线箭头所指的), 该结构产生等离子体共振, 太赫兹波反射率为  $R=2.63\%$ , 探测器几乎接收不到反射太赫兹波, 此时开关定义为“关”状态。当下层石墨烯化学势增加到  $\mu_c=0.15$  eV, 太赫兹波反射率迅速变大达到  $R=84.33\%$ 。随着下层石墨烯化学势增加到  $\mu_c=0.3$  eV, 太赫兹波反射率为  $R=93.01\%$ , 入射太赫兹波接近全反射, 探测器接收到反射太赫兹波, 此时太赫兹波开关为“开”状态。根据公式计算得到该太赫兹波开关消光比为 15.5 dB。

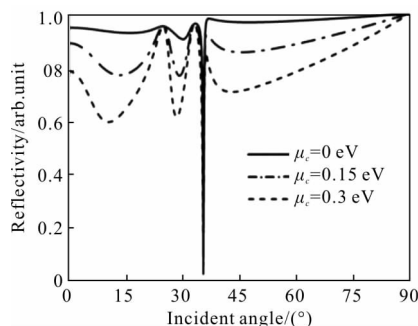
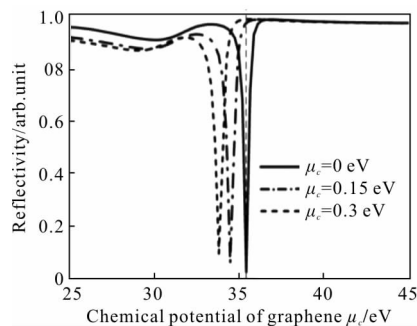


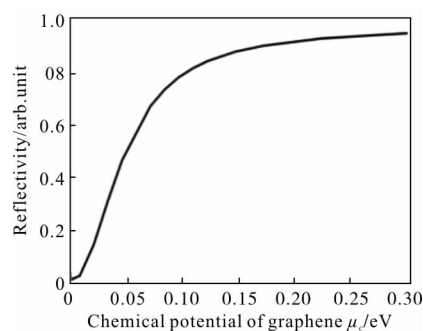
图 6 太赫兹波反射率随上层石墨烯化学势变化关系

Fig.6 Relationship between the reflectivity of terahertz wave and the chemical potential of upper graphene



(a) 扫描入射角

(a) Scanning incidence angle



(b) 固定入射角

(b) Fixed incidence angle

图 7 太赫兹波反射率随下层石墨烯化学势变化关系

Fig.7 Relationship between the reflectivity of terahertz wave and the chemical potential of lower graphene

### 3 结论

文中结合棱镜衰减全反射原理提出了新型双层石墨烯电控太赫兹波开关, 工作频率为 1 THz。仿真模拟实验中, 在无外加电场石墨烯化学势为 0 eV 时, 太赫兹波反射率为 2.63%, 太赫兹波开关处于“关”状态。有外加电场石墨烯化学势为 0.3 eV 时, 太赫兹波反射率为 93.01%, 此时太赫兹波开关处于“开”状态。研究表明通过外加电场能使太赫兹波的反射率快速地从 0 切换 1, 该太赫兹波开关消光比为 15.5 dB。上述新型太赫兹开关能通过外加偏压结构实现开关特性, 开关响应速度达到皮秒量级。

### 参考文献:

- [1] Xie Qi, Yang Hongru, Li Hongguang. Identification of explosives based on terahertz time domain spectroscopy system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(10): 2392-2399. (in Chinese)
- [2] Zhou Xiaodan, Li Lijuan, Zhao Duo, et al. Application of terahertz technology in nondestructive testing of ceramic matrix composite defects [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(8): 0825001. (in Chinese)
- [3] Wang Hua, Sun Xiaohong, Wang Zhen, et al. Characteristics of terahertz wave metamaterial absorber [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(12): 1225003. (in Chinese)
- [4] Qin Hua, Huang Y D, Sun J D, et al. Two dimensional electron gas excited terahertz wave device [J]. *Chinese Optics*, 2017, 10(1): 51-67. (in Chinese)
- [5] Yarahmadi M, Moravvej -Farshi M K, Yousefi L.

- Subwavelength graphene-based plasmonic THz switches and logic gates[J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2015, 5(5): 725–731.
- [6] Yang Jing, Gong Cheng, Zhao J Y, et al. Fabrication of terahertz devices using 3D printing technology [J]. *Chinese Optics*, 2017, 10(1): 77–85. (in Chinese)
- [7] Pan X C, Yao Z H, Xu X L, et al. Fabrication, design and application of terahertz band metamaterials [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(3): 283–296. (in Chinese)
- [8] Zhong L, Zhang B, He T, et al. Conjugated polymer based active electric-controlled terahertz device[J]. *Applied Physics Letters*, 2016, 108(10): 103301–103302.
- [9] Li J, He J, Hong Z. Terahertz wave switch based on silicon photonic crystals[J]. *Applied Optics*, 2007, 46(22): 5034–5037.
- [10] Li J, Yao J. Novel optical controllable terahertz wave switch [J]. *Optics Communications*, 2008, 281(23): 5697–5700.
- [11] Yarahmadi M, Moravvej-Farshi M K, Yousefi L. Subwavelength graphene-based plasmonic THz switches and logic gates[J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2015, 5(5): 725–731.
- [12] Zhang H, Guo P, Chen P, et al. Liquid-crystal-filled photonic crystal for terahertz switch and filter [J]. *JOSA B*, 2009, 26(1): 101–106.
- [13] Gómez-Díaz J S, Perruisseau-Carrier J. Graphene-based plasmonic switches at near infrared frequencies [J]. *Optics Express*, 2013, 21(13): 15490–15504.
- [14] Sun J Z, Zhang L, Gao F. Ultra-compact terahertz switch with graphene ring resonators [J]. *Chinese Physics B*, 2016, 25(10): 108701–108702.
- [15] Song K, Mazumder P. Dynamic terahertz spoof surface plasmon-polariton switch based on resonance and absorption [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2011, 58(7): 2172–2176.