

# 基于光学 Tamm 态的石墨烯光调制器

王磊, 栾开智, 左依凡, 李培丽\*

南京邮电大学电子与光学工程学院, 江苏 南京 210023

**摘要** 利用光学 Tamm 态(OTS)在金属-分布式布拉格反射镜(DBR)界面处的局域场增强和石墨烯的电控特性, 提出一种基于 OTS 的石墨烯光调制器。利用有限元法和时域有限差分法对提出的调制器进行仿真研究。研究结果表明:当入射波长为 850.7 nm 时,在金属-DBR 界面处会产生 OTS,入射光的反射率比较低;当外加驱动电压大于 7.5 V 时,OTS 的本征波长会发生漂移,入射光的反射率增大,可以实现强度调制。调制器的最大调制深度可达 0.96,消光比为 14.45 dB,在不考虑电路 RC 时间常数影响的情况下,调制速率超过 600 GHz。该结构石墨烯光调制器在一定波长范围内,可以实现调制深度不同的光调制,在未来的光通信系统和光信息处理系统中具有很好的应用前景。

**关键词** 光通信; 石墨烯; 光学 Tamm 态; 光调制器

中图分类号 TN256

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.1106001

## Graphene Optical Modulator Based on Optical Tamm States

Wang Lei, Luan Kaizhi, Zuo Yifan, Li Peili\*

*College of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications,  
Nanjing, Jiangsu 210023, China*

**Abstract** By using the local field enhancement of the optical Tamm state (OTS) at the interface of metal-distributed Bragg reflector (DBR) and the electronic control characteristics of graphene, we propose a graphene based light modulator based on OTS. The proposed optical modulator is simulated by finite element method and finite difference time domain method. The results show that when the incident wavelength is 850.7 nm, OTS can be engendered at the metal-DBR interface and the reflectivity of incident light is relatively low. When the driving voltage is greater than 7.5 V, the intrinsic wavelength of OTS drifts and the reflectivity of incident light increases, so that intensity modulation can be achieved. The maximum modulation depth of the optical modulator can be up to 0.96 and the extinction ratio is 14.45 dB. Without considering the effect of RC time constant on the modulation rate, the modulation rate is above 600 GHz. The proposed graphene modulator can be modulated with different modulation depths in a certain wavelength range. It has a good application prospect in the optical communication system and the optical information processing system in the future.

**Key words** optical communications; graphene; optical Tamm states; optical modulator

**OCIS codes** 060.4080; 230.1480; 230.2090; 230.4110

## 1 引 言

光调制器是光通信系统和光信息处理系统中的重要部件,通常是利用电光<sup>[1]</sup>、声光<sup>[2]</sup>或磁光<sup>[3]</sup>等效应实现对光信息的调制。其中,电光调制器是通过电压或电场的变化调控输出光的折射率、吸收率、振幅或相位的器件,它在损耗、速度及集成性等方面具

有明显的优势。由于石墨烯具有独特的光学、电子学和力学特性,关于它的研究也越来越多,结合石墨烯材料与各类材料实现光调制器的研究受到广泛关注。

2011年,Liu等<sup>[4]</sup>在硅波导上平铺一层单层石墨烯,首次提出了石墨烯与硅波导集成的光调制器,调制器的工作波长为 1.35~1.6  $\mu\text{m}$ ,3 dB 带宽达 1 GHz,但是调制深度只有 10%;2012年,Liu等<sup>[5]</sup>

收稿日期: 2018-05-15; 修回日期: 2018-06-06; 录用日期: 2018-06-14

基金项目: 国家自然科学基金(61275067)

\* E-mail: lipl@njupt.edu.cn

又设计了一个双层石墨烯光学调制器,调制深度提高到 16%;2012 年, Li 等<sup>[6]</sup>将硅基绝缘体波导置于两个石墨烯层上,设计了一种高速波导耦合双层石墨烯光电调制器,采用 1550 nm 光源时,3 dB 带宽为 120 GHz,调制深度为 50%;2013 年, Gosciniak 等<sup>[7]</sup>将石墨烯置于脊形波导和高折射率衬底之间,提出了一种基于双层石墨烯的脊波导结构调制器,能量消耗为 1 fJ/bit,调制速率为 160~850 GHz;2014 年, Du 等<sup>[8]</sup>提出了一种石墨烯嵌入式环形光学调制器,该谐振调制器的带宽为 149 GHz,消光比为 22.13 dB;2014 年, Mohsin 等<sup>[9]</sup>把铜基底上生成的石墨烯转移到波导上,提出了一种 1550 nm 波段的基于双层石墨烯的低插入损耗的电吸收光调制器,调制深度为 16%,3 dB 带宽为 670 MHz。

光学 Tamm 态(OTS)是一种新型局域界面模,可以把光局域在不同材料的分界面处,在远离界面的区域,强度逐渐衰减<sup>[10]</sup>。与传统的表面等离子体相比较,OTS 的极化线宽要小很多,局域场增强的共振模式较大,在平面结构中可以同时被 TE 和 TM 偏振光激发,入射角和色散调节元件均不需特定,更加容易实现。因而 OTS 引起了广泛的关注,成为目前的研究热点之一。

本文提出一种基于 OTS 的石墨烯光调制器,利用石墨烯的电控性质,并结合 OTS 的光局域特性,通过调节外加驱动电压的大小来改变输出光的强度,从而实现光调制。利用 COMSOL Multiphysics 软件对该调制器的特性进行仿真分析,并结合有限元法(FEM)<sup>[11]</sup>和时域有限差分法(FDTD)对调制深度、消光比和调制速率等性能进行研究。

## 2 结构设计及原理

### 2.1 结构设计

基于 OTS 的石墨烯光调制器结构如图 1 所示。选取介质层 A 为 SiO<sub>2</sub>,折射率为 1.45,厚度为 136 nm;B 层为 TiO<sub>2</sub>,折射率为 2.51,厚度为 72.2 nm;C 层为石墨烯层;A、B、C 三层周期性排列构成一个分布式布拉格反射镜(DBR),DBR 的周期数为 8;D 层为金属层,材料选择 Ag,厚度为 40 nm,金属 Ag 的介电常数可由 Drude 模型<sup>[12]</sup>计算得出。

### 2.2 石墨烯折射率与外加驱动电压的关系

自由电子紧紧地束缚在石墨烯单原子层内,在石墨烯上施加电压,会使石墨烯中的电子浓度、空穴浓度发生改变,载流子浓度的轻微变化就能引起费米能级的偏移,带间跃迁的速率改变,从而引起光学

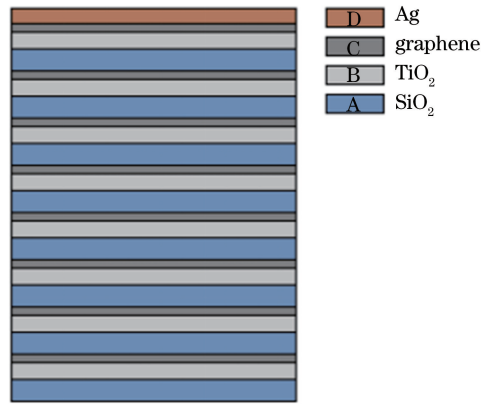


图 1 石墨烯光调制器结构示意图

Fig. 1 Schematic of structure of graphene optical modulator

常数的变化。

石墨烯的化学势和驱动电压的关系为

$$\mu = \hbar v_F \sqrt{\pi |\eta(V_g + V_0)|}, \quad (1)$$

式中: $\hbar$  为约化普朗克常量; $v_F$  为费米速度; $V_g$  为外加驱动电压; $V_0$  与石墨烯未施加电压时的费米能级有关,当未对石墨烯施加电压时,它的费米能级处于狄拉克点, $V_0$  取 0; $\eta$  为简化平行板电容模型得到的一个常数,表达式为

$$\eta = (\epsilon_0 \epsilon_r) / de, \quad (2)$$

其中, $\epsilon_0$  为真空绝对介电常数, $\epsilon_r$  为两层石墨烯间隔离介质的介电常数, $d$  为两层石墨烯之间的距离, $e$  为电子电荷量。

石墨烯和光的相互作用主要从带内跃迁和带间跃迁两部分来考虑,计算公式为

$$\delta(\omega) = \delta_{\text{intra}} + \delta_{\text{inter}}, \quad (3)$$

$$\delta_{\text{intra}} = \delta_0 \times \frac{4\mu}{\pi \hbar (\Gamma_1 - i\omega)}, \quad (4)$$

$$\delta_{\text{inter}} = \delta_0 \left[ 1 + \frac{1}{\pi} \arctan \frac{\hbar \omega - 2\mu}{\hbar \Gamma_2} - \frac{1}{\pi} \arctan \frac{\hbar \omega + 2\mu}{\hbar \Gamma_1} - \frac{i}{2\pi} \ln \frac{(\hbar \omega + 2\mu)^2 + (\hbar \Gamma_2)^2}{(\hbar \omega - 2\mu)^2 + (\hbar \Gamma_2)^2} \right], \quad (5)$$

式中: $\delta_{\text{intra}}$  为带内电导率; $\delta_{\text{inter}}$  为带间电导率; $\delta(\omega)$  为总的电导率; $\delta_0 = e^2 / (4\hbar)$  为未掺杂石墨烯的电导率; $\omega$  为入射角频率; $\Gamma_1 = 1/t_1$ ,  $\Gamma_2 = 1/t_2$ ,  $t_1$  为带内跃迁弛豫时间,  $t_2$  为带间跃迁弛豫时间。

假设石墨烯各向同性,石墨烯的折射率与化学势的关系式可表示为

$$n = \sqrt{\epsilon(\omega)} = \sqrt{1 + \frac{i\delta(\omega)}{\omega \epsilon_0 d_G}}, \quad (6)$$

式中: $d_G$  为单层石墨烯厚度。因此,由(1)式、(3)式和(6)式,可以得到石墨烯折射率实部与驱动电压的

关系曲线,如图 2 所示。

从图 2 可以看出,随着驱动电压的增大,石墨烯折射率实部逐渐减小,当电压增加到一定大小时,石墨烯折射率实部突然减小,随后趋于稳定。石墨烯折射率实部发生突变时的驱动电压称为突变电压。在可见光和近红外波段,随着入射波长的增加,对应石墨烯折射率实部的突变电压会逐渐减小。当入射波长为 850 nm 时,石墨烯折射率实部的突变电压约为 7.5 V,施加电压后石墨烯的折射率实部由 2.69 减小到 0.09。

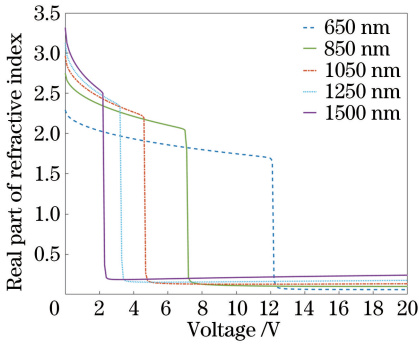


图 2 石墨烯折射率实部与驱动电压的关系图

Fig. 2 Diagram of the relationship between the real part of refractive index of graphene and driving voltage

### 2.3 工作原理

当光从金属一端入射到金属-DBR 结构中,金属与 DBR 界面可以等效成一个微腔结构。当满足一定的振幅匹配条件时<sup>[13]</sup>,可以认为光在微腔里来回反射,在界面处发生光的强局域现象,形成 OTS,使入射电磁波的反射率急剧下降,产生一个极小值,该反射谱 dip 峰处的波长值即为 OTS 的本征波长。在金属层和 B 层交界面处以及 AB 层之间添加石墨烯层,能增强石墨烯与光的相互作用,利用石墨烯的电控性质调控 DBR 的有效折射率,可以提高调制性能。

当入射波长为 OTS 本征波长时,由于 OTS 的局域特性,光被局域在金属与 DBR 的交界面处,反射率很低,此时的调制器处于“关闭”状态;当施加的外部驱动电压超过突变电压时,石墨烯的折射率发生突变,导致 OTS 的 dip 峰发生漂移,入射光的反射率由最低点上升至高反射区域,这时调制器处于“打开”状态。因此,通过施加驱动电压,改变石墨烯的折射率,可以实现强度调制。

## 3 仿真结果和分析

利用 COMSOL Multiphysics 软件对基于 OTS 的石墨烯光调制器进行仿真研究。

### 3.1 调制器仿真结果

对于石墨烯来说,随着层数的增加,外加驱动电压会更容易引起 dip 峰漂移,但是层数增多,石墨烯对光的吸收会增强<sup>[14]</sup>,dip 峰的反射率呈增高趋势,调制的效果反而会降低,所以层数并不是越多越好。另外,当石墨烯的层数超过 6 层后,石墨烯的性质可能会转变为石墨的性质,所以将石墨烯层数设置为 5 层。

图 3 为光入射到金属-DBR 结构中,施加驱动电压前后的反射谱和 850.7 nm 波长的光在金属-DBR 结构中的电场分布图。从图 3(a)未加驱动电压时的反射谱可以看出,在光子晶体禁带范围内波长为 850.7 nm 处,存在一个反射 dip 峰,反射率的最小值为 0.031,半峰全宽(FWHM)为 4.8 nm。图 3(b)为未加驱动电压时 850.7 nm 处的电场分布图,可以清晰地看到入射光被局域在金属-DBR 界面处,并且沿着分界面向两边不断衰减。由此也证实反射谱的 dip 峰是由 OTS 引起的。

当施加的外部驱动电压超过突变电压时,石墨烯的折射率发生跳跃性改变,使得调制器结构的有效折射率发生变化。图 3(c)为施加大于 7.5 V 驱动电压后的反射谱,对比图 3(a)可以看出,反射率谱的 dip 峰从 850.7 nm 漂移至 841.7 nm 处,此时 850.7 nm 波长处的反射率上升到 0.863。图 3(d)为施加驱动电压后 850.7 nm 处的电场分布图,从图中可以看出,大部分光被反射回去,只有少部分的光被局域在金属-DBR 交界面处。

因此,以 OTS 本征波长作为入射波长,当外加驱动电压为 0 V 时,OTS 本征波长处的反射率最低,调制器处于“关闭”状态。当外加驱动电压大于 7.5 V 时,石墨烯折射率发生突变,OTS 的 dip 峰发生漂移,本征波长处的反射率会由最低点上升至高反射区域,这时调制器处于“打开”状态,利用这一特性可以实现强度调制。

### 3.2 调制器性能分析

在光调制器中,调制深度、消光比和调制速率是评价调制器的重要指标,对基于 OTS 的石墨烯光调制器的性能进行研究。

#### 1) 调制深度

光调制器的调制深度  $M$  定义为最大输出光功率与最小输出光功率之差与最大输出光功率之间的比值<sup>[15]</sup>,表达式为

$$M = \frac{P_{\max} - P_{\min}}{P_{\max}}, \quad (7)$$

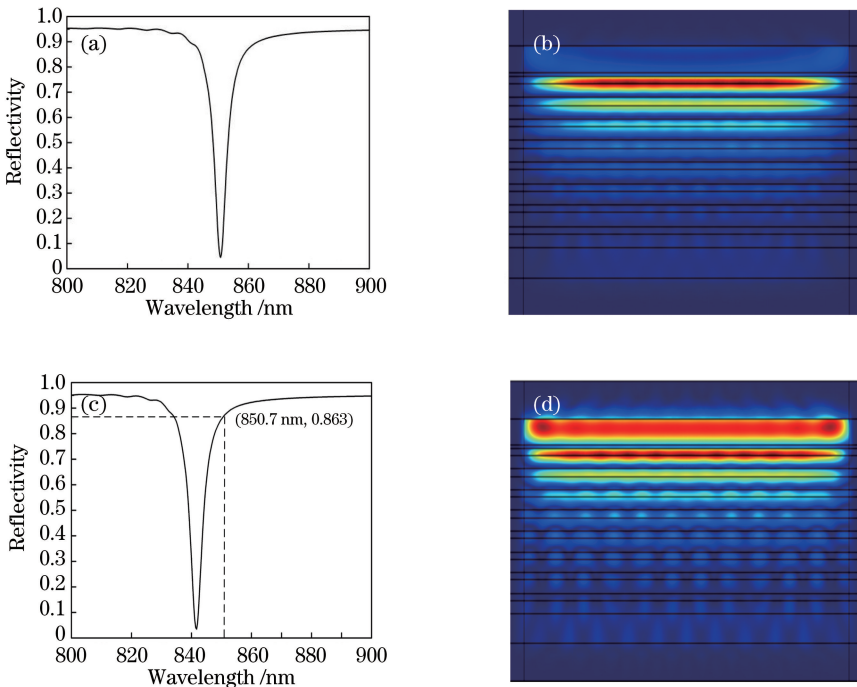


图 3 施加驱动电压前后的反射谱和电场分布图。(a)未加电压时的反射谱；

(b)未加电压时 850.7 nm 处的电场分布图；(c)施加电压后的反射谱；(d)施加电压后 850.7 nm 处的电场分布图

Fig. 3 Reflection spectra and electric field distributions with and without driving voltage. (a) Reflection spectrum without voltage; (b) electric field distribution at 850.7 nm without voltage; (c) reflection spectrum with voltage; (d) electric field distribution at 850.7 nm with voltage

式中： $P_{\max}$ 为输出光功率最大值， $P_{\min}$ 为输出光功率最小值。利用反射谱可得到入射光波长和调制深度的关系。

图 4 为基于 OTS 的石墨烯光调制器的调制深度随波长变化的曲线图。可以看出，入射光波长在 847~856 nm 范围内，随着波长的增加，调制深度先逐渐增加，在本征波长 850.7 nm 处调制深度达到最大值 0.96，然后调制深度逐渐减小。这是由于在施加突变电压前后，本征波长处的反射率变化最大，所以调制深度也最大。因此，本方案在波长范围 847~856 nm 内，可以实现不同调制深度的光调制。

### 2) 消光比

光调制器的消光比  $K$  定义为调制器处于“关闭”状态时的光强与处于“打开”状态时的比值<sup>[15]</sup>，表达式为

$$K = 10 \lg \left( \frac{P_{\max}}{P_{\min}} \right). \quad (8)$$

图 5 为基于 OTS 的石墨烯光调制器的消光比随波长变化的关系图。可以看出，随着波长的增加，消光比先逐渐上升，在本征波长 850.7 nm 处消光比达到最大值 14.45 dB，然后消光比逐渐减小并趋于零。这是由于在未施加驱动电压时，本征波长处光的局

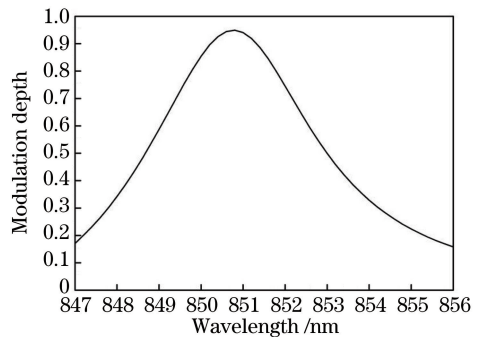


图 4 石墨烯光调制器的波长和调制深度关系图

Fig. 4 Relationship between wavelength and modulation depth of graphene optical modulator

域现象最明显，施加突变电压后，本征波长处只有很小部分光被局域。因此，本征波长处的消光比达到最大值。

### 3) 调制速率

调制速率是指调制器单位时间可调制的码元速率，反映调制器通、断调制的转换速度<sup>[15]</sup>。在石墨烯光调制器中，影响调制速率的因素有很多，主要为石墨烯的电控响应时间、调制器的系统稳定时间和电极对应的电路 RC 时间常数。在不考虑电路 RC 时间常数影响的情况下，调制速率  $\nu$  与调制器的系统响应时间满足

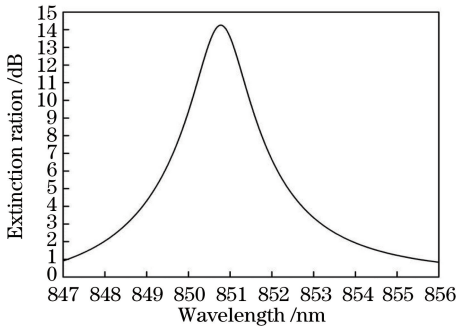


图 5 石墨烯光调制器的波长和消光比关系图

Fig. 5 Relationship between wavelength and extinction ratio of graphene optical modulator

$$v = \frac{1}{t_{re} + t_s}, \quad (9)$$

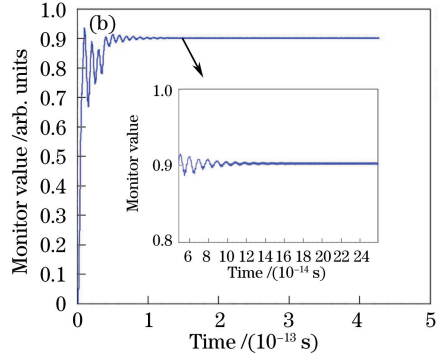
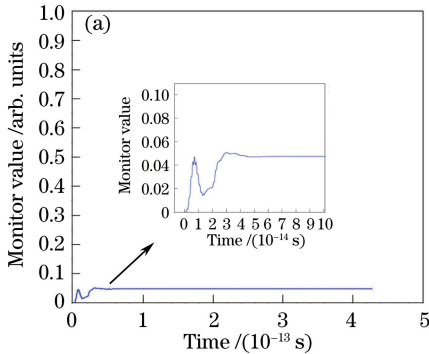


图 6 石墨烯光调制器的输出与输入的比值随时间变化的曲线图。(a)“关闭”状态;(b)“打开”状态

Fig. 6 Curves of the ratio of output to input of graphene optical modulator versus time.

(a) "Close" state; (b) "open" state

## 4 结 论

提出一种基于 OTS 的石墨烯光调制器,利用石墨烯的电控特性和 OTS 的光局域特性,可以实现强度调制。在金属-DBR 结构中,OTS 的本征波长为 850.7 nm。当入射波长等于本征波长时,石墨烯与光充分相互作用,调制器所需的最小调制电压为 7.5 V,反射率 dip 峰发生漂移,在 dip 峰处的最大调制深度为 0.96,消光比为 14.45 dB,在不考虑电极对应的电路 RC 时间常数影响的情况下,调制速率可超过 600 GHz,在一定波长范围内可以实现调制深度不同的光调制。该调制器具有调制深度深、调制电压低和调制速率快的优势,在未来的光通信系统和光信息处理系统中具有很好的应用前景。

## 参 考 文 献

[1] Yu K X, Pang Z G, Jiang A E. Lithium niobate fiber acousto-electro-optic modulator[J]. Journal of

式中: $t_{re}$ 为石墨烯电控的响应时间, $t_s$ 为调制器系统稳定时的响应时间。

图 6 为基于 OTS 的石墨烯光调制器“关闭”、“打开”两种状态下反射光与入射光光强的比值随时间变化的曲线图。从图 6(a)可以看到,调制器从“打开”到“关闭”,并达到稳定状态需要 0.08 ps;从图 6(b)可以看到,调制器从“关闭”到“打开”,并达到稳定状态需要 0.2 ps。结合电控石墨烯材料折射率的响应时间  $t_{re}$  约为 1.2 ps<sup>[16]</sup>,可以得到调制器的系统稳定时间  $t_s$  约为 0.28 ps。在不考虑电极对应的电路 RC 时间常数对调制速率影响的情况下,由(9)式可得,该调制器的调制速率可超过 600 GHz。

Beijing University of Technology, 2004, 30(2): 256-259.

俞宽新, 庞兆广, 蒋安恩. 铌酸锂光纤声光电调制器[J]. 北京工业大学学报, 2004, 30(2): 256-259.

[2] Chen H B, Chen F, She W L. The design of acousto-optic modulator for both phase modulation and amplitude modulation [J]. Acta Photonica Sinica, 2003, 32(2): 166-169.

陈海波, 陈芳, 余卫龙. 相位、振幅调制两用声光调制器设计[J]. 光子学报, 2003, 32(2): 166-169.

[3] Guo J H, Zhu Z M, Deng W M. A novel magneto-optical modulator[J]. Acta Optica Sinica, 2000, 20(1): 110-113.

郭继华, 朱兆明, 邓为民. 新型磁光调制器[J]. 光学学报, 2000, 20(1): 110-113.

[4] Liu M, Yin X B, Ulin-Avila E, et al. A graphene-based broadband optical modulator [J]. Nature, 2011, 474: 64-67.

[5] Liu M, Yin X B, Zhang X. Double-layer graphene optical modulator[J]. Nano Letters, 2012, 12(3): 1482-1485.

- [6] Li H, Anugrah Y, Koester S J, *et al.* Optical absorption in graphene integrated on silicon waveguides[J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 101(11): 111110.
- [7] Gosciniak J, Tan D T. Theoretical investigation of graphene-based photonic modulators [J]. *Scientific Reports*, 2013, 3: 1897.
- [8] Du W, Li E P, Hao R. Tunability analysis of a graphene-embedded ring modulator [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2014, 26(20): 2008-2011.
- [9] Mohsin M, Schall D, Otto M, *et al.* Graphene based low insertion loss electro-absorption modulator on SOI waveguide[J]. *Optics Express*, 2014, 22(12): 15292-15297.
- [10] Zhou H C. The properties and applications of optical Tamm states in metal-distributed Bragg reflector[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012: 2-3.  
周海春. 金属-分布式布拉格反射镜结构中的光学 Tamm 态[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012: 2-3.
- [11] Wang J M. Structure design of graphene-based modulator and study of its characteristics [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2014: 25-26.  
王建敏. 基于石墨烯的电光调制器的结构设计及其特性研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2014: 25-26.
- [12] Chen X F, Li S J, Zhang Y, *et al.* The wide-angle perfect absorption based on the optical Tamm states [J]. *Optoelectronics Letters*, 2014, 10(4): 317-320.
- [13] Jiang Y. Study of optical Tamm state photonic devices in metal-periodical structure [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2014: 22-26.  
蒋瑶. 金属-周期性介质光学 Tamm 态光子器件研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2014: 22-26.
- [14] Miloua R, Kebbab Z, Chiker F, *et al.* Peak, multi-peak and broadband absorption in graphene-based one-dimensional photonic crystal [J]. *Optics Communications*, 2014, 330: 135-139.
- [15] Li T T. The research of graphene-based electro-absorption modulator [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2015: 46-48.  
李婷婷. 石墨烯电吸收调制器的基础研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2015: 46-48.
- [16] Chen H M, Wei X Y. The design of high-speed photonic crystal optical switch [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2013, 40(11): 34-39.  
陈鹤鸣, 卫晓颖. 高速光子晶体光开关的设计 [J]. *光电工程*, 2013, 40(11): 34-39.