基于石墨烯的高效复合波导调制器研究

王少亮，叶子威，彭希亮，郝然

浙江大学先进微纳电子器件智能系统及应用重点实验室，浙江 杭州 310027

摘要 提出了一种基于石墨烯的复合波导调制器，用严格的三维数值仿真结果展示了该调制器的工作状态。利用调制器狭缝中的表面等离激元对电磁波的强约束，增强了光与石墨烯间的相互作用，提高了调制器的调制性能，调制效率可达 0.197 dB·μm^{-1}。在调制器长度为 15 μm 时，可实现调制深度为 3 dB 的开关键控效应，此时的插入损耗为 0.4 dB，调制带宽可达1.85 GHz。设计了与输入波导相连接的耦合器，在耦合器总长度仅为 1 μm 的条件下，实现了 86.6%的耦合效率。

关键词 集成光学；光通信；调制器；复合波导；石墨烯；表面等离激元

中图分类号 TN256 **文献标识码** A **doi**：10.3788/AOS201838.0513003

Study of Highly-Efficient Composite Waveguide Modulator Based on Graphene

Wang Shaoliang, Ye Ziwei, Peng Xiliang, Hao Ran

Key Laboratory for Advanced Microelectronic Intelligent Systems and Applications, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, *China*

Abstract A composite waveguide modulator based on graphene is proposed and the rigid three-dimensional numerical simulation results demonstrate the working states of this modulator. The surface plasmon polaritons in the slits of this modulator are used to strongly confine the electromagnetic wave, which enhances the interaction between the light and the graphene and thus improves the modulation performance of this modulator. Its modulation efficiency can reach 0.197 dB·μm^{-1}. The on-off keying modulation with a modulation depth of 3 dB can be achieved when the modulator length is 15 μm. Meanwhile, the insertion loss is 0.4 dB and the modulation bandwidth is 1.85 GHz. The coupler connecting the input waveguide is designed, and the coupling efficiency can reach 86.6% when the coupler length is just 1 μm.

Key words integrated optics; optical communications; modulator; composite waveguide; graphene; surface plasmon

OCIS codes 130.3120; 250.5403; 130.4110

1 引 言

电光调制器是光通信系统中的核心功能器件之一，它的主要功能是实现通信过程中的电光转换[1-2]。在各种电光调制器中，硅基电光调制器凭借着损耗低、与 CMOS(互补金属氧化物半导体)工艺相兼容等优点，已成为电光调制器研究中的热点之一[3-4]。硅基电光调制器主要分为两种：一种是基于由外加电压引起的硅折射率实部发生变化的电折射效应，称为电折射效应调制器；另一种是基于由外加电压引起的硅折射率虚部发生变化的电吸收效应，称为电吸收效应调制器。然而，硅材料固有的缺陷，即在光通信频段的电折射效应与电吸收效应都比较弱，抑制了硅基电光调制器的性能[5]。针对这一问题，最新的研究是把新型纳米材料与硅相结合，利用新型纳米材料来增强硅基电光调制器的调制性能。新型二维材料石墨烯有着零带隙的能带结构[6]、极高的电子迁移率(约 2×10^5 cm^2·V^{-1}·s^{-1})[7]、可吸

收稿日期：2017-11-07；**收到修改稿日期**：2017-12-14

基金项目：国家自然科学基金(61575174)、浙江省杰出青年基金(LR16F050002)、中央高校基本科研业务费(2017XZZX009-02)、浙江大学现代光学仪器国家重点实验室开放课题

作者简介：王少亮(1991—)，男，硕士研究生，主要从事光子器件方面的研究。E-mail：21431012@zju.edu.cn

导师简介：郝然(1983—)，男，博士，副教授，博士生导师，主要从事基于二维材料光器件和硅基微纳光电系统方面的研究。E-mail：rhao@zju.edu.cn(通信联系人)

收宽频域的电磁波[8]、高度可调性[9]等优点，有望大幅提高调制效率，在传感器[10-11]和调制器[12]领域有着广阔的应用前景。但是，在石墨烯条形波导硅基电光调制器中，硅波导所传输的导模的尺寸是石墨烯厚度(约 0.34 nm)的数千倍[9]，非常不利于光场耦合到石墨烯中，限制了光与石墨烯间的相互作用，成为调制器性能提高的主要障碍之一。彭希亮等[13]提出了一种 4 层石墨烯交叉电容结构的调制器，但石墨烯调制结构复杂，且实际情况下 4 层石墨烯的化学势难以实现一致调制。针对这一问题，本文提出了一种基于单层石墨烯的复合波导调制器，大大降低了加工难度，石墨烯、银与硅波导一起形成电容结构，用以调制硅波导与金属银上方石墨烯的费米能级。根据载流子扩散原理可知，狭缝中石墨烯的载流子浓度也将改变，狭缝中石墨烯的化学势得以实现调控。复合波导由金属银与硅波导构成，中间介质为空气，复合波导狭缝中的表面等离激元对电磁场有着强约束，增强了光与石墨烯间的相互作用，改善了调制器的调制性能，实现了0.197 dB·μm^{-1}的调制效率，在调制器长度仅为 15 μm 时，即可实现调制深度为 3 dB 的开关键控效应，此时石墨烯复合波导调制器的插入损耗为 0.4 dB，调制带宽可达 1.85 GHz。同时还设计了针对调制器与光路互连所需的耦合器，在耦合总长度仅为 1 μm 的前提下，耦合效率达到 86.8%。最后，用严格的三维数值仿真结果证明了该分析结果，以光能量传输分布图直观地展现了所设计调制器的工作状态。

2　理论模型与仿真

2.1　石墨烯高效复合波导调制器的材料建模

根据库伯公式，石墨烯的面内复电导率由带间电导率和带内电导率两部分所组成[14]，即

$$\sigma_{\text{total}}=\sigma_{\text{intra}}+\sigma'_{\text{inter}}+\sigma''_{\text{inter}},\tag{1}$$

$$\sigma_{\text{intra}}=\sigma_0\frac{4\mu_c}{\pi}\frac{1}{\hbar(\Gamma_1-\mathrm{j}\omega)},\tag{2}$$

$$\sigma'_{\text{inter}}=\sigma_0\left[1+\frac{1}{\pi}\tan^{-1}\left(\frac{\hbar\omega-2\mu_c}{\hbar\Gamma_2}\right)-\frac{1}{\pi}\tan^{-1}\left(\frac{\hbar\omega+2\mu_c}{\hbar\Gamma_2}\right)\right],\tag{3}$$

$$\sigma''_{\text{inter}}=-\sigma_0\frac{1}{2\pi}\ln\left[\frac{(2\mu_c+\hbar\omega)^2+(\hbar\Gamma_2)^2}{(2\mu_c-\hbar\omega)^2+(\hbar\Gamma_2)^2}\right],\tag{4}$$

式中 σ_{total} 为石墨烯总电导率，σ_{intra} 为石墨烯带内电导率，σ_{inter} 为石墨烯带间电导率，$\hbar$ 表示约化普朗克常量；光导率 $\sigma_0=e^2/4\hbar$，其中 e 为电子电荷量；μ_c 为石墨烯的化学势；ω 为光的角频率；Γ_1、Γ_2 分别为石墨烯的带内与带间粒子散射率。由(1)～(4)式可知，在温度、入射波波长以及粒子散射率确定之后，石墨烯的电导率只与化学势相关。石墨烯化学势的调节通常有两种方法：1)通过化学掺杂改变石墨烯的载流子浓度，从而改变石墨烯的化学势；2)利用电掺杂，具体来说是对石墨烯施加一个外加电场，使得石墨烯的载流子浓度发生变化。

介电常数是表征材料光学性质的重要参数之一，石墨烯面内的介电常数为

$$\varepsilon_{\parallel}(\omega)=1+\frac{\mathrm{j}\sigma_{\text{total}}(\omega)}{\omega\varepsilon_0 d},\tag{5}$$

式中 ε_0 为真空介电常数，d 为石墨烯的厚度[15]。石墨烯的面外介电常数则可视为常数，即 $\varepsilon_{\perp}=2.5$。在波长 1550 nm 处，石墨烯面内的介电常数随着化学势的变化如图 1 所示。

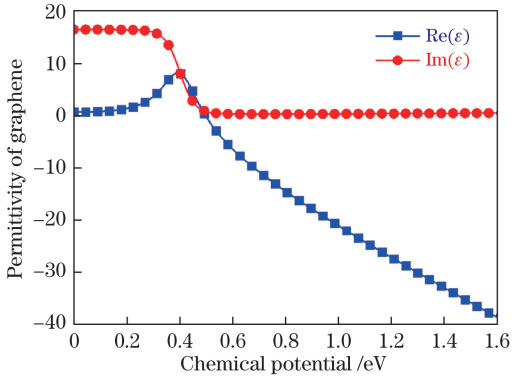

图 1　石墨烯介电常数随着化学势的变化

Fig. 1　Permittivity of graphene versus chemical potential

2.2　石墨烯高效复合波导调制器的结构设计与分析

基于石墨烯横电(TE)偏振的高效复合波导调制器的结构如图 2 所示。

用全波数值仿真软件 COMSOL 对调制器进行了仿真研究，其中硅、金属银的折射率分别设为 3.45 和 0.1453+11.3587i[16]，厚度设为绝缘体上硅(SOI)片的厚度(220 nm)，二氧化硅的折射率设为 1.45，厚度设为3 μm，三氧化二铝的折射率设为 1.746，厚度设为10 nm，波长 λ 设为 1550 nm。经过严格的数值仿真计算可求得石墨烯复合波导的有效折射率 n_{eff}，复合波导的单位长度的传输损耗为

$$\alpha=40\pi(\lg e)\mathrm{Im}(n_{\text{eff}})/\lambda。\tag{6}$$

随着外加电压的增大，石墨烯的化学势从 0 eV 增大到 0.6 eV，石墨烯内电子的带间跃迁被抑制[9]，复合波导调制器的传输损耗逐渐减小，如图 3 所示。

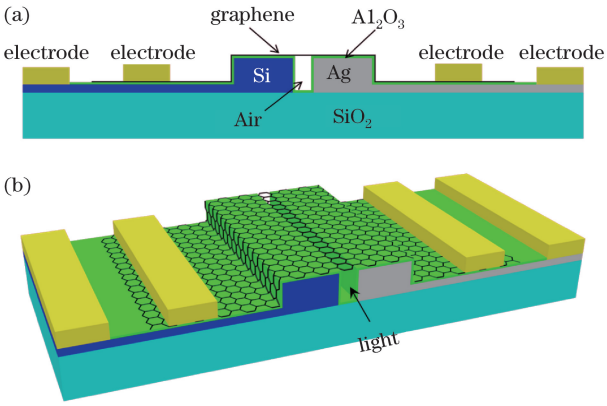

图 2　基于石墨烯的复合波导调制器的结构示意图。(a)二维截面图;(b)三维模型图

Fig. 2　Structural diagram of composite waveguide modulator based on graphene. (a) 2D cross section; (b) 3D model

石墨烯的化学势可以通过外加电压来调控[17],即

$$|\mu_c| = \hbar v_f \sqrt{\pi\eta\,|(V_g - V_0)|}, \tag{7}$$

式中 v_f 为费米速度(约为 0.9×10^6 m·s^{-1}),η 为系数(约等于 9×10^{16} m^{-2}·s^{-1}),V_0 为石墨烯掺杂所带来的静态偏压,V_g 为加在两层石墨烯之间的偏置电压。在理想情况下($V_0=0$),石墨烯化学势随偏置电压的变化如图 3 中蓝色实线所示,图 3 插图为复合波导 TE 基模的电场分布图。

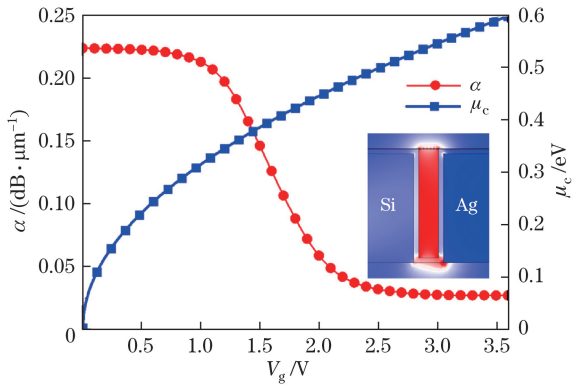

图 3　复合波导的传输损耗和石墨烯化学势随偏置电压的变化

Fig. 3　Propagation loss of composite waveguide and chemical potential of graphene versus bias voltage

根据(6)、(7)式可知,复合波导的传输损耗能够有效地被金属电极所加的偏置电压所调控。当施加低调制电压时,石墨烯化学势为 0,复合波导传输损耗很大,光能量在传输过程中被大大衰减,此时的输出状态在通信编码上可记为 0。当施加高调制电压时,石墨烯化学势为 0.6 eV,复合波导传输损耗很小,光能量能够顺利地传输通过复合波导,此时的输出状态在通信编码上可记为 1。这里定义石墨烯化学势为 0 时的传输损耗(0.224 dB·μm^{-1})与石墨烯化学势为 0.6 eV 时的传输损耗(0.027 dB·μm^{-1})之差为调制器的调制效率,用以表征调制器的调制性能。所设计调制器实现了 0.197 dB·μm^{-1} 的调制效率,即调制器每微米可实现 0.197 dB 的调制深度。在调制器长度为 15 μm 时即可实现调制深度为 3 dB 的开关键控效应,此时的插入损耗仅为 0.4 dB。相对于传统硅基调制器,石墨烯复合波导调制器有效地减小了器件的尺寸长度。其原因可以用图 3 插图所示的复合波导 TE 基模电场的分布来解释:一方面,电场在不同折射率的交界面处具有不连续性,狭缝中的电场被增强[18],相对于传统波导结构,光与石墨烯间的相互作用更强,石墨烯的光吸收率更大,提高了调制器的调制性能;另一方面,狭缝中的表面等离激元增强了对光的约束,进一步增强了电场强度,使得调制器的调制性能得到了提高。狭缝中电场的强度与狭缝宽度和硅波导宽度有关,狭缝宽度与硅波导宽度又影响着复合波导与石墨烯的相互作用面积,以下分析了两者对复合波导调制器调制效率的影响。

固定硅波导宽度为 260 nm,石墨烯复合波导调制器的狭缝宽度对调制器调制效率的影响如图 4(a)所示。当狭缝宽度等于 40 nm 时,调制器的调制效率取得最大值。虽然狭缝宽度越小,狭缝中的场强就越强,与石墨烯的相互作用越强烈,但调制器传输信号为 1 时的传输损耗也越大。随着狭缝宽度的增大,调制器传输信号 1 时的传输损耗相对于传输信号为 0 时的传输损耗减小得更快,因此调制器的调制效率增大。狭缝宽度大于 40 nm 后,调制器传输信号为 1 时的传输损耗基本保持不变,约为 0.027 dB·μm^{-1},此时随着狭缝宽度的增大,石墨烯与狭缝中光强的总相互作用逐渐减小,调制器的调制效率缓慢减小。固定狭缝宽度为 40 nm,石墨烯复合波导调制器的硅波导宽度对调制效率的影响如图 4(b)所示。硅波导的宽度影响着狭缝中光强的大小,与此同时硅波导中也有少量的光强与上层的石墨烯相互作用,如图 3 中插图所示。当硅波导的宽度大于或小于 260 nm 时,调制效率开始减小,当硅宽度为 340 nm 时,调制器的调制效率为 0.165 dB·μm^{-1},相比于 260 nm 时,调制效率减小了 15.4%,反映出该调制器具有较好的工艺加工容错性。

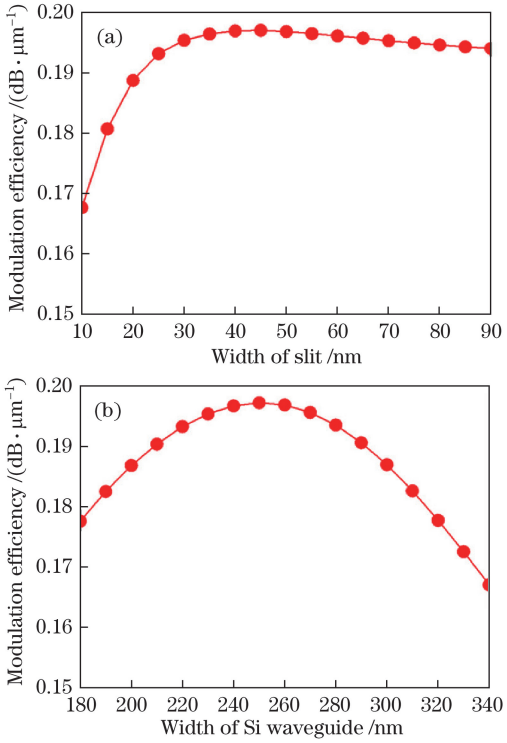

图 4　(a)狭缝宽度对调制效率的影响；(b)硅波导宽度对调制效率的影响

Fig. 4　(a) Effect of slit width on modulation efficiency; (b) effect of Si waveguide width on modulation efficiency

2.3　石墨烯高效复合波导调制器的耦合器设计

设计了与输入波导相连接所需的锥形耦合器，耦合器的结构及尺寸细节如图 5 中插图所示。输入光波导的宽度为 400 nm，调制器硅波导宽度为 260 nm，金属银宽度为 260 nm，狭缝宽度为 40 nm。耦合器由上下两部分组成，耦合器缝隙宽度从20 nm 渐变到 40 nm，这种耦合系数逐渐减小的设计有效地减小了耦合器的总长度。当耦合器长度等于 500 nm 时，耦合器的耦合效率达到最大值(86.6%)，此时输入输出耦合器的总长度仅为1 μm。当耦合器长度大于 500 nm 时，随着耦合器长度的增大，耦合器的耦合效率基本保持不变。

2.4　石墨烯高效复合波导调制器的系统仿真

对由耦合器与复合波导调制器构成的整个传输系统进行了严格的三维仿真分析。其中，耦合器分为输入耦合器与输出耦合器两部分，耦合器的总长度为 1 μm。当石墨烯化学势等于 0.6 eV 时，光能量很好地通过了调制器，耦合进入输出波导，此时石墨烯复合波导调制器的工作状态可记为导通状态，输出编码记为 1；当石墨烯的化学势等于 0 时，光能量耦合进入调制器中，但此时复合波导的传输损耗比较大，光能量在传输的过程中慢慢衰减至 0，石墨

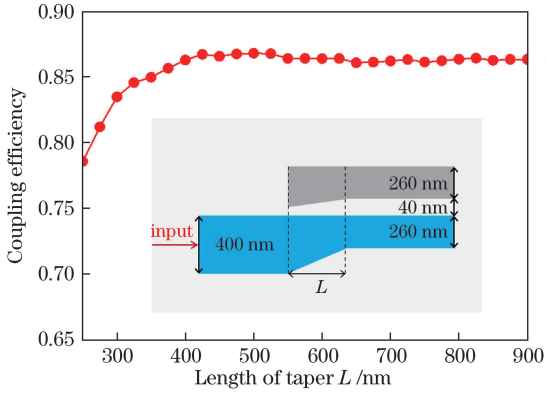

图 5　锥形耦合器结构与耦合效率

Fig. 5　Structural diagram and coupling efficiency of tapered coupler

烯复合波导调制器的工作状态可记为截断状态，输出编码记为 0，如图 6(a)、(b)所示。

图 6(c)与 6(d)所示分别为不同化学势下输出波导黑色虚线处对应的光波模场分布。所设计的调制器基于 SOI 硅片制造而成，通过电子束曝光技术与干法刻蚀技术来制造调制器的硅波导[19]，通过化学气象沉积技术来制造调制器的金属银部分。通过原子层沉积技术来制造三氧化二铝绝缘层，目的是隔绝石墨烯与波导之间的电接触[20]。根据文献[9]可知，通过机械转移技术便可将单层石墨烯覆盖在整个调制器上面。最后制造用来调控石墨烯化学势的金属电极，所有制作步骤都是与 CMOS 工艺相兼容的。

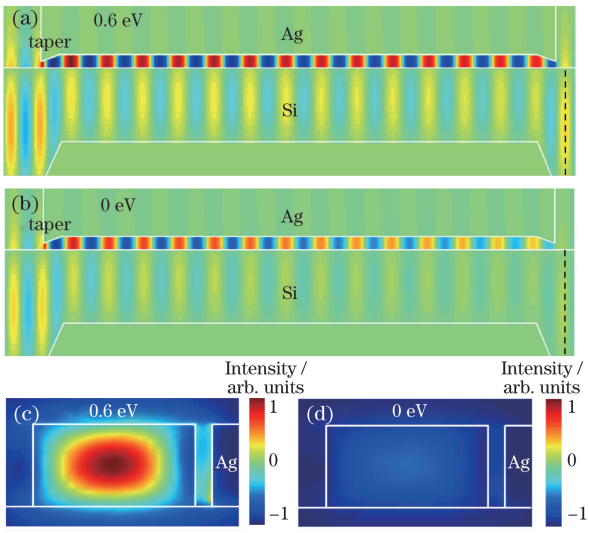

图 6　在不同石墨烯化学势下，(a)(b)调制器的光能量传输分布图和(c)(d)输出波导的光波模场分布

Fig. 6　(a)(b) Optical energy transmission distribution of modulator and (c)(d) optical mode distribution of output waveguide under different chemical potentials of graphene

调制器的调制带宽为

$$W_B = 1/(2\pi RC_p), \tag{8}$$

式中 R 为等效电阻；等效电容 $C_p = \varepsilon_0\varepsilon_r S/d$（约为 2.32 pF），其中 ε_r 为 Al_2O_3 的相对介电常数，S 为电容的面积。石墨烯与金属电极的接触电阻 $R_c = 400\ \Omega\cdot\mu m$，则调制器的等效电阻可用 $R = L/R_c$ 计算，其中 L 为波导长度（15 μm），调制器等效电阻约为 27 Ω。调制器的3 dB带宽约为 1.85 GHz。

3 结　论

提出了一种基于石墨烯的复合波导调制器，复合波导由金属银与硅波导构成，中间介质为空气，三氧化二铝绝缘层隔绝了石墨烯与复合波导的电接触，狭缝中的表面等离激元对电磁场的强约束与铺在复合波导上表面的石墨烯相互作用，增强了调制器的调制性能，实现了 0.197 $dB\cdot\mu m^{-1}$ 的调制效率，在调制器长度为 15 μm 时，可实现调制深度为 3 dB 的开关键控效应，此时的插入损耗为 0.4 dB，调制带宽可达 1.85 GHz。通过严格的三维数值仿真得到了光能量传输分布图，直观地展现了调制器的两种工作状态。研究结果为电光调制器的设计提供了参考。

参 考 文 献

[1] Doerr C R, Zhang L, Winzer P J, *et al*. Compact high-speed InP DQPSK modulator[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2007, 19(15): 1184-1186.

[2] Griffin R A, Jones S K, Whitbread N, *et al*. InP Mach-Zehnder modulator platform for 10/40/100/200-Gb/s operation[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2013, 19(6): 158-166.

[3] Thomson D J, Gardes F Y, Fedeli J M, *et al*. 50-Gb/s silicon optical modulator[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2012, 24(4): 234-236.

[4] Ding J F, Ji R Q, Zhang L, *et al*. Electro-optical response analysis of a 40 Gb/s silicon Mach-Zehnder optical modulator[J]. Journal of Lightwave Technology, 2013, 31(14): 2434-2440.

[5] Hao R, Du W, Chen H S, *et al*. Ultra-compact optical modulator by graphene induced electro-refraction effect[J]. Applied Physics Letters, 2013, 103(6): 061116.

[6] Novoselov K S, Geim A K, Morozov S V, *et al*. Two-dimensional gas of massless Dirac fermions in graphene[J]. Nature, 2005, 438(7065): 197-200.

[7] Mak K F, Sfeir M Y, Wu Y, *et al*. Measurement of the optical conductivity of graphene[J]. Physical Review Letters, 2008, 101(19): 196405.

[8] Tan Y W, Zhang Y, Stormer H L, *et al*. Temperature dependent electron transport in graphene[J]. European Physical Journal Special Topics, 2007, 148(1): 15-18.

[9] Liu M, Yin X B, Ulin-Avila E, *et al*. A graphene-based broadband optical modulator[J]. Nature, 2011, 474(7349): 64-67.

[10] Xiao Y, Zhang J, Cai X, *et al*. Fiber-optic humidity sensing based on graphene[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(4): 0406005.
肖毅, 张军, 蔡祥, 等. 基于石墨烯的光纤湿度传感研究[J]. 光学学报, 2015, 35(4): 0406005.

[11] Liao G Z, Zhang J, Cai X, *et al*. All-fiber temperature sensor based on graphene[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(7): 0706004.
廖国珍, 张军, 蔡祥, 等. 基于石墨烯的全光纤温度传感器的研究[J]. 光学学报, 2013, 33(7): 0706004.

[12] Liu Y Z, Zhang Y P, Cao Y Y, *et al*. Modulator of tunable modulation depth on graphene metamaterial[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(10): 1016002.
刘元忠, 张玉萍, 曹妍妍, 等. 基于石墨烯超材料深度可调的调制器[J]. 光学学报, 2016, 36(10): 1016002.

[13] Peng X L, Hao R, Ye Z W, *et al*. Highly efficient graphene-on-gap modulator by employing the hybrid plasmonic effect[J]. Optics Letters, 2017, 42(9): 1736-1739.

[14] Phatak A, Cheng Z Z, Qin C, *et al*. Design of electro-optic modulators based on graphene-on-silicon slot waveguides[J]. Optics Letters, 2016, 41(11): 2501-2504.

[15] 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.

[16] Guan X W, Wu H, Shi Y C, *et al*. Ultracompact and broadband polarization beam splitter utilizing the evanescent coupling between a hybrid plasmonic waveguide and a silicon nanowire[J]. Optics Letters, 2013, 38(16): 3005-3008.

[17] Youngblood N, Anugrah Y, Ma R, *et al*. Multifunctional graphene optical modulator and photodetector integrated on silicon waveguides[J]. Nano Letters, 2014, 14(5): 2741-2746.

[18] Almeida V R, Xu Q F, Barrios C A, *et al*. Guiding and confining light in void nanostructure[J]. Optics Letters, 2004, 29(11): 1209-1211.

[19] Cheng Z Z, Chen X, Wong C Y, *et al*. Focusing subwavelength grating coupler for mid-infrared suspended membrane waveguide[J]. Optics Letters, 2012, 37(7): 1217-1219.

[20] Huang B H, Lu W B, Li X B, *et al*. Waveguide-coupled hybrid plasmonic modulator based on graphene[J]. Applied Optics, 2016, 55(21): 5598-5602.