

覆石墨烯微纳光纤双折射与电光调控特性

毕卫红 李彩丽 王晓愚 付广伟 付兴虎 杨凯丽 马敬云

燕山大学信息科学与工程学院河北省特种光纤与光纤传感重点实验室, 河北 秦皇岛 066004

摘要 石墨烯具有特殊的二维柔性结构,可调控费米能级特性和优异的光学、电学性能。利用有限元法,对覆石墨烯微纳光纤光场调控进行理论分析,通过改变石墨烯与缓冲层结构覆微纳光纤的角度,破坏光纤的对称性结构,使光纤具有双折射特性,双折射度大小与石墨烯覆盖角度有关;通过外加电压的方法改变石墨烯的化学势,可对光纤进行开关调控,由此设计出一种包覆石墨烯的微纳光纤电吸收型调制器并进行性能分析。通过数值分析可发现当覆盖光纤角度为 270° 时,1550 nm处双折射度可达 1.23×10^{-3} ;电吸收调制器工作在1550 nm时,器件长度为18 μm ,消光比为7 dB,3 dB带宽可达到927 MHz,插入损耗为0.58 dB。

关键词 物理光学; 双折射; 微纳光纤; 电光调控; 有限元法; 石墨烯; 化学势

中图分类号 TN253 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201636.1026013

Birefringence and Electro-Optic Properties of Graphene Covered Microfiber

Bi Weihong Li Caili Wang Xiaoyu Fu Guangwei Fu Xinghu Yang Kaili Ma Jingyun

Hebei Provincial Key Laboratory for Special Fiber and Fiber Sensor, School of Information Science and Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China

Abstract Based on the special two-dimensional flexible structure, graphene has excellent optical and electrical properties. With the finite element method, we theoretically investigated modulation of the optical field of graphene covered microfiber. By changing the overlay angle, the symmetrical structure of fiber was destroyed to provide the microfiber with birefringence. The value of birefringence is a function of overlay angle. The chemical potential of graphene can be modulated and the light transmission of optical fiber can be switched by changing the external voltage. We designed a graphene covered microfiber based electrical absorption modulator and proceeded the performance analysis. Numerical simulations show that when the overlay angle is 270° and the incident wavelength is 1550 nm, the birefringence can be up to 1.23×10^{-3} . When the electric absorption modulator works at the wavelength of 1550 nm, its length is 18 μm , the extinction ratio is 7 dB, the 3 dB bandwidth reaches 927 MHz, and the insert loss is 0.58 dB.

Key words physical optics; birefringence; microfiber; electro-optic modulation; finite element method; graphene; chemical potential

OCIS codes 260.1440; 250.4110; 060.2310; 060.2330; 060.2420

1 引 言

石墨烯是单层碳原子组成的二维蜂窝状结构材料,自从2004年被提出以来,由于其具有优异的电学、光学性能吸引了很多科学工作者的注意^[1-2]。石墨烯具有优异的机械性能、热学性能、电子特性和光学特性,包括高电子迁移率、可调控的费米能级、与波长无关的光学吸收常数、可饱和吸收性等^[3],这些性质使得石墨烯在激光器^[4-5]、偏振器^[6]、调制器^[7]、光电探测器^[8]中具有重要的应用。微纳光纤作为光波长尺度的波导纤维具有低传输损耗、高功率密度、大倏逝场和小弯曲半径等特点,在微纳尺度的光传输、耦合、调制、谐振、放大、传感等领域具有潜在的应用价值,成为光通信、光传感和其他多个领域的研究热点。将微纳光纤大倏逝场特

收稿日期: 2016-05-26; 收到修改稿日期: 2016-07-12

基金项目: 国家自然科学基金(61575170,61475133)、河北省应用基础研究计划重点基础研究项目(16961701D)

作者简介: 毕卫红(1960—),女,博士,教授,主要从事光纤传感、光纤通信、光电检测方面的研究。

E-mail: whbi@ysu.edu.cn

性和石墨烯优异的电光特性相结合,可增大光纤光场调控性能,设计多种光学器件^[9-12]。He 等^[13]首先提出偏振相关的覆石墨烯微纳光纤,研究了不同角度入射光及不同层数石墨烯对光纤光场透过率和偏振敏感度的影响。Kou 等^[14]将微纳光纤缠绕在包裹石墨烯的低折射率介质棒上,通过控制微纳光纤螺旋结构圈数增大石墨烯与光的作用强度,不仅可以实现宽带偏振器功能,还可以作为高品质因数单偏振谐振器使用;利用该结构 Chen 等^[15]提出了全光调制器模型,并进行了实验验证。基于脊波导的石墨烯电光调制研究发现^[16],两层分离的石墨烯比两层紧贴的石墨烯具有更好的电光调制效果。石墨烯作为涂覆层,其折射率变化不仅可由入射光及温度改变引起,其独特的带内跃迁和带间跃迁机制也会使石墨烯折射率发生改变,而关于石墨烯可调控费米能级特性以及对光场模场分布影响的相关研究很少。本文基于本课题组石墨烯涂覆空芯光纤电光调制特性的研究^[17],针对石墨烯二维柔性结构和可调控费米能级的特点,利用有限元法从理论上分析了石墨烯覆盖不同角度时微纳光纤双折射特性和不同化学势下的损耗特性,提出电吸收调制器模型,并进行性能分析。

2 光纤结构与理论基础

2.1 石墨烯的电光性质

根据 Kubo 公式^[18],石墨烯电导率由带内光电导和带间光电导组成,

$$\sigma_g = \sigma_{\text{intra}} + \sigma_{\text{inter}}, \quad (1)$$

$$\sigma_{\text{intra}} = \frac{je^2(\omega - j\tau_1^{-1})}{\pi \hbar^2} \left\{ \frac{1}{(\omega - j\tau_1^{-1})^2} \int_0^\infty \epsilon \left[\frac{\partial f_d(\epsilon)}{\partial \epsilon} - \frac{\partial f_d(-\epsilon)}{\partial \epsilon} \right] d\epsilon \right\}, \quad (2)$$

$$\sigma_{\text{inter}} = \frac{-je^2(\omega - j\tau_2^{-1})}{\pi \hbar^2} \left[\frac{1}{(\omega - j\tau_2^{-1})^2} \int_0^\infty \frac{f_d(-\epsilon) - f_d(\epsilon)}{(\omega - j\tau_2^{-1})^2 - 4(\epsilon/\hbar)^2} d\epsilon \right], \quad (3)$$

式中 \hbar 为约化普朗克常量, e 为电子电量, ω 为角频率, μ_c 为化学势, τ_1 和 τ_2 分别为带内、带间跃迁的弛豫时间, $f_d(\epsilon)$ 为费米狄拉克分布并且满足 $f_d(\epsilon) = \left[\exp\left(\frac{\epsilon - \mu_c}{kT}\right) + 1 \right]^{-1}$, T 为温度, $T = 300$ K, $\tau_1 = 10$ fs, $\tau_2 = 1.2$ ps, k 为玻尔兹曼常数。

石墨烯介电常数计算公式为

$$\epsilon_g(\omega, \mu_c) = 1 + \frac{i\sigma_g}{\omega \epsilon_0 d_g}, \quad (4)$$

式中 d_g 为单层石墨烯厚度,默认为 0.34 nm。

石墨烯化学势 μ_c 可通过化学掺杂或加电压方式调控,调控电压 V 与 μ_c 之间的关系为^[6]

$$\mu_c = \hbar v_F \sqrt{\pi \frac{\epsilon_0 \epsilon_r}{de} |V + V_0|}, \quad (5)$$

式中费米速度 v_F 取 1×10^6 m/s; V_0 为石墨烯本征电压,取 $V_0 = 0$; d 为电容结构缓冲层厚度, $d = 7$ nm; ϵ_0 、 ϵ_r 分别为真空介电常数和缓冲层介电常数。

石墨烯复折射率和化学势之间的关系曲线如图 1 所示,折射率实部先增大后减小,而折射率虚部是先减小后增大。当 $|\mu_c| < \hbar\omega/2$ 时,石墨烯以带内跃迁为主,带间跃迁被阻止;当 $|\mu_c| \geq \hbar\omega/2$ 时,石墨烯以带间跃迁为主,带内跃迁被阻止。虚部转变临界点在 $\mu_c = 0.5$ eV 处,这是由于介电常数近零(ENZ)点时,石墨烯将会从“介质属性”向“金属属性”转变。通过电调控的方式控制带内和带间跃迁特性在石墨烯电光调制器设计中具有重要的作用。

2.2 覆石墨烯微纳光纤模型

采用 SiO₂ 材料进行微纳光纤仿真,其 Sellmeier 方程为

$$n_1^2 - 1 = \frac{0.6961663\lambda^2}{\lambda^2 - 0.0684043^2} + \frac{0.4079426\lambda^2}{\lambda^2 - 0.1162414^2} + \frac{0.8974794\lambda^2}{\lambda^2 - 9.896161^2}, \quad (6)$$

式中 λ 为入射光波长,单位为微米^[19]。当微纳光纤的入射光波长为 1550 nm 时,单模直径 D_{SM} 为 1.14 μm ^[20],在临界单模直径时,微纳光纤内外光能量比例 η 约为 81%,随着光纤直径的减小, η 值迅速减

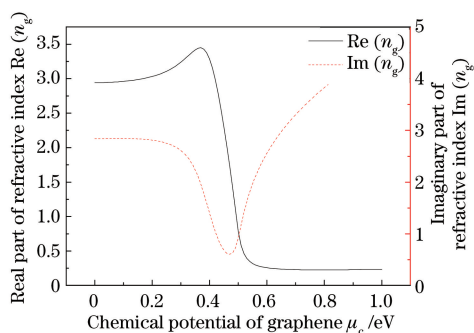


图 1 入射光波长为 1550 nm 时单层石墨烯折射率随化学势变化曲线

Fig. 1 Variation in refractive index of monolayer graphene with the chemical potential when the wavelength of incident light is 1550 nm

小,越来越多的光场能量将会泄漏到周围空气中。图 2 为单层石墨烯包覆不同半径的微纳光纤时,折射率实部与虚部的变化曲线图。GMF 代表单层石墨烯包覆微纳光纤, MF 代表无包覆的微纳光纤。

如图 2 所示,单层石墨烯包覆的微纳光纤折射率实部和虚部均在半径为 0.45 μm 时变化最大。光纤直径远大于波长时,光场能量绝大部分限制在光纤中,光纤外部石墨烯与光纤内部光场作用不强烈,光纤直径越小则其对光的束缚程度越小,倏逝场分量越大,光场与石墨烯作用的强度越大。折射率实部变化量与能量损耗随光纤直径减小而增大;当光纤直径相对于传输波长很小时,大部分能量以倏逝场形式在光纤外传输,包覆在光纤外壁上的石墨烯与光场作用程度减弱,折射率实部变化量减小,光纤损耗也减小。光纤直径越小,所需计算量越大,综合考虑,选取直径为 1 μm 的光纤进行仿真。

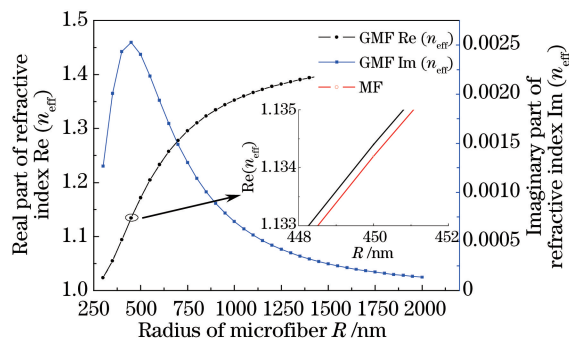


图 2 覆单层石墨烯微纳光纤有效折射率随光纤直径的变化(插图:直径 450 nm 附近的放大图)

Fig. 2 Variation in effective refractive index of monolayer graphene covered microfiber with radius of microfiber (inset: enlarged view near 450 nm)

由于石墨烯特殊的二维柔性结构,厚度为 d_g 的石墨烯与微纳光纤结合形成覆盖角度为 φ 的光纤具有电光调控特性,其端面如图 3 所示。

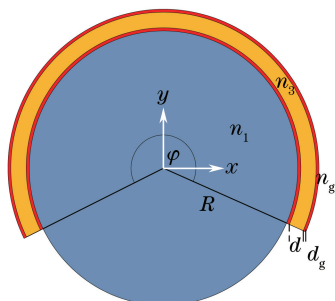


图 3 覆双层石墨烯微纳光纤端面

Fig. 3 Cross-section of double-layer graphene covered microfiber

将微纳光纤纤芯外分别涂覆单层石墨烯、缓冲层、单层石墨烯三层物质,构成平板电容器结构,缓冲层物质为六方氮化硼(*h*-BN,折射率 $n_3=1.98$,介电常数 $\epsilon_r=3.92$)。六方氮化硼是一种绝缘体,与石墨烯晶格失配度为 1.73%。为了防止 *h*-BN 和石墨烯混合结构中复杂机械应变的影响,采用 *h*-BN 厚度 $d=7\text{ nm}$ ^[21]。

3 仿真结果与讨论

3.1 双折射特性

当石墨烯覆盖角度 $\varphi \neq 360^\circ$ 时,光纤对称性结构被破坏,电场在 x 方向和 y 方向上出现偏振,图 4 为 $\varphi=180^\circ$ 时不同电场偏振方向的光场模式,箭头指向为电场方向。

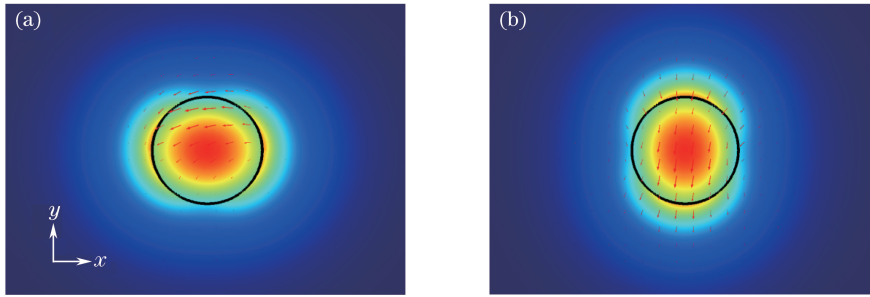


图 4 覆盖角度为 180° 时基模光场分布。(a) x 偏振;(b) y 偏振
Fig. 4 Distribution of the fundamental mode optical field when the overlay angle is 180° .
(a) x polarization; (b) y polarization

图 4 中电场 x 分量关于 $x=0$ 平面对称,电场 y 分量关于 $y=0$ 平面对称,同时缓冲层折射率大于光纤折射率,光场分布不均匀,大部分能量集中在覆石墨烯的上半部分,其双折射效果并不强烈。石墨烯覆盖角度 φ 不断增大时,双折射度 $B = |\text{Re}(n_{\text{eff}}^x) - \text{Re}(n_{\text{eff}}^y)|$ 随着 φ 的不同呈抛物线型变化,如图 5(a) 所示;同时由于石墨烯的费米能级可调性,不同化学势下的光纤光场折射率也发生变化,如图 5(b)、(c) 所示。

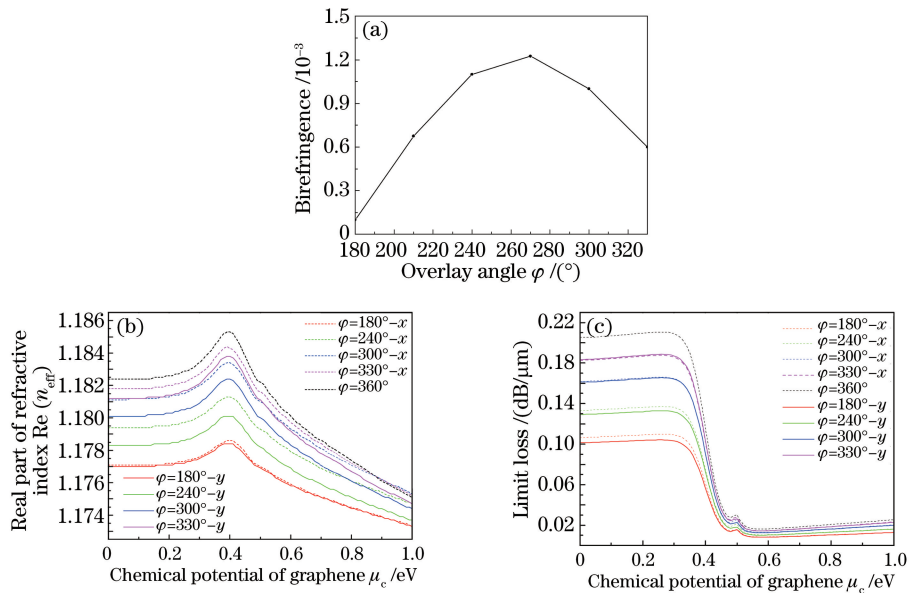


图 5 入射波长 1550 nm 时直径为 $1\text{ }\mu\text{m}$ 覆双层石墨烯光纤的双折射度及折射率。(a) 双折射度 B 随覆盖角度的变化;
(b) 不同覆盖角度下光纤有效折射率实部随化学势的变化;(c) 不同覆盖角度下限制损耗随化学势的变化
Fig. 5 Birefringence and refractive index of double-layer graphene covered microfiber with a diameter of $1\text{ }\mu\text{m}$ at the incident wavelength of 1550 nm. (a) Birefringence versus overlay angle; (b) real part of refractive index as a function of graphene chemical potential at different overlay angles; (c) limit loss as a function of graphene chemical potential at different overlay angles

当 φ 不断增大, 石墨烯在 x 方向对光的作用效果增强, 而在 y 方向上对光场作用效果不明显, 使得双折射度增大; 覆盖角度为 270° 时, 双折射度达到最大; 当 φ 继续增大, 石墨烯在 x 方向对光的作用效果影响不明显, 而在 y 方向上对光场作用效果增强, 不对称影响减弱, 双折射度减小。在 1550 nm 波长下, 改变石墨烯化学势将改变光纤折射率, 双层石墨烯覆盖光纤具有电光调制效果, 有效折射率的实部和虚部都会随着化学势的变化而变化, 石墨烯覆盖角度越大, 实部和虚部最大值与最小值之差越大, 调制效果将越强。微纳光纤被全部包覆时, 不出现双折射效应, 同时调制效果达到最好, 利用实部的变化可设计光纤相位调制器, 虚部的变化可设计电吸收型调制器。

当覆盖角度一定时, 入射波长对双折射度的影响如图 6 所示。石墨烯电导率在近红外波段呈现变化, 不同波长下的微纳光纤倏逝波强度不同。考虑石英色散, 发现双折射度随波长增加呈先增大后减小的趋势, 在 1550 nm 处, 化学势为 0 eV 时双折射度达到 1.23×10^{-3} ; 随着波长增大, 双折射石墨烯和光场作用程度减弱, 双折射度也减小; 化学势不同双折射特性曲线也会变化, 1550 nm 附近化学势为 0.4 eV 时双折射度比化学势为 1.0 eV 时大; 在 1770 nm 处化学势为 0 eV 时的双折射度与化学势为 0.4 eV 时相同, 1850 nm 处化学势为 0.4 eV 时的双折射度与化学势为 1.0 eV 时相同, 这是由于石墨烯折射率与波长有关, 波长越大, $\hbar\omega/2$ 值越小。

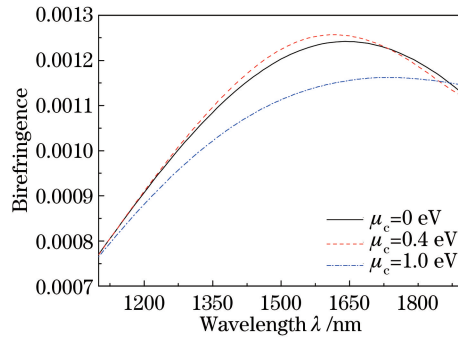


图 6 双折射特性曲线(石墨烯 270° 覆盖)

Fig. 6 Birefringence characteristic curves at different chemical potentials (overlay angle is 270°)

3.2 电光调制特性

在现代光通信系统中一般使用近红外光, 典型波长为 1310 nm 和 1550 nm , 而 1550 nm 波段为石英光纤损耗最低窗口, 同时由于 $\varphi = 360^\circ$ 时不出现双折射效应, 石墨烯损耗随化学势变化, 并于 0.5 eV 处(ENZ 点)出现次损耗峰, 利用损耗变化可在包覆石墨烯的光纤外壁加入旋转电极, 设计一种电吸收型调制器。电极施加电压用于调制石墨烯费米能级结构。调制器有源区长度为光纤周长, 微纳光纤直径为 $1\text{ }\mu\text{m}$, 损耗最大处(化学势为 0.26 eV)为“关”, 损耗最小处(化学势为 0.58 eV)为“开”。

微纳光纤外部由石墨烯、缓冲层、石墨烯三层材料形成电容结构, 与其他电光调制器相同, 时间常数 RC 大大影响器件性能。除器件长度以外, 石墨烯量子电容、石墨烯欧姆电阻、石墨烯与电极接触电阻均影响器件的 3 dB 调制带宽 $f_{3\text{ dB}}$ 。调制器中总电阻 R 为石墨烯欧姆电阻 R_g 与接触电阻 $R_c = 400\text{ }\Omega \cdot \mu\text{m}$ ^[22] 串联, 总电容 C 是石墨烯量子电容 C_Q ^[23] 与平板电容 C_p 的串联^[24],

$$C_Q = \frac{2e^2 kT}{\pi (\hbar v_F)^2} \ln \left[2 \left(1 + \cosh \frac{E_F}{kT} \right) \right], \quad (7)$$

$$C_p = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r S}{d}, \quad (8)$$

$$R_g = \frac{\rho L}{W}, \quad (9)$$

$$f_{3\text{ dB}} = \frac{1}{2\pi RC}, \quad (10)$$

式中 ρ 为石墨烯电阻率, W 为每层石墨烯平面延伸宽度, E_F 为费米能级, S 为平板电容接触面积, L 为调制器的长度, 费米速度 $v_F = 10^6\text{ m/s}$, 3 dB 调制带宽 $f_{3\text{ dB}}$ 取平均值。图 7(a) 为调制器长度与消光比和插入损耗之间的关系图, 图 7(b) 为器件长度与 3 dB 带宽的关系图。

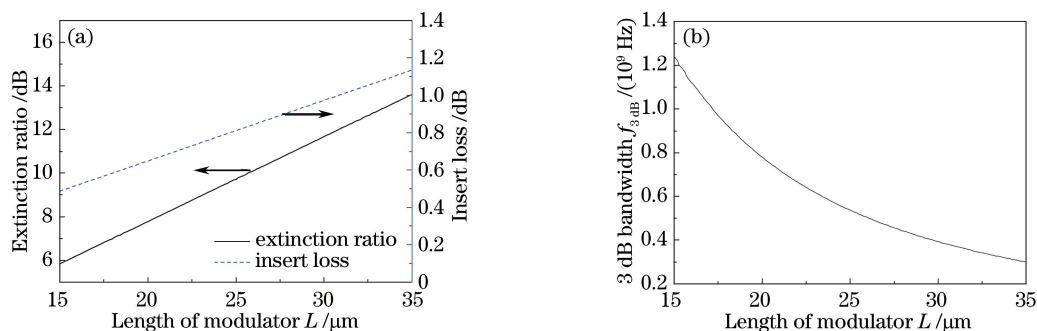


图 7 (a) 消光比和插入损耗随器件长度的变化;(b) 3 dB 带宽随器件长度的变化

Fig. 7 (a) Extinction ratio and insert loss as functions of modulator length; (b) 3 dB bandwidth as a function of modulator length

由图 7(a)和 7(b)可以发现器件消光比、插入损耗与器件长度成正比,3 dB 带宽与器件长度成反比,这是因为器件的有源区长度为微纳光纤的周长,器件长度 L 则与石墨烯电阻和电容面积有关。大的消光比有利于长距离传输信号,而大于 7 dB 的消光比已经满足一般光学器件需求^[25],消光比越大,器件长度越大,插入损耗和 3 dB 带宽越小。综合考虑消光比取 7 dB,此时,器件长度为 $18 \mu\text{m}$,3 dB 带宽达到 927 MHz,插入损耗为 0.58 dB。由(5)式外部调制电压与调制器化学势关系,可得外部调制电压与归一化光功率 P 的关系,如图 8 所示。

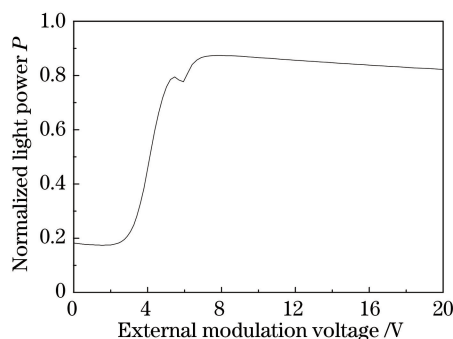


图 8 外部调制电压与归一化光功率的关系

Fig. 8 Normalized light power as a function of external modulation voltage

由(5)式可知“开”电压为 7.986 V,对应化学势为 0.58 eV,归一化光功率为 0.87;“关”电压为 1.605 V,对应化学势为 0.26 eV,归一化光功率为 0.17。由图 5(c)可知,随着石墨烯化学势的增加,光纤损耗呈先增大后减小的趋势,在 0.26 eV 处损耗最大,对应光功率最小值;而在 0.58 eV 处损耗最小,对应光功率最大值;同时在 0.5 eV(ENZ 点)处石墨烯微纳光纤出现一个小损耗峰。图 8 中曲线符合光功率先减小后增大的趋势,且在外电压 5.94 V(对应化学势为 0.5 eV)左右出现光功率微小变化,与光纤损耗变化吻合。

4 结 论

利用有限元分析法,将石墨烯的电调控特性与微纳光纤结构相结合,通过改变石墨烯的化学势、改变不同覆盖角度研究光纤的双折射特性,同时设计了石墨烯包裹微纳光纤的电吸收型调制器。数值分析发现,当双层石墨烯覆盖角度为 270° 时,双折射度最大,在 1550 nm 处可达到 1.23×10^{-3} ;基于双层石墨烯的电光调制器中微纳光纤直径为 $1 \mu\text{m}$,器件长度为 $18 \mu\text{m}$,消光比为 7 dB,3 dB 带宽可达到 927 MHz,插入损耗为 0.58 dB,与本课题组基于空芯光纤电光调制器的研究相比,减小了器件长度和插入损耗,并增加了器件的 3 dB 带宽,拓展了石墨烯在光纤上的应用。

参 考 文 献

- 1 Novoselov K S, Geim A K, Morozov S V, *et al.* Electric field effect in atomically thin carbon films[J]. Science, 2004,

- 306(5696): 666-669.
- 2 Geim A K. Graphene: status and prospects[J]. *Science*, 2009, 324(5934): 1530-1534.
 - 3 Wu H Q, Linghu C Y, Lü H M, *et al.* Graphene applications in electronic and optoelectronic devices and circuits[J]. *Chinese Physics B*, 2013, 22(9): 098106.
 - 4 Zhang H, Bao Q L, Tang D Y, *et al.* Large energy soliton erbium-doped fiber laser with a graphene-polymer composite mode locker[J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 95(14): 141103.
 - 5 Yang Guang, Lou Jiachang, Han Daming, *et al.* Passively Q-switched mode-locked thulium-doped fiber laser by using graphene saturable absorber on tapered fiber [J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(s1): s102014.
杨 光, 楼嘉昌, 韩达明, 等. 基于拉锥光纤石墨烯可饱和吸收体的被动调 Q 锁模掺铥光纤激光器[J]. *中国激光*, 2015, 42(s1): s102014.
 - 6 Bao Q L, Zhang H, Wang B, *et al.* Broadband graphene polarizer[J]. *Nature Photonics*, 2011, 5: 411-415.
 - 7 Liu M, Yin X B, Ulin-Avila E, *et al.* A graphene-based broadband optical modulator[J]. *Nature*, 2011, 474(7349): 64-67.
 - 8 Yang Hua, Cao Yang, He Junhui, *et al.* Research progress in graphene-based infrared photodetectors[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(11): 110003.
杨 花, 曹 阳, 贺军辉, 等. 石墨烯红外光电探测器研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(11): 110003.
 - 9 Yao B C, Wu Y, Wang Z G, *et al.* Demonstration of complex refractive index of graphene waveguide by microfiber-based Mach-Zehnder interferometer[J]. *Optics Express*, 2013, 21(24): 29818-29826.
 - 10 Li W, Chen B G, Meng C, *et al.* Ultrafast all-optical graphene modulator[J]. *Nano Letters*, 2014, 14(2): 955-959.
 - 11 Yao B C, Wu Y, Zhang A Q, *et al.* Graphene Bragg gratings on microfiber[J]. *Optics Express*, 2014, 22(20): 23829-23835.
 - 12 Gan X T, Zhao C Y, Wang Y D, *et al.* Graphene-assisted all-fiber phase shifter and switching[J]. *Optica*, 2015, 2(5): 468-471.
 - 13 He X Y, Liu Z B, Wang D N, *et al.* Saturable absorber based on graphene-covered-microfiber[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2013, 25(14): 1392-1394.
 - 14 Kou J L, Chen J H, Chen Y, *et al.* Platform for enhanced light-graphene interaction length and miniaturizing fiber stereo devices[J]. *Optica*, 2014, 1(5): 307-310.
 - 15 Chen J H, Zheng B C, Shao G H, *et al.* An all-optical modulator based on a stereo graphene-microfiber structure[J]. *Light: Science & Applications*, 2015, 4: e360.
 - 16 Hao R, Jin J M, Wei X C, *et al.* Recent developments in graphene-based optical modulators [J]. *Frontiers of Optoelectronics*, 2014, 7(3): 277-292.
 - 17 Bi Weihong, Wang Yuanyuan, Fu Guangwei, *et al.* Study on the electro-optic modulation properties of graphene-coated hollow optical fiber [J]. *Acta Physica Sinica*, 2016, 65(4): 047801.
毕卫红, 王圆圆, 付广伟, 等. 基于石墨烯涂覆空心光纤电光调制特性的研究[J]. *物理学报*, 2016, 65(4): 047801.
 - 18 Hanson G W. Dyadic Green's functions and guided surface waves for a surface conductivity model of graphene[J]. *Journal of Applied Physics*, 2008, 103(6): 064302.
 - 19 Tong L M, Lou J Y, Mazur E. Single-mode guiding properties of subwavelength-diameter silica and silicon wire waveguides[J]. *Optics Express*, 2004, 12(6): 1025-1035.
 - 20 Liang Ruibing. Investigation on theories and applications of high sensitive fiber optical sensing based on the evanescent field of micro/nanofiber [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2013: 12-13.
梁瑞冰. 基于微纳光纤倏逝场的高灵敏传感理论与应用研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2013: 12-13.
 - 21 Ahn G, Kim H R, Ko T Y, *et al.* Optical probing of electronic interaction between graphene and hexagonal boron nitride [J]. *ACS Nano*, 2013, 7(2): 1533-1541.
 - 22 Koester S J, Li M. High-speed waveguide coupled graphene-on-graphene optical modulators[J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 100(17): 171107.
 - 23 Fang T, Konar A, Xing H L, *et al.* Carrier statistics and quantum capacitance of graphene sheets and ribbons[J]. *Applied Physics Letters*, 2007, 91(9): 092109.
 - 24 Tang Linfeng. Graphene-based optical modulator basic research [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2014: 32-34.
唐琳峰. 石墨烯光调制器基础研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2014: 32-34.
 - 25 Reed G T, Mashanovich G, Gardes F Y, *et al.* Silicon optical modulators[J]. *Nature Photonics*, 2010, 4: 518-526.