

基于石墨烯涂覆空心光纤电光调制特性的研究

毕卫红 王圆圆 付广伟 王晓愚 李彩丽

Study on the electro-optic modulation properties of graphene-coated hollow optical fiber

Bi Wei-Hong Wang Yuan-Yuan Fu Guang-Wei Wang Xiao-Yu Li Cai-Li

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 047801 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.047801

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.047801>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I4>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

全新的电导率特征矩阵方法及其在石墨烯 THz 频率光学特性上的应用

A new characteristics matrix method based on conductivity and its application in the optical properties of graphene in THz frequency range

物理学报.2015, 64(5): 057801 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.057801>

层石墨烯位于 1800--2150  $\text{cm}^{-1}$  频率范围内的和频拉曼模

The second-order combination Raman modes of bilayer graphene in the range of 1800-2150  $\text{cm}^{-1}$

物理学报.2014, 63(14): 147802 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.147802>

光子晶体增强石墨烯 THz 吸收

Terahertz absorption of graphene enhanced by one-dimensional photonic crystal

物理学报.2014, 63(5): 057803 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.057803>

基于倏逝场耦合的石墨烯波导光传输相位特性仿真与实验研究

Simulation and experimental research of phase transmission features based on evanescent field coupled graphene waveguide

物理学报.2013, 62(23): 237805 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.237805>

掺杂石墨烯系统电场调控的非线性太赫兹光学特性研究

Electrically-controlled nonlinear terahertz optical properties of graphene

物理学报.2013, 62(23): 237804 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.237804>

# 基于石墨烯涂覆空心光纤电光调制特性的研究\*

毕卫红<sup>†</sup> 王圆圆 付广伟 王晓愚 李彩丽

(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, 秦皇岛 066004)

(2015年9月13日收到; 2015年12月4日收到修改稿)

设计了一种新型的石墨烯-空心光纤可调谐结构, 将石墨烯涂覆在空心光纤的空气孔内表面上, 利用有限元法研究了该结构的电光调制特性. 研究表明, 改变石墨烯的化学势既可以调控光纤的相位和开关特性, 还可以调谐光纤损耗峰与次峰的位置、强度和宽度. 然而, 改变空气孔半径和石墨烯层数不会改变开关点和损耗峰与次峰的位置, 只会改变损耗差和损耗峰的强度和宽度, 而且由  $N$  层石墨烯引起的损耗差是单层的  $N$  倍. 这是因为石墨烯的介电常数决定了光纤的有效折射率和损耗, 改变石墨烯的化学势可以改变石墨烯的介电常数, 而改变空气孔半径和石墨烯层数不会改变石墨烯的介电常数, 却改变了石墨烯和光的作用强度. 经过参数优化之后, 我们提出一种基于五层石墨烯涂覆空心光纤的电吸收型调制器, 工作在 1180—1760 nm 波段, 具有小尺寸 (5 mm × 125 μm)、宽光带宽 (580 nm)、高消光比 (16 dB)、高调制带宽 (64 MHz) 和低插入损耗 (1.23 dB) 特性. 研究结果对基于石墨烯的可调谐光纤光子器件的设计和应用提供了理论参考.

**关键词:** 石墨烯, 空心光纤, 化学势, 有限元法

**PACS:** 78.67.Wj, 42.81.Qb, 47.11.Fg

**DOI:** 10.7498/aps.65.047801

## 1 引言

目前, 光纤通信因其具有频带宽、容量大、损耗低等优点而迅速成为当今信息传输的主要形式, 其中光纤调制器通过外界能量来调控输出光波的强度、相位或偏振, 使光波能够运载各种大容量、高速率的信息, 从而成为现代光纤通信系统中的核心器件. 为了实现光纤内调制, 一些研究人员利用外界能量直接改变光纤的固有性质, 比如利用热极化技术使得光纤具有电光效应, 此时极化光纤本身就可作为相位调制器, 如果将其构造成 Sagnac 环, 就可以将相位调制转换为强度调制<sup>[1]</sup>, 但是极化光纤的电光系数非常低, 通常需要很长 (厘米级) 的光纤才能达到所要求的调制效率, 而且半波电压高, 调制带宽窄. 除此之外, 还可以将功能材料的物理效应 (热光、电光、磁光、声光效应) 与光纤结合起来, 利用外界能量改变功能材料的物理性质, 间接地影响

光纤的导光机理, 常用的功能材料有液晶<sup>[2]</sup>、电光聚合物<sup>[3]</sup>、磁流体<sup>[4,5]</sup>、压电陶瓷<sup>[6]</sup>等, 但是这些调制器调制效率低, 插入损耗大, 特殊结构的光纤不易制备, 限制了它的进一步应用.

石墨烯是碳原子以  $sp^2$  杂化轨道按蜂巢晶格排列构成的单原子层二维晶体, 是一种半金属薄膜材料, 厚度仅为 0.34 nm<sup>[7]</sup>. 因其独特的零带隙线性能带结构, 石墨烯具有优异的电学和光学特性, 包括高迁移率<sup>[8]</sup>、可调控的费米能级<sup>[9]</sup>、可饱和吸收性<sup>[10]</sup>、表面等离激元<sup>[11]</sup>等, 这些性质使得石墨烯在调制器<sup>[12-15]</sup>、偏振器<sup>[16,17]</sup>、激光器<sup>[18,19]</sup>等领域具有重要应用. 石墨烯不同于其他材料的独有性质就是可调控的费米能级, 当石墨烯与光纤结合时, 通过外加电压或化学掺杂调控石墨烯的费米能级, 就可以改变光纤的相位和透射率. 2012年, Bao和Loh<sup>[16]</sup>曾提出一种基于石墨烯的光纤偏振器的概念, 通过外加电场来改变偏振态输出. 2014年, Zhou等<sup>[13]</sup>提出一种基于石墨烯的光纤相位调

\* 国家自然科学基金 (批准号: 61575170, 61475133) 资助的课题.

<sup>†</sup> 通信作者. E-mail: whbi@ysu.edu.cn

制器, 理论分析了石墨烯的化学势对光纤相位的影响. 2015年, Lee等<sup>[19]</sup>首次制备出基于石墨烯的电可调光纤激光器, 实验测得光纤的透射率会随着对石墨烯外加电压的变化而变化. 然而上述研究所采用的光纤都是侧边抛磨光纤, 石墨烯与光纤的作用面积太小, 而Zhou等<sup>[13]</sup>提出的光纤结构参数特殊, 耦合损耗很大, 并且关于石墨烯对光纤损耗特性影响的分析还尚未见报道.

本文提出一种基于石墨烯的电吸收型光纤调制器, 将石墨烯涂覆在空心光纤 (graphene-coated hollow optical fiber, GHOF) 的空气孔内表面上, 研究了石墨烯的费米能级电可调特性对光纤传输特性的影响. 首先根据Kubo公式分析了石墨烯介电常数和化学势的关系; 其次利用有限元法对GHOF的模场分布进行仿真, 讨论了单层石墨烯对光纤模场、有效折射率和损耗的影响; 最后重点分析了光纤空气孔半径、石墨烯层数和石墨烯化学势对光纤损耗的影响, 并且计算了调制器的基本参数.

## 2 石墨烯的电光可调性

石墨烯因其锥形能带结构而同时存在带内跃迁和带间跃迁, 所以石墨烯的光电导由带内光电导  $\sigma_{\text{intra}}$  和带间光电导  $\sigma_{\text{inter}}$  构成. 根据Kubo公式<sup>[20]</sup>有

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

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

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

其中,  $\omega$  为入射波角频率,

$$f_D(\varepsilon) = \left[ e^{(\varepsilon - \mu_c)/(k_B T)} + 1 \right]^{-1},$$

$f_D(\varepsilon)$  为费米狄拉克分布,  $\mu_c$  为石墨烯化学势或费米能级,  $T$  为温度,  $\tau_1$  和  $\tau_2$  分别为带内、带间跃迁的弛豫时间. 石墨烯的化学势  $\mu_c$  由其电子/空穴载流子浓度  $n_s$  决定, 即

$$n_s = \frac{2}{\pi\hbar^2 v_F^2} \int_0^\infty \varepsilon (f_D(\varepsilon) - f_D(\varepsilon + 2\mu_c)) d\varepsilon, \quad (2)$$

其中  $v_F \approx 10^6$  m/s 为石墨烯的费米速率. 我们可以通过加电压、化学掺杂等方法改变石墨烯载流子浓度, 从而改变石墨烯的费米能级. 单层石墨烯的价带与导带相交于布里渊区的6个顶点, 即狄拉克点. 由于石墨烯电荷在狄拉克点附近处于低密度状态, 所以用较低的能量就可使其费米能级可调<sup>[21]</sup>. 石墨烯的介电常数为

$$\varepsilon_g = 1 + j \frac{\sigma_g}{\omega \varepsilon_0 \Delta}, \quad (3)$$

其中  $\Delta = 0.34$  nm 为单层石墨烯的厚度.

之后的计算中, 我们均采用  $T = 300$  K,  $\tau_1 = 10$  fs,  $\tau_2 = 1.2$  ps. 当  $\lambda = 1550$  nm 时石墨烯的介电常数  $\varepsilon_g$  与化学势  $\mu_c$  的关系如图1所示. 从图1可以看出, 随着化学势  $\mu_c$  的增加, 介电常数的实部  $\text{Re}(\varepsilon_g)$  先上升后下降, 并在  $\mu_c = hc/(2\lambda) = 0.4$  eV 处达到最大, 而介电常数的虚部  $\text{Im}(\varepsilon_g)$  一直为正数, 在  $0 < \mu_c < 0.3$  eV 时为常数, 之后在  $0.3$  eV  $< \mu_c < 0.5$  eV 时迅速下降, 最后趋近于0. 另外介电常数的绝对值  $|\varepsilon_g|$  在  $\mu_c = 0.5$  eV 时趋近于0, 即所谓的epsilon-near-zero点, 简称ENZ点<sup>[12]</sup>, 石墨烯将从此点开始由介质属性过渡到金属属性, 这是石墨烯不同于其他材料的独有属性.

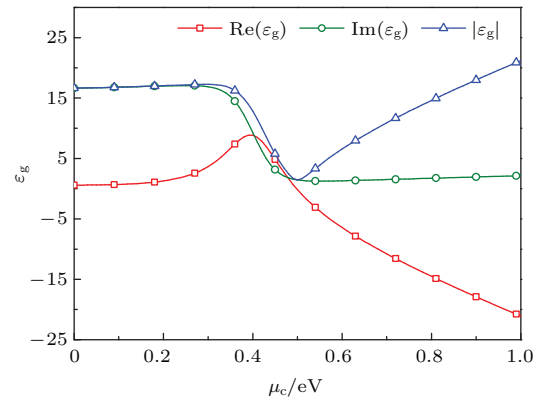


图1 (网刊彩色) 石墨烯介电常数在  $\lambda = 1550$  nm 时随化学势的变化

Fig. 1. (color online) Calculated dielectric constant of the graphene sheet (real part, imaginary part and magnitude) as a function of the chemical potential for  $\lambda = 1550$  nm.

## 3 GHOF 特性分析

本文提出的GHOF的端面结构如图2所示, 空心光纤 (hollow optical fiber, HOF) 包括三层结构, 内部是中央空气孔, 中间层是掺锆 (GeO<sub>2</sub> 玻璃) 纤芯环, 外部包层是二氧化硅 (SiO<sub>2</sub>), 石墨烯和六方

氮化硼 (hexagonal boron nitride, hBN) 依次涂覆在 HOF 的空气孔内表面上, 那么石墨烯与 hBN 就形成了简单的平板电容器模型. HOF 将光束主要引导在纤芯环中传播, 而一部分倏逝波会进入中央空气孔中传播<sup>[22]</sup>, 当石墨烯涂覆在空气孔内表面时, 进入空气孔的倏逝波可以与石墨烯相互作用, 通过改变石墨烯的化学势, 就可以改变 GHOF 的光学特性. 该光纤的空气孔半径  $a$ 、纤芯环外半径  $b$ 、包层半径  $c$  和 hBN 厚度  $d$  分别为  $1.8 \mu\text{m}$ 、 $4.1 \mu\text{m}$ 、 $62.5 \mu\text{m}$  和  $7 \text{nm}$ , 空气的折射率  $n_0$  为 1, hBN 的介电常数  $\epsilon_r$  为 3.92, 而掺锗纤芯环和包层的折射率  $n_1$  和  $n_2$  可用 Sellmeier 公式表示为

$$n^2 - 1 = \sum_{i=1}^3 \frac{[SA_i + X(GA_i - SA_i)] \lambda^2}{\lambda^2 - [Sl_i + X(Gl_i - Sl_i)]^2}, \quad (4)$$

其中,  $n$  为材料折射率;  $\lambda$  为真空中波长;  $SA$ ,  $Sl$ ,  $GA$ ,  $Gl$  分别为  $\text{SiO}_2$  和  $\text{GeO}_2$  的 Sellmeier 系数;  $X$  为  $\text{GeO}_2$  掺杂的摩尔百分比浓度, 本文中,  $X$  取  $10 \text{mol}\%$ .

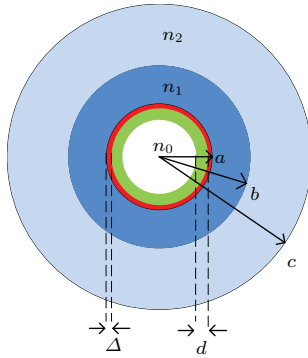


图2 (网刊彩色) GHOF 的端面结构图

Fig. 2. (color online) The cross-section of the proposed GHOF.

当  $\lambda = 1550 \text{nm}$  时, 利用有限元法对 GHOF 进行模式分析, 该结构在  $\mu_t = 0.5 \text{eV}$  时基模的模场分布如图 3(a) 所示, 图中黑色箭头表示电场方向, 越白的区域表明光强越强, 否则表示光强越弱. 由于石墨烯仅具有单原子层厚度, 不会明显改变波导的模场分布, 所以 GHOF 具有与 HOF 相似的模场分布. 图 3(b) 给出了涂覆石墨烯前后光纤电场模的径向分布, 其中插图是电场模在石墨烯处的局部放大图. 结果显示: GHOF 的电场模明显小于 HOF 的电场模, 这是因为石墨烯的  $\text{Im}(\epsilon_g)$  为正, 代表着欧姆损耗, 当电磁波在光纤中传播时, 石墨烯会吸收一部分光波能量; 另外电场模曲线在石墨烯处不再连续, 而是发生了跳变, 这

是由于此时石墨烯介电常数明显高于纤芯和空气的介电常数造成的. 图 3(c) 和图 3(d) 分别给出了 GHOF 有效折射率和损耗随化学势的变化. 损耗  $\alpha = 8.686(2\pi/\lambda) \text{Im}(n_{\text{eff}})$ , 与有效折射率的虚部  $\text{Im}(n_{\text{eff}})$  相关. 对比图 3(c) 与图 1, GHOF 有效折射率和石墨烯介电常数的曲线几乎一致, 只是  $\text{Im}(n_{\text{eff}})$  在 ENZ 点, 即  $\mu_c = \mu_t$  处有一个小起伏. 石墨烯中的光波能量占模场总能量之比为

$$f_g = \frac{\int_{\text{石墨烯}} (E_x H_y - E_y H_x) dx dy}{\int_{\text{光纤}} (E_x H_y - E_y H_x) dx dy}. \quad (5)$$

当石墨烯结合进波导中时, 有效折射率的实部和虚部与石墨烯的介电常数呈现一次线性关系, 而  $f_g$  的大小决定了有效折射率的变化量<sup>[14]</sup>, 所以整个混合波导的有效折射率和石墨烯介电常数随化学势的变化几乎一致. 根据图 3(c) 的插图可知, 石墨烯  $f_g$  在 ENZ 点附近剧烈变化, 所以会使得  $\text{Im}(n_{\text{eff}})$  在此处有一个小起伏, 对应的是图 3(d) 中的小损耗峰. 通过电压调控石墨烯的化学势, 首先可以改变 GHOF 有效折射率的实部  $\text{Re}(n_{\text{eff}})$ , 使光纤具有了电致折射效应. 当  $0.4 \text{eV} < \mu_c < 1 \text{eV}$  时,  $\text{Re}(n_{\text{eff}})$  与  $\mu_c$  呈线性关系, 而光纤相位  $\varphi = (2\pi/\lambda) \text{Re}(n_{\text{eff}}) L$  与  $\text{Re}(n_{\text{eff}})$  呈线性关系, 所以光纤相位  $\varphi$  与石墨烯化学势  $\mu_c$  呈线性关系, 即当  $0.4 \text{eV} < \mu_c < 1 \text{eV}$  时, 通过调控石墨烯的化学势  $\mu_c$  就可以线性调控光纤的相位. 其次可以改变 GHOF 有效折射率的虚部  $\text{Im}(n_{\text{eff}})$ , 使光纤具有了电致吸收效应, Lee 等<sup>[19]</sup> 实验测得侧边抛磨光纤的光透射率随着对石墨烯外加电压的增加 (对应着石墨烯化学势的减小) 而减小, 计算结果与其实验结果一致. GHOF 损耗图中  $0.26 \text{eV}$  和  $0.56 \text{eV}$  分别对应损耗的最大值和最小值, 即光路的“光关闭”和“光通路”, 说明通过调控石墨烯的化学势  $\mu_c$  就可以改变光纤的开关特性.

图 4(a) 和图 4(b) 分别给出了 GHOF 损耗在不同空气孔半径和石墨烯层数下随化学势的变化. 从图中可以看出, 空气孔半径  $a$  和石墨烯层数  $N$  不会改变 GHOF 的开关点位置, 只是影响损耗的幅度. 图 4(c) 给出了当石墨烯层数  $N = 1-5$  时 GHOF 损耗差  $\Delta\alpha = \alpha_{\text{max}} - \alpha_{\text{min}}$  与空气孔半径  $a$  的关系, 可知 GHOF 损耗差  $\Delta\alpha$  会随着空气孔半径的增加先增大后减小, 而且由  $N$  层石墨烯引起的损耗差  $\Delta\alpha$  是单层石墨烯的  $N$  倍.

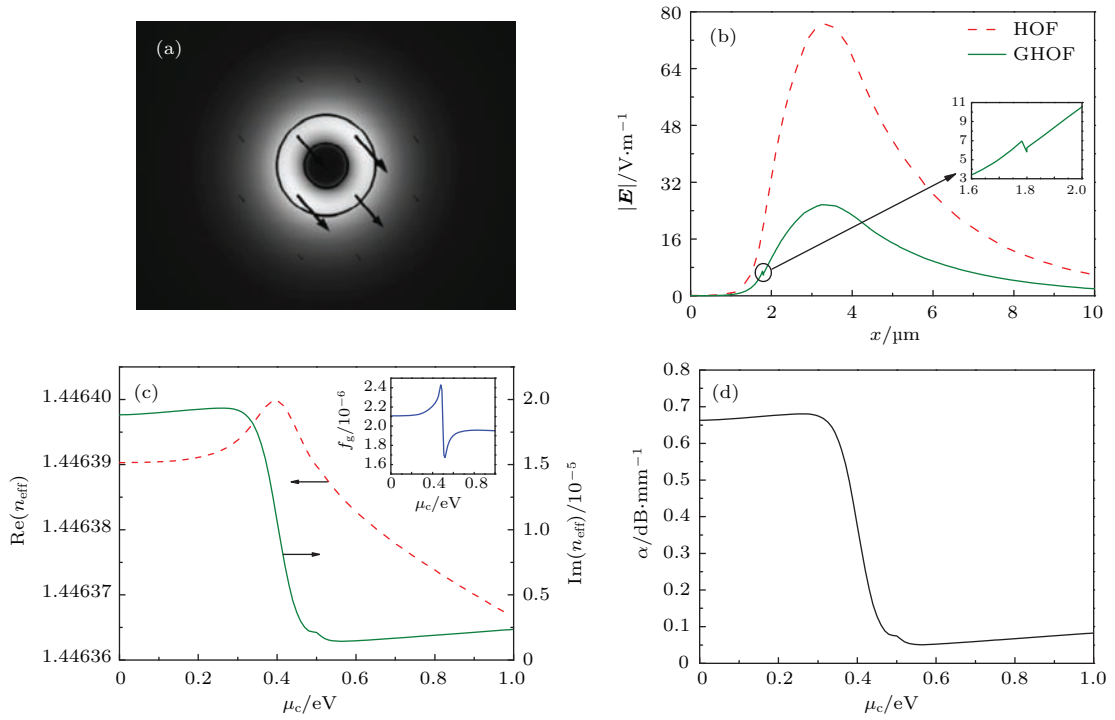


图3 (网刊彩色)(a) GHOF的基模模场; (b) HOF和GHOF的电场模分布; GHOF的(c)有效折射率和(d)损耗随化学势的变化

Fig. 3. (color online) (a) The electric field distributions of the fundamental mode for GHOF; (b) the amplitudes of the electric field comparison between the HOF and GHOF along the radial direction (inset shows a zoomed view near the graphene); (c) the effective refractive index and (d) loss of GHOF as a function of the chemical potential. The inset of panel (c) shows the power fraction of graphene as a function of the chemical potential.

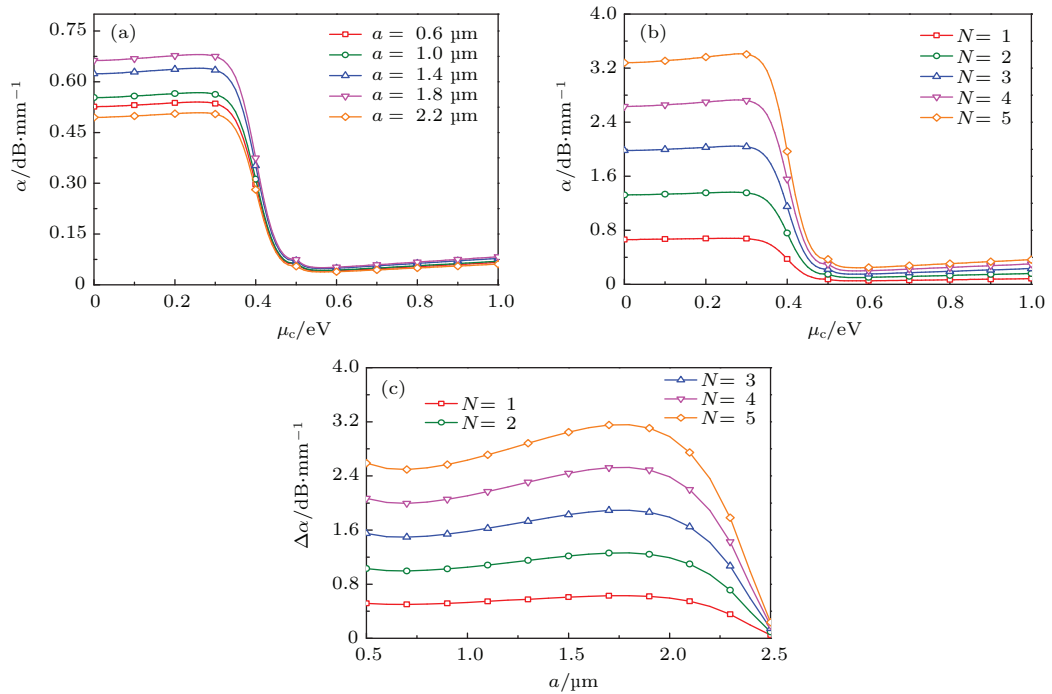


图4 (网刊彩色) GHOF损耗在不同(a)空气孔半径和(b)石墨烯层数下随化学势的变化; (c)不同石墨烯层数下GHOF损耗差随空气孔半径的变化

Fig. 4. (color online) The loss of GHOF as a function of the chemical potential for different (a) air-hole's radii and (b) layers of graphene; (c) the loss variation of GHOF as a function of the air-hole's radius for different layers of graphene.



之前的计算都是在波长  $\lambda = 1550 \text{ nm}$  条件下, 从(1)—(3)式中可以看出石墨烯的介电常数  $\epsilon_g$  与化学势  $\mu_c$ 、波长  $\lambda$  都相关, 说明石墨烯是具有色散效应的电光晶体. 为了分析石墨烯的化学势  $\mu_c$  对 GHOF 损耗谱的影响, 分别计算了不同化学势下石墨烯介电常数  $\epsilon_g$  和 GHOF 损耗  $\alpha$  与入射波波长  $\lambda$  的关系, 如图 5(a) 和图 5(b) 所示, 其中石墨烯层数  $N = 1$ . 图 5(a) 中, 当  $\mu_c = 1 \text{ eV}$  时, 随着波长的增加, 石墨烯介电常数的实部  $\text{Re}(\epsilon_g)$  先增加后减小, 并在  $\lambda = hc/(2\mu_c) = 0.62 \mu\text{m}$  处达到最大值, 而且在  $\lambda_t = 0.78 \mu\text{m}$  (ENZ 点) 处由正数变为负数, 同时石墨烯介电常数的虚部  $\text{Im}(\epsilon_g)$  最小. 随着化学势的减小, 石墨烯介电常数实部  $\text{Re}(\epsilon_g)$  的波峰、虚部  $\text{Im}(\epsilon_g)$  的波峰和波谷与  $\lambda_t$  均向较长波长处移动. 图 5(b) 中, GHOF 的损耗谱与石墨烯  $\text{Im}(\epsilon_g)$  曲线几乎相同, 损耗峰和次峰的位置分别与石墨烯  $\text{Im}(\epsilon_g)$  波峰和  $\lambda_t$  的位置重合. 随着石墨烯化学势的减小, 损耗峰和次峰向长波方向移动, 宽度变宽, 而且损耗峰强度逐渐变大, 次峰强度却逐渐变小直至消失. 因此适当地调节石墨烯的化学势, 可以有效地调控 GHOF 损耗峰的位置. 除了石墨烯

的化学势, GHOF 损耗谱还与空气孔半径和石墨烯层数有关, 如图 5(c) 和图 5(d) 所示, 其中石墨烯化学势为  $0.5 \text{ eV}$ . 这两幅图中五条曲线的变化趋势与石墨烯介电常数变化趋势是相同的, 只是幅度和宽度不同, 即空气孔半径  $a$  和石墨烯层数  $N$  不会改变 GHOF 损耗峰和次峰的位置.

文献 [17] 提出, 当石墨烯的层数  $N < 5$  时, 可以忽略石墨烯之间的耦合作用, 那么多层石墨烯就是多个单层石墨烯之间的叠加. 也就是说, 多层石墨烯的光电导为单层石墨烯的  $N$  倍, 同时厚度也是单层石墨烯的  $N$  倍, 根据 (3) 式可知, 单层石墨烯和多层石墨烯的介电常数是一样的. GHOF 的电光调制特性和损耗谱都是由石墨烯介电常数决定的, 但是只有化学势才能改变石墨烯的介电常数, 所以空气孔半径  $a$  和石墨烯层数  $N$  不会改变 GHOF 的开关点位置和损耗峰与次峰的位置. 然而空气孔半径  $a$  会对光纤光场的分布产生影响, 石墨烯层数  $N$  的增加也会使石墨烯与光场作用更强, 所以空气孔半径  $a$  和石墨烯层数  $N$  会影响 GHOF 的损耗差和损耗峰的强度与宽度.

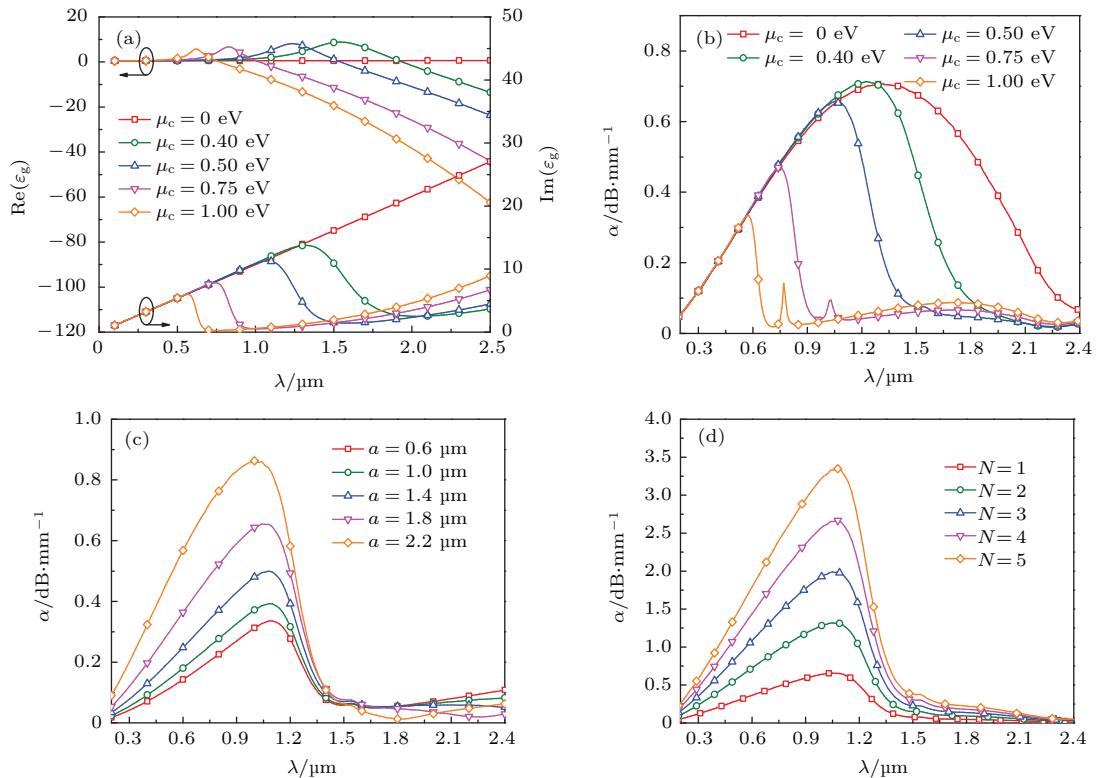


图 5 (网刊彩色) (a) 不同化学势下石墨烯介电常数随波长的变化; (b) 不同化学势、(c) 不同空气孔半径和 (d) 不同石墨烯层数下的损耗谱

Fig. 5. (color online) (a) The dielectric constant of the graphene sheet as a function of wavelength for different chemical potentials; the loss spectrum for different (b) chemical potentials, (c) air-hole's radii and (d) layers of graphene.

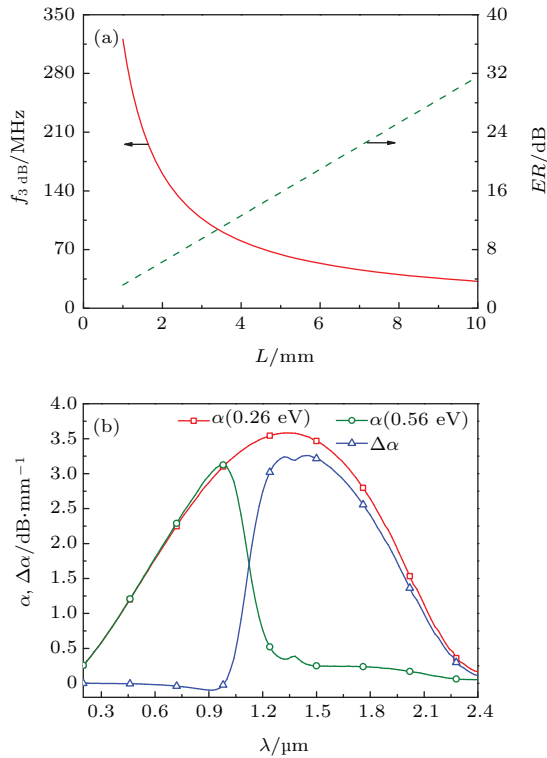


图6 (网刊彩色)(a) 3 dB 带宽和消光比随有源区长度的变化; (b)  $\mu_c = 0.26$  和  $0.56$  eV 时的损耗谱

Fig. 6. (color online) (a) The 3 dB modulation bandwidth and extinction ratio versus the length of the active region; (b) the loss spectrum at  $\mu_c = 0.26$  and  $0.56$  eV.

器件的 3 dB 带宽为  $f_{3\text{ dB}} = 1/(2\pi RC)$ , 其中  $R = R_C/(2\pi a)$ ,  $R_C$  是石墨烯-电极接触电阻, 其大小与电极和石墨烯的接触宽度有关, 本文中取  $100 \Omega \cdot \mu\text{m}$  [15]; 而电容  $C = \epsilon_0 \epsilon_r S/d$ ,  $\epsilon_r$  和  $d$  分别是 hBN 的相对介电常数和厚度,  $S = 2\pi a \cdot L$  是石墨烯的面积. 调制器的消光比  $ER = \Delta\alpha \cdot L$ , 上文中求得  $\Delta\alpha$  在  $a = 1.8 \mu\text{m}$ ,  $N = 5$  时达到最大值, 所以我们采用了空气孔半径为  $1.8 \mu\text{m}$ , 涂覆五层石墨烯的空心光纤调制器模型. 根据调制器的 3 dB 带宽  $f_{3\text{ dB}}$  和消光比  $ER$  的计算公式可知,  $f_{3\text{ dB}}$  和调制器有源区长度  $L$  呈反比, 而消光比  $ER$  和  $L$  呈正比, 也就是说 3 dB 带宽和消光比之间相互制约, 如图 6(a) 所示. 如果调制器的调制长度较长或较短, 都会影响器件的性能. 在光互联应用系统中, 带宽一般为几十 GHz, 而对于主动锁模光纤激光器而言, 几十 MHz 的调制带宽已经满足要求 [1]. 高消光比有利于长距离传输信号, 降低误码率和提高接收灵敏度, 通常大于 7 dB 的消光比对于一般的光系统就足够了 [23]. 权衡之下, 当器件有源区长度为 5 mm 时, 调制器的 3 dB 带宽为 64 MHz, 消光比为

16 dB, 插入损耗为  $L_i = \alpha_{\text{min}} L = 1.23$  dB.

传统电光调制器中材料的电光特性很差, 往往尺寸很大, 光带宽很窄 (一般为 20 nm) [23]. 石墨烯具有独立于波长的超高载流子迁移率, 这使得石墨烯光调制器能够成为一种具有超宽光带宽的新型光调制器. 图 6(b) 给出了当  $\mu_c = 0.26$ , 0.56 eV 时的损耗谱以及两者的损耗差. 若器件有源区长度为 5 mm, 当  $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$  时, 器件的消光比为 15.7 dB, 当  $\lambda = 1.18$  和  $1.76 \mu\text{m}$  时, 消光比为 12.7 dB, 所以 3 dB 光带宽为 580 nm, 从而大大拓宽了调制器的光带宽.

## 4 结 论

本文利用石墨烯的费米能级可调特性, 从理论上研究了石墨烯涂覆空心光纤的电光调制特性. 结果表明, 单原子层厚度的石墨烯几乎不影响光纤的模场分布, 但是石墨烯的高损耗特性会减小光纤的电场模强度. 石墨烯化学势可以线性调控光纤的相位和开关特性, 使得光纤具有电致折射和电致吸收效应, 而且当改变空气孔半径和石墨烯层数时, 会影响石墨烯与光场的作用强度, 所以石墨烯损耗与石墨烯化学势、空气孔半径、石墨烯层数有关. 石墨烯损耗差会随着空气孔半径的增大而先增大后减小, 也会随着石墨烯层数的增多而线性增加. 石墨烯损耗谱中损耗峰与次峰的位置仅由石墨烯化学势决定, 而其强度和宽度则由石墨烯化学势、空气孔半径、石墨烯层数共同决定. 最后我们提出了一种基于五层石墨烯涂覆空心光纤的电吸收型调制器, 当器件有源区长度为 5 mm 时, 调制器的 3 dB 带宽为 64 MHz, 消光比为 16 dB, 插入损耗为 1.23 dB, 工作波段为 1180—1760 nm.

## 参考文献

- [1] Malmström M, Margulis W, Tarasenko O, Pasiskevicius V, Laurell F 2012 *Opt. Express* **20** 2905
- [2] Wang J L, Du M Q, Zhang L L, Liu Y J, Sun W M 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 120702 (in Chinese) [王家璐, 杜木清, 张伶俐, 刘永军, 孙伟民 2015 物理学报 **64** 120702]
- [3] Wang L M, Monte T D 2008 *Opt. Lett.* **33** 1078
- [4] Yang X H, Liu Y X, Tian F J, Yuan L B, Liu Z H, Luo S Z, Zhao E M 2012 *Opt. Lett.* **37** 2115
- [5] Chen Y F, Han Q, Liu T G 2015 *Chin. Phys. B* **24** 014214

- [6] Liu C, Pei L, Wu L Y, Wang Y Q, Weng S J, Yu S W 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 174207 (in Chinese) [刘超, 裴丽, 吴良英, 王一群, 翁思俊, 余少伟 2015 物理学报 **64** 174207]
- [7] Geim A K, Novoselov K S 2007 *Nat. Mater.* **6** 183
- [8] Novoselov K S, Geim A K, Morozov S V, Jiang D, Zhang Y, Dubonos S V, Grigorieva I V, Firsov A A 2004 *Science* **306** 666
- [9] Vakil A, Engheta N 2011 *Science* **332** 1291
- [10] Obraztsov P A, Rybin M G, Tyurnina A V, Garnov S V, Obraztsova E D, Obraztsov A N, Svirko Y P 2011 *Nano Lett.* **11** 1540
- [11] Jablan M, Buljan H, Soljacic M 2009 *Phys. Rev. B* **80** 245435
- [12] Lu Z L, Zhao W S 2012 *J. Opt. Soc. Am. B* **29** 1490
- [13] Zhou F, Hao R, Jin X F, Zhang X M, Li E P 2014 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **26** 1867
- [14] Hao R, Du W, Chen H S, Jin X F, Yang L Z, Li E P 2013 *Appl. Phys. Lett.* **103** 061116
- [15] Soriano V, Midrio M, Romagnoli M 2015 *Opt. Express* **23** 6478
- [16] Bao Q L, Loh K P 2012 *ACS Nano* **6** 3677
- [17] Bao Q L, Zhang H, Wang B, Ni Z H, Lim C H Y X, Wang Y, Tang D Y, Loh K P 2011 *Nat. Photon.* **5** 411
- [18] Feng D J, Huang W Y, Jiang S Z, Ji W, Jia D F 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 054202 (in Chinese) [冯德军, 黄文育, 姜守振, 季伟, 贾东方 2013 物理学报 **62** 054202]
- [19] Lee E J, Choi S Y, Jeong H, Park N H, Yim W, Kim M H, Park J K, Son S, Bae S, Kim S J, Lee K, Ahn Y H, Ahn K J, Hong B H, Park J Y, Rotermund F, Yeom D I 2015 *Nat. Commun.* **6** 6851
- [20] Gusynin V P, Sharapov S G, Carbotte J P 2007 *J. Phys.: Condens. Matter* **19** 026222
- [21] Capmany J, Domenech D, Muñoz P 2014 *Opt. Express* **22** 5283
- [22] Lee S, Park J, Jeong Y, Jung H, Oh K 2009 *J. Lightwave Technol.* **27** 4919
- [23] Reed G T, Mashanovich G, Gardes F Y, Thomson D J 2010 *Nat. Photon.* **4** 518



# Study on the electro-optic modulation properties of graphene-coated hollow optical fiber\*

Bi Wei-Hong<sup>†</sup> Wang Yuan-Yuan Fu Guang-Wei Wang Xiao-Yu Li Cai-Li

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

( Received 13 September 2015; revised manuscript received 4 December 2015 )

## Abstract

Active manipulation of light in optical fibers has been extensively studied with great interest because of the structure simplicity, small footprint, low insertion loss and the compatibility with diverse fiber-optic systems. While graphene can be seen to exhibit a strong electro-optic effect originating from its gapless Dirac-fermionic band structure, there is no report on the electro-absorption properties of all-fiber graphene devices. Here a novel tunable graphene-based hollow optical fiber structure is designed with graphene coated on the inner wall of the fiber central core. Evanescent field of the guided mode propagating in the hollow optical fiber interacts with a monolayer or stacked multilayer graphene, which could modulate the intensity of the propagating mode via altering the chemical potential of the graphene by an external electric field. A full vector finite element method is adopted to analyse the influences of the chemical potential, the air-hole's radius and layers of graphene on the electro-optic modulation properties of the structure. Numerical simulation results show that by adjusting the chemical potential of graphene, the phase and on-off features of the fiber can be tuned correspondingly, as well as the position, magnitude and width of the loss peak and the sub-peak. However, the air-hole's radius and layers of graphene will only affect the loss variation, the magnitude and width of the loss peak and the sub-peak, but have no influence on the on-off point and the position of the loss peak and the sub-peak. In addition, the loss variation caused by  $N$ -layer graphene is  $N$  times that of the monolayer graphene. Since it is the dielectric constant of graphene that determines the effective refractive index and the loss of the fiber, the dielectric constant is only related to its chemical potential while independent of the air-hole's radius and the layers of graphene. Finally, an optimal electro-absorptive modulator based on the penta-layer graphene-coated hollow optical fiber is proposed for its advantage of ultra-compact footprint ( $5\text{ mm} \times 125\text{ }\mu\text{m}$ ), ultrawide optical bandwidth (580 nm), high extinction ratio (16 dB), high modulation bandwidth (64 MHz) and low insertion loss (1.23 dB), as well as a broad operational spectrum that ranges from 1180 to 1760 nm. Our results can provide theoretical references for the design and application of graphene-based tunable photonic fiber devices.

**Keywords:** graphene, hollow optical fiber, chemical potential, finite element method

**PACS:** 78.67.Wj, 42.81.Qb, 47.11.Fg

**DOI:** 10.7498/aps.65.047801

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61575170, 61475133).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [whbi@ysu.edu.cn](mailto:whbi@ysu.edu.cn)