

# 光学学报

## 涂覆石墨烯的混合型电介质纳米并行线波导的模式特性分析

李宁<sup>1</sup>, 薛文瑞<sup>1\*</sup>, 董慧莹<sup>1</sup>, 李慧慧<sup>1</sup>, 李昌勇<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>山西大学物理电子工程学院, 山西太原 030006;

<sup>2</sup>量子光学与光量子器件国家重点实验室, 山西大学激光光谱研究所, 山西太原 030006;

<sup>3</sup>极端光学协同创新中心, 山西大学物理电子工程学院, 山西太原 030006

**摘要** 设计了一种涂覆石墨烯的混合型电介质纳米并行线波导。这种波导由两根圆柱形和一根椭圆柱形电介质纳米并行线组成。利用有限元方法对 5 个最低阶模式进行了分类, 研究了工作波长、石墨烯的费米能和结构参数对 5 个最低阶模式的有效折射率实部、传播长度和品质因数的影响。结果表明: 5 个最低阶模式均可由圆柱形纳米线和椭圆柱形纳米线的低阶模合成。当调节工作波长和石墨烯的费米能时, 5 个模式的传输特性均可得到有效的调节。当结构参数变化时, 前两个模式的传输特性变化比较显著, 而其他三个模式的传输特性变化不明显。将所设计结构与由两根椭圆柱形和一根圆柱形电介质纳米并行线构成的波导相比较, 发现所设计的结构具有更长的传播长度和更高的品质因数。该研究为涂覆石墨烯的混合型电介质纳米并行线波导的设计、制作和应用提供了参考。

**关键词** 表面光学; 石墨烯; 纳米线; 波导; 表面等离子激元; 有限元方法

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.1324001

## Analysis of Mode Characteristics of Hybrid Dielectric Nano-Parallel Wires Based Waveguide Coated with Graphene

Li Ning<sup>1</sup>, Xue Wenrui<sup>1\*</sup>, Dong Huiying<sup>1</sup>, Li Huihui<sup>1</sup>, Li Changyong<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>School of Physics and Electronic Engineering, Shanxi University, Taiyuan 030006, Shanxi, China;

<sup>2</sup>State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices, Institute of Laser-Spectroscopy, Shanxi University, Taiyuan 030006, Shanxi, China;

<sup>3</sup>Collaborative Innovation Center of Extreme Optics, College of Physics and Electronic Engineering, Shanxi University, Taiyuan 030006, Shanxi, China

**Abstract** In this paper, a graphene-coated hybrid dielectric nano-parallel wire waveguide is designed. This waveguide consists of two cylindrical and one elliptical cylindrical dielectric nano-parallel wires. The five lowest-order modes are classified, the effects of working wavelength, Fermi energy of graphene, and structural parameters on the real part of effective refractive index, propagation length, and quality factor of the five lowest-order modes are investigated by the finite element method. The results show that the five lowest-order modes can be synthesized from the low-order modes of cylindrical nanowires and elliptical cylindrical nanowires. The transmission characteristics of the five modes can be effectively adjusted when the operating wavelength and Fermi energy of the graphene are adjusted. When the structural parameters are changed, the transmission characteristics of the first two modes change significantly, while the transmission characteristics of the other three modes do not change significantly. Compared with a waveguide composed of two elliptical cylinders and a cylindrical dielectric nano-parallel wire, the waveguide structure designed in this paper has a longer propagation length and a higher figure of merit. The theoretical research in this work is helpful to the design, fabrication, and application of graphene coated hybrid dielectric nano-parallel wire waveguides.

**Key words** optics at surfaces; graphene; nanowire; waveguide; surface plasmon; finite element method

收稿日期: 2021-10-15; 修回日期: 2021-11-18; 录用日期: 2021-12-30

基金项目: 国家自然科学基金(61378039, 61575115)、国家基础科学人才培养基金(J1103210)

通信作者: \*wxue@sxu.edu.cn

## 1 引言

表面等离子激元(SPPs)是入射光与金属表面自由振荡的电子耦合产生的一种表面电磁波<sup>[1]</sup>。SPPs可以将入射光的能量局域在金属与电介质表面,因此有较好的场增强能力和约束能力。利用这个性质可以引导电磁波在表面等离子激元波导(SPWs)中进行传输<sup>[2]</sup>。考虑到在金属表面激发的SPPs具有较高的欧姆损耗<sup>[3]</sup>、金属波导在制作成型后的可调参数较少这些缺点,需要寻找性能更好的可传导表面等离子激元的材料。

石墨烯独特的二维单原子层晶体结构促使其具有优异的光学与电学特性<sup>[4-5]</sup>,进而其在表面增强的红外吸收、分子指纹传感和分子痕量传感等领域<sup>[6-7]</sup>中具有广泛的应用前景。在中红外和太赫兹波段,石墨烯表现出类金属性质<sup>[8-9]</sup>,其表面可传播SPPs。相比金属材料,石墨烯作为传播SPPs的载体,具有电导率灵活可调、传输损耗小和传播长度长的优势,因此研究石墨烯表面SPPs的传输具有重要意义。

近年来,基于涂覆石墨烯材料的波导是一个研究热点<sup>[10-23]</sup>。有研究表明,涂覆单层石墨烯的圆柱形电介质波导具有更高的模式折射率和更强的模式限制<sup>[10-11]</sup>。相比圆柱形结构,涂覆单层石墨烯的椭圆柱形电介质波导可调参数多,传输性能好<sup>[12]</sup>。涂覆单层石墨烯的对称圆柱形电介质波导有较大的梯度力,狭缝区域的场增强较强<sup>[13-14]</sup>。涂覆单层石墨烯的对称楔形电介质波导的归一化模式面积较小<sup>[15]</sup>。涂覆石墨烯的非对称圆柱形电介质波导的模式特性灵活可调<sup>[17]</sup>。涂覆石墨烯的非对称椭圆柱形电介质波导的传输性能较优<sup>[19]</sup>。中间有电介质隔板的涂覆石墨烯的对称椭圆柱形电介质波导具有较小的归一化模式面积和较大的品质因数<sup>[21]</sup>。中间有电介质隔板的涂覆石墨烯的对称楔形电介质波导的场增强效应较好<sup>[23]</sup>。上述波导一般是由1~2根圆柱形或者椭圆柱形的电介质纳米线构成,存在的缺点是可调节的结构参数相对较少。

为增加波导结构的可调节参数,进一步增大传播长度和品质因数,本文设计了一种由涂覆单层石墨烯的两根圆柱形与一根椭圆柱形电介质并行纳米线构成的混合波导。通过有限元方法研究了这种波导的有效折射率实部、传播长度和品质因数与工作波长、石墨烯费米能和结构参数间的依赖关系。这种波导有望在空分复用<sup>[24]</sup>、生物传感器<sup>[25]</sup>、微纳光子集成<sup>[26]</sup>、分子传感<sup>[27]</sup>和可控量子器件<sup>[28]</sup>等领域中得到应用。

## 2 结构模型和计算方法

本文所设计的波导的横截面如图1所示,它是由三根涂覆石墨烯的电介质纳米并行线构成。其中,左右两边为对称分布的两根圆柱形纳米线,中间为一根椭圆柱形纳米线,背景为空气。将左右两根圆柱形纳米线分别标记为1号和2号纳米线,中间的椭圆柱形纳米线标记为3号纳米线。假设1号和2号纳米线的中

心位于 $x$ 轴上,坐标分别为 $(-c,0)$ 和 $(c,0)$ ,半径均为 $\rho_0$ 。3号纳米线的中心位于 $y$ 轴上,坐标为 $(0,h)$ ,长轴半径为 $a$ ,短轴半径为 $b$ 。

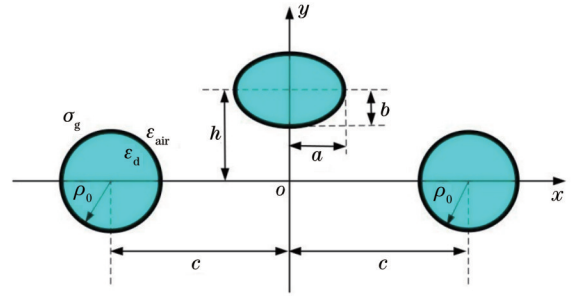


图1 涂覆石墨烯的混合型电介质纳米线波导的横截面示意图  
Fig. 1 Schematic diagram of cross-section of hybrid dielectric nanowire waveguide coated with graphene

三根电介质纳米线的介电常数为 $\epsilon_d$ ,空气的介电常数为 $\epsilon_{\text{air}}$ 。石墨烯的表面电导率 $\sigma_g$ 可以由Kubo公式 $\sigma_g = \sigma_{\text{intra}} + \sigma_{\text{inter}}$ 得到<sup>[29]</sup>。其中, $\sigma_{\text{intra}}$ 为带内电导率, $\sigma_{\text{inter}}$ 为带间电导率,它们的表达式分别为

$$\sigma_{\text{intra}} = \frac{2ie^2 k_b T}{\hbar^2 \pi (\omega + i\Gamma)} \ln \left[ 2 \cosh \left( \frac{E_f}{2k_b T} \right) \right], \quad (1)$$

$$\sigma_{\text{inter}} = \frac{e^2}{4\hbar} \left[ \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \arctan \left( \frac{\hbar\omega - 2E_f}{2k_b T} \right) - \frac{i}{2\pi} \ln \frac{(\hbar\omega + 2E_f)^2}{(\hbar\omega - 2E_f)^2 + (2k_b T)^2} \right], \quad (2)$$

式中: $e$ 为电子电量; $k_b$ 为玻尔兹曼常数; $T=300\text{ K}$ 为环境温度; $\hbar$ 为约化普朗克常量; $\omega=2\pi f$ 为角频率; $\Gamma=2 \times 10^{12} \text{ rad/s}$ 为载流子散射率; $E_f$ 为石墨烯的费米能。本文所设计的波导可以通过包裹-切割法<sup>[30]</sup>或者化学气相沉积法制备<sup>[31]</sup>。

本文采用有限元方法,利用Comsol软件对所设计的波导进行仿真。通过仿真可得到5个最低阶模式的场分布和有效折射率的实部和虚部。通过进一步的计算,可以得到表征模式特性的两个参数,即传播长度 $L_{\text{prop}}$ 和品质因数(FOM,其值可用 $Q_{\text{FOM}}$ 表示),二者的具体计算公式<sup>[32-33]</sup>为

$$L_{\text{prop}} = \lambda / [4\pi \text{Im}(n_{\text{eff}})], \quad (3)$$

$$Q_{\text{FOM}} = \text{Re}(n_{\text{eff}}) / \text{Im}(n_{\text{eff}}), \quad (4)$$

式中: $\text{Re}(\cdot)$ 和 $\text{Im}(\cdot)$ 分别代表实部和虚部; $\lambda$ 为工作波长。

## 3 结果与讨论

### 3.1 模式的分类

图2给出了在 $\lambda=7\ \mu\text{m}$ 、 $E_f=0.5\ \text{eV}$ 、 $\rho_0=100\ \text{nm}$ 、 $a=80\ \text{nm}$ 、 $b=70\ \text{nm}$ 、 $c=230\ \text{nm}$ 和 $h=30\ \text{nm}$ 的条件下,5个最低阶模式的合成图和场分布图,其中图2(a)~(e)是5个最低阶模式的模式合成

图 2(f)~(j)是 5 个最低阶模式的  $z$  方向的电场分量 ( $E_z$ ) 分布图, 图 2(k)~(o)是 5 个最低阶模式的电场强度 ( $|E|$ ) 分布图。模式 1 是由圆柱形纳米线与椭圆柱形纳米线的 0 阶模合成。模式 2 是由圆柱形纳米线的 0

阶模和椭圆柱形纳米线的 1 阶模合成。模式 3 是由圆柱形纳米线的 1 阶模与椭圆柱形纳米线的 0 阶模合成。模式 4 与模式 5 是由圆柱形纳米线和椭圆柱形纳米线的 1 阶模合成。

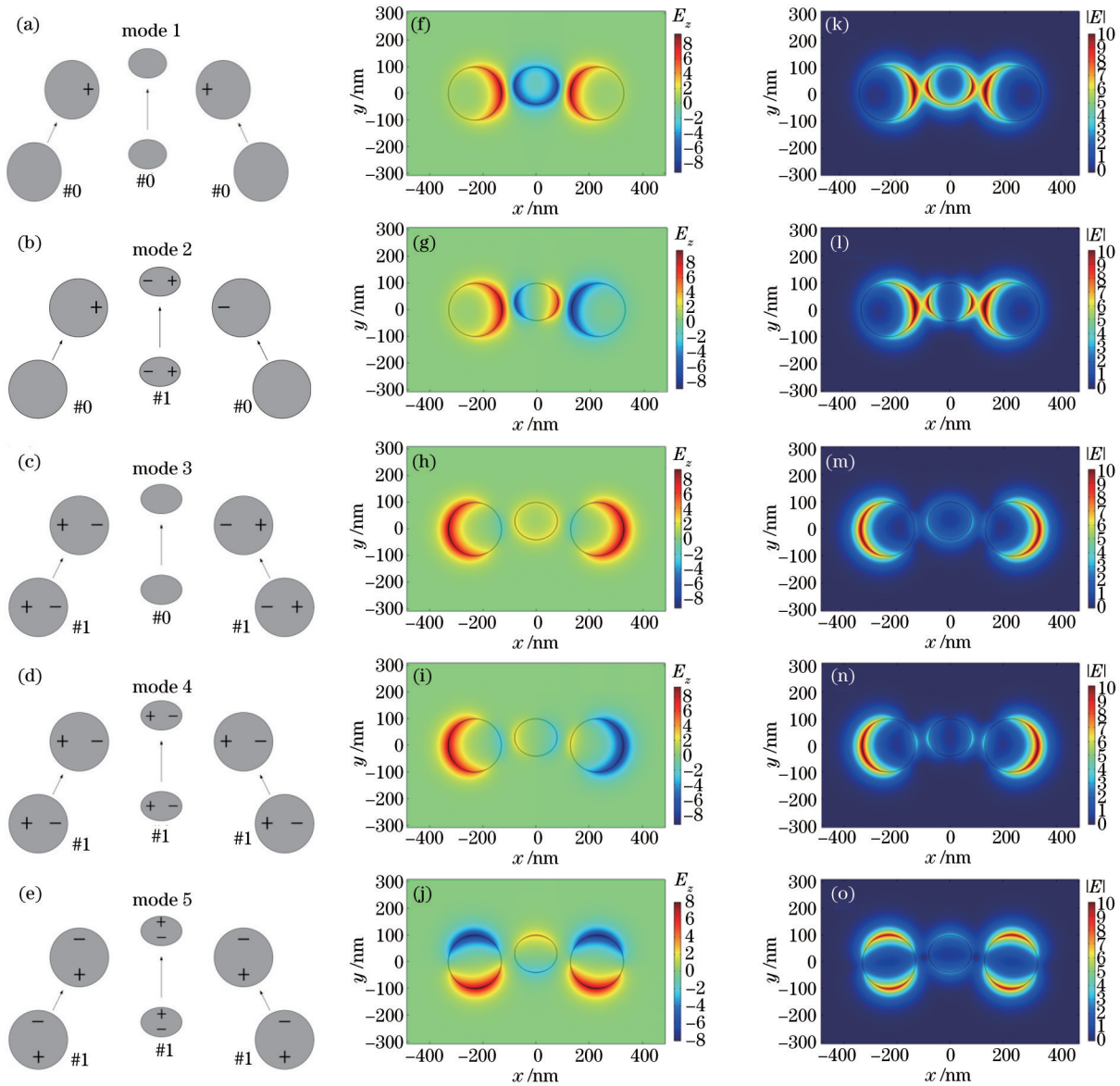


图 2 5 个最低阶模式的合成、电场  $z$  分量和电场强度分布图。(a)~(e) 5 个最低阶模式的合成; (f)~(j) 电场  $z$  分量; (k)~(o) 电场强度分布图

Fig. 2 Synthesis, electric field  $z$  component, and electric field intensity distributions of five lowest-order modes; (f)-(j) electric field  $z$  component; (k)-(o) electric field intensity distributions

### 3.2 工作波长 $\lambda$ 对传输特性的影响

研究工作波长对传输特性的影响。从图 3(a)~(c)可以得出, 在  $E_f = 0.5 \text{ eV}$ 、 $\rho_0 = 100 \text{ nm}$ 、 $a = 80 \text{ nm}$ 、 $b = 70 \text{ nm}$ 、 $c = 230 \text{ nm}$  和  $h = 30 \text{ nm}$  条件下, 随着波长从  $6.2 \mu\text{m}$  增长到  $7.8 \mu\text{m}$ , 5 个最低阶模式的有效折射率实部单调减小, 传播长度单调增加。模式 1 与模式 2 的品质因数单调增大, 模式 3~5 的品质因数单调减小并出现交叉现象。这些模式特性的变化可以通过场分布解释。以模式 1 为例, 图 3(d)~(f) 给出了波长为

$6.2 \mu\text{m}$ 、 $7.0 \mu\text{m}$  和  $7.8 \mu\text{m}$  时的场分布图, 当波长为  $6.2 \mu\text{m}$  时, 场主要分布在圆柱形与椭圆柱形纳米线的表面, 而在纳米线之间的间隙内分布得较少。当波长为  $7.0 \mu\text{m}$  时, 场开始扩散到纳米线之间的间隙内。当波长为  $7.8 \mu\text{m}$  时, 场在纳米线之间的间隙内分布得更多。在波长增加的过程中, 场分布从纳米线表面转移到纳米线之间, 场与石墨烯的作用减弱, 使得损耗减小, 波导的传播长度增加, 品质因数增加。

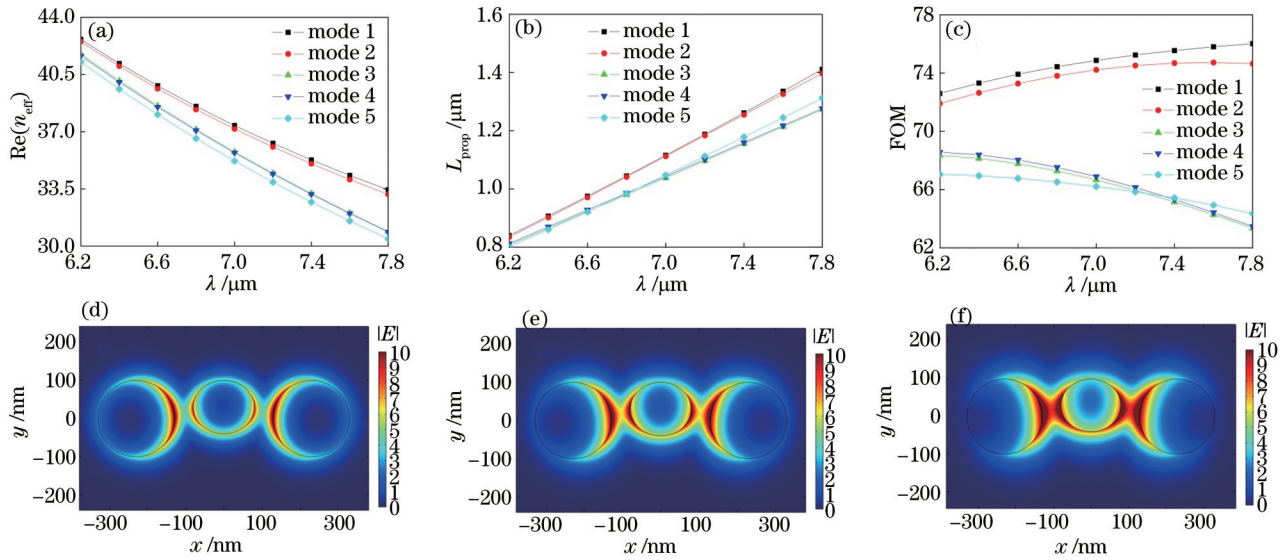


图 3 5 个最低阶模式的有效折射率实部  $\text{Re}(n_{\text{eff}})$ 、传播长度  $L_{\text{prop}}$ 、品质因数 FOM 随工作波长  $\lambda$  的变化, 以及模式 1 在波长为  $6.2 \mu\text{m}$ 、 $7.0 \mu\text{m}$  和  $7.8 \mu\text{m}$  情况下的电场强度分布图。(a) 有效折射率实部  $\text{Re}(n_{\text{eff}})$ ; (b) 传播长度  $L_{\text{prop}}$ ; (c) 品质因数 FOM; 波长为 (d)  $6.2 \mu\text{m}$ 、(e)  $7.0 \mu\text{m}$  和 (f)  $7.8 \mu\text{m}$  情况下的电场强度分布图

Fig. 3 Real part of effective refractive index  $\text{Re}(n_{\text{eff}})$ , propagation length, and figure of merit FOM of five lowest-order modes varying with operating wavelength  $\lambda$ , and electric field intensity distributions at wavelengths of  $6.2$ ,  $7.0$ , and  $7.8 \mu\text{m}$ . (a) Real part of effective refractive index  $\text{Re}(n_{\text{eff}})$ ; (b) propagation length; (c) figure of merit FOM; electric field intensity distributions at wavelengths of (d)  $6.2 \mu\text{m}$ , (e)  $7.0 \mu\text{m}$ , and (f)  $7.8 \mu\text{m}$

### 3.3 费米能 $E_f$ 对传输特性的影响

研究费米能对传输性能的影响。在  $\lambda = 7 \mu\text{m}$ 、 $\rho_0 = 100 \text{ nm}$ 、 $a = 80 \text{ nm}$ 、 $b = 70 \text{ nm}$ 、 $c = 230 \text{ nm}$  和  $h = 30 \text{ nm}$  的条件下, 费米能增大对模式特性的影响如图 4 所示。从图 4(a)~(c) 可以看出, 随着费米能的增大, 5 个低阶模式的有效折射率实部单调减小, 传播长度单调增大, 品质因数单调增加。模式特性的变化可通过场分布的变化来解释。以模式 1 为例, 图 4(d)~(f) 是费米能为  $0.42 \text{ eV}$ 、 $0.50 \text{ eV}$  和  $0.58 \text{ eV}$  时的电场强度分布图, 随着费米能的增大, 场逐步从纳米线的表面向纳米线之间的间隙处转移, 场与石墨烯之间的相互作用减小, 传输损耗减小, 传播长度增加, 品质因数增加。

### 3.4 半径 $\rho_0$ 对传输特性的影响

研究圆柱纳米线半径改变对传输特性的影响。在  $\lambda = 7 \mu\text{m}$ 、 $E_f = 0.5 \text{ eV}$ 、 $a = 80 \text{ nm}$ 、 $b = 70 \text{ nm}$ 、 $c = 230 \text{ nm}$  和  $h = 30 \text{ nm}$  的条件下, 从图 5(a)~(c) 可以看出, 5 个低阶模式的有效折射率实部  $\text{Re}(n_{\text{eff}})$  与品质因数 FOM 随圆柱形纳米线半径  $\rho_0$  的增加而单调增加, 模式 1~5 的传播长度  $L_{\text{prop}}$  随纳米线半径增加的变化各不相同。通过场分布可以解释这些现象。图 5(d)~(f) 为圆柱半径为  $84 \text{ nm}$ 、 $100 \text{ nm}$  和  $116 \text{ nm}$  时, 模式 1 的电场强度分布图。对于模式 1 来说, 在圆柱纳米线半径增加的过程中, 电场集中在纳米线表面与纳米线间的空隙内, 场逐渐增强, 波导对场的约束能力增强, 有效折射率的实部增大。然而, 场在石墨烯表面的分布面积缩小, 石墨烯与电场之间的耦合作用变小, 传输损耗减小导致传播长度与品质因数同时增大。

### 3.5 半长轴 $a$ 对传输特性的影响

研究椭圆半长轴长度对传输特性的影响。在  $\lambda = 7 \mu\text{m}$ 、 $E_f = 0.5 \text{ eV}$ 、 $\rho_0 = 100 \text{ nm}$ 、 $b = 70 \text{ nm}$ 、 $c = 230 \text{ nm}$  和  $h = 30 \text{ nm}$  条件下, 从图 6(a)~(c) 得出, 随着椭圆半长轴的增大, 模式 1~5 的有效折射率实部  $\text{Re}(n_{\text{eff}})$  单调增大, 其中模式 3~5 的有效折射率实部缓慢增加。模式 1、模式 2 与模式 5 的传播长度  $L_{\text{prop}}$  和品质因数 FOM 单调增大, 模式 3 与模式 4 的传播长度和品质因数单调减小。以模式 1 为例, 图 6(d)~(f) 给出了半长轴分别为  $74 \text{ nm}$ 、 $82 \text{ nm}$  和  $90 \text{ nm}$  时的场分布情况。随着椭圆半长轴的增加, 电场从纳米线表面逐渐向纳米线之间的间隙转移, 场与石墨烯之间的相互作用减小, 损耗减小, 传播长度与品质因数得到改善。

### 3.6 半短轴 $b$ 对传输特性的影响

研究椭圆纳米线半短轴长度对模式传输特性的影响。在  $\lambda = 7 \mu\text{m}$ 、 $E_f = 0.5 \text{ eV}$ 、 $\rho_0 = 100 \text{ nm}$ 、 $a = 80 \text{ nm}$ 、 $c = 230 \text{ nm}$  和  $h = 30 \text{ nm}$  的条件下, 从图 7(a)~(c) 可以看到, 模式 1 与模式 2 的有效折射率实部  $\text{Re}(n_{\text{eff}})$ 、传播长度  $L_{\text{prop}}$  与品质因数 FOM 随着椭圆半短轴的增大而增大, 模式 3~5 的有效折射率实部基本保持不变, 而传播长度和品质因数缓慢减小。仍然以模式 1 为例来说明这些现象。图 7(d)~(f) 是模式 1 在椭圆半短轴为  $62 \text{ nm}$ 、 $70 \text{ nm}$  和  $78 \text{ nm}$  情况下的场强分布图, 随着椭圆半短轴长度的增加, 椭圆逐渐趋向于圆柱, 三根波导上分布的电场耦合作用有所加强, 损耗有所减小, 故传播长度与品质因数的增加速度较慢。

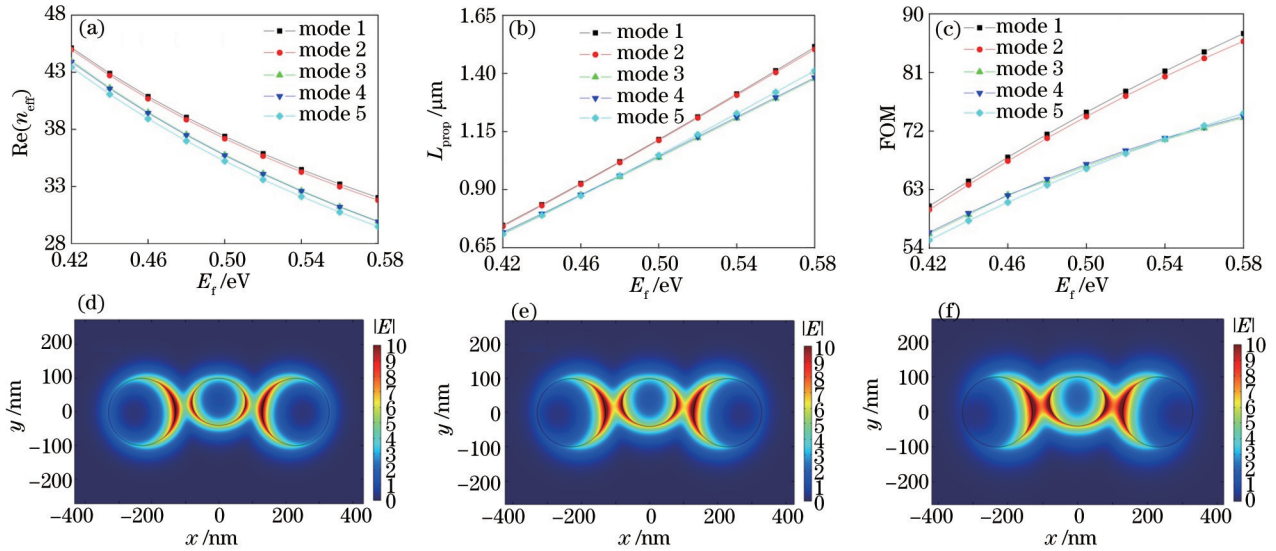


图 4 5 个最低阶模式的有效折射率实部  $\text{Re}(n_{\text{eff}})$ 、传播长度  $L_{\text{prop}}$  和品质因数 FOM 随费米能  $E_f$  的变化, 以及模式 1 在费米能为 0.42 eV、0.50 eV 和 0.58 eV 情况下的电场强度分布图。(a) 有效折射率实部  $\text{Re}(n_{\text{eff}})$ ; (b) 传播长度  $L_{\text{prop}}$ ; (c) 品质因数 FOM; 模式 1 在费米能  $E_f$  为 (d) 0.42 eV、(e) 0.50 eV 和 (f) 0.58 eV 情况下的电场强度分布图

Fig. 4 Real part of effective refractive index  $\text{Re}(n_{\text{eff}})$ , propagation length  $L_{\text{prop}}$ , and figure of merit FOM of five lowest-order modes varying with Fermi energy  $E_f$ , and electric field intensity distributions at Fermi energies  $E_f$  of 0.42, 0.50, and 0.58 eV. (a) Real part of effective refractive index  $\text{Re}(n_{\text{eff}})$ ; (b) propagation length  $L_{\text{prop}}$ ; (c) figure of merit FOM; electric field intensity distributions at Fermi energies  $E_f$  of (d) 0.42 eV, (e) 0.50 eV and (f) 0.58 eV

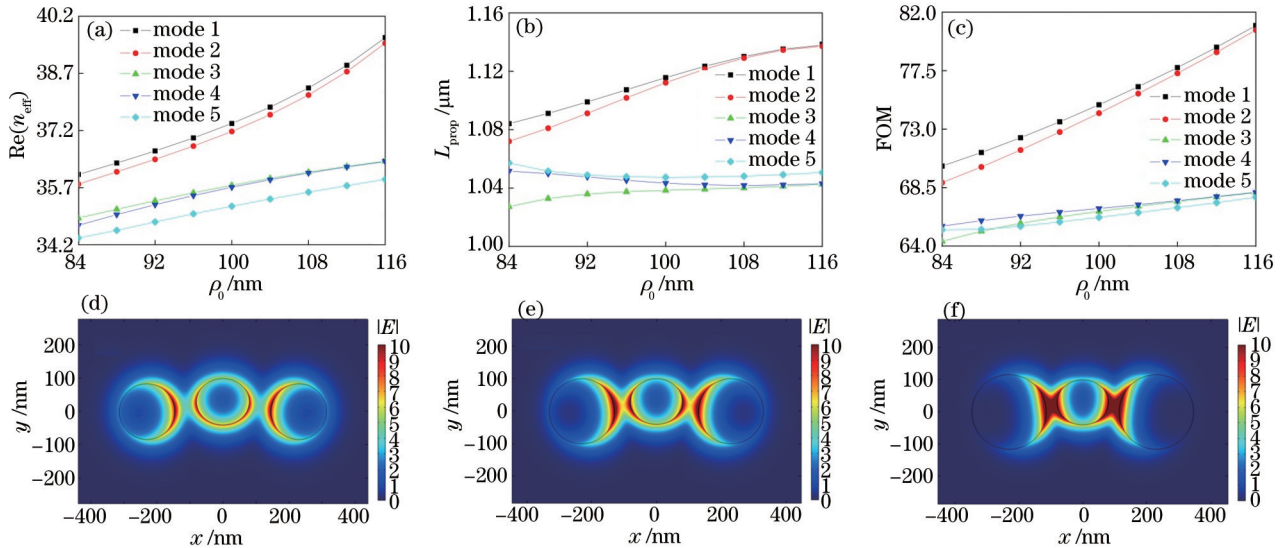


图 5 5 个最低阶模式的有效折射率实部  $\text{Re}(n_{\text{eff}})$ 、传播长度  $L_{\text{prop}}$  和品质因数 FOM 随半径  $\rho_0$  的变化, 以及模式 1 在圆柱半径为 84 nm、100 nm 和 116 nm 时的电场强度分布图。(a) 有效折射率实部  $\text{Re}(n_{\text{eff}})$ ; (b) 传播长度  $L_{\text{prop}}$ ; (c) 品质因数 FOM; 模式 1 在圆柱半径  $\rho_0$  为 (d) 84 nm、(e) 100 nm 和 (f) 116 nm 时的电场强度分布图

Fig. 5 Real part of effective refractive index  $\text{Re}(n_{\text{eff}})$ , propagation length  $L_{\text{prop}}$ , and figure of merit FOM of five lowest-order modes varying with radius  $\rho_0$ , and electric field intensity distributions at radii  $\rho_0$  of 84, 100, 116 nm. (a) Real part of effective refractive index  $\text{Re}(n_{\text{eff}})$ ; (b) propagation length  $L_{\text{prop}}$ ; (c) figure of merit FOM; electric field intensity distributions at radii  $\rho_0$  of (d) 84 nm, (e) 100 nm, and (f) 116 nm

### 3.7 间距 $c$ 对传输特性的影响

研究纳米线之间的间距对模式传输特性的影响。

图 8(a)~(c) 是在  $\lambda = 7 \mu\text{m}$ 、 $E_f = 0.5 \text{ eV}$ 、 $\rho_0 = 100 \text{ nm}$ 、 $a = 80 \text{ nm}$ 、 $b = 70 \text{ nm}$  和  $h = 30 \text{ nm}$  条件下, 增大间距  $c$

的过程中, 模式特性的变化趋势图。随着间距的增大, 模式 1、模式 2 和模式 5 的模式特性参数单调减小, 其中模式 5 的模式特性变化平缓。模式 3 与模式 4 的有效折射率随着间距的增大而缓慢减小, 传播长度与品

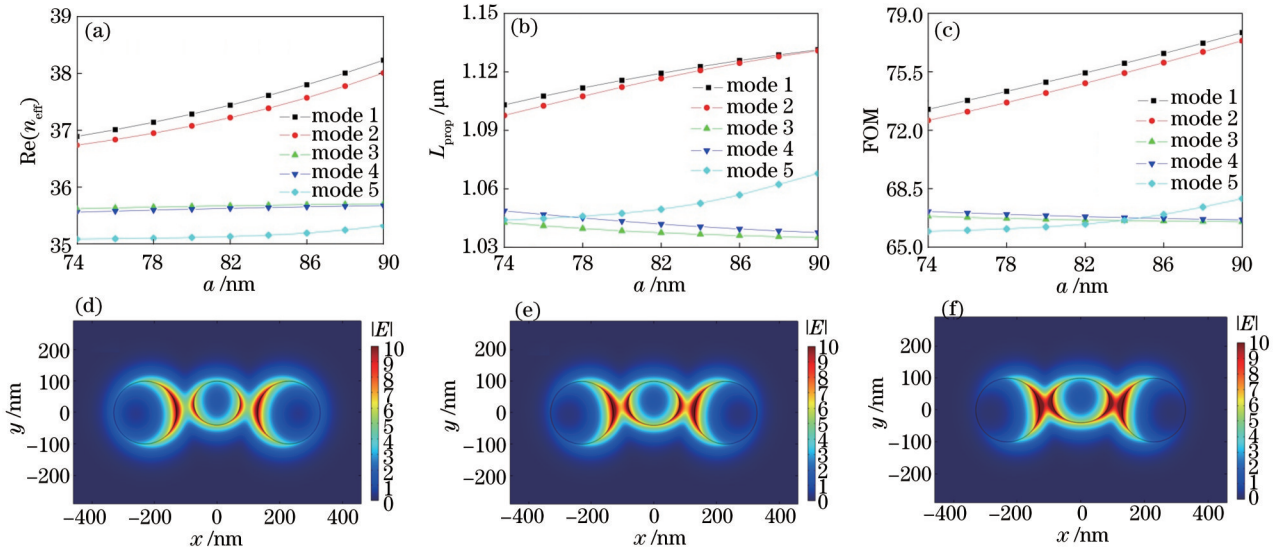


图 6 5 个最低阶模式的有效折射率实部  $\text{Re}(n_{\text{eff}})$ 、传播长度  $L_{\text{prop}}$  和品质因数 FOM 随椭圆纳米线半长轴  $a$  的变化, 以及模式 1 在半长轴为 74 nm、82 nm 和 90 nm 情况下的电场强度分布图。(a) 有效折射率实部  $\text{Re}(n_{\text{eff}})$ ; (b) 传播长度  $L_{\text{prop}}$ ; (c) 品质因数 FOM; 模式 1 在半长轴  $a$  为 (d) 74 nm、(e) 82 nm 和 (f) 90 nm 情况下的电场强度分布图

Fig. 6 Real part of effective refractive index  $\text{Re}(n_{\text{eff}})$ , propagation length  $L_{\text{prop}}$ , and figure of merit FOM of five lowest-order modes varying with elliptic nanowire semi-major axis  $a$ , and electric field intensity distributions at elliptic nanowire semi-major axis of 74, 82, and 90 nm. (a) Real part of effective refractive index  $\text{Re}(n_{\text{eff}})$ ; (b) propagation length  $L_{\text{prop}}$ ; (c) figure of merit FOM; electric field intensity distributions at elliptic nanowire semi-major axis  $a$  of (d) 74 nm, (e) 82 nm, and (f) 90 nm

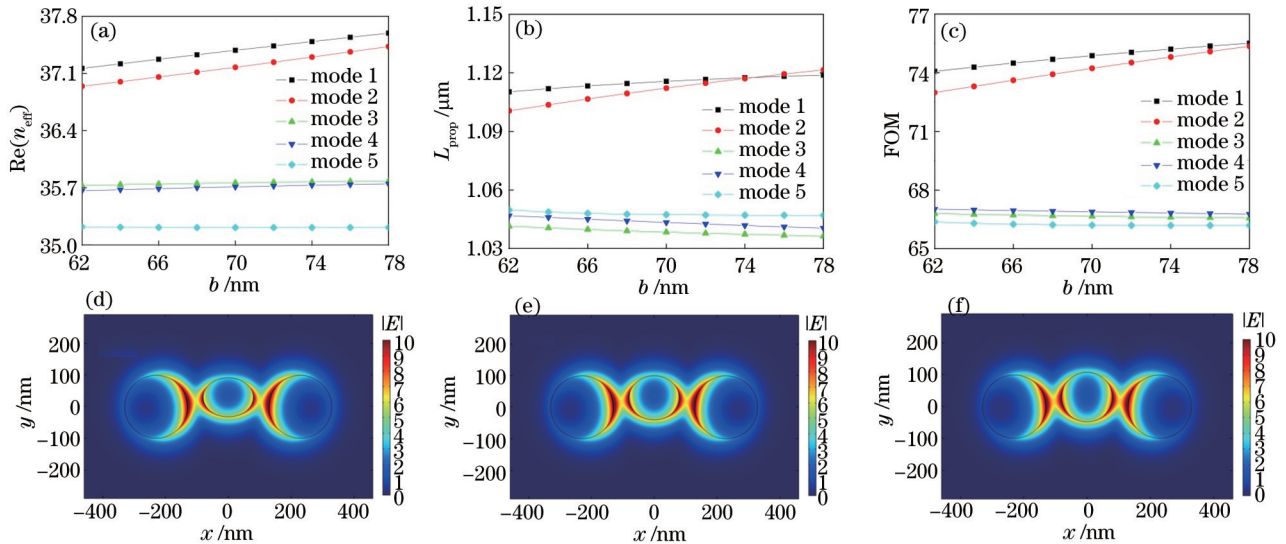


图 7 5 个最低阶模式的有效折射率实部  $\text{Re}(n_{\text{eff}})$ 、传播长度  $L_{\text{prop}}$  和品质因数 FOM 随椭圆纳米线半短轴  $b$  的变化, 以及模式 1 在半短轴  $b$  为 62 nm、70 nm 和 78 nm 情况下的电场强度分布图。(a) 有效折射率实部  $\text{Re}(n_{\text{eff}})$ ; (b) 传播长度  $L_{\text{prop}}$ ; (c) 品质因数 FOM; 模式 1 在半短轴  $b$  为 (d) 62 nm、(e) 70 nm 和 (f) 78 nm 情况下的电场强度分布图

Fig. 7 Real part of effective refractive index  $\text{Re}(n_{\text{eff}})$ , propagation length  $L_{\text{prop}}$ , and figure of merit FOM of five lowest-order modes varying with elliptical nanowire semi-minor axis  $b$ , and electric field intensity distributions at semi-minor axis  $b$  of 62, 70, and 78 nm. (a) Real part of effective refractive index  $\text{Re}(n_{\text{eff}})$ ; (b) propagation length  $L_{\text{prop}}$ ; (c) figure of merit FOM; electric field intensity distributions at semi-minor axis  $b$  of (d) 62 nm, (e) 70 nm, and (f) 78 nm

品质因数缓慢增大。这些模式特性的改变可以通过场分布来解释。以模式 1 为例, 图 8(d)~(f) 是模式 1 在间距为 210 nm、230 nm 和 250 nm 时的场分布图, 随着间距的增加, 电场逐步由纳米线间隙向表面转移, 使得场与石墨烯之间的作用增加, 传输损耗增加, 传播长度与

品质因数减小。

### 3.8 高度 $h$ 对传输特性的影响

研究中间纳米线高度对传输特性的影响。如图 9(a)~(c) 所示, 在  $\lambda = 7 \mu\text{m}$ 、 $E_i = 0.5 \text{ eV}$ 、 $\rho_0 = 100 \text{ nm}$ 、 $a = 80 \text{ nm}$ 、 $b = 70 \text{ nm}$  和  $c = 230 \text{ nm}$  条件下, 在中间椭

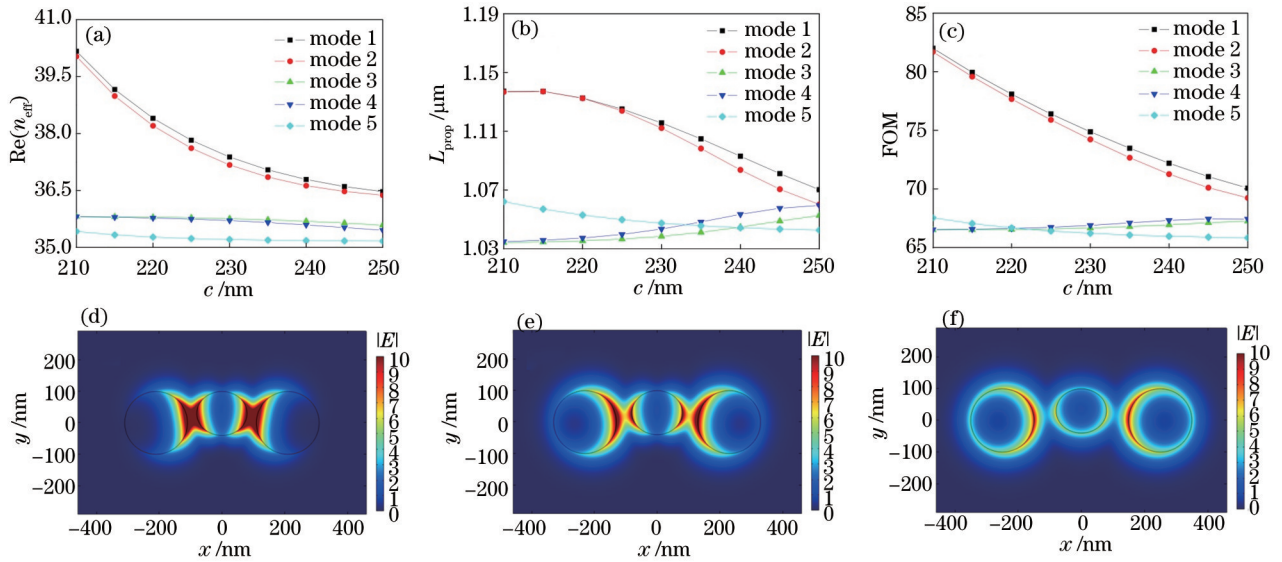


图 8 5 个最低阶模式的有效折射率实部  $\text{Re}(n_{\text{eff}})$ 、传播长度  $L_{\text{prop}}$  和品质因数 FOM 随间距  $c$  的变化, 以及模式 1 在间距为 210 nm, 230 nm 和 250 nm 情况下的电场强度分布图。(a) 有效折射率实部  $\text{Re}(n_{\text{eff}})$ ; (b) 传播长度  $L_{\text{prop}}$ ; (c) 品质因数 FOM; 模式 1 在间距  $c$  为 (d) 210 nm、(e) 230 nm 和 (f) 250 nm 情况下的电场强度分布图

Fig. 8 Real part of effective refractive index  $\text{Re}(n_{\text{eff}})$ , propagation length  $L_{\text{prop}}$ , and figure of merit FOM of five lowest-order modes varying with distance  $c$ , and electric field intensity distributions at distances  $c$  of 210, 230, and 250 nm. (a) Real part of effective refractive index  $\text{Re}(n_{\text{eff}})$ ; (b) propagation length  $L_{\text{prop}}$ ; (c) figure of merit FOM; electric field intensity distributions at distances  $c$  of (d) 210 nm, (e) 230 nm, and (f) 250 nm

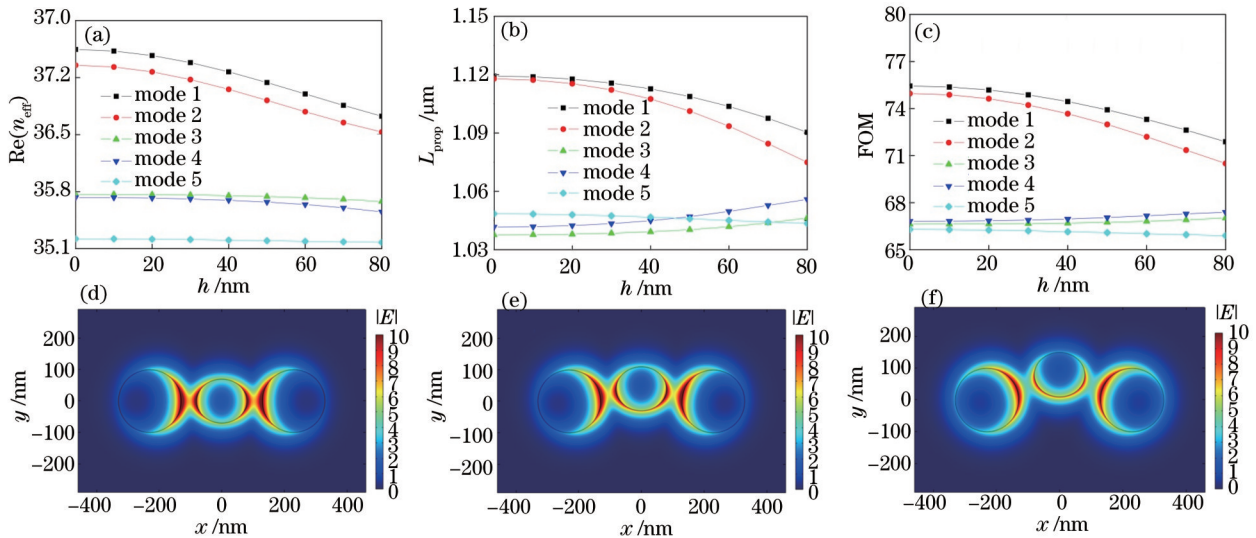


图 9 5 个最低阶模式的有效折射率实部  $\text{Re}(n_{\text{eff}})$ 、传播长度  $L_{\text{prop}}$  和品质因数 FOM 随高度  $h$  的变化, 以及模式 1 在圆柱纳米线高度为 0 nm、40 nm 和 80 nm 情况下的电场强度分布图。(a) 有效折射率实部  $\text{Re}(n_{\text{eff}})$ ; (b) 传播长度  $L_{\text{prop}}$ ; (c) 品质因数 FOM; 模式 1 在圆柱纳米线高度  $h$  为 (d) 0 nm、(e) 40 nm 和 (f) 80 nm 情况下的电场强度分布图

Fig. 9 Real part of effective refractive index  $\text{Re}(n_{\text{eff}})$ , propagation length  $L_{\text{prop}}$ , and figure of merit FOM of five lowest-order modes varying with height  $h$ , and electric field intensity distributions at heights  $h$  of 0, 40, and 80 nm. (a) Real part of effective refractive index  $\text{Re}(n_{\text{eff}})$ ; (b) propagation length  $L_{\text{prop}}$ ; (c) figure of merit FOM; electric field intensity distributions at heights  $h$  of (d) 0 nm, (e) 40 nm, and (f) 80 nm

圆柱纳米线高度从 0 nm 增加到 80 nm 的过程中, 模式 1 与模式 2 的三个模式特性参数单调减小, 模式 3 与模式 4 的有效折射率实部缓慢减小, 传播长度与品质因数缓慢增加。模式 5 的三个模式特性在圆柱纳米线高

度增大的过程中几乎不受影响。仍然以模式 1 为例, 通过场分布来解释这些现象。如图 9(d)~(f) 所示, 在圆柱纳米线高度分别为 0 nm、40 nm 和 80 nm 时, 模式 1 的场逐渐向纳米线表面集中, 纳米线之间的空间内

场分布减少,场与石墨烯之间的耦合作用增强,传输损耗增大,传播长度与品质因数减小。

### 3.9 传输特性比较

将本文设计的波导结构(struct1)与由两根椭圆柱形和一根圆柱形纳米并行线构成的波导结构(struct2)在改变传播长度和费米能的情况下进行模式特性比较。

首先改变波长。设结构一和结构二的参数为  $E_f = 0.5 \text{ eV}$ ,  $\rho_0 = 100 \text{ nm}$ ,  $a = 80 \text{ nm}$ ,  $b = 70 \text{ nm}$ ,  $c = 230 \text{ nm}$ ,  $h = 30 \text{ nm}$ 。图 10(a)~(c)为两个结构所支持

的模式 1 的传输特性随波长变化的对比图。在波长较长处,结构一的传播长度和品质因数均优于结构二。在波长为  $7.8 \mu\text{m}$  处,结构一的传播长度较结构二长  $0.02 \mu\text{m}$  左右,结构一的品质因数较结构二大  $0.75$  左右。图 10(d)、(e)分别为波长为  $7.8 \mu\text{m}$  时结构一和结构二的模式 1 的电场强度分布图。可以发现,相对结构二来说,结构一中分布于石墨烯表面的场比较弱,场与石墨烯的相互作用比较弱,模式 1 的传输损耗较小。因此,结构一的传输性能更优。

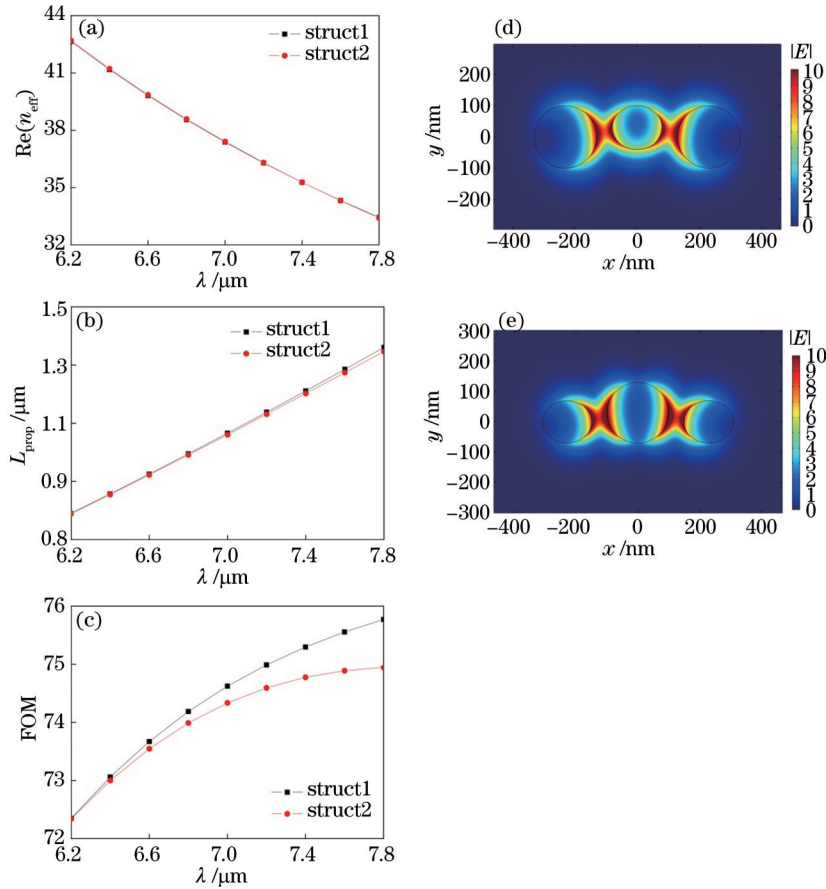


图 10 两种结构所支持的模式 1 的有效折射率实部  $\text{Re}(n_{\text{eff}})$ 、传播长度  $L_{\text{prop}}$  和品质因数 FOM 随工作波长  $\lambda$  的变化关系对比图,以及 struct1 和 struct2 所支持的模式 1 在波长为  $7.8 \mu\text{m}$  处的电场强度分布图。(a) 有效折射率实部  $\text{Re}(n_{\text{eff}})$ ; (b) 传播长度  $L_{\text{prop}}$ ; (c) 品质因数 FOM; (d) struct1 和 (e) struct2 所支持的模式 1 在波长为  $7.8 \mu\text{m}$  处的电场强度分布图

Fig. 10 Comparison of real part of effective refractive index  $\text{Re}(n_{\text{eff}})$ , propagation length  $L_{\text{prop}}$ , and figure of merit FOM of mode 1 supported by struct1 and struct2 varying with operating wavelength  $\lambda$ , and electric field intensity distributions of mode 1 supported by struct1 and struct2 at wavelength of  $7.8 \mu\text{m}$ . (a) Real part of effective refractive index  $\text{Re}(n_{\text{eff}})$ ; (b) propagation length  $L_{\text{prop}}$ ; (c) figure of merit FOM; electric field intensity distributions of mode 1 supported by (d) struct1 and (e) struct2 at wavelength of  $7.8 \mu\text{m}$

其次,比较在改变费米能的情况下两种结构的模式 1 的模式特性。设结构一和结构二的参数均为  $\lambda = 7 \mu\text{m}$ ,  $\rho_0 = 100 \text{ nm}$ ,  $a = 80 \text{ nm}$ ,  $b = 70 \text{ nm}$ ,  $c = 230 \text{ nm}$ ,  $h = 30 \text{ nm}$ 。从图 11(a)~(c)可以看出,随着费米能从  $0.42 \text{ eV}$  增加到  $0.58 \text{ eV}$ ,结构一的模式 1 的传播长度与品质因数大于结构二。在所计算的费米能范围内,结构一的传播长度较结构二增加了约

$0.1 \mu\text{m}$ ,品质因数增大约  $3.0$ 。如图 11 所示,在费米能为  $0.58 \text{ eV}$  时,图 11(d)为结构一的场分布,图 11(e)为结构二的场分布。可以看出,结构一的场更多地分布在纳米线之间,而结构二的场更多地分布在纳米线的表面,这就使得结构二中的场与纳米线之间的耦合作用增大,传输损耗增大,说明结构一的传输性能优于结构二。



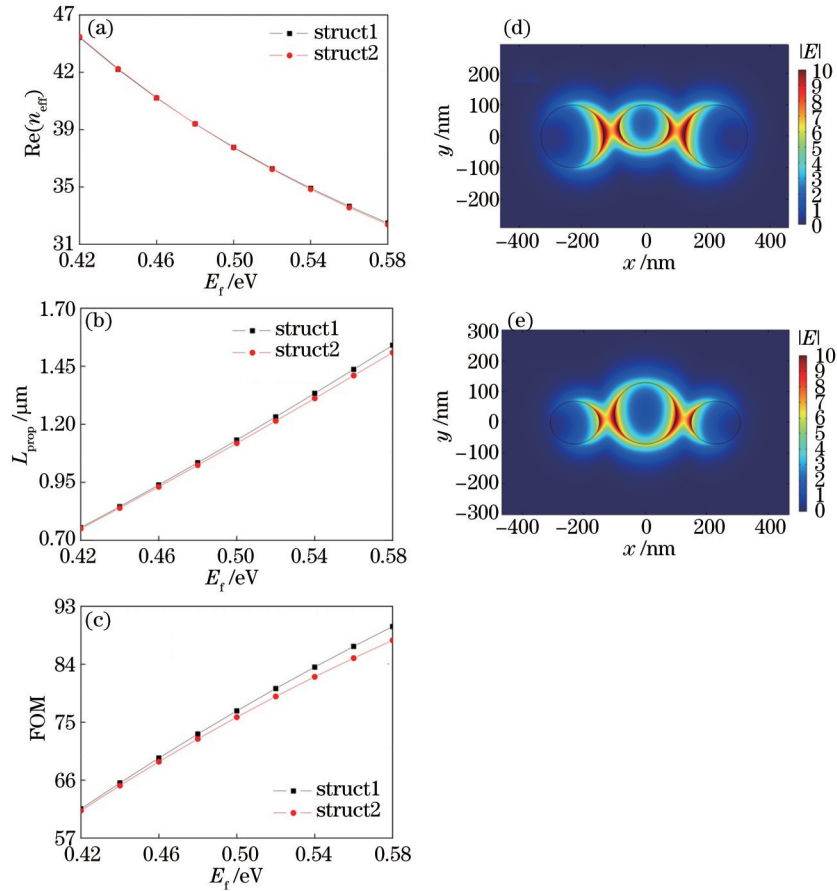


图 11 两种结构所支持的模式 1 的有效折射率实部  $Re(n_{eff})$ 、传播长度  $L_{prop}$  和品质因数 FOM 随费米能  $E_f$  的变化关系对比图,以及 struct1 和 struct2 所支持的模式 1 在费米能为 0.58 eV 处的电场强度分布图。(a)有效折射率实部  $Re(n_{eff})$ ; (b)传播长度  $L_{prop}$ ; (c)品质因数 FOM; (d) struct1 和 (e) struct2 所支持的模式 1 在费米能 0.58 eV 处的电场强度分布图

Fig. 11 Comparison of real part of effective refractive index  $Re(n_{eff})$ , propagation length  $L_{prop}$ , and figure of merit FOM of mode 1 supported by struct1 and struct2 varying with Fermi energy  $E_f$ , and electric field intensity distributions of mode 1 supported by struct1 and struct2 at Fermi energy of 0.58 eV. (a) Real part of effective refractive index  $Re(n_{eff})$ ; (b) propagation length  $L_{prop}$ ; (c) figure of merit FOM; electric field intensity distributions of mode 1 supported by (d) struct1 and (e) struct2 at Fermi energy of 0.58 eV

## 4 结 论

对所设计的涂覆石墨烯的混合型波导的 5 个最低阶模式进行了分析。结果表明,通过改变工作波长和石墨烯的费米能,可以调节这些模式的传输特性。因为模式 1 与模式 2 的场分布主要集中在圆柱形纳米线靠近椭圆柱形纳米线的内侧区域,故二者对结构参数的变化比较敏感。当结构参数变化时,这两个模式的传输特性变化比较显著。模式 3 与模式 4 的场主要分布在圆柱形纳米线外侧,对结构参数不敏感。当结构参数变化时,这两个模式的传输特性变化不显著。模式 5 的场分布在纳米线上下两侧,改变结构参数对其模式特性影响较小。相比两根椭圆柱波导中间夹一根圆柱波导的结构,所设计的波导结构具有更长的传播长度和更大的品质因数。

### 参 考 文 献

[1] Barnes W L, Dereux A, Ebbesen T W. Surface plasmon

subwavelength optics[J]. Nature, 2003, 424(6950): 824-830.

[2] Zhang J X, Zhang L D, Xu W. Surface plasmon polaritons: physics and applications[J]. Journal of Physics D, 2012, 45(11): 113001.

[3] Chu H S, Li E P, Bai P, et al. Optical performance of single-mode hybrid dielectric-loaded plasmonic waveguide-based components[J]. Applied Physics Letters, 2010, 96(22): 221103.

[4] 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.

[5] 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.

[6] Yang X X, Sun Z P, Low T, et al. Nanomaterial-based plasmon-enhanced infrared spectroscopy[J]. Advanced Materials, 2018, 30(20): e1704896.

[7] Hu H, Yang X X, Zhai F, et al. Far-field nanoscale infrared spectroscopy of vibrational fingerprints of

- molecules with graphene plasmons[J]. *Nature Communications*, 2016, 7: 12334.
- [8] 吴梦, 梁西银, 孙对兄, 等. 基于表面等离子激元的非对称矩形环腔电可调滤波器设计[J]. *光学学报*, 2020, 40(14): 1423001.
- Wu M, Liang X Y, Sun D X, et al. Design of asymmetric rectangular ring resonance cavity electrically adjustable filter based on surface plasmon polaritons[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(14): 1423001.
- [9] 滕达, 王凯, 李哲, 等. 用于中红外波深度亚波长传输的石墨烯间隙等离激元波导[J]. *光学学报*, 2020, 40(6): 0623002.
- Teng D, Wang K, Li Z, et al. Graphene gap plasmonic waveguide for deep-subwavelength transmission of mid-infrared waves[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(6): 0623002.
- [10] Gao Y X, Ren G B, Zhu B F, et al. Single-mode graphene-coated nanowire plasmonic waveguide[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(20): 5909-5912.
- [11] Gao Y X, Ren G B, Zhu B F, et al. Analytical model for plasmon modes in graphene-coated nanowire[J]. *Optics Express*, 2014, 22(20): 24322-24331.
- [12] 程鑫, 薛文瑞, 卫壮志, 等. 涂覆石墨烯的椭圆形电介质纳米线光波导的模式特性分析[J]. *物理学报*, 2019, 68(5): 058101.
- Cheng X, Xue W R, Wei Z Z, et al. Mode characteristic analysis of optical waveguides based on graphene-coated elliptical dielectric nanowire[J]. *Acta Physica Sinica*, 2019, 68(5): 058101.
- [13] Zhu B F, Ren G B, Yang Y, et al. Field enhancement and gradient force in the graphene-coated nanowire pairs [J]. *Plasmonics*, 2015, 10(4): 839-845.
- [14] Ye S, Wang Z X, Sun C R, et al. Plasmon-phonon-polariton modes and field enhancement in graphene-coated hexagon boron nitride nanowire pairs[J]. *Optics Express*, 2018, 26(18): 23854-23867.
- [15] Wu D, Tian J P. Study on the plasmonic characteristics of bow-tie type graphene-coated nanowire pair[J]. *Optik*, 2018, 156: 689-695.
- [16] Tengda, Guo J K, Yang Y D, et al. Study of modal properties in graphene-coated nanowires integrated with substrates[J]. *Applied Physics B*, 2020, 126(11): 1-9.
- [17] 彭艳玲, 薛文瑞, 卫壮志, 等. 涂覆石墨烯的非对称并行电介质纳米线波导的模式特性分析[J]. *物理学报*, 2018, 67(3): 038102.
- Peng Y L, Xue W R, Wei Z Z, et al. Mode properties analysis of graphene-coated asymmetric parallel dielectric nanowire waveguides[J]. *Acta Physica Sinica*, 2018, 67(3): 038102.
- [18] Xing R, Jian S S. The graphene square waveguide with small normalized mode area[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2017, 29(19): 1643-1646.
- [19] 董慧莹, 秦晓茹, 薛文瑞, 等. 涂覆石墨烯的非对称椭圆电介质纳米并行线的模式分析[J]. *物理学报*, 2020, 69(23): 238102.
- Dong H Y, Qin X R, Xue W R, et al. Mode characteristics of asymmetric graphene-coated elliptical dielectric nano-parallel wires waveguide[J]. *Acta Physica Sinica*, 2020, 69(23): 238102.
- [20] Huang Y X, Zhang L, Yin H, et al. Graphene-coated nanowires with a drop-shaped cross section for 10 nm confinement and 1 mm propagation[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(11): 2078-2081.
- [21] Wang X, Wang J, Ma T, et al. Plasmonic characteristics of suspended graphene-coated wedge porous silicon nanowires with Ag partition[J]. *Chinese Physics B*, 2021, 30(1): 014207.
- [22] Cong X, Huang Y X, Zhang M, et al. Graphene-coated nanowires with drop-shaped cross section for the low loss propagation of THz waves with sub-micron mode widths [J]. *Laser Physics Letters*, 2018, 15(9): 096001.
- [23] Teng D, Wang Y C, Xu T Z, et al. Symmetric graphene dielectric nanowaveguides as ultra-compact photonic structures[J]. *Nanomaterials*, 2021, 11(5): 1281.
- [24] Yan H Z, Li S Y, Xie Z Y, et al. Design of PANDA ring-core fiber with 10 polarization-maintaining modes[J]. *Photonics Research*, 2016, 5(1): 1-5.
- [25] Cao Z X, Yao B C, Qin C Y, et al. Biochemical sensing in graphene-enhanced microfiber resonators with individual molecule sensitivity and selectivity[J]. *Light: Science & Applications*, 2019, 8: 107.
- [26] Kim J T, Kim J, Choi H, et al. Graphene-based photonic devices for soft hybrid optoelectronic systems [J]. *Nanotechnology*, 2012, 23(34): 344005.
- [27] Yang J F, Yang J J, Deng W, et al. Transmission properties and molecular sensing application of CGPW [J]. *Optics Express*, 2015, 23(25): 32289-32299.
- [28] Zeng X D, Liao Z Y, Al-Amri M, et al. Controllable waveguide via dielectric cylinder covered with graphene: tunable entanglement[J]. *Europhysics Letters*, 2016, 115(1): 14002.
- [29] Nikitin A Y, Guinea F, Garcia-Vidal F J, et al. Fields radiated by a nanoemitter in a graphene sheet[J]. *Physical Review B*, 2011, 84(19): 195446.
- [30] Chen B G, Meng C, Yang Z Y, et al. Graphene coated ZnO nanowire optical waveguides[J]. *Optics Express*, 2014, 22(20): 24276-24285.
- [31] Chen K, Zhou X, Cheng X, et al. Graphene photonic crystal fibre with strong and tunable light-matter interaction[J]. *Nature Photonics*, 2019, 13(11): 754-759.
- [32] He X Q, Ning T G, Lu S H, et al. Ultralow loss graphene-based hybrid plasmonic waveguide with deep-subwavelength confinement[J]. *Optics Express*, 2018, 26(8): 10109-10118.
- [33] Hajati M, Hajati Y. Deep subwavelength confinement of mid-infrared plasmon modes by coupling graphene-coated nanowire with a dielectric substrate[J]. *Plasmonics*, 2018, 13(2): 403-412.