

# 基于石墨烯表面等离激元的混合型纳米并行线波导的模式分析

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>2,3</sup>

(1. 山西大学, 物理电子工程学院 山西 太原 030006;

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

3. 山西大学, 极端光学协同创新中心 山西 太原 030006)

**摘要:** 设计了一种由涂覆石墨烯的两根椭圆柱形和一根圆柱形电介质纳米线构成的基于石墨烯表面等离激元的纳米并行线波导。利用有限元方法, 对波导所支持的 5 个最低阶模式的传输特性进行了分析。结果表明, 波导所支持的这些模式均可由涂覆石墨烯的椭圆柱形和圆柱形电介质纳米线的基模和一阶模合成。工作波长或者石墨烯的费米能变化时, 这些模式的传输特性的变化趋势保持一致。模式 1 和模式 2 的传输特性受椭圆柱形纳米线半长轴、中心间距和圆柱纳米线的高度的影响相对较大。模式 3 的传输特性受结构参数的影响相对较小。模式 4 和模式 5 的传输特性受椭圆柱形纳米线半长轴、中心间距和圆柱纳米线的半径的影响相对较大。本文设计的波导采用了椭圆柱形结构, 增加了可调节的参数, 其传输性能优于由涂覆石墨烯的三根圆柱形电介质纳米线构成的波导。本文设计的波导在微纳光学器件集成和传感器领域具有一定的应用前景。

**关键词:** 石墨烯; 表面等离激元; 纳米线; 波导; 有限元方法

中图分类号: TN252

文献标识码: A

文章编号: 1007-6654(2022)02-0158-12

## 0 引言

表面等离激元 (Surface plasmon polaritons, SPPs) 是一种光子和电子相互作用形成的局域化的电磁表面激发态<sup>[1]</sup>。SPPs 具有表面局域特性, 在垂直于表面的方向, 电场强度呈指数衰减。一些贵金属的表面对于工作于可见光和近红外波段的 SPPs 具有较好的约束能力。在太赫兹和中红外波段, 贵金属的表面对于 SPPs 的约束能力变弱, 不适合 SPPs 的传输, 需要寻找新的材料。

石墨烯是由  $sp^2$  杂化的碳原子紧密排列而成的正六边形结构, 仅有一个原子尺寸的厚度<sup>[2]</sup>, 具有

很多奇异的性质, 例如: 通过改变化学掺杂<sup>[3]</sup> 和外加电压等方式, 可以调节其费米能。在太赫兹波段, 其具有较高的载流子迁移率和电导率。因为在太赫兹频率范围内石墨烯可以表现出类金属的特性, 可以在其表面传输 SPPs<sup>[4]</sup>。与金属材料表面支持的 SPPs 相比, 石墨烯表面支持的 SPPs 具有更小的欧姆损耗和灵活可调的电磁特性<sup>[5]</sup>, 因此石墨烯表面等离激元 (Graphene Surface Plasmons, GSPs) 在太赫兹频率范围具有非常好的应用前景。

在电介质表面涂覆石墨烯所构成的波导具有良好的传输性能<sup>[6–24]</sup>。其中, 在电介质纳米线表面涂覆石墨烯具有很好的应用前景。涂覆单层石墨烯

收稿日期: 2021-08-11; 接受日期: 2021-12-01

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)

作者简介: 李宁 (1995–), 女, 硕士研究生, 主要从事微纳波导器件方面的研究, E-mail: 775663822@qq.com

† 通信作者: 薛文瑞, E-mail: wxue@sxu.edu.cn

的单根圆柱形纳米线波导<sup>[7-8]</sup>、椭圆柱形纳米线波导<sup>[9]</sup>和具有水滴形横截面的纳米线波导<sup>[10-11]</sup>都有较强的模式约束能力。涂覆多层石墨烯的单根圆柱形纳米线波导<sup>[12-15]</sup>、椭圆柱形纳米线波导<sup>[16]</sup>和方柱形纳米线波导<sup>[17]</sup>都有较好的传输特性。涂覆单层石墨烯的并行圆柱波导<sup>[18-20]</sup>、椭圆柱形纳米线波导<sup>[21]</sup>和蝴蝶结形纳米线波导<sup>[22]</sup>具有较强的场增强效应。涂覆多层石墨烯的并行圆柱形纳米线波导<sup>[23]</sup>具有更强的场增强效应。涂覆单层石墨烯中间有隔板的对称楔形<sup>[24]</sup>和对称椭圆柱形<sup>[25]</sup>纳米线波导具有更小的模式面积及更高的波导灵敏度。2019年,我们小组对涂覆石墨烯的三根轴心非共面圆柱形纳米线波导进行了研究,结果发现这种波导具有灵活的可调节性,所支持的模式具有较长的传播长度<sup>[26]</sup>。但这种波导是由三根圆柱形纳米线构成,可调节的几何参数相对较少。

本文设计了一种涂覆石墨烯的三根并行的混合型电介质纳米线波导,这种波导是由两根椭圆柱形纳米线和一根圆柱形纳米线构成,增加了可调节的几何参数。利用有限元法对这种波导所支持的5个最低阶模式进行了研究,分析了波长、石墨烯费米能、圆柱形纳米线半径、椭圆柱形纳米线的半长轴和半短轴、纳米线间的间距、圆柱形纳米线的高度这七个参数,对波导传输特性的影响。

## 1 结构模型和计算方法

本文设计的波导的横截面如图1所示,左右为两根椭圆柱形电介质纳米线,居中的为圆柱形电介质纳米线。每根纳米线的表面,都涂覆了单层石墨烯。背景为空气。将两根椭圆柱形电介质纳米线从左到右标记为1号与2号纳米线,中间的圆柱形电介质纳米线标记为3号纳米线。1号纳米线和2号纳米线位于同一水平面内,3号纳米线相对于这一水平面的高度为 $h$ 。1号纳米线和2号纳米线的中心间距为 $2c$ 。 $a_1$ 、 $b_1$ 和 $q_1$ 与 $a_2$ 、 $b_2$ 和 $q_2$ 分别是1号纳米线和2号纳米线的半长轴、半短轴与焦距。 $\rho_0$ 为圆柱形纳米线的半径。在直角坐标系 $o-xy$ 中,1号纳米线的中心位于 $(-c,0)$ ,2号纳米线的中心位于 $(c,0)$ ,3号纳米线的中心位于 $(0,h)$ 。本文设计的波导与文献[26]中设计的波导相比,增加了可调节的参数,通过调节椭圆柱的长轴与短轴,能改变涂

覆在椭圆柱表面的石墨烯与电场的作用面积大小,以及纳米线之间的耦合程度,进而调节传输损耗,达到改善传输特性的目的。

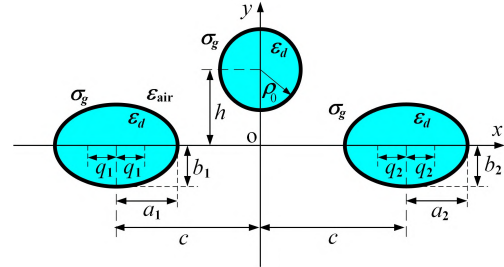


Fig. 1 Cross-section of the waveguide based on two elliptical and a cylindrical dielectric nanowire coated with graphene  
图1由涂覆石墨烯的两根椭圆柱形和一根圆柱形电介质纳米线构成的波导的横截面示意图

本文所设计的结构中,纳米线的介电常数为 $\epsilon_d$ ,空气背景的介电常数为 $\epsilon_{\text{air}}$ 。取 $\epsilon_d=2.1025$ , $\epsilon_{\text{air}}=1.0$ 。石墨烯电导率为 $\sigma_g$ ,由带内电导率 $\sigma_{\text{intra}}$ 和带间电导率 $\sigma_{\text{inter}}$ 两部分组成,即 $\sigma_g = \sigma_{\text{intra}} + \sigma_{\text{inter}}$ ,其表达式可由库珀公式得到<sup>[27]</sup>:

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

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

在上述表达式中, $e$ 为电子电量, $k_b$ 为玻尔兹曼常数, $T=300\text{K}$ 为环境温度, $h$ 为约化普朗克常量, $\omega=2\pi f$ 是角频率, $\Gamma=2 \times 10^{12}\text{rad/s}$ 是载流子散射率, $E_f$ 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>[28]</sup>或者化学气相沉积法制备<sup>[29]</sup>。

采用有限元方法(Comsol Multiphysics 5.1<sup>TM</sup>),设置网格的最小尺寸为 $\lambda/3000$ ,最大尺寸为 $\lambda/50$ 。计算区域的边界为圆形,半径为 $\lambda$ ,边界条件设置为散射边界条件。通过求解,就可以得到本文所设计的波导模式的场分布、有效折射率实部 $\text{Re}(n_{\text{eff}})$ 和有效折射率虚部 $\text{Im}(n_{\text{eff}})$ 。进一步换算可得到传播长度 $L_{\text{prop}}$ 与品质因数 $FOM$ 。其中传播长度 $L_{\text{prop}} = \lambda/[4\pi\text{Im}(n_{\text{eff}})]$ <sup>[30]</sup>,品质因数 $FOM = \text{Re}(n_{\text{eff}})/\text{Im}(n_{\text{eff}})$ <sup>[31]</sup>。本文采用有效折射率、传播长度和品质因数来衡量模式的传输特性。

## 2 结果与讨论

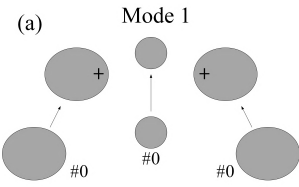
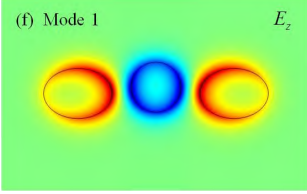
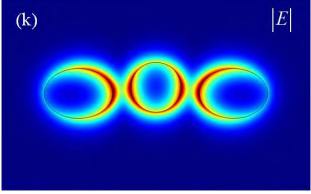
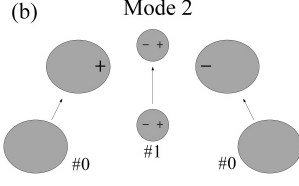
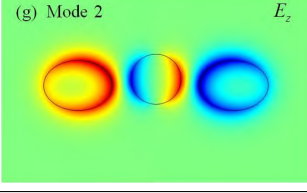
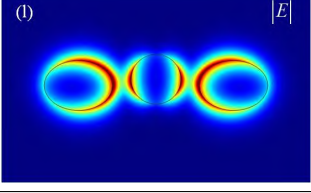
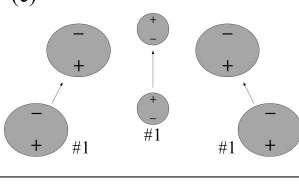
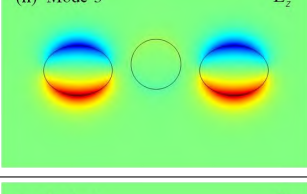
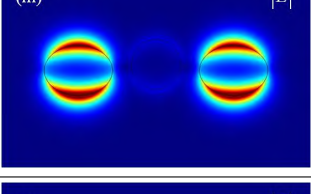
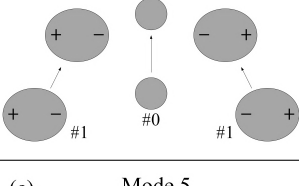
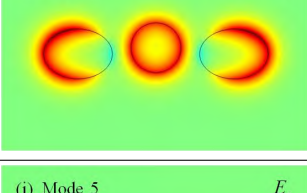
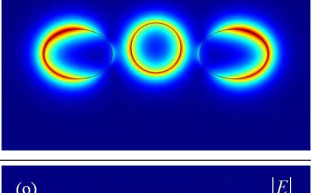
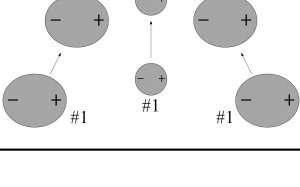
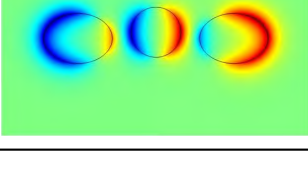
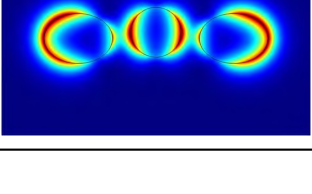
### 2.1 模式的分类

首先对五个最低阶模式进行分类，表 1 是在  $\lambda = 7 \mu\text{m}$ ,  $E_f = 0.5 \text{ eV}$ ,  $a_1 = a_2 = 110 \text{ nm}$ ,  $b_1 = b_2 = 80 \text{ nm}$ ,  $\rho_0 = 80 \text{ nm}$ ,  $c = 250 \text{ nm}$  和  $h = 20 \text{ nm}$  条件下，五个最低阶模式的合成、电场  $z$  分量和电场强度分布图。其中，表 1(a)–1(e) 显示的是五个最低阶模式的合成，这五个模式分别命名为模式 1 (Mode1)、模式 2 (Mode2)、模式 3 (Mode3)、模

式 4 (Mode4) 和模式 5 (Mode5)。从表中可以看出，模式 1 是由圆形纳米线的基模和椭圆形纳米线的基模合成的；模式 2 是由圆形纳米线的一阶模和椭圆形纳米线的基模合成的；模式 3 是圆形纳米线的一阶模和椭圆形纳米线的一阶模合成的；模式 4 是圆形纳米线的基模和椭圆形纳米线的一阶模合成的；模式 5 是圆形纳米线的一阶模和椭圆形纳米线的一阶模合成的。表 1(f)–1(j) 分别是五个最低阶模式所对应的  $z$  方向的电场分量  $E_z$  的场分布，表 1(k)–1(o) 是五个最低阶模式的电场强度  $|E|$  的分布。

表 1 在  $\lambda = 7 \mu\text{m}$ ,  $E_f = 0.5 \text{ eV}$ ,  $a_1 = a_2 = 110 \text{ nm}$ ,  $b_1 = b_2 = 80 \text{ nm}$ ,  $\rho_0 = 80 \text{ nm}$ ,  $c = 250 \text{ nm}$  和  $h = 20 \text{ nm}$  条件下，五个最低阶模式的合成、电场  $z$  分量和电场强度分布图

Tab. 1 Under the conditions of  $\lambda = 7 \mu\text{m}$ ,  $E_f = 0.5 \text{ eV}$ ,  $a_1 = a_2 = 110 \text{ nm}$ ,  $b_1 = b_2 = 80 \text{ nm}$ ,  $\rho_0 = 80 \text{ nm}$ ,  $c = 250 \text{ nm}$  and  $h = 20 \text{ nm}$ , the composite, electric field  $z$  component and electric field intensity distribution of the five lowest-order modes

模式的合成	$E_z$	$ E $
(a) Mode 1 	(f) Mode 1 $E_z$ 	(k) $ E $ 
(b) Mode 2 	(g) Mode 2 $E_z$ 	(l) $ E $ 
(c) Mode 3 	(h) Mode 3 $E_z$ 	(m) $ E $ 
(d) Mode 4 	(i) Mode 4 $E_z$ 	(n) $ E $ 
(e) Mode 5 	(j) Mode 5 $E_z$ 	(o) $ E $ 

### 2.2 工作波长 $\lambda$ 对传输特性的影响

讨论工作波长对模式传输特性的影响。通过库珀公式可以得知，工作波长对石墨烯电导率有较大影响，波长的增大会大幅度降低石墨烯的带内电导率<sup>[32]</sup>，使得传播损耗减小。工作波长的大小会影响波导内场的耦合程度，从而影响波导的传输特性。

图 2 是在  $E_f = 0.5 \text{ eV}$ ， $a_1 = a_2 = 110 \text{ nm}$ ， $b_1 = b_2 = 80 \text{ nm}$ ， $\rho_0 = 80 \text{ nm}$ ， $c = 250 \text{ nm}$  和  $h = 20 \text{ nm}$  条件下，5 个最低阶模式的有效折射率实部、传播长度以及品质因数随工作波长的变化趋势图以及模式 1 在波长为  $6.6 \mu\text{m}$ 、 $7.0 \mu\text{m}$  和  $7.4 \mu\text{m}$  情况下的电场强度分布图。在图 2(a)–2(c) 中，波长在介于  $6.6 \mu\text{m}$  至  $7.4 \mu\text{m}$  之间，模式 1–模式 5 的有效折射率实部随着波长的增大而呈现单调减小趋势，传播长度单调递增。模式 1 和模式 2 的品质因数缓慢增加，模式 3 的品质因数几乎不变，模式 4 和模式 5 的品质因数单调递减。这些现象均可以通过场分布的变化来解释。以模式 1 为例，从图 2(d)–2(f) 可以看出：随着波长的增大，场分布逐渐由石墨烯表面扩散到波导之间的空间，模式的传输损耗减小，传播长度变长，品质因数缓慢增加。

### 2.3 费米能 $E_f$ 对传输特性的影响

讨论费米能对模式传输特性的影响。通过改变化学掺杂和施加电压的方式可以调节石墨烯的费米能级<sup>[33]</sup>。由库珀公式可以推知，石墨烯的费米能增大，石墨烯的电导率的带间贡献大大降低，从而导致传输损耗减小，模式的传播常数及品质因数发生变化。

图 3 为  $\lambda = 7 \mu\text{m}$ ， $a_1 = a_2 = 110 \text{ nm}$ ， $b_1 = b_2 = 80 \text{ nm}$ ， $\rho_0 = 80 \text{ nm}$ ， $c = 250 \text{ nm}$  和  $h = 20 \text{ nm}$  条件下，5 个最低阶模式的  $\text{Re}(n_{\text{eff}})$ 、 $L_{\text{prop}}$ 、 $FOM$  随费米能  $E_f$  的变化关系图，以及模式 1 在费米能为  $0.47 \text{ eV}$ 、 $0.51 \text{ eV}$  和  $0.55 \text{ eV}$  情况下的电场强度分布图。从图 3(a)–3(c) 可以看出随着费米能从  $0.47 \text{ eV}$  增大到  $0.55 \text{ eV}$ ，模式 1 至模式 5 的有效折射率实部单调减小，传播长度单调增大，品质因数单调增大。这些现象可以由场分布的变化来解释。以模式 1 为例，从图 3(d)–3(f) 的场分布看出，随着费米能的增大，波导对场的束缚性减弱，场分布由石墨烯表面扩散到波导之间的空间，模式的传输损耗减小，导致了传播长度的增大，品质因数的增加。

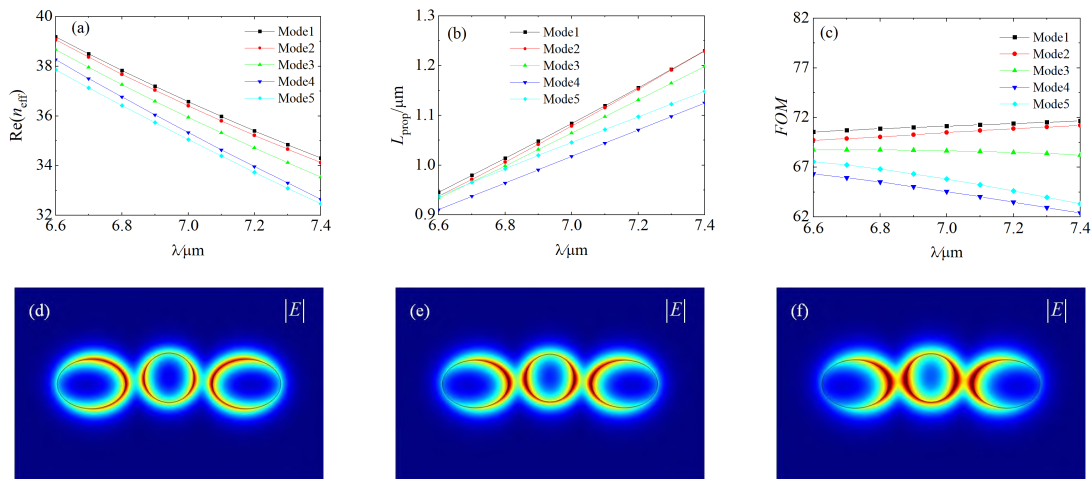


Fig. 2 Under the conditions of  $E_f = 0.5 \text{ eV}$ ， $a_1 = a_2 = 110 \text{ nm}$ ， $b_1 = b_2 = 80 \text{ nm}$ ， $\rho_0 = 80 \text{ nm}$ ， $c = 250 \text{ nm}$  and  $h = 20 \text{ nm}$ ，the relationship between (a)  $\text{Re}(n_{\text{eff}})$  (b)  $L_{\text{prop}}$  and (c)  $FOM$  of the five lowest-order modes with the working wavelength  $\lambda$ ; At the wavelength of (d)  $6.6 \mu\text{m}$  (e)  $7.0 \mu\text{m}$  and (f)  $7.4 \mu\text{m}$ ，electric field intensity distribution of Mode 1

图 2  $E_f = 0.5 \text{ eV}$ ， $a_1 = a_2 = 110 \text{ nm}$ ， $b_1 = b_2 = 80 \text{ nm}$ ， $\rho_0 = 80 \text{ nm}$ ， $c = 250 \text{ nm}$  和  $h = 20 \text{ nm}$  条件下，5 个最低阶模式的 (a) 有效折射率实部  $\text{Re}(n_{\text{eff}})$  (b) 传播长度  $L_{\text{prop}}$  和 (c) 品质因数  $FOM$  随工作波长  $\lambda$  的变化关系图；模式 1 在波长为 (d)  $6.6 \mu\text{m}$  (e)  $7.0 \mu\text{m}$  和 (f)  $7.4 \mu\text{m}$  情况下的电场强度分布图

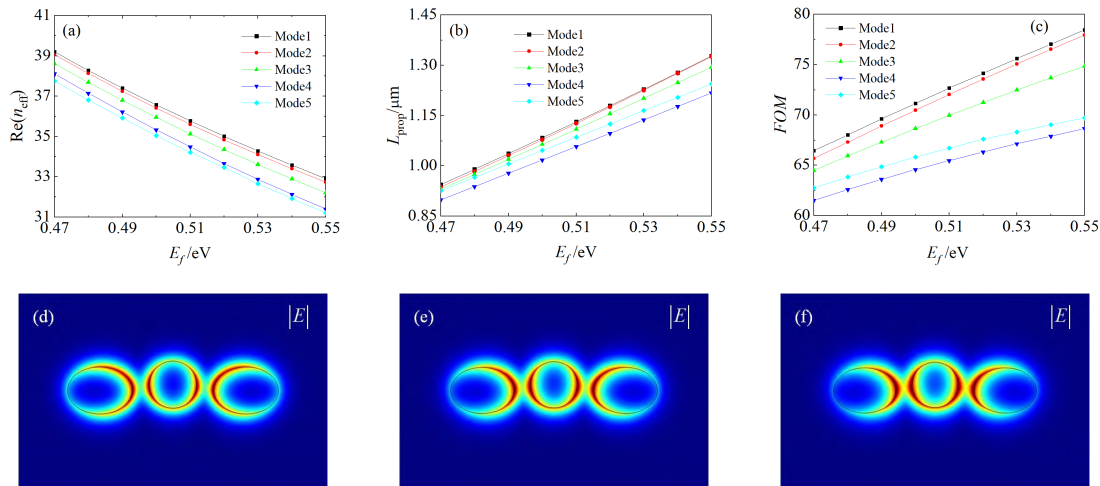


Fig. 3 Under the conditions of  $\lambda = 7 \mu\text{m}$ ,  $a_1 = a_2 = 110 \text{ nm}$ ,  $b_1 = b_2 = 80 \text{ nm}$ ,  $\rho_0 = 80 \text{ nm}$ ,  $c = 250 \text{ nm}$  and  $h = 20 \text{ nm}$ , the relationship between (a)  $\text{Re}(n_{\text{eff}})$  (b)  $L_{\text{prop}}$  and (c)  $FOM$  with the Fermi energy  $E_f$  of the five lowest-order modes; The electric field intensity distribution of Mode1 when the Fermi energy is (d) 0.47 eV (e) 0.51 eV and (f) 0.55 eV

图3  $\lambda = 7 \mu\text{m}$ ,  $a_1 = a_2 = 110 \text{ nm}$ ,  $b_1 = b_2 = 80 \text{ nm}$ ,  $\rho_0 = 80 \text{ nm}$ ,  $c = 250 \text{ nm}$  和  $h = 20 \text{ nm}$  条件下, 5个最低阶模式的 (a) 有效折射率实部  $\text{Re}(n_{\text{eff}})$  (b) 传播长度  $L_{\text{prop}}$  和 (c) 品质因数  $FOM$  随费米能  $E_f$  的变化关系图。模式1在费米能为 (d) 0.47 eV (e) 0.51 eV 和 (f) 0.55 eV 情况下的电场强度分布图

## 2.4 结构参数对传输特性的影响

讨论结构参数对传输特性的影响。通过调节圆柱纳米线半径、椭圆纳米线半长轴、半短轴长度、间距以及圆柱纳米线的高度, 可以改变石墨烯与场之间的耦合强度, 进一步调节模式的传输特性。

### 2.4.1 半径 $\rho_0$ 对传输特性的影响

本小节讨论中间圆柱形纳米线的半径对模式传输特性的影响。改变圆柱纳米线的半径可以影响圆柱形纳米线与椭圆纳米线之间的距离, 会影响波导的传输特性。图4是在  $\lambda = 7 \mu\text{m}$ ,  $E_f = 0.5 \text{ eV}$ ,  $a_1 = a_2 = 110 \text{ nm}$ ,  $b_1 = b_2 = 80 \text{ nm}$ ,  $c = 250 \text{ nm}$  和  $h = 20 \text{ nm}$  条件下, 5个最低阶模式的  $\text{Re}(n_{\text{eff}})$ 、 $L_{\text{prop}}$  和  $FOM$  随圆柱纳米线半径变化的趋势图以及模式1在圆柱半径为 45 nm、65 nm 和 85 nm 情况下的电场强度分布图。从图4(a)–图4(c)中可以看出, 随着圆柱纳米线半径从 45 nm 增大到 85 nm, 除模式3外的四个模式的有效折射率实部单调增大, 而模式3的几乎保持不变。模式1与模式2的传播长度随半径的增加而单调增加, 模式3的几乎保持不变, 模式4与模式5的先增大后减小。模式1和模式2的品质因数随半径的增大而单调增大, 模式3的几乎保持不变, 模式4和模式5的先增加后减小。这些现象可以用场分布来解释。以模式1为例, 图

4(d)–图4(f)中, 随着圆柱半径的增大, 场的耦合作用增强, 场分布扩散到了纳米线之间的空间, 场与石墨烯之间的作用变弱, 传输损耗减小, 传播长度变大。

### 2.4.2 半长轴对传输特性的影响

本小节讨论椭圆纳米线半长轴对模式传输特性的影响。椭圆纳米线半长轴的改变会影响纳米线间的横向距离, 影响纳米线上分布的场的耦合, 从而影响波导的传输特性。图5是在  $\lambda = 7 \mu\text{m}$ ,  $E_f = 0.5 \text{ eV}$ ,  $b_1 = b_2 = 80 \text{ nm}$ ,  $\rho_0 = 80 \text{ nm}$ ,  $c = 250 \text{ nm}$  和  $h = 20 \text{ nm}$  条件下, 5个最低阶模式的  $\text{Re}(n_{\text{eff}})$ 、 $L_{\text{prop}}$  和  $FOM$  随椭圆纳米线半长轴变化的关系图, 以及模式1在半长轴为 100 nm、108 nm 和 116 nm 情况下的电场强度分布图。在图5(a)–5(c)中, 随着半长轴从 100 nm 增大到 116 nm 过程中, 5个模式的有效折射率实部都增大, 模式1–模式2的传播长度增大, 模式3和模式4的传播长度增长较为缓慢, 模式5的传播长度单调减小。模式1–模式4的品质因数随着椭圆纳米线半长轴的增大而单调增大, 模式5的品质因数变化比较小。可以通过电场分布来解释这些现象。以模式1为例, 从图5(d)–5(f)能看出, 在椭圆波导的半长轴为 100 nm、108 nm、116 nm 的条件下, 电场

从纳米线波导表面逐渐向纳米线波导之间转移，这 耗减小，波导的传播长度增大，传输性能优化。表明场与石墨烯的相互作用有所减弱，导致传输损

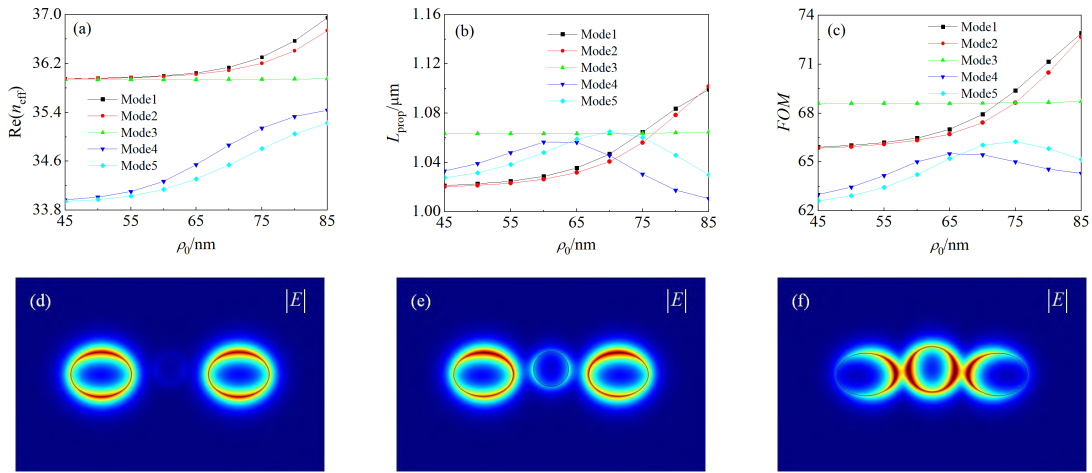


Fig. 4 Under the conditions of  $\lambda = 7 \mu\text{m}$ ,  $E_f = 0.5 \text{ eV}$ ,  $a_1 = a_2 = 110 \text{ nm}$ ,  $b_1 = b_2 = 80 \text{ nm}$ ,  $c = 250 \text{ nm}$  and  $h = 20 \text{ nm}$ , the relationship between (a)  $\text{Re}(n_{\text{eff}})$  (b)  $L_{\text{prop}}$  and (c)  $FOM$  of the five lowest-order modes with the radius  $\rho_0$ ; The electric field intensity distribution of Mode1 when the radius of the middle cylinder is (d) 45 nm (e) 65 nm and (f) 85 nm

图 4  $\lambda = 7 \mu\text{m}$ ,  $E_f = 0.5 \text{ eV}$ ,  $a_1 = a_2 = 110 \text{ nm}$ ,  $b_1 = b_2 = 80 \text{ nm}$ ,  $c = 250 \text{ nm}$  和  $h = 20 \text{ nm}$  条件下, 5 个最低阶模式的 (a) 有效折射率实部  $\text{Re}(n_{\text{eff}})$  (b) 传播长度  $L_{\text{prop}}$  和 (c) 品质因数  $FOM$  随半径  $\rho_0$  的变化关系图; 当中间圆柱半径为 (d) 45nm (e) 65nm 和 (f) 85nm 时, 模式 1 的电场强度分布图

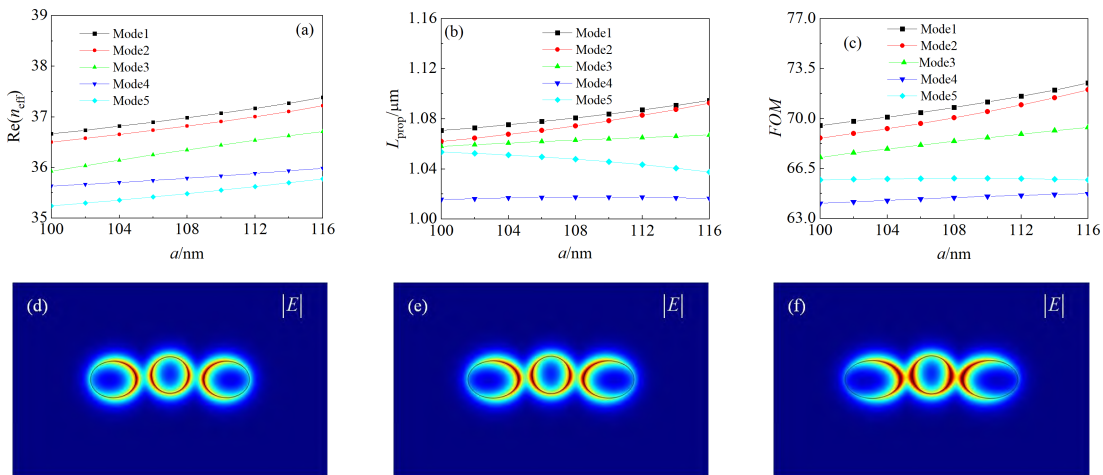


Fig. 5 Under the conditions of  $\lambda = 7 \mu\text{m}$ ,  $E_f = 0.5 \text{ eV}$ ,  $b_1 = b_2 = 80 \text{ nm}$ ,  $\rho_0 = 80 \text{ nm}$ ,  $c = 250 \text{ nm}$  and  $h = 20 \text{ nm}$ , the relationship between (a)  $\text{Re}(n_{\text{eff}})$  (b)  $L_{\text{prop}}$  and (c)  $FOM$  with the semi-major axis of the elliptical nanowire  $a$  for the five lowest-order modes;

Distribution of electric field intensity of Mode1 when the semi-major axis is (d) 100 nm (e) 108 nm and (f) 116 nm

图 5  $\lambda = 7 \mu\text{m}$ ,  $E_f = 0.5 \text{ eV}$ ,  $b_1 = b_2 = 80 \text{ nm}$ ,  $\rho_0 = 80 \text{ nm}$ ,  $c = 250 \text{ nm}$  和  $h = 20 \text{ nm}$  条件下, 5 个最低阶模式的 (a) 有效折射率实部  $\text{Re}(n_{\text{eff}})$  (b) 传播长度  $L_{\text{prop}}$  和 (c) 品质因数  $FOM$  随椭圆纳米线半长轴  $a$  的变化关系图; 模式 1 在半长轴 (d) 100 nm (e) 108 nm 和 (f) 116 nm 情况下的电场强度分布图

### 2.4.3 半短轴对传输特性的影响

本小节讨论椭圆柱形纳米线半短轴对模式传输特性的影响。改变椭圆柱半短轴会改变纳米线纵向

方向的间距, 也影响纳米线上分布的场的耦合, 从而影响波导的传输特性。图 6 是在  $\lambda = 7 \mu\text{m}$ ,  $E_f = 0.5 \text{ eV}$ ,  $a_1 = a_2 = 110 \text{ nm}$ ,  $\rho_0 = 80 \text{ nm}$ ,  $c = 250 \text{ nm}$

和  $h = 20 \text{ nm}$  条件下, 5 个最低阶模式的  $\text{Re}(n_{\text{eff}})$ 、 $L_{\text{prop}}$  和  $FOM$  随椭圆纳米线半短轴变化的关系图, 以及模式 1 在半短轴为 74 nm、80 nm 和 88 nm 情况下的电场强度分布图。在图 6(a)–图 6(c) 中, 半短轴从 74 nm 增大到 88 nm, 除了模式 3 之外, 其余四个模式的有效折射率实部、传播长度和品质因数均呈单调增加的趋势, 而模式 3 的有效折射率实

部、传播长度和品质因数呈单调减小的趋势。这些现象都可以用场分布来解释。以模式 1 为例, 从图 6(d)–图 6(f) 可以看出, 随着椭圆纳米线半短轴长度的增加, 椭圆纳米线与圆柱纳米线之间的场的耦合有所增强, 石墨烯表面处分布的场有所减弱, 传输损耗变小, 传播长度与品质因数在这种情况下有所提升。

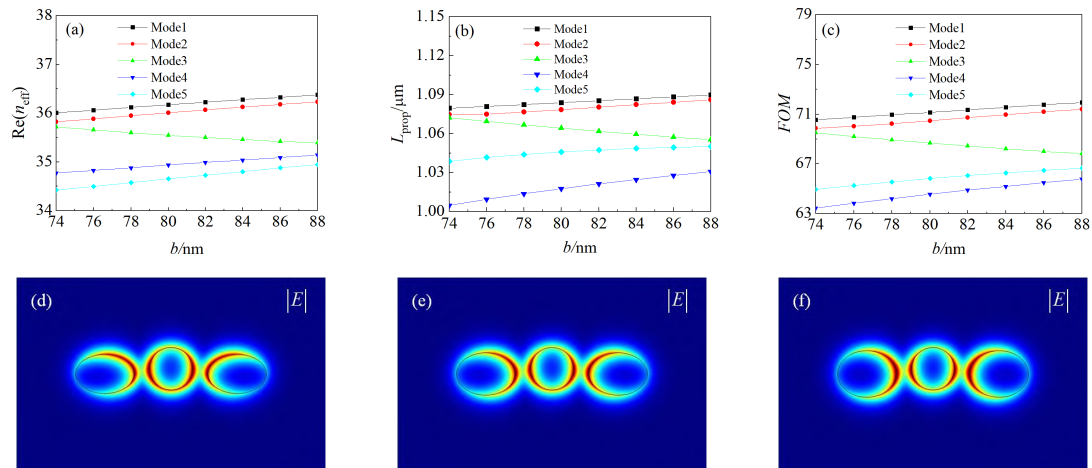


Fig. 6 Under the conditions of  $\lambda = 7 \mu\text{m}$ ,  $E_f = 0.5 \text{ eV}$ ,  $a_1 = a_2 = 100 \text{ nm}$ ,  $\rho_0 = 80 \text{ nm}$ ,  $c = 250 \text{ nm}$  and  $h = 20 \text{ nm}$ , the relationship between (a)  $\text{Re}(n_{\text{eff}})$  (b)  $L_{\text{prop}}$  and (c)  $FOM$  with the semi-minor axis  $b$  of the elliptical nanowire for the five lowest-order modes; The electric field intensity distribution of Mode1 when the short axis is (d) 74 nm (e) 80 nm and (f) 88 nm

图 6  $\lambda = 7 \mu\text{m}$ ,  $E_f = 0.5 \text{ eV}$ ,  $a_1 = a_2 = 100 \text{ nm}$ ,  $\rho_0 = 80 \text{ nm}$ ,  $c = 250 \text{ nm}$  和  $h = 20 \text{ nm}$  条件下, 5 个最低阶模式的 (a) 有效折射率实部  $\text{Re}(n_{\text{eff}})$  (b) 传播长度  $L_{\text{prop}}$  和 (c) 品质因数  $FOM$  随椭圆纳米线半短轴  $b$  的变化关系图; 模式 1 在半短轴 (d) 74 nm (e) 80 nm 和 (f) 88 nm 情况下的电场强度分布图

#### 2.4.4 间距 $c$ 对传输特性的影响

本小节讨论间距  $c$  对模式传输特性的影响。间距  $c$  的改变影响到三根纳米线之间的距离, 影响场的耦合作用的大小, 从而影响模式的传输特性。图 7 是在  $\lambda = 7 \mu\text{m}$ ,  $E_f = 0.5 \text{ eV}$ ,  $a_1 = a_2 = 110 \text{ nm}$ ,  $b_1 = b_2 = 80 \text{ nm}$ ,  $\rho_0 = 80 \text{ nm}$  和  $h = 20 \text{ nm}$  条件下, 5 个最低阶模式的有效折射率实部、传播长度和品质因数随间距的关系图, 以及模式 1 在间距为 250 nm、262 nm 和 274 nm 情况下的电场强度分布图。在图 7(a)–图 7(c) 中, 随着间距  $c$  从 250 nm 增大到 274 nm 的过程中, 模式 1、模式 2、模式 5 的有效折射率实部减小, 模式 3 与模式 4 的变化较小。模式 1 与模式 2 的传播长度随着间距  $c$  的增大而单调减小。模式 3 的几乎保持不变, 模式 4 与模式 5 的单调增加, 其中模式 4 的增加幅度较小。模式 1 与模式 2 的品质因数随着间距  $c$  的增加而单调减小,

模式 3 的几乎不变, 模式 4 与模式 5 的先增大再减小, 模式 4 的变化幅度较小。图 7(d)–图 7(f) 中模式 1 的场分布的变化可以解释其传输特性的变化。当间距  $c$  分别为 250 nm、262 nm 和 274 nm 的时候, 可以明显看出, 场与石墨烯之间的作用增强, 电场趋向于分布在椭圆与圆柱纳米线表面, 电场与石墨烯的耦合作用进一步增强, 传输损耗增大, 传播长度减小, 品质因数减小。

#### 2.4.5 高度 $h$ 对传输特性的影响

本小节讨论圆柱形纳米线的高度对传输特性的影响。通过改变圆柱形纳米线的高度, 影响纳米线上分布的场的耦合作用, 从而影响模式的传输性能。图 8 是在  $\lambda = 7 \mu\text{m}$ ,  $E_f = 0.5 \text{ eV}$ ,  $a_1 = a_2 = 110 \text{ nm}$ ,  $b_1 = b_2 = 80 \text{ nm}$ ,  $\rho_0 = 80 \text{ nm}$ ,  $c = 250 \text{ nm}$  条件下, 5 个最低阶模式的有效折射率实部、传播长度以及品质因数随高度  $h$  的变化关系图以及模式 1 在圆柱

的高度  $h$  为 0 nm、40 nm 和 80 nm 情况下的电场强度分布图。从图 8(a)–图 8(c) 可以看出，随着圆柱高度  $h$  的增加，模式 1、模式 2 和模式 5 对应的有效折射率曲线随高度  $h$  呈减小的趋势，模式 3 和模式 4 对应的有效折射率曲线随高度  $h$  的变化不明显。模式 1 和模式 2 的传播长度呈减小的趋势，模式 3

的传播长度几乎不受圆柱高度变化的影响，模式 4 和模式 5 的传播长度呈增大的趋势。模式 1 和模式 2 品质因数呈减小的趋势，模式 3、模式 4 和模式 5 的品质因数几乎不受圆柱高度变化的影响。这些现象均可以通过场分布的变化来解释。以模式 1 为例，可以由图 8(d)–图 8(f) 的场分布看出，随着圆柱的

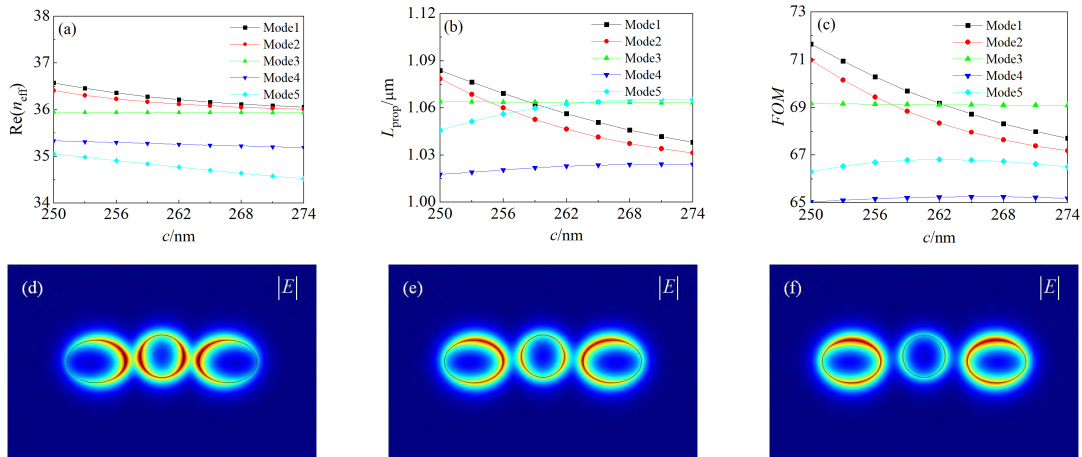


Fig. 7 Under the conditions of  $\lambda = 7 \mu\text{m}$ ,  $E_f = 0.5 \text{ eV}$ ,  $a_1 = a_2 = 110 \text{ nm}$ ,  $b_1 = b_2 = 80 \text{ nm}$ ,  $\rho_0 = 80 \text{ nm}$ , and  $h = 20 \text{ nm}$ , the relationship between (a)  $\text{Re}(n_{\text{eff}})$  (b)  $L_{\text{prop}}$  and (c)  $FOM$  with the distance  $c$  of the five lowest-order modes; The electric field intensity distribution of Mode1 when the distance is (d) 250 nm (e) 262 nm and (f) 274 nm

图 7  $\lambda = 7 \mu\text{m}$ ,  $E_f = 0.5 \text{ eV}$ ,  $a_1 = a_2 = 110 \text{ nm}$ ,  $b_1 = b_2 = 80 \text{ nm}$ ,  $\rho_0 = 80 \text{ nm}$  和  $h = 20 \text{ nm}$  条件下，5 个最低阶模式的 (a) 有效折射率实部  $\text{Re}(n_{\text{eff}})$  (b) 传播长度  $L_{\text{prop}}$  和 (c) 品质因数  $FOM$  随间距  $c$  的变化关系图；模式 1 在间距为 (d) 250 nm (e) 262 nm 和 (f) 274 nm 情况下的电场强度分布图

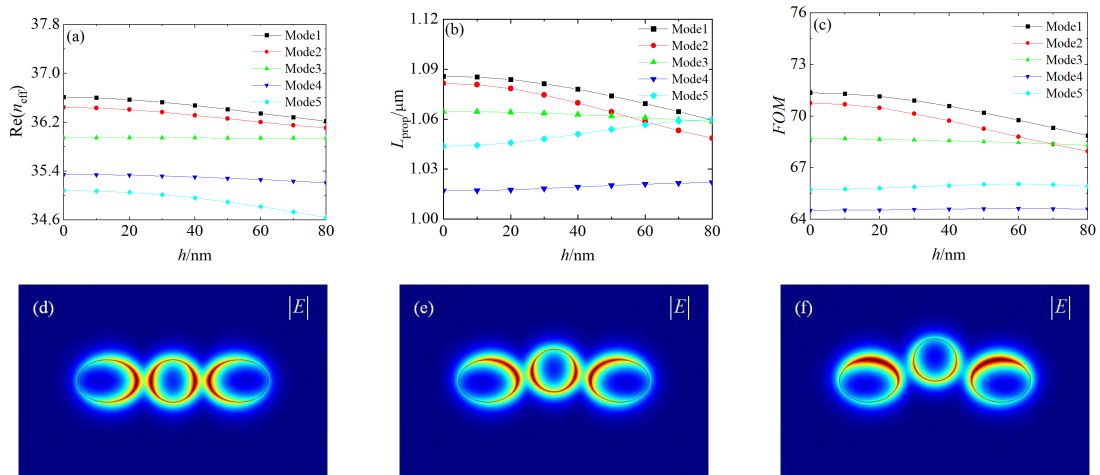


Fig. 8 Under the conditions of  $\lambda = 7 \mu\text{m}$ ,  $E_f = 0.5 \text{ eV}$ ,  $a_1 = a_2 = 110 \text{ nm}$ ,  $b_1 = b_2 = 80 \text{ nm}$ ,  $\rho_0 = 80 \text{ nm}$ , and  $c = 250 \text{ nm}$ , the relationship between (a)  $\text{Re}(n_{\text{eff}})$  (b)  $L_{\text{prop}}$  and (c)  $FOM$  with height  $h$  for the five lowest-order modes; The electric field intensity distribution of Mode1 when the height of the cylindrical nanowire is (d) 0 nm (e) 40 nm and (f) 80 nm

图 8  $\lambda = 7 \mu\text{m}$ ,  $E_f = 0.5 \text{ eV}$ ,  $a_1 = a_2 = 110 \text{ nm}$ ,  $b_1 = b_2 = 80 \text{ nm}$ ,  $\rho_0 = 80 \text{ nm}$  和  $c = 250 \text{ nm}$  条件下，5 个最低阶模式的 (a) 有效折射率实部  $\text{Re}(n_{\text{eff}})$  (b) 传播长度  $L_{\text{prop}}$  和 (c) 品质因数  $FOM$  随高度  $h$  的变化关系图；模式 1 在圆柱纳米线高度为 (d) 0 nm (e) 40 nm 和 (f) 80 nm 情况下的电场强度分布图



高度由 0 nm 升高到 80 nm 的过程中, 场分布逐渐向圆柱下表面转移, 椭圆柱表面的场分布逐渐向与圆柱靠近的一侧偏移, 这使得场主要集中到了石墨烯表面, 场的耦合变弱, 场与石墨烯之间的相互作用变强, 这使得传输损耗增加, 传输长度减小, 品质因数减小。

## 2.5 传输特性比较

本节讨论本文设计的波导(结构一)与文献[26]设计的波导(结构二)的模式特性随工作波长和石墨烯费米能变化的比较。由于可调节的几何参数相对较多, 本文设计的波导结构的模式特性优于结构二。

首先取结构一参数为:  $E_f = 0.5$  eV,  $a_1 = a_2 = 110$  nm,  $b_1 = b_2 = 80$  nm,  $\rho_0 = 80$  nm,  $c = 250$  nm 和  $h = 20$  nm, 取结构二的参数为:  $E_f = 0.5$  eV,  $\rho_1 = \rho_2 = 80$  nm,  $\rho_0 = 80$  nm,  $c = 250$  nm 和  $h = 20$  nm。图 9 给出了两种结构所支持的模式 1 的有效折射率实部、传播长度和品质因数随工作波长  $\lambda$  的变化关系对比图以及两种波导在波长为  $7.0 \mu\text{m}$  处模式 1 的电场强度分布图。从图 9(a)–图 9(c) 中可以看出, 随着工作波长从  $6.6 \mu\text{m}$  增大到  $7.4 \mu\text{m}$ , 结构一与结构二的模式 1 的有效折射率实部单调减小,

传播长度单调增加, 结构一的模式 1 的品质因数单调增加, 结构二的模式 1 的品质因数单调减小。在这个过程中, 结构一的模式 1 的有效折射率和品质因数始终比结构二的大。从图 9(d) 和图 9(e) 可以看到, 在波长为  $7.0 \mu\text{m}$  处, 结构一与结构二相比, 场分布在波导之间较多, 场与石墨烯的相互作用相对结构二较小, 因而结构一的传输损耗小, 传播长度长, 品质因数大。

其次取结构一的参数为:  $\lambda = 7 \mu\text{m}$ ,  $a_1 = a_2 = 110$  nm,  $b_1 = b_2 = 80$  nm,  $\rho_0 = 80$  nm,  $c = 250$  nm 和  $h = 20$  nm, 取结构二的参数为:  $\lambda = 7 \mu\text{m}$ ,  $\rho_1 = \rho_2 = 80$  nm,  $\rho_0 = 80$  nm,  $c = 250$  nm 和  $h = 20$  nm。图 10(a)–图 10(c) 为费米能在  $0.47$  eV 增长到  $0.55$  eV 时, 结构一与结构二所支持的模式 1 的有效折射率实部、传播长度与品质因数随费米能的变化趋势图。可以看出, 随着费米能的增加, 结构一的模式 1 的有效折射率实部, 传播长度, 品质因数一直优于结构二。这种现象可以通过场分布解释。图 10(d)–图 10(e) 是费米能为  $0.53$  eV 时结构一与结构二的模式 1 的场分布, 结构一的场更多地分布在纳米线之间, 结构二的场更多地分布在纳米线表面, 所以结构一的传输损耗更小, 传播长度及品质因数更优。

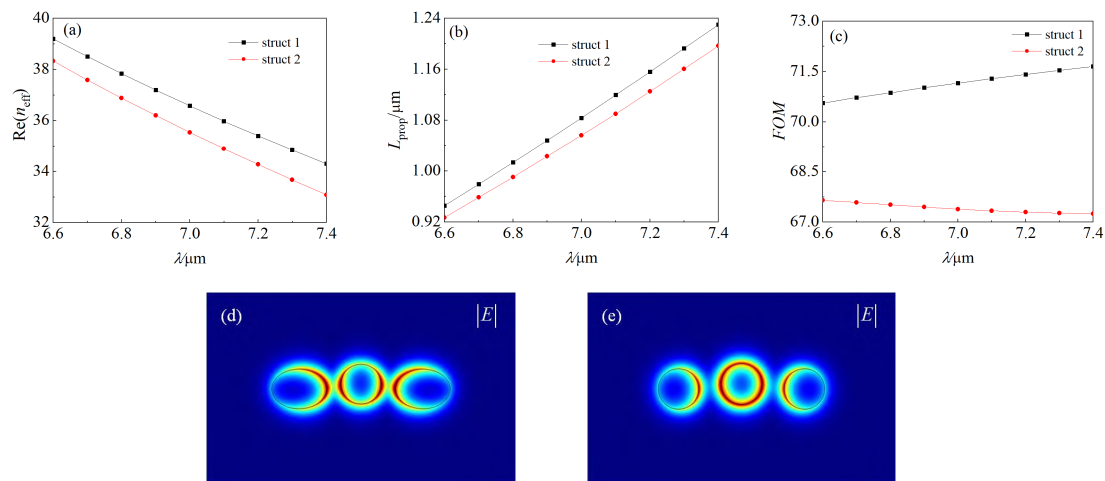


Fig. 9 Dependence of (a)  $\text{Re}(n_{\text{eff}})$  (b)  $L_{\text{prop}}$  and (c)  $FOM$  with wavelength  $\lambda$  of Mode 1 supported by the two structures; The electric field intensity distribution of Mode 1 supported by (d) three hybrid nanowires and (e) three cylindrical nanowires at wavelength of  $7.0 \mu\text{m}$

图 9 两种结构所支持的模式 1 的 (a) 有效折射率实部  $\text{Re}(n_{\text{eff}})$  (b) 传播长度  $L_{\text{prop}}$  和 (c) 品质因数  $FOM$  随工作波长  $\lambda$  的变化关系对比图; (d) 三根混合型纳米线和 (e) 三根圆形纳米线的模式 1 在波长为  $7.0 \mu\text{m}$  处的电场强度分布图

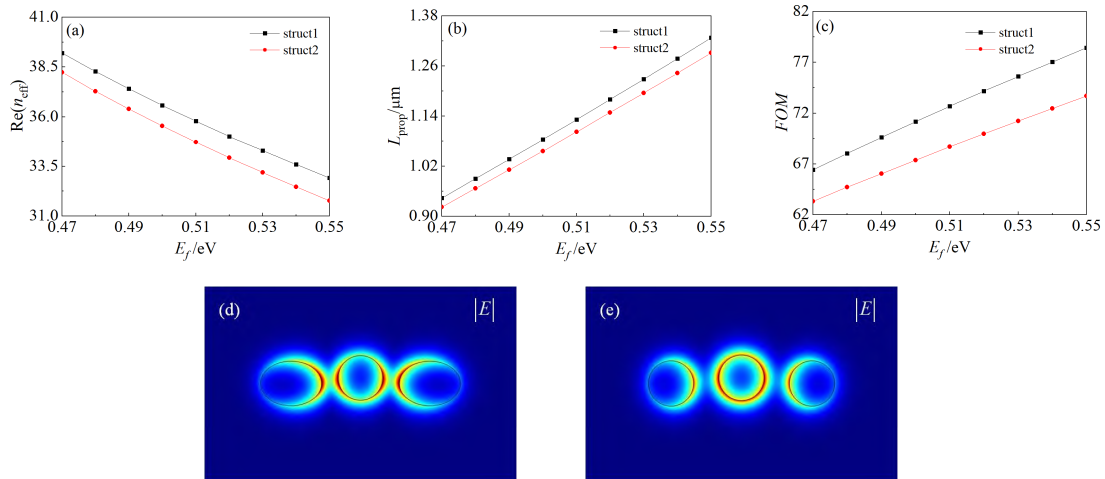


Fig. 10 Dependence of (a)  $\text{Re}(n_{\text{eff}})$  (b)  $L_{\text{prop}}$  and (c)  $FOM$  with the Fermi energy of Mode 1 supported by the two structures; The electric field intensity distribution of Mode 1 supported by (d) three hybrid nanowires and (e) three cylindrical nanowires when the Fermi energy is 0.53 eV

图 10 两种结构所支持的模式 1 的 (a) 有效折射率实部  $\text{Re}(n_{\text{eff}})$  (b) 传播长度  $L_{\text{prop}}$  和 (c) 品质因数  $FOM$  随石墨烯费米能  $E_f$  的变化关系对比图; (d) 本文设计的波导和 (e) 文献 [26] 设计的波导的模式 1 在费米能为 0.53 eV 处的电场强度分布图

### 3 结论

设计了一种由涂覆石墨烯的两根椭圆柱形和一根圆柱形电介质纳米线构成的波导, 其导波机制是石墨烯表面等离激元。对其所支持的模式特性的分析表明: 波导所支持的五个最低阶模式均可由圆形纳米线的和椭圆形纳米线的基模以及一阶模合成。工作波长对石墨烯的电导率有较大影响, 对波导内场的耦合程度也有影响, 当波长逐渐增大时, 五个最低阶模式的传输特性会发生变化, 而且保持基本一致的变化趋势。石墨烯的费米能对其电导率有较大影响, 当费米能逐渐增大时, 五个最低阶模式的传输特性也会发生变化, 而且保持基本一致的变化趋势。本文设计的波导的结构参数包括圆柱纳米线半径、椭圆柱纳米线半长轴、半短轴长度、中心间距以及圆柱纳米线的高度。由于这些模式的场分布

不同, 结构参数的变化对它们的传输特性的影响也不同。因为模式 1 和模式 2 的场主要集中于椭圆形纳米线和圆形纳米线之间的空间, 所以当波导的结构参数变化时, 尤其是椭圆柱纳米线半长轴、中心间距和圆柱纳米线的高度变化时, 传输特性变化相对较大。因为模式 3 的场主要分布于椭圆形纳米线的上下两侧, 所以当结构参数变化时, 传输特性变化相对较小。因为模式 4 和模式 5 的场分布于两个区域, 一是椭圆形纳米线和圆形纳米线之间的空间, 二是两根椭圆形纳米线的外侧区域, 所以当波导的结构参数变化时, 尤其是椭圆柱纳米线半长轴、中心间距和圆柱纳米线的半径变化时, 其传输特性变化相对较大。本文设计的波导具有相对较多的可调几何参数, 性能优于由涂覆石墨烯的三根圆形电介质纳米线构成的波导, 有望在微纳光学器件集成和传感器领域得到应用。

### 参考文献

- [1] BARNES W L, DEREUX A, EBBESEN T W. Surface plasmon subwavelength optics[J]. *Nature*, 2003, **424**(6950): 824–830. DOI: 10.1038/nature01937.
- [2] NOVOSELOV K S, GEIM A K, MOROZOV S V, *et al.* Two-dimensional gas of massless Dirac fermions in graphene[J]. *Nature*, 2003, **438**(7065): 197–200. DOI: 10.1038/nature04233.
- [3] CHRISTENSEN J, MANJAVACAS A, THONGRATTANASIRI S, *et al.* Graphene plasmon waveguiding and hybridization in individual and paired nanoribbons[J]. *ACS Nano*, 2012, **6**(1): 431–440. DOI: 10.1021/nn2037626.

- [4] JU L, GENG B S, HORNG J, *et al.* Graphene plasmonics for tunable terahertz,metamaterials[J]. *Nature Nanotechnology*, 2011, **6**(10): 630–634. DOI: 10.1038/NNANO.2011.146.
- [5] JABLAN M, BULJAN H, SOLJAI H. Plasmonics in graphene at infrared frequencies[J]. *Phys Rev B*, 2009, **80**(24): 245435.
- [6] LIU P H, ZHANG X Z, MA Z H, *et al.* Surface plasmon modes in graphene wedge and groove waveguides[J]. *Opt Express*, 2013, **21**(26): 32432–32440. DOI: 10.1364/OE.21.032432.
- [7] GAO Y X, REN G B, ZHU B F, *et al.* Single-mode graphene-coated naplasmonic waveguide[J]. *Opt Lett*, 2014, **39**(20): 5909–5912. DOI: 10.1364/OL.39.005909.
- [8] GAO Y X, REN G B, ZHU B F, *et al.* Analytical model for plasmon modes in graphene-coated nanowire[J]. *Opt Express*, 2014, **22**(20): 24322–24331. DOI: 10.1364/OE.22.024322.
- [9] 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**(05): 058101. DOI: 10.7498/aps.68.20182090.  
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**(05): 058101. (in Chinese). DOI: 10.7498/aps.68.20182090.
- [10] 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]. *Opt Lett*, 2017, **42**(11): 2078–2081. DOI: 10.1364/OL.42.002078.
- [11] 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 Phys Lett*, 2018, **15**(9): 096001.
- [12] YANG J F, YANG J J, DENG W, *et al.* Transmission properties and molecular sensing application of CGPW[J]. *Opt Express*, 2015, **23**(25): 32289–32299. DOI: 10.1364/OE.23.032289
- [13] LIU J P, ZHAI X, WANG L L, *et al.* Analysis of mid-infrared surface plasmon modes in a graphene-based cylindrical hybrid waveguide[J]. *Plasmonics*, 2015, **11**(3): 703–711. DOI: 10.1007/s11468-015-0095-z.
- [14] LIU J P, ZHAI X, XIE F, *et al.* Analytical model of mid-infrared surface plasmon modes in a cylindrical long-range waveguide with double-layer graphene[J]. *J Lightwave Technology*, 2017, **35**(10): 1971–1979. DOI: 10.1109/JLT.2016.2645239.
- [15] XING R, JIAN S S. Numerical analysis on tunable multilayer nanoring waveguide[J]. *IEEE Photo Techno Lett*, 2017, **29**(12): 967–970. DOI: 10.1109/LPT.2017.2700539.
- [16] CHENG X, XUE W R, WEI Z Z, *et al.* Mode analysis of a confocal elliptical dielectric nanowire coated with double-layer grapheme[J]. *Opt Communications*, 2019, **452**: 467–475. DOI: 10.1016/j.optcom.2019.07.067.
- [17] XING R, JIAN S S. The graphene square waveguide with small normalized mode area[J]. *IEEE Photo Techno Lett*, 2017, **29**(19): 1643–1646. DOI: 10.1109/LPT.2017.2743014.
- [18] ZHU B F, REN G B, YANG Y, *et al.* Field enhancement and gradient force in the graphene-coated nanowire pairs[J]. *Plasmonics*, 2014, **10**(4): 839–845. DOI: 10.1007/s11468-014-9871-4.
- [19] YE S, WANG Z X, SUN C R, *et al.* Plasmon-phonon-polariton modes and field enhancement in the graphene-coated hexagon boron nitride nanowire pairs[J]. *Opt Express*, 2018, **26**(18): 23854–23867. DOI: 10.1364/OE.26.023854.
- [20] 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 DOI: 10.7498/aps.67.20172016.  
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. (in Chinese). DOI: 10.7498/aps.67.20172016.
- [21] 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. DOI: 10.7498/aps.69.20201041.  
DONG H Y, QING 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. (in Chinese). DOI: 10.7498/aps.69.20201041.
- [22] WU D, TIAN J P. Study on the plasmonic characteristics of bow-tie type graphene-coated nanowire pair[J]. *Optik*, **156**: 689–695. DOI: 10.1016/j.ijleo.2017.12.003.
- [23] XING R, JIAN S S. Numerical analysis on the multilayer nanoring waveguide pair[J]. *IEEE Photo Techno Lett*, 2016, **28**(24): 2779–2782. DOI: 10.1109/LPT.2016.2623274.

- [24] 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. DOI: 10.1088/1674-1056/abb65c.
- [25] TENG D, WANG Y, XU T, *et al.* Symmetric Graphene Dielectric Nanowaveguides as Ultra-Compact Photonic Structures[J]. *Nanomaterials*, 2021, **11**(5): 1281. DOI: 10.3390/nano11051281.
- [26] 卫壮志, 薛文瑞, 彭艳玲, 等. 基于涂覆石墨烯的三根电介质纳米线的 THz 波导的模式特性分析 [J]. *物理学报*, 2018, **67**(10):108101. DOI: 10.7498/aps.67.20180036.
- WEI Z Z, XUE W R, PENG Y L, *et al.* Modes characteristics analysis of THz waveguides based on three graphene-coated dielectric nanowires[J]. *Acta Physica Sinica*, 2018, **67**(10):108101. (in Chinese). DOI: 10.7498/aps.67.20180036.
- [27] NIKITIN A Y, GUINEA F, GARCIA-VIDAL F J, *et al.* Fields radiated by a nanoemitter in a graphene sheet [J]. *Phys Rev B*, 2011, **84**(19): 195446. DOI: 10.1103/PhysRevB.84.195446.
- [28] CHEN B, MENG C, YANG Z, *et al.* Graphene coated ZnO nanowire optical waveguides[J]. *Optics Express*, 2014, **22**(20): 24276–24285. DOI: 10.1364/OE.22.024276.
- [29] CHEN K, ZHOU X, CHENG X, *et al.* Graphene photonic crystal fibre with strong and tunable lightmatter interaction[J]. *Nature Photonics*, 2019, **13**(11): 754–759. DOI: 10.1038/s41566-019-0492-5.
- [30] HE X, NING T, LU S, *et al.* Ultralow loss graphene-based hybrid plasmonic waveguide with deep-subwavelength confinement[J]. *Opt Express*, 2018, **26**(8): 10109–10118. DOI: 10.1364/OE.26.010109.
- [31] 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. DOI:10.1007/s11468-017-0524-2.
- [32] TENG D, WANG K, HUAN Q, *et al.* High-performance light transmission based on graphene plasmonic waveguides[J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2020, **8**(20): 6832–6838. DOI:10.1039/d0tc01125h.
- [33] VAKIL A, ENGHETA N. Transformation Optics Using Graphene[J]. *Science*, 2011, **332**(6035): 1291–1294.

## Mode Analysis of Hybrid Nanoparallel Wire Waveguides Based on Graphene Surface Plasmons

LI Ning<sup>1</sup>, XUE Wen-rui<sup>1†</sup>, DONG Hui-ying<sup>1</sup>, LI Hui-hui<sup>1</sup>, LI Chang-yong<sup>2,3</sup>

(1. School of Physical and Electronic Engineering, Shanxi University, Taiyuan 030006, China;

2. State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices,

Institute of Laser Spectroscopy, Shanxi University, Taiyuan 030006, China;

3. Collaborative Innovation Center of Extreme Optics, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

**Abstract:** A graphene surface plasmon-based nano-parallel wire waveguide composed of two elliptical cylindrical and one cylindrical dielectric nanowires coated with graphene is designed. Using the finite element method, the transmission characteristics of the five lowest-order modes supported by the waveguide are analyzed. The results show that these modes supported by the waveguide can be synthesized from the fundamental mode and the first-order mode of the graphene-coated elliptical cylindrical and cylindrical dielectric nanowires. When the working wavelength or the Fermi energy of graphene changes, the changing trend of the transmission characteristics of these modes remains the same. The transmission characteristics of mode 1 and mode 2 are relatively greatly affected by the semi-major axis of the elliptical cylindrical nanowire, the center distance, and the height of the cylindrical nanowire. The transmission characteristics of Mode 3 are relatively less affected by structural parameters. The transmission characteristics of mode 4 and mode 5 are relatively greatly affected by the semi-major axis of the elliptical cylindrical nanowire, the center distance, and the radius of the cylindrical nanowire. The waveguide designed in this paper adopts an elliptical cylindrical structure and increases adjustable parameters. Its transmission performance is better than that of a waveguide composed of three cylindrical dielectric nanowires coated with graphene. The waveguide designed in this paper has certain application prospects in the field of micro-nano optical device integration and sensors.

**Keywords:** graphene; surface plasmon polaritons; nanowire; waveguide; finite element method