

涂覆石墨烯层的双椭圆形纳米线模式特性

滕达^{1*}, 王云成¹, 郭晋康¹, 杨研蝶¹, 马文帅¹, 王凯^{2**}

¹ 郑州师范学院物理与电子工程学院, 河南 郑州 450044;

² 中国科学院上海技术物理研究所红外成像材料与探测器重点实验室, 上海 200083

摘要 针对涂覆石墨烯层的圆形纳米线结构中模式场约束特性较差, 以及难以与常用的线偏光源进行耦合, 提出两种涂覆石墨烯层的双椭圆形纳米线等离激元波导, 并采用有限元方法详细研究该结构中的石墨烯等离激元模式特性对几何参数和物理参数的依赖关系。仿真结果表明, 双椭圆形纳米线的排列方向、纳米线间距、椭圆长短轴的比值和石墨烯化学势对等离激元模式传输性能有显著影响。所提的涂覆石墨烯层的双椭圆形纳米线结构能够实现长距离传输和亚波长约束, 并在可调谐纳米光子器件和红外传感等领域具有潜在的应用价值。

关键词 光学器件; 波导; 表面等离激元; 红外波

中图分类号 O436 **文献标志码** A

doi: 10.3788/LOP57.232303

Modal Properties of Graphene-Coated Elliptical Nanowire Pairs

Teng Da^{1*}, Wang Yuncheng¹, Guo Jinkang¹, Yang Yandie¹, Ma Wenshuai¹, Wang Kai^{2**}

¹ College of Physics and Electronic Engineering, Zhengzhou Normal University, Zhengzhou, Henan 450044, China;

² Key Laboratory of Infrared Imaging Materials and Detectors, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China

Abstract Considering the poor mode-field confinement characteristics of graphene-coated circular nanowire structures and the difficulty of coupling them with commonly used linearly polarized light sources, two types of graphene-coated elliptical nanowire pairs are proposed in this work. Finite element modeling is used to study the dependence of the graphene plasmon mode characteristics on the geometric and physical parameters of the structures. Simulation results show that the arrangement direction of the double elliptical nanowires, distance between the nanowires, ratio of the long and short axes of the ellipse, and graphene chemical potential have a significant effect on the transmission performance of the plasmon mode. The proposed graphene-coated elliptical nanowire pairs can realize long-distance transmission and subwavelength confinement, and it has potential application value in the fields of tunable nanophotonic devices and infrared sensing.

Key words optical devices; waveguides; surface plasmons; infrared wave

OCIS codes 230.7370; 240.6680; 130.3060

1 引言

表面等离激元(SPs)^[1]可以实现纳米尺度的光场聚焦^[2], 即能够将光场面积压缩到远小于衍射极限的尺寸, 为此引起了大量研究人员的关注。由于波矢不匹配, 所以需要采用特定的结构来激发表面等离激元^[1]。传统的表面等离激元结构主要采用贵

金属材料, 到目前为止已提出和研究各种性能优良的等离激元波导结构, 如纳米金属线波导^[3-5]、金属间隙波导^[6-8]、介质加载等离激元波导^[9-11]、长程等离激元波导^[12]、金属沟槽/楔形等离激元波导^[13]和混合型等离激元波导^[14-16]等。然而, 这类金属结构存在一些不足。如在中远红外波段, 光场的约束特性相对较差; 一定频率下金属的光响应固定, 缺乏可

收稿日期: 2020-04-02; **修回日期:** 2020-04-25; **录用日期:** 2020-04-27

基金项目: 河南省高等学校重点科研项目(21A140029)、郑州师范学院科研启动专项、郑州师范学院开放研究基金、郑州师范学院大学生科研创新基金(2019DC003)、郑州师范学院大学生创新性实验计划项目建设专项(DCZ2019015)

* **E-mail:** tengda@zznu.edu.cn; ** **E-mail:** wangkai@mail.sitp.ac.cn

调节性。

近期,研究人员发现二维材料石墨烯在红外波段可以展现出良好的“金属”特性,其可以激发表面等离子激元^[17-18],而且石墨烯表面等离子激元相比于金属表面等离子激元更具优势^[19],如石墨烯具有可调的表面电导率、极强的模式场约束和巨大的场增强的特性,从而使其更受欢迎。目前,研究人员已经提出了多种石墨烯等离子激元结构,如石墨烯纳米带^[20]、石墨烯平行平板波导^[21]、石墨烯槽/楔^[22]、介质加载石墨烯波导^[23-25]、石墨烯金属复合波导^[26]和涂覆石墨烯层的纳米线波导^[27-28]等,其中涂覆石墨烯层的纳米线因其具有基模无截止的特性和结构简单的优点而引起研究人员的广泛关注^[29-40],如涂覆石墨烯层的圆形纳米线结构^[27]可以实现长距离传输,传输距离为 $10\ \mu\text{m}$,归一化模式场面积在 10^{-3} 量级。然而,涂覆石墨烯层的圆形纳米线结构中的模式场约束特性较差,其周围光场呈均匀分布,但仅可以实现一维模式场约束;基模径向偏振的模式场使涂覆石墨烯层的圆形纳米线结构很难与常用的线偏光源进行耦合。近期,研究人员通过添加额外一根涂覆石墨烯层的纳米线来形成涂覆石墨烯层的圆形纳米线二聚体结构^[30-34],并在传输损耗保持不变的基础上进一步将归一化模式场面积减小至 10^{-4} 量级^[32-34],该结构可以实现二维光场约束,而且光场在间隙区域表现为近似线性偏振态,为此更有利于与常用的线偏光源进行耦合。

本文提出涂覆石墨烯层的双椭圆形纳米线结构,该结构在两个椭圆短轴靠近排列且长短轴比值较大的情况下可近似为有限尺寸平行平板波导,故间隙区域的光场具有更高的线偏振度。采用有限元的方法详细探究所提结构中的基模特性,以及其对椭圆长短轴比值、纳米线间隙距离和石墨烯化学势的依赖关系。仿真结果表明,该结构的模式场约束性能非常好,同时传输损耗也较低,所得结果为可调谐纳米光子器件和红外传感器的设计提供理论支持。

2 理论模型

图1为两种涂覆石墨烯层的双椭圆形纳米线波导结构的截面,其中 a 和 b 分别为椭圆的两个半轴。考虑到椭圆结构的特殊性,将同时对波导结构 A ($b > a$) 和波导结构 B ($a > b$) 进行研究。为了简单起见,假设纳米线外围介质的介电常数 $\epsilon_1 = 1$,椭圆形纳米线波导结构的介电常数 $\epsilon_2 = 2.25$,椭圆纳米

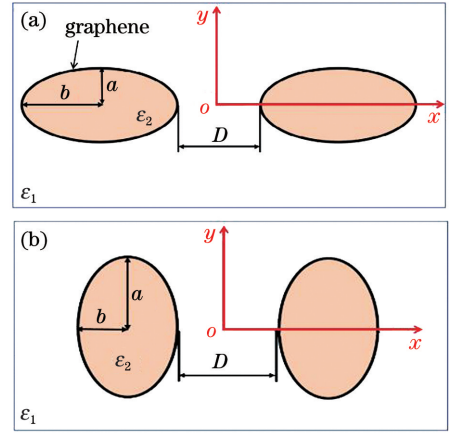


图1 涂覆石墨烯层的双椭圆形纳米线结构。

(a)波导结构 A; (b)波导结构 B

Fig. 1 Graphene-coated elliptical nanowire pairs.

(a) Waveguide structure A; (b) waveguide structure B

线的间距为 D 。中红外波段石墨烯的介电常数 $\epsilon_g = 1 + i\sigma_g/\epsilon_0\omega\delta$ ^[40],其中 ω 为入射光的角频率, ϵ_0 为石墨烯在自由空间中的介电常数, δ 为单层石墨烯的厚度,即 $\delta = 0.335\ \text{nm}$, σ_g 为石墨烯的电导率,即 $\sigma_g = \sigma_{\text{intra}} + \sigma_{\text{inter}}$ ^[41],其中

$$\sigma_{\text{intra}} = \frac{2ie^2k_B T}{\pi h^2(\omega + i/\tau)} \ln \left[2 \cosh \left(\frac{\mu_c}{2k_B T} \right) \right], \quad (1)$$

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

式中: τ 为电子弛豫时间,即 $\tau = 0.5\ \text{ps}$; T 为温度,即 $T = 300\ \text{K}$; h 为约化普朗克常数; k_B 为玻尔兹曼常数; e 为元电荷,即 $e = 1.6 \times 10^{-19}\ \text{C}$; μ_c 为石墨烯的化学势; $\cosh(\cdot)$ 为双曲余弦函数。采用化学掺杂或者加偏压的方式来改变石墨烯的化学势^[42-43],进而实现对模式特性的调制。石墨烯的化学势与载流子浓度 n_c 的关系^[42],即 $\mu_c \approx \hbar v_F \sqrt{n_c \pi}$,其中 v_F 为费米速度,即 $v_F \approx 10^6\ \text{m/s}$ 。文献^[43]研究结果表明,石墨烯中的载流子浓度可达 $10^{14}\ \text{cm}^{-2}$,相对应的化学势为 $1.17\ \text{eV}$,故实验过程中化学势的取值范围为 $0.4 \sim 1.2\ \text{eV}$ 。

计算过程中,石墨烯薄层的电流用 $\mathbf{J} = \sigma_g \mathbf{E}$ 来表示,其中 \mathbf{E} 为电场矢量。假设石墨烯等离子激元模式沿 z 轴方向传播,复传播常数 $\beta = k_0 n_{\text{eff}}$,其中 $k_0 = 2\pi/\lambda_0$, λ_0 为石墨烯在自由空间中的波长, n_{eff} 为复等效模式系数,传播长度 $L_p = \lambda_0/[2\pi \text{Im}(n_{\text{eff}})]$,其中 $\text{Im}(\cdot)$ 为取虚数,归一化模式场

面积 $A_{\text{nor}} = A_{\text{eff}}/A_0$, 其中 A_0 为衍射受限光场面积, 即 $A_0 = \lambda_0^2/4$, A_{eff} 为等效模式场面积^[14], 即 $A_{\text{eff}} = \iint W(\mathbf{r})d^2\mathbf{r}/\max[W(\mathbf{r})]$, 其中 $W(\mathbf{r})$ 为电磁能量密度, \mathbf{r} 为位置矢量。

3 结果与讨论

当 $D=20\text{ nm}$ 时, 涂覆石墨烯层的双椭圆形纳米线波导中的基模归一化电场分布, 如图 2(a) 和图 2(b) 所示, 其中箭头表示电场偏振方向。从图 2(a) 和图 2(b) 可以看到, 当 $a/b=3$ 时, 电场线偏度更大, 无论是波导结构 A ($b/a=3, a=100\text{ nm}$) 还是波导结构 B ($a/b=3, b=100\text{ nm}$), 基模光场主要约束在间隙区域中, 所以可以实现二维光场聚焦,

这一点可从图 2(c) 和图 2(d) 看到。不同 D 值, 波导结构 A 和波导结构 B 中的基模归一化电场在频率 $f=20\text{ THz}$, $\mu_c=0.5\text{ eV}$ 下沿 x 轴和 y 轴的分布曲线, 如图 2(c) 和图 2(d) 所示。从图 2(c) 和图 2(d) 可以看到, 当长短轴比值一定时, D 值越小, 光场越集中; 当 D 值固定时, $b/a=3$ 和 $a/b=3$ 两种结构中基模电场在 x 轴上的约束特性, 即半峰全宽 (FWHM) 差异较小, 但在 y 轴上差异较大, 这是由于当 $a/b=3$ 时, 涂覆石墨烯层的双椭圆形纳米线结构可近似为有限尺寸石墨烯平行平板波导, 基模场在间隙区域中的分布比 $b/a=3$ 更均匀, 故 y 轴的场约束能力降低。后续将会证实这一点, 即当参数一定时, 波导结构 A ($b>a$) 中的基模模式场面积比波导结构 B ($a>b$) 更小。

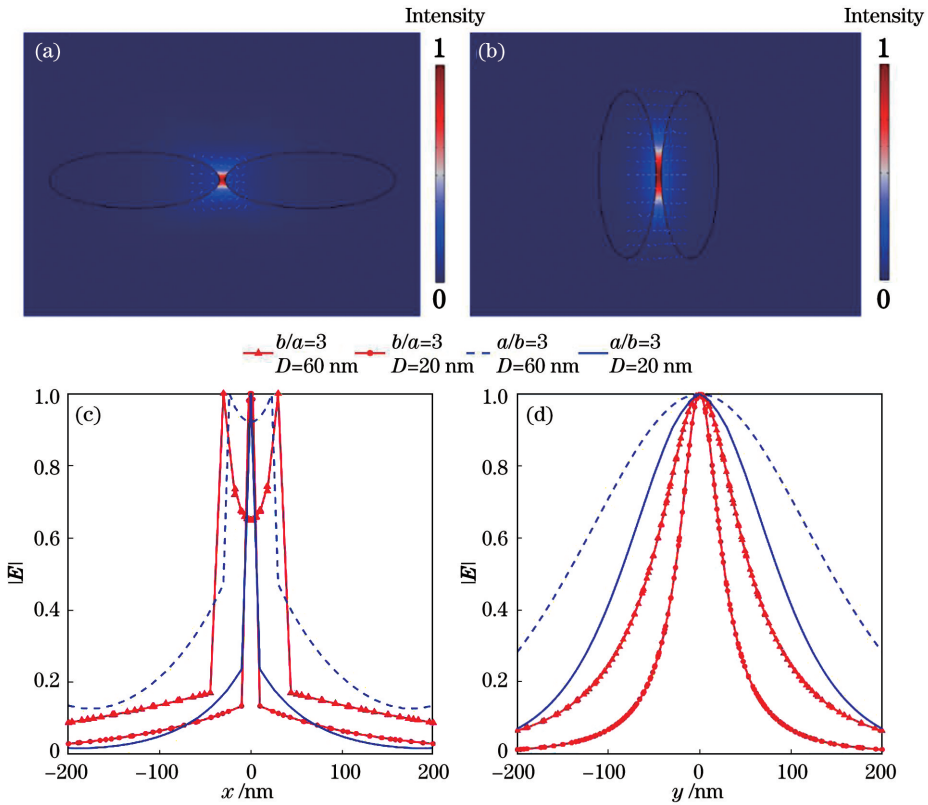


图 2 基模的归一化电场分布。(a) $b/a=3, a=100\text{ nm}$; (b) $a/b=3, b=100\text{ nm}$; (c) x 轴的归一化电场分布曲线; (d) y 轴的归一化电场分布曲线

Fig. 2 Normalized electric field distribution of fundamental mode. (a) $b/a=3, a=100\text{ nm}$; (b) $a/b=3, b=100\text{ nm}$; (c) normalized electric field distribution curves of x -axis; (d) normalized electric field distribution curves of y -axis

当 $f=20\text{ THz}$, $D=40\text{ nm}$ 和 $\mu_c=0.5\text{ eV}$ 时, 波导结构 A ($b>a$) 和波导结构 B ($a>b$) 两种涂覆石墨烯层的双椭圆形纳米线结构中的基模传输特性与长短轴之比的关系, 如图 3 所示。从图 3 实线可以看到, 当 $b>a, a=100\text{ nm}$ 时, 有效模式系数 $\text{Re}(\beta)/k_0$ 随着 b/a 值的增大而减小, 其中 $\text{Re}(\cdot)$

为取实数, 同时传播长度 L_p 随着 b/a 值的增大而不断增加, 最高可以达到 $8.56\text{ }\mu\text{m}$, A_{nor} 随着 b/a 值的增大而减小, 当 b/a 值从 1 增大到 7 时, A_{nor} 值由 1.11×10^{-4} 减小到 3.75×10^{-5} 。通过上述研究可以得到两个结论: 增大 b/a 值可以在降低模式传输损耗的同时减小模式场面积, 表明该波

导可以在局部区域中突破表面等离激元的模式传输损耗和场约束之间的制约关系;当 $b/a > 1$ 时,模式传输损耗和模式场面积均比 $b/a = 1$ 小,这表明涂覆石墨烯层的双椭圆形纳米线结构的亚波长传输性能比涂覆石墨烯层的双圆形纳米线结构更优。当 $a > b$, $b = 100$ nm 时,模式特性变化关系与 $b > a$ 截然相反,如图 3 虚线所示。从图 3 虚线可以看到,当 a/b 值从 1 增大到 7,该双椭圆结构逐渐演变为有限尺寸石墨烯平行平板波导;

$\text{Re}(\beta)/k_0$ 值随着 a/b 值的增大而增大,这表明石墨烯与光的相互作用逐渐增强。如前所述,光场在间隙区域的分布相对均匀,一方面会导致模式场面积增大,如图 3(c)虚线所示;另外一方面光线进入石墨烯层的比例增加,导致模式损耗增大,即传播长度降低,如图 3(b)虚线所示。需要指出的是,当 $a/b \geq 3$ 时,传输损耗趋于稳定,模式传播长度保持在 $6.25 \mu\text{m}$ 左右。后续研究中,将椭圆长短轴比值(a/b 和 b/a)固定为 3。

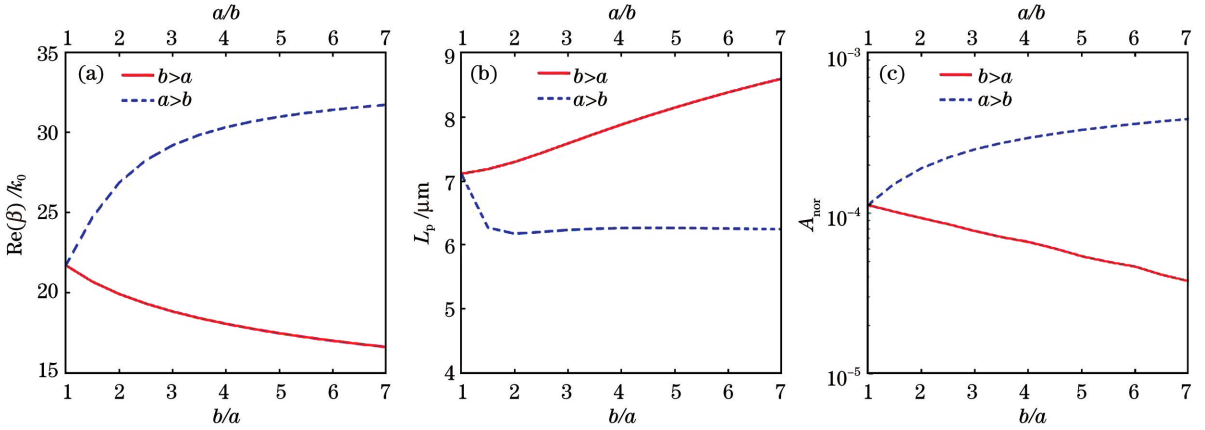


图 3 模式特性与椭圆长短轴之比的关系。(a)有效模式系数;(b)传播长度;(c)归一化模式场面积

Fig. 3 Relationship between modal properties and ratio of major and minor axes of ellipse. (a) Effective mode coefficient; (b) propagation length; (c) normalized mode field area

对于涂覆石墨烯层的双椭圆形纳米线结构,不同 D 值对模式特性有很大的影响。当 $f = 20$ THz 和 $\mu_c = 0.5$ eV 时,波导结构 A ($b/a = 3, a = 100$ nm)和波导结构 B ($a/b = 3, b = 100$ nm)两种结构中的基模传输特性与 D 的关系,如图 4 所示。从图 4(a)可以看到,两种情形下 $\text{Re}(\beta)/k_0$ 值均随着 D 值的增大呈先快速减小后缓慢减小的趋势,这表明当增大 D 值时,两根涂覆石墨烯层的椭圆形纳米线等离激元模式之间的耦合强度逐渐减弱。从

图 4(b)和图 4(c)可以看到, L_p 和 A_{nor} 值均随着 D 值的增大逐渐增大,这表明增大 D 值可以降低传输损耗,但是 D 值的增大会导致两个等离激元模式之间的耦合强度减弱,故模式场面积增大。特别地,当 D 值超过一定值时,两根涂覆石墨烯层的纳米线等离激元模式将退耦。另外,从图 4(c)可以看到,当 $D = 10$ nm 时,在 $b/a = 3$ 和 $a/b = 3$ 情形下的 A_{nor} 仅为 7.31×10^{-6} 和 2.44×10^{-5} 。从亚波长传输性能来看,波导结构 A 明显优于波导结构 B,即在相

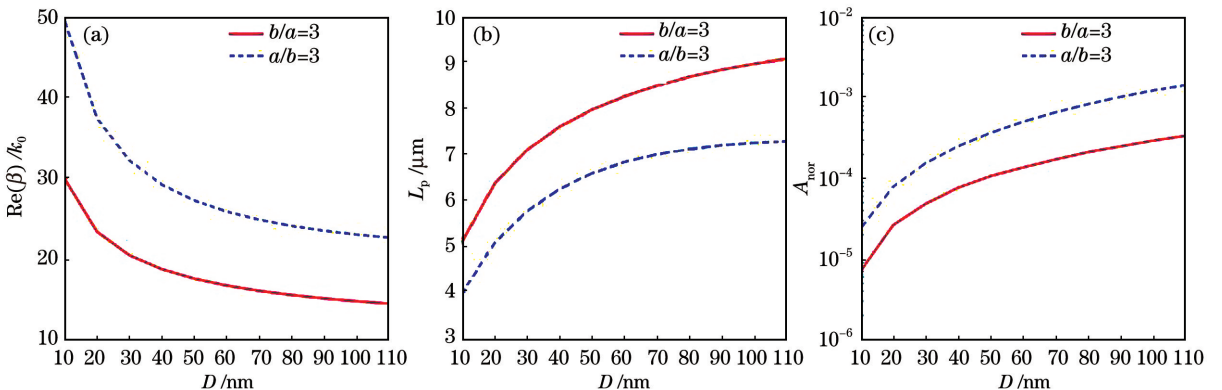


图 4 模式特性与 D 的关系。(a)有效模式系数;(b)传播长度;(c)归一化模式场面积

Fig. 4 Relationship between modal properties and D . (a) Effective mode coefficient; (b) propagation length; (c) normalized mode field area

同参数下,波导结构 A 中的等离激元模式具有更长的传播长度和更小的模式场面积。

当 $D = 40 \text{ nm}$ 和 $\mu_c = 0.5 \text{ eV}$ 时,波导结构 A ($b/a=3, a = 100 \text{ nm}$) 和波导结构 B ($a/b=3, b = 100 \text{ nm}$) 中的基模传输特性与 f 的关系,如图 5 所示。从图 5(a) 可以看到,当 $a/b=3$ 时, $\text{Re}(\beta)/k_0$ 值比 $b/a=3$ 大,且二者均随着 f 值的增大而增大。从

图 5(b) 可以看到,随着 f 值的增大,模式传输损耗逐渐增大,传播长度减小;当 $10 \text{ THz} < f < 32 \text{ THz}$ 时, $b/a=3$ 的 L_p 比 $a/b=3$ 大;当 $32 \text{ THz} < f < 37 \text{ THz}$ 时, $b/a=3$ 的 L_p 比 $a/b=3$ 略小。从图 5(c) 可以看到,增大 f 值,两种情形下的 A_{nor} 均随着 f 的增大而增大;在低频波段, $b/a=3$ 的 A_{nor} 小于 $a/b=3$;当 $f > 34 \text{ THz}$ 时,这一情况发生转变。

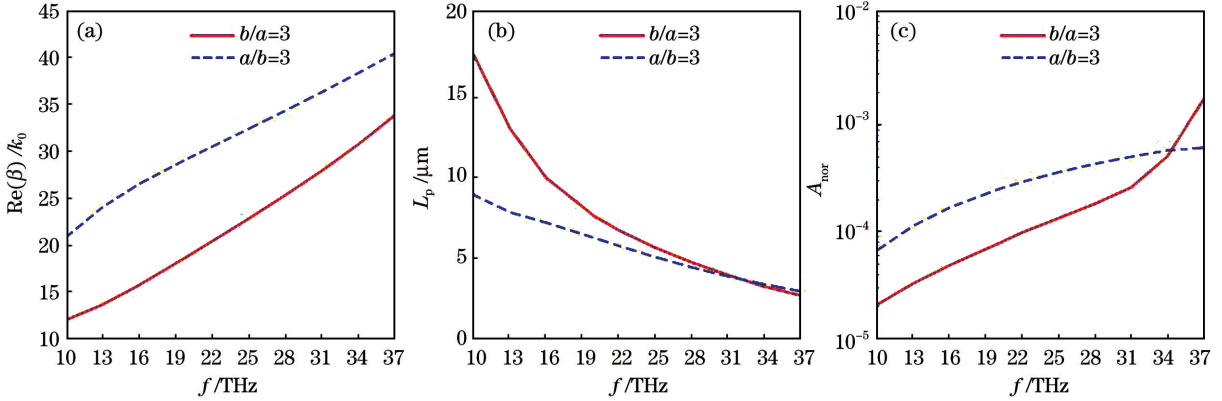


图 5 模式特性与 f 的关系。(a)有效模式系数;(b)传播长度;(c)归一化模式场面积

Fig. 5 Relationship between modal properties and f . (a) Effective mode coefficient; (b) propagation length; (c) normalized mode field area

与传统的金属等离激元材料相比,石墨烯材料中化学势的可调节性为更好地实现对模式传输特性的调控提供一种可行方法。当 $f = 20 \text{ THz}$ 和 $D = 40 \text{ nm}$ 时,波导结构 A ($b/a=3, a = 100 \text{ nm}$) 和波导结构 B ($a/b=3, b = 100 \text{ nm}$) 中石墨烯等离激元的模式传输特性与 μ_c 的关系,如图 6 所示。从图 6(a) 可以看到,随着 μ_c 值的增加, $\text{Re}(\beta)/k_0$ 值逐渐降低。从图 6(b) 可以看到, L_p 值随着 μ_c 值的

增加而不断增加,且当 $b/a=3$ 时, L_p 值的增速一直大于 $a/b=3$,这是当 μ_c 值增大时,电子的带间跃迁对 σ_{inter} 的贡献剧烈减小,使得损耗降低^[38-39];当 $\mu_c = 1.2 \text{ eV}$ 和 $b/a=3$ 时, L_p 值约为 $21 \mu\text{m}$ 。从图 6(c) 可以看到,化学势对归一化模式场面积的影响较小,在 $b/a=3$ 和 $a/b=3$ 两种情况下, A_{nor} 分别保持在 $\sim 10^{-5}$ 和 $\sim 10^{-4}$ 量级,而波导结构 A 中的 A_{nor} 更小。

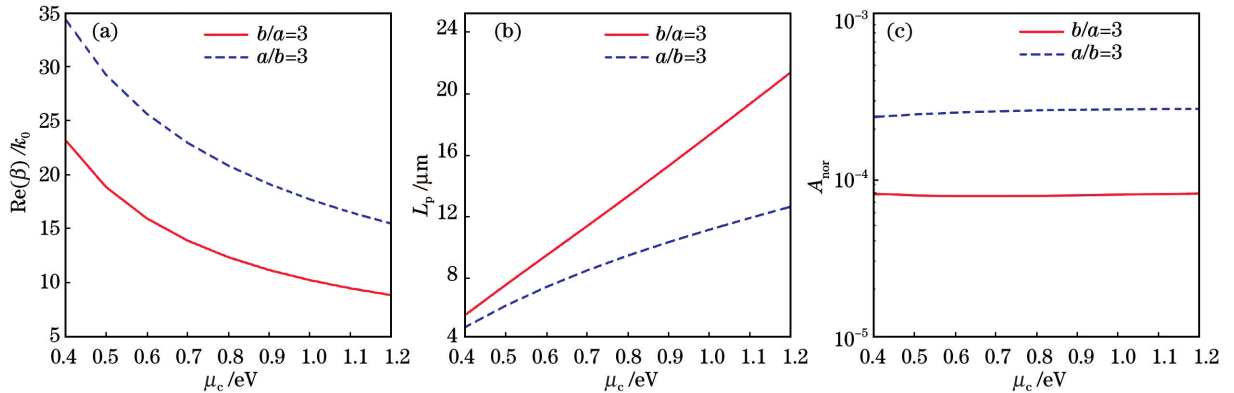


图 6 石墨烯化学势对模式特性的影响。(a)有效模式系数;(b)传播长度;(c)归一化模式场面积

Fig. 6 Influence of graphene chemical potential on modal properties. (a) Effective mode coefficient; (b) propagation length; (c) normalized mode field area

综上所述,对于两种排列方式的双椭圆形纳米线结构,其基模传播长度均可达到 $10 \mu\text{m}$ 量级,同

时归一化模式场面积在 $10^{-4} \sim 10^{-5}$ 量级。相比于涂覆石墨烯层的单圆形纳米线结构 ($\sim 10^{-3}$)^[27] 和

涂覆石墨烯层的双圆形纳米线结构($\sim 10^{-4}$)^[32-34], 所提波导在保持传输损耗不变的前提下, 可以进一步压缩光场面积。这类石墨烯表面等离激元模式可以同时实现极小的模式场面积和长距离传输, 可为可调谐纳米光子器件和红外传感的设计提供理论依据和指导。

涂覆石墨烯层的双椭圆形纳米线结构的基模光场在间隙区域表现为近似线性偏振态。相比于涂覆石墨烯层的双圆形纳米线和单圆形纳米线结构中的基模光场, 涂覆石墨烯层的双椭圆形纳米线结构 B 中的基模光场具有更大的线偏度且更有利于与线偏光源耦合。尽管涂覆石墨烯层的纳米线结构引起大量科学家的关注, 但在波导模耦合方面的研究相对较少, 后续可对相关内容进行进一步研究。

4 结 论

本课题组提出两种涂覆石墨烯层的双椭圆形纳米线等离激元结构, 采用有限元方法来详细研究基模传输特性。仿真结果表明, 波导结构 A($b > a$) 的亚波长传输性能优于波导结构 B($a > b$); 增大波导结构 A 中 b/a 值, 可以在降低模式传输损耗的同时减小模式场面积; 波导结构 A($b/a > 1$) 的亚波长传输性能比涂覆石墨烯层的双圆形纳米线结构($b/a = 1$) 更好, 波导结构 B($a/b > 1$) 的亚波长传输性能比涂覆石墨烯层的双圆形纳米线结构($b/a = 1$) 差; 波导结构 B 中的基模光场具有更大的线偏度且更有利于与线偏光源耦合。通过调节几何参数和石墨烯化学势, 两种结构均可以实现中红外波段的低损耗传输, 同时能够获得深度亚波长约束的光场, 相关研究结果将在可调谐纳米光子器件及红外传感等领域具有一定的应用前景。

参 考 文 献

- [1] Yang L, Duan Z Y, Ma L H, et al. Surface plasmon polariton nanolasers [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(20): 202409.
杨琳, 段智勇, 马刘红, 等. 表面等离激元纳米激光器综述[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(20): 202409.
- [2] Li P. Research progress of plasmonic nanofocusing [J]. *Acta Physica Sinica*, 2019, 68(14): 146201.
李盼. 表面等离激元纳米聚焦研究进展[J]. *物理学报*, 2019, 68(14): 146201.
- [3] Wei H, Pan D, Zhang S P, et al. Plasmon waveguiding in nanowires [J]. *Chemical Reviews*,

2018, 118(6): 2882-2926.

- [4] Xiong X, Zou C L, Ren X F, et al. Silver nanowires for photonics applications [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2013, 7(6): 901-919.
- [5] Zou C L, Sun F W, Xiao Y F, et al. Plasmon modes of silver nanowire on a silica substrate [J]. *Applied Physics Letters*, 2010, 97(18): 183102.
- [6] Veronis G, Fan S H. Modes of subwavelength plasmonic slot waveguides [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2007, 25(9): 2511-2521.
- [7] Wu M, Liang X Y, Yan C L, et al. Design of arch-type resonance cavity filter based on surface plasmon polaritons [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(20): 202417.
吴梦, 梁西银, 颜昌林, 等. 基于表面等离激元的拱型谐振腔滤波器设计[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(20): 202417.
- [8] Yan Y F, Zhang G M, Qiao L T, et al. Design on the convex ring MIM structure filter based on surface plasmon polaritons [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2019, 48(2): 0223002.
闫云菲, 张冠茂, 乔利涛, 等. 基于表面等离激元的凸环结构金属-介质-金属滤波器设计[J]. *光子学报*, 2019, 48(2): 0223002.
- [9] Han Z H, Radko I P, Mazurski N, et al. On-chip detection of radiation guided by dielectric-loaded plasmonic waveguides [J]. *Nano Letters*, 2015, 15(1): 476-480.
- [10] Wang Q, Shao X Z, Zhang G M, et al. Transmission characteristics of the double-layer semi-circular dielectric-loaded surface plasmon polariton waveguides [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(6): 061302.
王琼, 邵晓珍, 张冠茂, 等. 双层半圆介质加载表面等离激元波导的传输特性研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(6): 061302.
- [11] Shao X Z, Zhang G M, Wang Q, et al. Transmission characteristics of long-range dielectric-loaded surface plasmon polariton waveguide based on golden ratio [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(6): 061301.
邵晓珍, 张冠茂, 王琼, 等. 基于黄金分割比的长程介质加载表面等离激元波导传输特性研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(6): 061301.
- [12] Berini P. Highlighting recent progress in long-range surface plasmon polaritons: guest editorial [J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2019, 11(2): ED19-ED23.

- [13] Min Y, Min Q. Guided plasmon polariton at 2D metal corners[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2007, 24(9): 2333-2342.
- [14] Oulton R F, Sorger V J, Genov D A, et al. A hybrid plasmonic waveguide for subwavelength confinement and long-range propagation[J]. *Nature Photonics*, 2008, 2(8): 496-500.
- [15] Wang C, Wu G Z, Zhou P, et al. Mode properties of hybrid plasmonic waveguide with an metal nano-rib[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, 43(9): 0916001.
王聪, 吴根柱, 周沛, 等. 纳米金属肋混合表面等离子体波导模式特性分析[J]. *光子学报*, 2014, 43(9): 0916001.
- [16] Yue W C, Yao P J, Chen X L, et al. Hybrid dual wedge plasmonic waveguide with long-range propagation and subwavelength mode confinement[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2018, 37(6): 663-667.
岳文成, 姚培军, 陈小林, 等. 具有长程传播和亚波长模式局域性的混合双楔形等离子体波导[J]. *红外与毫米波学报*, 2018, 37(6): 663-667.
- [17] Jablan M, Buljan H, Soljačić M. Plasmonics in graphene at infrared frequencies[J]. *Physical Review B*, 2009, 80(24): 245435.
- [18] Li Z Q, Feng D D, Li X, et al. Graphene surface plasmon polaritons based photoelectric modulator with double branched structure[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(1): 0124001.
李志全, 冯丹丹, 李欣, 等. 基于石墨烯表面等离激元的双支节结构光电调制器[J]. *光学学报*, 2018, 38(1): 0124001.
- [19] Yang X X, Kong X T, Dai Q. Optical properties of graphene plasmons and their potential applications[J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, 64(10): 106801.
杨晓霞, 孔祥天, 戴庆. 石墨烯等离激元的光学性质及其应用前景[J]. *物理学报*, 2015, 64(10): 106801.
- [20] Zhuang H W, Kong F M, Li K, et al. Plasmonic bandpass filter based on graphene nanoribbon[J]. *Applied Optics*, 2015, 54(10): 2558-2564.
- [21] Wu Y X, Wu W Q, Dai X Y. SPPs in a double layer graphene system with an anisotropic dielectric[J]. *Results in Physics*, 2019, 15: 102718.
- [22] Liu P H, Zhang X Z, Ma Z H, et al. Surface plasmon modes in graphene wedge and groove waveguides[J]. *Optics Express*, 2013, 21(26): 32432-32440.
- [23] Wang Q C, Song L. Propagation characteristics of dielectric-loaded graphene plasma waveguides[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(11): 112401.
王清晨, 宋梁. 介质加载石墨烯等离子体波导传输特性[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(11): 112401.
- [24] Li Y, Zhang H F, Fan T X, et al. Theoretical analysis of double dielectric loaded graphene surface plasmon polariton[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(7): 0724001.
李勇, 张惠芳, 范天馨, 等. 双介质加载石墨烯表面等离激元波导的理论分析[J]. *光学学报*, 2016, 36(7): 0724001.
- [25] Li Y, Zhang H F, Wu Q, et al. Theoretical analysis of single dielectric loaded two-sheet graphene symmetric surface plasmon waveguide[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(20): 202413.
李勇, 张惠芳, 吴琼, 等. 单介质加载双层石墨烯对称表面等离激元波导的理论分析[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(20): 202413.
- [26] Lu H, Gan X T, Mao D, et al. Graphene-supported manipulation of surface plasmon polaritons in metallic nanowaveguides[J]. *Photonics Research*, 2017, 5(3): 162-167.
- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] 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*, 2016, 11(3): 703-711.
- [30] Zhai L, Xue W R, Yang R C, et al. Propagation properties of nano dielectric parallel lines coated with graphene[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(11): 1123002.
翟利, 薛文瑞, 杨荣草, 等. 涂覆石墨烯的电介质纳米并行线的传输特性[J]. *光学学报*, 2015, 35(11): 1123002.
- [31] 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.
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.

- [32] 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.
- [33] Teng D, Wang K, Li Z, et al. Graphene-coated nanowire dimers for deep subwavelength waveguiding in mid-infrared range[J]. *Optics Express*, 2019, 27(9): 12458-12469.
- [34] Teng D, Wang K, Huan Q, et al. High-performance transmission of surface plasmons in graphene-covered nanowire pairs with substrate [J]. *Nanomaterials*, 2019, 9(11): 1594.
- [35] 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.
- [36] 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.
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子波导[J]. *光学学报*, 2020, 40(6): 0623002.
- [37] Teng D, Wang K, Li Z, et al. Graphene-coated elliptical nanowires for low loss subwavelength terahertz transmission[J]. *Applied Sciences*, 2019, 9(11): 2351.
- [38] Teng D, Wang K, Li Z. Graphene-coated nanowire waveguides and their applications[J]. *Nanomaterials*, 2020, 10(2): 229.
- [39] Hajati M, Hajati Y. High-performance and low-loss plasmon waveguiding in graphene-coated nanowire with substrate[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2016, 33(12): 2560-2565.
- [40] Wu D, Tian J P, Yang R C. Study of mode performances of graphene-coated nanowire integrated with triangle wedge substrate[J]. *Journal of Nonlinear Optical Physics & Materials*, 2018, 27(2): 1850013.
- [41] Jabbarzadeh F, Heydari M, Habibzadeh-Sharif A. A comparative analysis of the accuracy of Kubo formulations for graphene plasmonics[J]. *Materials Research Express*, 2019, 6(8): 086209.
- [42] Gan C H, Chu H S, Li E P. Synthesis of highly confined surface plasmon modes with doped graphene sheets in the midinfrared and terahertz frequencies[J]. *Physical Review B*, 2012, 85(12): 125431.
- [43] Efetov D K, Kim P. Controlling electron-phonon interactions in graphene at ultrahigh carrier densities [J]. *Physical Review Letters*, 2010, 105(25): 256805.