

# 激光与光电子学进展

## 石墨烯和金属包裹的纳米线亚波长传输特性

王云成<sup>1</sup>, 滕达<sup>1\*</sup>, 胡聚源<sup>1</sup>, 王菲菲<sup>1</sup>, 徐田子<sup>1</sup>, 阮从燕<sup>1</sup>, 李益强<sup>1</sup>, 赵英豪<sup>1</sup>, 欧锦锦<sup>1</sup>, 王凯<sup>2</sup>

<sup>1</sup>郑州师范学院物理与电子工程学院, 河南 郑州 450044;

<sup>2</sup>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** 对比研究了石墨烯包裹的纳米线与金属包裹的纳米线亚波长传输特性。针对单线和双线两个结构, 采用有限元方法研究了不同频率和尺寸下最低阶模式的场分布和传输特性。结果表明, 当金属层厚度大于其趋肤深度时, 石墨烯包裹的纳米线的基模光场约束性能更好; 当金属层厚度远小于趋肤深度时, 金属包裹的纳米线和石墨烯包裹的纳米线亚波长传输性能相当。相关研究结果可为等离激元材料的选择提供参考, 在亚波长光子器件领域有潜在的应用价值。

**关键词** 光学器件; 波导; 红外波; 纳米线

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.0923001

### Subwavelength Transmission Properties of Graphene- and Metal-Coated Nanowires

Wang Yuncheng<sup>1</sup>, Teng Da<sup>1\*</sup>, Hu Juyuan<sup>1</sup>, Wang Feifei<sup>1</sup>, Xu Tianzi<sup>1</sup>, Ruan Congyan<sup>1</sup>,  
Li Yiqiang<sup>1</sup>, Zhao Yinghao<sup>1</sup>, Ou Jinjin<sup>1</sup>, Wang Kai<sup>2</sup>

<sup>1</sup>College of Physics and Electronic Engineering, Zhengzhou Normal University,  
Zhengzhou, Henan 450044, China;

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

**Abstract** In this study, a comparative investigation of the subwavelength transmission properties of graphene- and metal-coated nanowires is conducted. By using the finite element method, the modal field distribution and transmission properties of the lowest-order modes are investigated based on the frequency and structural dimensions for single nanowires and nanowire dimers. The results showed that when the thickness of the metal layer is larger than the skin-depth, graphene-coated nanowires exhibit better fundamental modal field confinement. However, when the thickness of the metal layer is far smaller than the skin-depth, the subwavelength transmission properties of the metal-coated nanowires are comparable to those of graphene-coated nanowires. These results will provide a reference for choosing plasmonic materials and have potential applications in subwavelength photonic devices.

**Key words** optical devices; waveguide; infrared wave; nanowires

**OCIS codes** 230.7370; 240.6680; 130.3060

收稿日期: 2020-09-09; 修回日期: 2020-09-10; 录用日期: 2020-09-17

基金项目: 河南省高等学校重点科研项目计划(21A140029)、郑州师范学院青年骨干教师培养项目(QNGG-20774)、郑州师范学院科研启动专项经费、郑州师范学院开放研究基金、郑州师范学院大学生创新性实验计划(DCZ2019015)、郑州师范学院大学生科研创新基金(2019DC003)

\*E-mail: tengda@zznu.edu.cn

# 1 引言

近年来,表面等离激元(SPP)<sup>[1]</sup>纳米光波导<sup>[2]</sup>因可以实现纳米尺度的光场传输而引起了大量研究人员的关注。早期,SPP纳米光波导主要基于贵金属材料,如金属线波导<sup>[3-6]</sup>、金属缝隙波导<sup>[7-8]</sup>、介质加载等离激元波导<sup>[9]</sup>、金属沟槽/楔形等离激元波导<sup>[10]</sup>、混合型波导<sup>[11-13]</sup>等。尽管这类金属结构具有良好的亚波长传输性能,但同时也存在一些不足:材质多为贵金属材料,成本高;贵金属表面的等离激元波导虽然在近红外波段和可见光波段表现优异,但是在中远红外波段的模场约束特性较差<sup>[14-15]</sup>;当频率一定时,金属的光响应固定,缺乏可调节性。

近年来,研究人员发现石墨烯可以在中远红外波段激发SPP<sup>[16-17]</sup>。故石墨烯是探索SPP器件的良好补充材料。相较于贵金属表面等离激元,石墨烯表面等离激元具备极强的场约束特性、巨大的场增强和性能可调的特性<sup>[18]</sup>,故引起学术界的广泛关注。基于上述特性,研究人员提出了多种石墨烯等离激元波导,如石墨烯纳米带<sup>[19]</sup>、石墨烯平行平板波导<sup>[20]</sup>、石墨烯槽/楔形波导<sup>[21]</sup>、介质加载石墨烯波导<sup>[22]</sup>、石墨烯金属复合波导<sup>[23]</sup>、涂覆石墨烯层的纳米线波导<sup>[24]</sup>等。其中,涂覆石墨烯层的单纳米线、纳米线对和多根纳米线引起了广泛的研究<sup>[25-37]</sup>。

尽管近期的研究在金属和石墨烯等离激元波导领域取得一定进展,但有关石墨烯和贵金属表面等离激元亚波长传输特性的对比研究相对较少<sup>[38]</sup>。He等<sup>[18]</sup>对比研究了不同厚度金属薄层与石墨烯层的等离激元特性,发现金属层厚度在几十纳米时,金属等离激元特性与石墨烯等离激元特性相当。Gao等<sup>[24]</sup>简要对比了石墨烯包裹的纳米线和金属包裹的纳米线。但是相关对比中金属层厚度仍较大,并没有考虑金属层厚度趋近石墨烯层厚度时的情况。

本文详细研究了金属包裹的纳米线和纳米线对与石墨烯包裹的纳米线和纳米线对的模场分布和亚波长传输特性。研究发现,金属层厚度较大时,石墨烯包裹的纳米线和纳米线对在有效模式系数及模场约束方面要优于金属包裹的纳米线和纳米线对,但损耗较大。此外研究结果表明,当金属

包裹的纳米线外围金属层厚度减小时,其模式特性与石墨烯结构中模式特性之间的差异逐步减小。

# 2 理论模型

图1为提出的两种结构。结构A:中心为半径为 $r$ 、介电常数 $\epsilon_1=2.25$ 的纳米线,外围包裹一层厚度为 $t$ 的金属银,满足 $r+t=100\text{ nm}$ ,具体研究中 $t$ 不断变薄。当 $t=0\text{ nm}$ 时,金属薄层消失。此时在纳米线表面施加表面电流,研究石墨烯包裹的纳米线(GCNW)模式特性,然后与金属包裹纳米线(MCNW)中模式特性进行对比。结构B:两个结构A组成的纳米线二聚体结构,结构间隙 $D=100\text{ nm}$ ,并在间隙中心建立坐标原点。与结构A相同,当金属薄层 $t$ 减小到 $0\text{ nm}$ 时,在纳米线表面施加表面电流,研究石墨烯包裹的纳米线二聚体(GCNDM)模式特性,并与金属包裹的纳米线二聚体(MCNDM)中模式特性进行对比。

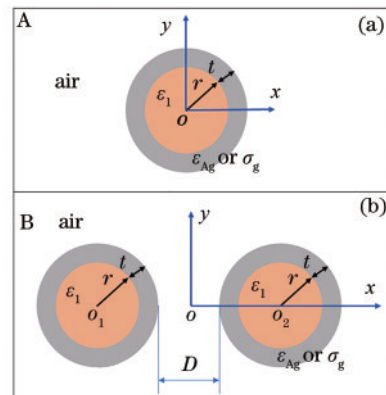


图1 提出的两种结构。(a)金属或石墨烯包裹纳米线结构; (b)金属或石墨烯包裹纳米线二聚体结构  
Fig. 1 Proposed two structures. (a) Metal- or graphene-coated nanowire structure; (b) metal- or graphene-coated nanowire dimer structure

中红外波段金属银的相对介电常数 $\epsilon_{Ag}$ 由2015年Yang等的研究<sup>[39]</sup>所得,银的趋肤深度可由 $\delta=1/\text{Im}(\sqrt{k_0^2 \epsilon_{Ag}})$ <sup>[40]</sup>计算,其中 $k_0$ 为自由空间波数, $\text{Im}(\cdot)$ 表示取虚部。在频率为 $20\sim 50\text{ THz}$ 时, $\delta\approx 23\text{ nm}$ 。石墨烯的表面电导率 $\sigma_g$ 由两部分组成:带内电子跃迁( $\sigma_{intra}$ )和带间电子跃迁( $\sigma_{inter}$ ),即 $\sigma_g=\sigma_{intra}+\sigma_{inter}$ ,其中<sup>[16,41]</sup>

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

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

式中:电子弛豫时间  $\tau=0.5\text{ ps}$ ; 温度  $T=300\text{ K}$ ;  $\mu_c$  为石墨烯化学势;  $\hbar$  为约化的普朗克常数;  $k_B$  为玻尔兹曼常数; 元电荷  $e=1.6\times 10^{-19}\text{ C}$ 。研究中, 可通过化学掺杂或加直流偏压来改变石墨烯中载流子浓度  $n_c$ , 进而改变石墨烯化学势  $\mu_c$ , 二者关系式为  $\mu_c \approx \hbar v_F \sqrt{n_c \pi}$ <sup>[42]</sup>, 其中费米速度  $v_F \approx 10^6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。近期实验研究表明, 石墨烯中载流子浓度可高达  $10^{14}\text{ cm}^{-2}$ <sup>[43]</sup>, 相应的化学势约为  $1.17\text{ eV}$ 。故本文选取  $\mu_c=0.6, 1\text{ eV}$  进行对比研究。具体计算中, 石墨烯层用介质纳米线表面电流 ( $\mathbf{J}=\sigma_g \mathbf{E}$ ) 表示<sup>[44]</sup>。

为对比研究波导性能, 假设等离激元模式沿  $z$  方向传播, 电场按  $\exp(i\beta z-i\omega t)$  变化, 其中传播常数  $\beta=k_0 n_{\text{eff}}$ ,  $n_{\text{eff}}$  由有限元方法 (FEM) 计算, 其实部  $\text{Re}(n_{\text{eff}})$  与色散有关, 虚部  $\text{Im}(n_{\text{eff}})$  与损耗有关。后续, 将详细对比研究两类纳米线的基模场分布和模式传播特性。传播长度定义为  $L_P=\lambda_0/[2\pi\text{Im}(n_{\text{eff}})]$ 。归一化模式场面积定义为  $A_N=A_{\text{eff}}/A_0$ ,  $A_0=\lambda_0^2/4$ , 等效模式场面积  $A_{\text{eff}}=\iint W(r)d^2r/\max\{W(r)\}$ ,  $W(r)$  为电磁能量密度<sup>[11]</sup>。

### 3 分析与讨论

#### 3.1 单根纳米线

首先对 MCNW 和 GCNW 进行研究。图 2(a)~(e) 为频率  $f=30\text{ THz}$  时, 不同金属层厚度  $t$  下 MCNW 中基模二维场分布图, 其中图 2(a) 为纯金属纳米线结构。图 2(f) 和 (g) 分别为  $r=100\text{ nm}$ ,  $\mu_c=0.6, 1\text{ eV}$  时 GCNW 中的基模场分布。对于 MCNW, 当金属层厚度  $t(=50\text{ nm})$  大于金属趋肤深度  $\delta(\approx 23\text{ nm})$  时, 其场分布和图 2(a) 中金属纳米线之间的差别非常小, 中心场强几乎为零。这一点可从图 2(h) 中得到证明, 即图 2(a) 和 (b) 所对应的一维场分布高度重合。但是, 当金属层厚度  $t(=20, 5, 1\text{ nm})$  小于金属趋肤深度  $\delta(\approx 23\text{ nm})$  时, 电磁场完全穿透金属层, MCNW 介质区域 ( $x=-r\sim r$ ) 场分布和  $t>\delta$  时相比有一定差别, 如图 2(h) 所示。且随着金属层厚度  $t$  的减小, MCNW 介质区域的场强值逐渐增大。需要说明的是, 尽管介质区域电场强度  $E_x$  和  $E_y$  分量很小, 但  $E_z$  分量较大, 因此图 2(h) 所示 MCNW 介质区域的场值  $|\mathbf{E}|=\sqrt{E_x^2+E_y^2+E_z^2}\approx E_z$ 。对于 GCNW, 从图 2(f) 和 (g) 可以直观得到, GCNW 光场

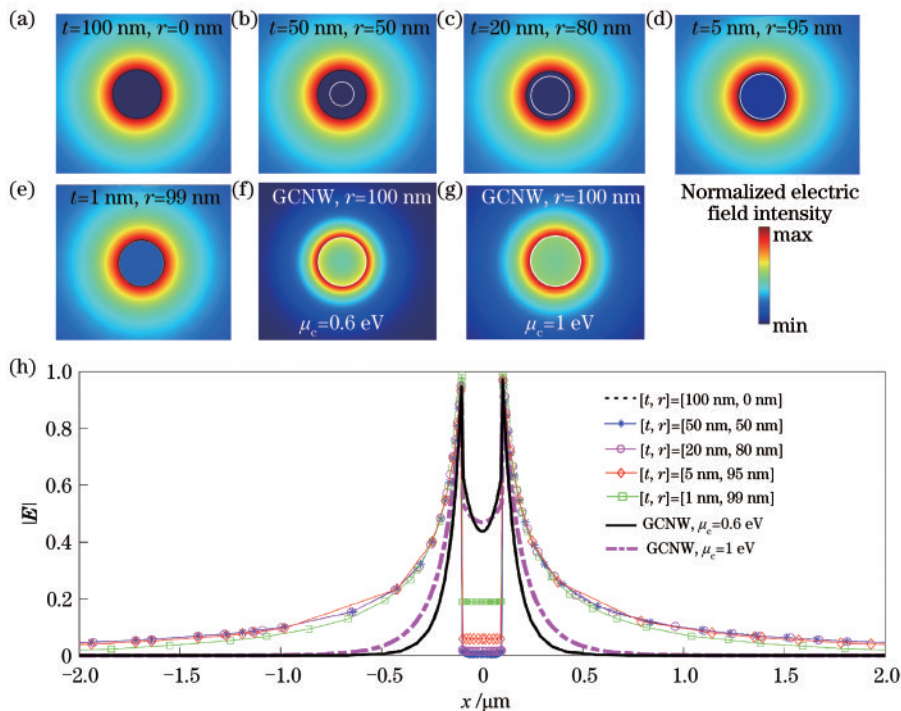


图 2 基模场分布。(a)~(e)金属包裹纳米线的基模二维电场分布图;(f)~(g)石墨烯包裹纳米线的基模二维电场分布图;(h)对应的一维电场分布

Fig. 2 Field distribution of the fundamental mode. (a)~(e) 2D electric field distributions of the fundamental modes in MCNW; (f)~(g) 2D electric field distributions of the fundamental modes in GCNW; (h) corresponding 1D electric field distributions



分布比 MCNW 更集中且介质区域场强值较大。另外,从图 2(h)中可明显看出,GCNW 基模一维场分布半峰全宽更小,故 GCNW 场约束性能更好,可有效避免光子集成回路中光信号之间的串扰。

图 3 给出了 MCNW 和 GCNW 模式特性与频率的关系,其中  $\mu_c$  取 0.6 eV 和 1 eV。从图 3(a)可以看出:随着频率的增大,MCNW 基模的有效模式系数  $\text{Re}(n_{\text{eff}})$  变化非常小,当  $t$  较大时,  $\text{Re}(n_{\text{eff}})$  略大于 1, 当  $t=1$  nm 时,  $\text{Re}(n_{\text{eff}})$  趋近于 2; GCNW 基模的有效模式系数实部远大于 MCNW 中基模的等效模式系数实部,且随频率的升高不断增大。另外,从图 3(a)插图可看出:当  $t > \delta$  时, MCNW 基模的有效模式系数和金属纳米线之间的差别非常小,这与图 2 所示场分布一致; 当  $t < \delta$  时, MCNW 基模的有效模式系数逐渐增大,但仍然远小于 GCNW。

图 3(b)可以看出,当频率增大时,MCNW 基模传播长度  $L_p$  缓慢减小,且随着金属厚度  $t$  的减小而减小,这主要是因为当  $t < \delta$  时,电磁场完全穿透金属层,导致损耗变大。特别地,  $\mu_c=1$  eV 时,在低频部分,GCNW 基模传播长度接近  $t=5$  nm 时 MCNW 基模传播长度;在高频部分,GCNW 基模传播长度与  $t=1$  nm 时 MCNW 基模传播长度相当。因此,一定程度上可以认为当金属层厚度很小(如  $t$  取 1~5 nm)时,MCNW 和 GCNW 基模损耗差别不大。图 3(c)给出了频率增大时归一化模式场面积的变化情况。其中,MCNW 基模场面积逐渐增大,而 GCNW 模场面积几乎保持不变。当金属层厚度  $t > \delta$  时,二者模式场面积之间存在 1 个数量级左右的差别;但是当金属层厚度  $t(=1$  nm)远小于  $\delta$  时,二者模场面积相当。

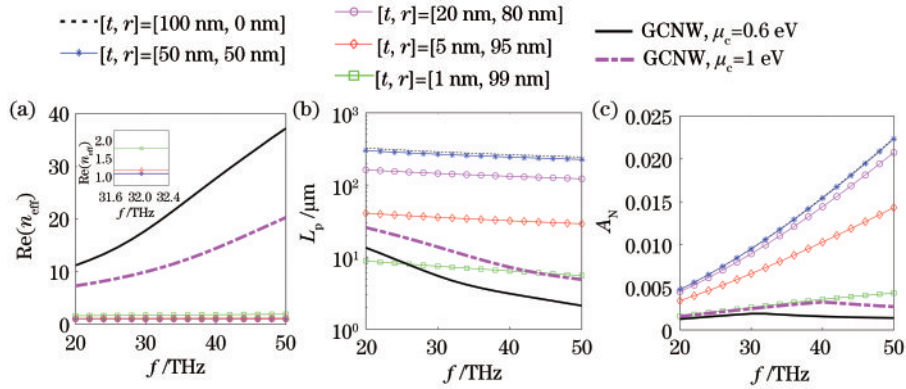


图 3 模式特性与频率之间的关系。(a)  $\text{Re}(n_{\text{eff}})$ ; (b)  $L_p$ ; (c)  $A_N$

Fig. 3 Relationship between mode characteristics and frequency. (a)  $\text{Re}(n_{\text{eff}})$ ; (b)  $L_p$ ; (c)  $A_N$

可见,当金属层厚度  $t \ll \delta$  时,GCNW 和 MCNW 在传输损耗和模场约束方面性能相当;当金属层厚度  $t > \delta$  时,尽管 GCNW 传输损耗相比 MCNW 较大,但 GCNW 有效模式系数实部更大、模式场面积更小,这对亚波长光场传输至关重要。近期,研究人员利用石墨烯等离激元实现了超小模式场压缩,归一化模场体积在  $10^{-10}$  量级<sup>[45]</sup>。

### 3.2 纳米线二聚体

图 4 给出了  $D=100$  nm,  $f=30$  THz 时,金属层厚度不同时 MCNDM 和 GCNDM 的基模场分布。如图 4(a)~(d)所示,MCNDM 中基模光场主要被约束在间隙区域,实现二维光场聚焦。随着金属层厚度  $t$  的减小,模式场分布变化非常小,即使  $t < \delta$  [如图 4(c)和(d)所示],亦是如此。更为直观的结果可从图 5 中得到,除 GCNDM 之外,MCNDM 基模一维场分布在  $x$  和  $y$  方向高度重叠。从图 4(e)和

(f)可看出,GCNDM 基模光场也是被限制在间隙区域,且相比 MCNDM 场分布有一定的优势。进一步,如图 5 所示,GCNDM 基模沿  $x$  方向上的一维场分布半峰全宽与 MCNDM 基本相同,但在  $y$  方向上的相比 MCNDM 略小。同时,对于 GCNDM,增大  $\mu_c$  会导致  $y$  方向的模场约束变差。实际上,由于金属间隙结构本身就具备良好的光场约束特性,如图 6(c)和图 3(c)所示,双线结构的归一化模场面积整体比单线小 1 个数量级。因此,对于纳米线二聚体结构,石墨烯在场约束方面相比图 2 所示的单线结构优势并不那么明显。

图 6 给出了 MCNDM 和 GCNDM 中基模特性与频率的关系,  $D=100$  nm,  $\mu_c=0.6, 1$  eV。从图 6(a)可以看出:随着频率的增大,MCNDM 基模的有效模式系数  $\text{Re}(n_{\text{eff}})$  的变化非常小,当  $t$  较大时,  $\text{Re}(n_{\text{eff}})$  略大于 1, 当  $t=1$  nm 时,  $\text{Re}(n_{\text{eff}})$  为 2.5916~

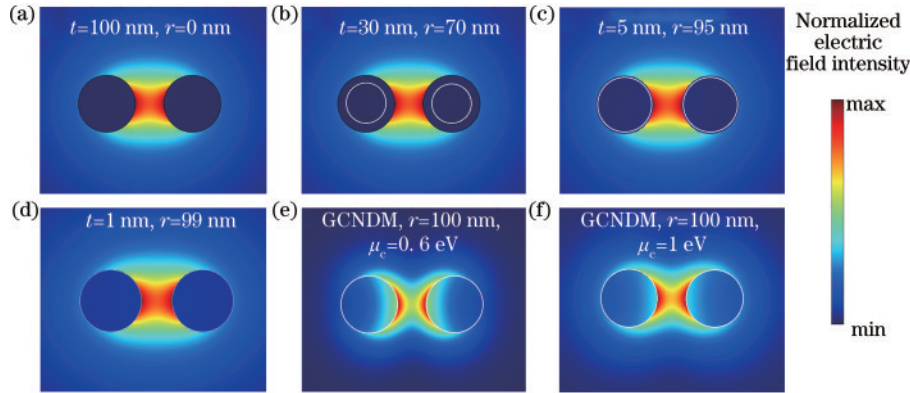


图 4 基模二维电场分布。(a)~(d)金属包裹纳米线二聚体;(e)(f)石墨烯包裹纳米线二聚体

Fig. 4 2D electric field distributions of the fundamental modes. (a)~(d) MCNDM; (e)(f) GCNDM

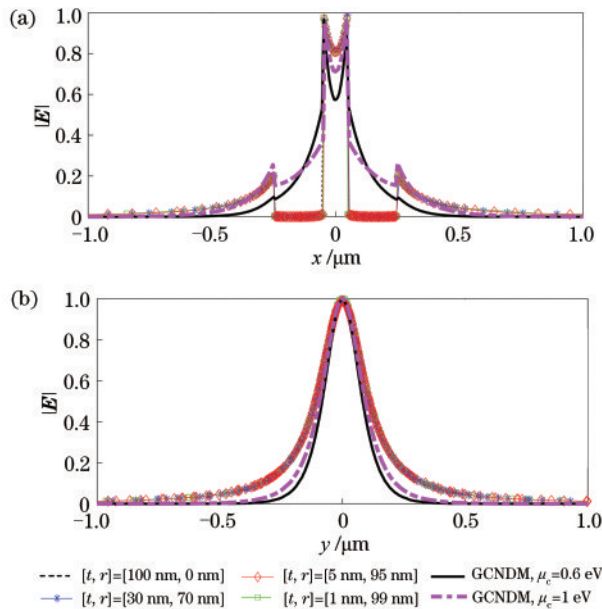


图 5 归一化电场沿不同方向的分布。(a)  $x$  方向;(b)  $y$  方向  
Fig. 5 Normalized electric field distributions along different directions. (a)  $x$ -direction; (b)  $y$ -direction

2. 7085; 而 GCNDM 基模的有效模式系数实部较大且随频率的升高不断增大; 当  $t > \delta$  时, MCNDM 基

模的有效模式系数实部和双金属纳米线之间的差别非常小, 当  $t < \delta$  时, MCNDM 基模的有效模式系数逐渐增大, 但仍然远小于 GCNDM。这与图 3 所展示的结果相似。从图 6(b) 可以看出: 当频率增大时, MCNDM 基模传播长度  $L_p$  缓慢减小, 且随着金属厚度  $t$  的减小而减小; 特别地, 当  $t < \delta$  时, 损耗剧增; 当  $\mu_c = 1$  eV、频率为 30~50 THz 时, GCNDM 基模传播长度介于  $t = 1$  nm 和  $t = 5$  nm 的 MCNDM 对应的传播长度之间; 当石墨烯化学势降低至 0.6 eV 时, GCNDM 基模损耗增大。低频部分, GCNDM 基模传播长度介于  $t = 1$  nm 和  $t = 5$  nm 的 MCNDM 对应的传播长度之间, 高频部分与  $t = 1$  nm 时 MCNDM 基模损耗在同一量级。故可以认为, 当金属层厚度很小 (如  $t$  取 1~5 nm) 时, MCNDM 和 GCNDM 基模损耗在同一量级。图 6(c) 给出了归一化模式场面积的变化情况。所有模式的基模场面积均随频率的增大而增大。当金属层厚度  $t > \delta$  (如  $t = 30, 100$  nm) 时, GCNDM 模场面积略小, 且与 MCNDM 模场面积的相对偏差随频率增大而逐渐增大; 但当金属层厚度  $t \ll \delta$  (如  $t = 1, 5$  nm) 时,

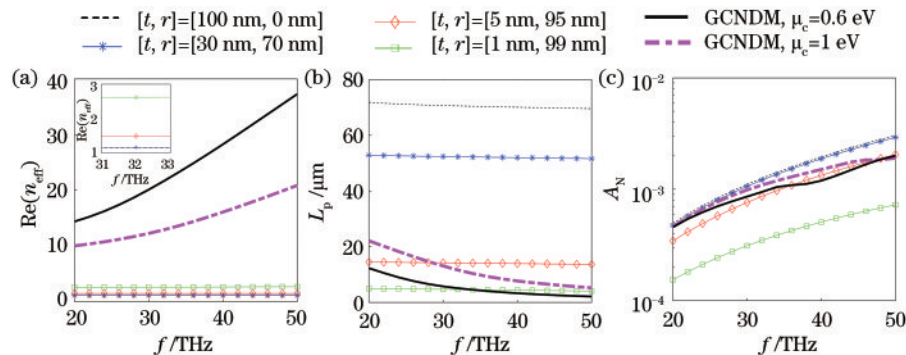


图 6 模式特性与频率之间的关系。(a)  $\text{Re}(n_{\text{eff}})$ ; (b)  $L_p$ ; (c)  $A_N$

Fig. 6 Relationship between mode characteristics and frequency. (a)  $\text{Re}(n_{\text{eff}})$ ; (b)  $L_p$ ; (c)  $A_N$

MCNDM 模场面积反而比 GCNDM 小。需要说明的是,二者之间并没有产生数量级的差别。产生这一现象的原因是(金属)等离激元间隙结构本身就具备良好的场约束性能,因此石墨烯在模场约束性能方面的优势没有体现出来。

故当金属层厚度  $t \ll \delta$  时,GCNDM 和 MCNDM 在传输损耗和模场约束方面性能相当;当金属层厚度  $t > \delta$  时,尽管 GCNDM 传输损耗相比 MCNDM 较大,但 GCNDM 基模的有效模式系数实部更大。

## 4 结 论

对比研究了石墨烯包裹的纳米线与金属包裹的纳米线在中红外波段的亚波长传输特性。结果表明:对于单线结构,当  $t > \delta$  时,金属包裹的纳米线基模传播损耗较小,但石墨烯包裹的纳米线基模光场约束性能更好,当  $t \ll \delta$  时,金属包裹的纳米线基模特性与石墨烯包裹的纳米线性能相当;对于双线结构,结果与单线结构类似;不论  $t > \delta$  或者  $t \ll \delta$ ,石墨烯包裹的纳米线基模的  $\text{Re}(n_{\text{eff}})$  均远大于金属包裹的纳米线基模的  $\text{Re}(n_{\text{eff}})$ 。相关结论可为设计等离激元结构提供理论指导,并在亚波长光子集成领域有潜在的应用价值。

## 参 考 文 献

- [1] Wang Y L, Zhao B, Min C J, et al. Research progress of femtosecond surface plasmon polariton [J]. Chinese Physics B, 2020, 29(2): 027302.
- [2] Fang Y R, Sun M T. Nanoplasmonic waveguides: towards applications in integrated nanophotonic circuits [J]. Light: Science & Applications, 2015, 4(6): e294.
- [3] Xiong X, Zou C L, Ren X F, et al. Silver nanowires for photonics applications [J]. Laser & Photonics Reviews, 2013, 7(6): 901-919.
- [4] Wei H, Pan D, Zhang S P, et al. Plasmon waveguiding in nanowires [J]. Chemical Reviews, 2018, 118(6): 2882-2926.
- [5] Hu Q, Xu D H, Zhou Y, et al. Position-sensitive spectral splitting with a plasmonic nanowire on silicon chip [J]. Scientific Reports, 2013, 3: 3095.
- [6] Teng D, Cao Q, Li S, et al. Tapered dual elliptical plasmon waveguides as highly efficient terahertz connectors between approximate plate waveguides and two-wire waveguides [J]. Journal of the Optical Society of America A, 2014, 31(2): 268-273.
- [7] Yang H Y, Chen Y P, Xiao G L, et al. MIM tunable plasmonic filter embedded with symmetrical sector metal resonator [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(11): 1124001.
- [8] 杨宏艳, 陈昱澎, 肖功利, 等. 内嵌对称扇形金属谐振腔的 MIM 可调谐等离子体滤波器 [J]. 光学学报, 2020, 40(11): 1124001.
- [8] Xiao G L, Dou W Y, Yang H Y, et al. Band-stop filter based on metal-insulator-metal waveguide with asymmetric circular resonant cavities [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(5): 0513001.
- [8] 肖功利, 窦婉滢, 杨宏艳, 等. 基于非对称圆形谐振腔金属-介质-金属波导结构的带阻滤波器 [J]. 光学学报, 2019, 39(5): 0513001.
- [9] Kumar A, Gosciniaik J, Volkov V S, et al. Dielectric-loaded plasmonic waveguide components: going practical [J]. Laser & Photonics Reviews, 2013, 7(6): 938-951.
- [10] Yan M, Qiu M. Guided plasmon polariton at 2D metal corners [J]. Journal of the Optical Society of America B, 2007, 24(9): 2333-2342.
- [11] 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.
- [12] Sun M, Tian J P, Li L. Mode properties of a coaxial multi-layer hybrid surface plasmon waveguide [J]. Physica Status Solidi (b), 2015, 252(8): 1884-1889.
- [13] Wang F, Zhang L, Ma T, et al. A symmetrical wedge-to-wedge THz hybrid SPPs waveguide with low propagation loss [J]. Acta Physica Sinica, 2020, 69(7): 074205.
- [13] 王芳, 张龙, 马涛, 等. 一种低损耗的对称双楔形太赫兹混合表面等离激元波导 [J]. 物理学报, 2020, 69(7): 074205.
- [14] Huang T J, Yin L Z, Zhao J, et al. Amplifying evanescent waves by dispersion-induced plasmons: defying the materials limitation of the superlens [J]. ACS Photonics, 2020, 7(8): 2173-2181.
- [15] Gao Y X, Shadrivov I V. Second harmonic generation in graphene-coated nanowires [J]. Optics Letters, 2016, 41(15): 3623-3626.
- [16] Xiao S Y, Wang T, Liu T T, et al. Active modulation of electromagnetically induced transparency analogue in terahertz hybrid metal-graphene metamaterials [J]. Carbon, 2018, 126: 271-278.
- [17] Vakil A, Engheta N. Transformation optics using graphene [J]. Science, 2011, 332(6035): 1291-



- 1294.
- [18] He X Y, Gao P Q, Shi W Z. A further comparison of graphene and thin metal layers for plasmonics[J]. *Nanoscale*, 2016, 8(19): 10388-10397.
- [19] Zhuang H, Kong F, Li K, et al. Plasmonic bandpass filter based on graphene nanoribbon [J]. *Applied Optics*, 2015, 54(10): 2558-2564.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 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子体波导的理论分析 [J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(20): 202413.
- [23] Xiao B G, Qin K, Xiao S S, et al. Metal-loaded graphene surface plasmon waveguides working in the terahertz regime [J]. *Optics Communications*, 2015, 355: 602-606.
- [24] 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.
- [25] Teng D, Wang Y C, Guo J K, et al. Study on modal properties of graphene-coated elliptical nanowire pairs [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(23): 232303.  
滕达, 王云成, 郭晋康, 等. 涂覆石墨烯层的双椭圆形纳米线模式特性研究 [J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(23): 232303.
- [26] 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.
- [27] Teng D, Wang K, Huan Q S, et al. High-performance light transmission based on graphene plasmonic waveguides [J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2020, 8(20): 6832-6838.
- [28] Wei Z Z, Xue W R, Peng Y L, et al. Mode characteristics of waveguides based on three graphene-coated dielectric nanowires [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(1): 0124001.  
卫壮志, 薛文瑞, 彭艳玲, 等. 涂覆石墨烯的三根电介质纳米线波导的模式特性 [J]. *光学学报*, 2019, 39(1): 0124001.
- [29] 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.
- [30] 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.
- [31] 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.
- [32] 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体波导 [J]. *光学学报*, 2020, 40(6): 0623002.
- [33] Teng D, Ma W S, Yang Y D, et al. Study on subwavelength transmission properties of triangular-shaped graphene-coated nanowires on substrate [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(13): 1324002.  
滕达, 马文帅, 杨研蝶, 等. 基于衬底的涂覆石墨烯层的三角形纳米线亚波长传输特性研究 [J]. *光学学报*, 2020, 40(13): 1324002.
- [34] Teng D, Wang K, Li Z. Graphene-coated nanowire waveguides and their applications [J]. *Nanomaterials*, 2020, 10(2): 229.
- [35] 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.
- [36] Yang J F, Yang J J, Huang M. Single-mode cylindrical graphene plasmon waveguide [J]. *Modern Physics Letters B*, 2016, 30(22): 1650268.
- [37] Yu P C, Fesenko V I, Tuz V R. Dispersion features of complex waves in a graphene-coated semiconductor nanowire [J]. *Nanophotonics*, 2018, 7(5): 925-934.
- [38] Tassin P, Koschny T, Kafesaki M, et al. A comparison of graphene, superconductors and metals as conductors for metamaterials and plasmonics [J]. *Nature Photonics*, 2012, 6(4): 259-264.
- [39] Yang H U, D'Archangel J, Sundheimer M L, et al. Optical dielectric function of silver [J]. *Physical*

- Review B, 2015, 91(23): 235137.
- [40] Yang J, Cao Q, Zhou C H. Theory for terahertz plasmons of metallic nanowires with sub-skin-depth diameters [J]. *Optics Express*, 2010, 18 (18) : 18550-18557.
- [41] Zhang J F, Hong Q L, Zou J L, et al. Fano-resonance in hybrid metal-graphene metamaterial and its application as mid-infrared plasmonic sensor [J]. *Micromachines*, 2020, 11(3): 268.
- [42] Gan C H, Chu H S, Li E P. Synthesis of highly confined surface plasmon modes with doped graphene sheets in the mid-infrared 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.
- [44] Gao Y X, Shadrivov I V. Nonlinear coupling in graphene-coated nanowires [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 38924.
- [45] Epstein I, Alcaraz D, Huang Z Q, et al. Far-field excitation of single graphene plasmon cavities with ultracompressed mode volumes [J]. *Science*, 2020, 368(6496): 1219-1223.