

激光与光电子学进展

基于硅-绝缘体结构的石墨烯等离子激元波导

滕达^{1*}, 赵永哲¹, 王云成¹, 李益强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 提出一种由硅-绝缘体(SOI)结构与涂覆石墨烯层的纳米线(GCNW)构成的低损耗波导结构,采用有限元方法详细研究波导结构中石墨烯等离子激元基模传输特性对频率、几何参数、材料参数以及石墨烯化学势的依赖关系。仿真结果表明,该波导中低折射率的SiO₂介质层可实现高性能的深度亚波长光约束。得益于低折射率的SiO₂介质层和SOI衬底以及石墨烯层的高折射率对比度,可获得极小模场面积的低损耗等离子激元模式。所提出的波导结构为高性能和深度亚波长可调谐集成光子器件的设计提供一定的参考。

关键词 光学器件; 表面光学; 波导; 表面等离子激元; 红外波

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.0323001

Graphene Plasmonic Waveguide Based on Silicon-on-Insulator Structure

Teng Da^{1*}, Zhao Yongzhe¹, Wang Yuncheng¹, Li Yiqiang¹, Wang Kai^{2**}

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

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

Abstract A low-loss waveguide structure composed of a silicon-on-insulator (SOI) structure and graphene-coated nanowires (GCNW) is proposed. The dependences of the transmission characteristics of fundamental graphene plasmon mode in the proposed structure on frequency, geometric, material parameters, and chemical potential of graphene are investigated in detail by use of the finite element method. Simulation results show that the low refractive index SiO₂ dielectric layer in the waveguide can achieve high-performance deep subwavelength light confinement. Thanks to the high refractive index contrast between the low refractive index SiO₂ dielectric layer and the SOI substrate as well as the graphene layer, a low-loss plasmon mode with a very small mode field area is obtained. The proposed waveguide structure provides a certain reference for the design of high-performance and deep sub-wavelength tunable integrated photonic devices.

Key words optical devices; optics at surfaces; waveguides; surface plasmons; infrared wave

OCIS codes 230.7370; 240.6680; 130.3060

收稿日期: 2020-06-06; 修回日期: 2020-07-10; 录用日期: 2020-07-14

基金项目: 河南省高等学校重点科研项目(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科研创新基金(2019DC003)

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

1 引言

纳米尺度的光场聚焦在亚波长光子器件领域中具有重要的应用价值^[1-2],为此采用亚波长金属结构来激发表面等离子激元(SPs)^[3-5],从而大幅度减小模场面积。目前,研究人员相继提出并研究了各种金属结构^[6-9],其中金属纳米线^[10]具有结构简单和光波导性能优异的特点,但其基模 TM_0 在纳米线半径相对较大的情况下,模场约束特性较弱。为了实现深度亚波长的模场约束,纳米线的半径必须很小,但这会导致模式传输损耗剧增。近期,研究人员采用了硅衬底来减少金属纳米线的模式传输损耗^[11]。研究表明金属结构更适用于近红外和可见光波段^[12],但金属的光响应缺乏可调性,因此在可调光器件方面的应用受限。

石墨烯^[13]是一种可在中远红外波段激发SPs的新材料,而石墨烯表面等离子激元具有可调性、极强的模场约束和巨大的场增强特性^[14-16],这可以在一定程度上克服金属结构应用的局限性。基于上述特性,研究人员提出了许多高性能的石墨烯光器件,如波导^[12]、调制器^[17]和耦合器^[18]等。针对光子集成电路(PICs)^[19]的组成器件,研究人员提出了诸多性能优异的石墨烯等离子激元波导^[20-23],如涂覆石墨烯的纳米线(GCNW)^[24-38]。

与金属纳米线类似,GCNW中的模场约束特性依然较弱,随后GCNW二聚体^[30-31,34-35]结构被提出,且研究发现GCNW二聚体结构中的模场约束特性比GCNW更优。近期,研究发现通过在高折射率衬底和GCNW之间插入一层低折射率介质,可以减少由高折射率衬底带来的模式损耗^[36-37]。Hajati等^[37]提出了一种GCNW-Air-MgF₂-Si结构,该结构的归一化模场面积约为 10^{-5} 。文献^[38]提出了一种GCNW-Air-hBN层结构,该结构中等离子激元声子混合模式的归一化模场面积约为 10^{-5} ,模式传输距离小于 $1\ \mu\text{m}$ 。需要注意的是,上述两种结构中低折射率材料的宽度为无限宽,这会阻碍实际的制造和应用。Ye等^[23]提出了一种基于石墨烯层的混合波导,在 $10\sim 20\ \text{THz}$ 的频率范围内,传输距离为 $12.1\sim 16.7\ \mu\text{m}$,归一化模场面积约为 10^{-4} 。由于石墨烯在中红外波段的吸收损耗较大,故等离子激元模式的传输距离通常为 $10\ \mu\text{m}$,因此在维持传输距离基本不变的前提下,可以进一步压缩模场面积。

为了进一步提升GCNW的亚波长传输性能,本

文提出一种由硅-绝缘体(SOI)结构和GCNW组成的波导结构。该结构不仅可以实现比传统GCNW、GCNW二聚体和基于GCNW的混合型波导更好的波导性能,还可与现有的半导体制造技术相兼容,从而实现与硅光子器件的结合。

2 理论模型

设计的波导结构如图1所示,该结构由SOI衬底、SiO₂层和GCNW组成。SiO₂层的宽度和高度分别为 W_1 和 h_1 ,调节 h_1 可调控石墨烯等离子激元模式与SOI衬底之间的耦合,从而实现模式特性的有效控制。波导结构的二维截面如图1(b)所示,其中纳米线的半径为 R ,介电常数 $\epsilon_1=2$,SOI衬底中Si的宽度 W 和高度 h_2 分别为 $600\ \text{nm}$ 和 $200\ \text{nm}$,SiO₂的宽度 W 和高度 h_3 分别为 $600\ \text{nm}$ 和 $200\ \text{nm}$,SiO₂和Si的介电常数分别设为 2.25 ^[39]和 12.25 ^[40]。制作波导结构的过程:首先在范德瓦耳斯力的作用下,将单层石墨烯包裹在介质纳米线上以制备GCNW^[29];其次使用等离子体增强化学气相沉积(PECVD)技术^[41]在SOI衬底的顶部沉积SiO₂薄层,通过调节沉积速率可以精确控制SiO₂薄层的厚度 h_1 ,此时 h_1 值约为 $10\ \text{nm}$;然后通过蚀刻来控制SiO₂薄层的宽度 W_1 ;最后通过组装得到波导结构。

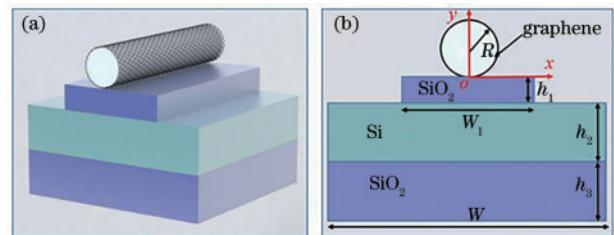


图1 波导结构示意图。(a)三维结构;(b)波导结构的二维截面
Fig. 1 Schematic of waveguide structure. (a) Three-dimensional structure; (b) two-dimensional cross section of waveguide structure

计算过程中,石墨烯层既可作为薄层,又可作为表面电流层。对于前者,石墨烯层的等效介电常数可以用 $\epsilon_g=1+i\sigma_g/(\epsilon_0\omega d)$ ^[15]来计算,其中 d 为单层石墨烯的厚度, $d=0.33\ \text{nm}$, ω 为入射光的角频率, f 为对应频率, ϵ_0 为石墨烯在真空中的介电常数, σ_g 为石墨烯的表面电导率。对于后者,石墨烯层的表面电流用 $\mathbf{J}=\sigma_g\mathbf{E}$ 来表示,但忽略了石墨烯层的厚度,其中 \mathbf{E} 为电场矢量。这两种方法之间的相对误差小于 1% ,为了简单起见,将石墨烯层作为表面电流层。石墨烯的动态光学响应可由Kubo公式^[42-43]

推导出来,其表面电导率在红外波段包括电子带间和带内跃迁的贡献,即 $\sigma_g = \sigma_{\text{intra}} + \sigma_{\text{inter}}$, 其中

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

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

式中: σ_{intra} 为电子带内跃迁对电导率的贡献; σ_{inter} 为电子带间跃迁对电导率的贡献; τ 为电子弛豫时间, $\tau = 0.5 \text{ ps}$; T 为温度, $T = 300 \text{ K}$; μ_c 为石墨烯的化学势; \hbar 为约化普朗克常数; k_B 为玻尔兹曼常数; e 为元电荷, $e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$; $\cosh(\cdot)$ 为双曲余弦函数。

为了定量描述波导的性能,假设石墨烯等离子元的最低阶模式(基模)沿 z 轴方向传播,时间因子为 $\exp(-i\omega t)$, 电场按照 $\exp(i\beta z - i\omega t)$ 来变化,其中 t 为时间, β 为传播常数, $\beta = 2\pi N_{\text{eff}}/\lambda_0$, λ_0 为光在真空中的波长, N_{eff} 为基模的复等效模式系数。等离激元模式的横向模场(电场 E 和磁场 H) 满足二维波动方程^[44], 表达式为

$$[\nabla_{\text{r}}^2 + (n^2 - N_{\text{eff}}^2)(2\pi/\lambda_0)^2]M(x, y) = 0, \quad (3)$$

式中: n 为材料的折射率; ∇_{r} 为横向拉普拉斯算子; $M(x, y)$ 为横向模场。 N_{eff} 是采用有限元方法(FEM)计算出来的,其实部 $\text{Re}(N_{\text{eff}}) = n_{\text{eff}}$ 与色散有关,虚部 $\text{Im}(N_{\text{eff}})$ 与损耗有关。模式传播距离可由 $L_p = \lambda_0/[2\pi\text{Im}(N_{\text{eff}})]$ 来计算, L_p 值越小,表明传输损耗越大。有效模式面积 $A_{\text{eff}} = \iint W(r) d^2r / \max[W(r)]$, 其中 $W(r)$ 为电磁能量密度^[8], r 为位置坐标。归一化模场面积 $A_{\text{nor}} = A_{\text{eff}}/A_0$, 其中 A_0 为衍射受限的模场面积, $A_0 = \lambda_0^2/4$ 。品质因数(FOM)^[45] 可由 $x_{\text{FOM}} = L_p/(A_{\text{eff}}/\pi)^{1/2}$ 来计算。为了详细研究波导的传输特性,将从频率、几何参数和材料参数等方面对所设计的波导进行系统评价,同时解决相邻结构之间的模式串扰问题。

3 分析与讨论

当 $\mu_c = 0.6 \text{ eV}$ 、 $f = 20 \text{ THz}$ 、 $W_1 = 200 \text{ nm}$ 和 $R = 50 \text{ nm}$ 时,波导结构在不同厚度的 SiO_2 薄层下的基模归一化电场分布如图 2 所示,其中 $h_1 = 0 \text{ nm}$ 表示 GCNW 直接位于 SOI 衬底的上方。从图 2 可以看

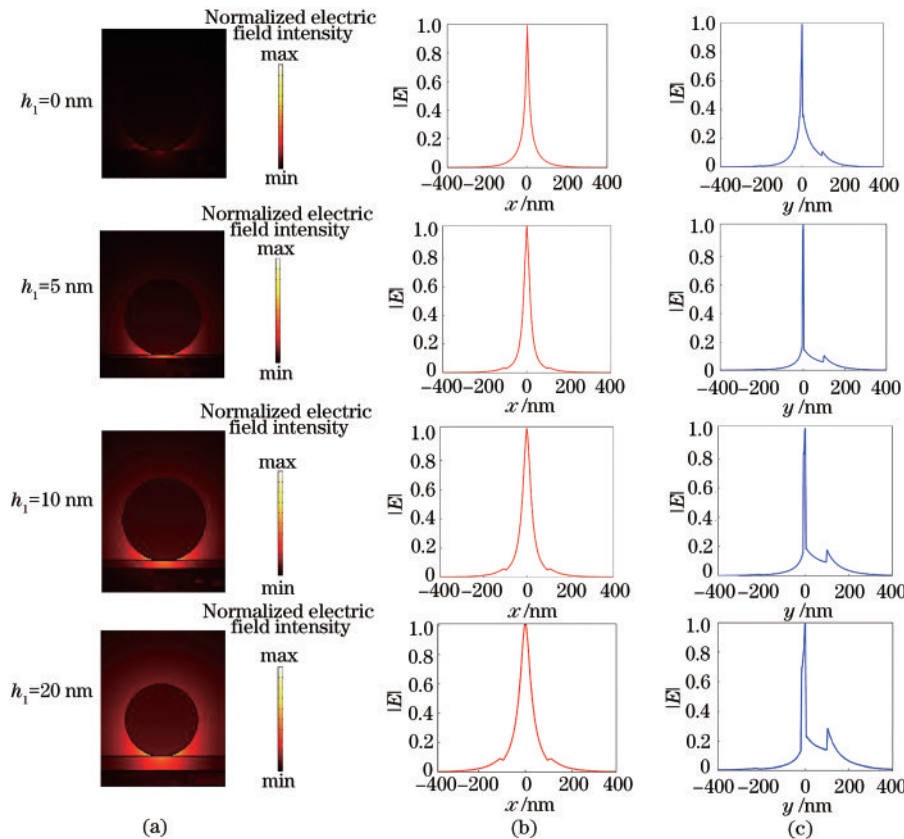


图 2 不同情况下的基模归一化电场分布。(a)模拟结果;(b)x方向;(c)y方向

Fig. 2 Normalized fundamental mode electric field distribution under different conditions. (a) Simulation results; (b) x direction; (c) y direction

到,当 $h_1=0$ nm 时,光场被强烈地集中在 GCNW 的底部附近,这会导致模场面积非常小,此时能量穿透到 SOI 衬底中,导致模式传播距离缩短;在 GCNW 和 SOI 衬底之间插入一层有限宽的 SiO_2 薄层,基于法向电位移矢量的连续性在低折射率的 SiO_2 薄层中可实现巨大的场增强。GCNW 等离子激元模式与 SOI 衬底之间的强耦合,可以使亚波长的光场约束性非常好,这对实现 PICs 的高密度集成至关重要。此外,改变间隙区域的宽度可以对低折射率的 SiO_2 薄层中的能量进行调制,当增大 h_1 值时,模式场约束特性变差,但模式传输损耗更低。

当 $\mu_c=0.6$ eV、 $W_1=200$ nm 和 $R=40$ nm 时,石墨烯等离子激元模式特性与 f 的关系如图 3 所示。从图 3 可以看到,当 f 值从 10 THz 增大到 50 THz 时, n_{eff} 和传输损耗均逐渐增大,这是因为在较高的频率下, σ_g 中电子带间跃迁的贡献较大;当 $h_1=0$ nm 时, n_{eff} 值从 24.0 增大到 111.8;当 f 值从 50 THz 减小至 10 THz 时, A_{nor} 值显著减小;当增加 SiO_2 薄层的厚度时, L_p 值和 A_{nor} 值均逐渐增大;当 $h_1=5$ nm 和 $f=10$ THz 时, L_p 值约为 $10.7 \mu\text{m}$,而 A_{nor} 值仅为 1.3×10^{-6} ;当 h_1 值增大至 20 nm 时,可进一步降低损耗,如当 $f=10$ THz 时, $L_p > 12 \mu\text{m}$,但是模场约束特性变差;在较低的频率下,波导结构的性能更优,即 FOM 更大。

当 $\mu_c=0.6$ eV、 $f=20$ THz 和 $W_1=200$ nm 时,模式传输特性与 R 的关系如图 4 所示。从图 4 可以

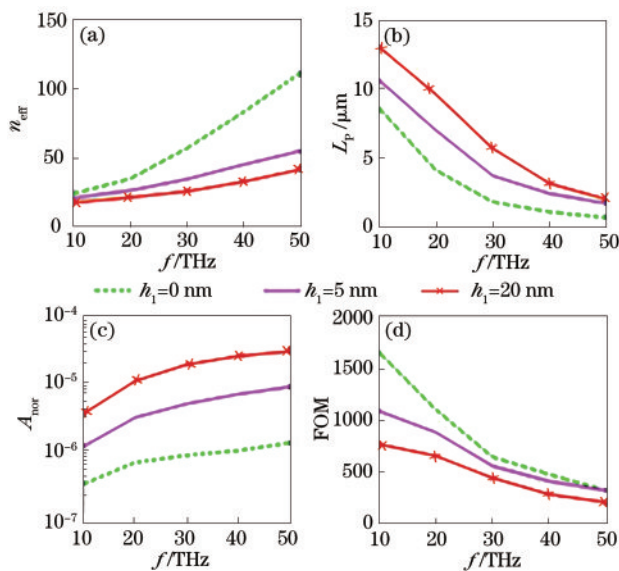


图 3 模式特性与 f 的关系。(a) n_{eff} ; (b) L_p ; (c) A_{nor} ; (d) FOM
Fig. 3 Relationship between mode characteristics and f .
(a) n_{eff} ; (b) L_p ; (c) A_{nor} ; (d) FOM

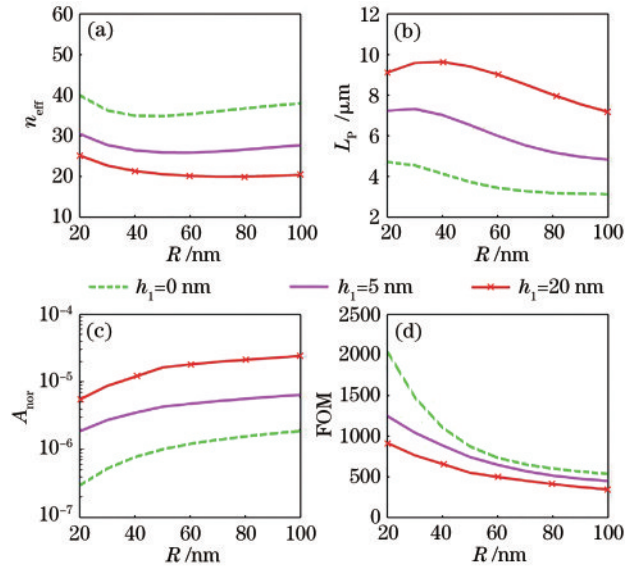


图 4 模式特性与 R 的关系。(a) n_{eff} ; (b) L_p ; (c) A_{nor} ; (d) FOM
Fig. 4 Relationship between mode characteristics and R .
(a) n_{eff} ; (b) L_p ; (c) A_{nor} ; (d) FOM

看到,当 h_1 值较小时,GCNW 等离子激元模式和 SOI 衬底之间的强耦合会导致 n_{eff} 值较大;当 $h_1=0$ nm 时,即模场渗透到高折射率的硅层中,这会导致模场面积非常小,如在 $R=20$ nm 的情况下, A_{nor} 值仅为 2.9×10^{-7} , L_p 值仅为 $4.7 \mu\text{m}$;通过增大 h_1 值可以使更多的能量束缚在间隙区域中,则模式传播损耗减小,即 L_p 值增大;值得注意的是, L_p 值对较小的 R 值更敏感,即 $R < 60$ nm,当 $R=40$ nm 时, L_p 值达到 $10 \mu\text{m}$;当 R 值在 20~100 nm 之间时, A_{nor} 值可保持在深度亚波长尺度,即 $2.9 \times 10^{-7} \sim 2.4 \times 10^{-5}$,这比 GCNW^[25] 和 GCNW 二聚体^[34-35] 小两至三个数量级,比基于 GCNW 的等离子激元波导^[37-38] 小一至两个数量级,如文献[37]中当 $f=20$ THz、 $\mu_c=0.6$ eV、 $R=20$ nm 和 $h_1=5$ nm 时, L_p 值约为 $9 \mu\text{m}$, A_{nor} 值约为 7×10^{-5} ,而设计结构的 L_p 值和 A_{nor} 值分别为 $7.3 \mu\text{m}$ 和 1.9×10^{-6} ,对比发现模场面积约为文献[37]中的 $1/36.8$ 。相关波导结构的模场面积如表 1 所示;当 R 值增大时, FOM 值单调减小,表明该波导在相对较小的半径下可以展现更好的亚波长传输性能,这是由于 R 值的减小意味着石墨烯的表面积减小,所以模式损耗减少。

SiO_2 薄层在模式特性中起着重要的作用,选择不同的 h_1 和 W_1 可以调节 GCNW 等离子激元模式与 SOI 衬底之间的耦合。当 $\mu_c=0.6$ eV、 $f=20$ THz 和 $R=40$ nm 时,模式特性与 W_1 的关系如图 5 所示。从图 5(a) 可以看到,当 $h_1=0$ nm 时,GCNW 直接位

表 1 不同结构的模场面积

Table 1 Model field area of different structures

Structure	f/THz	μ_c/eV	A_{nor}
Ref. [25]	50	1.0	1.35×10^{-3}
Ref. [34]	30	1.0	$\sim 1.00 \times 10^{-4}$
Ref. [35]	30-50	0.6	$\sim 1.00 \times 10^{-5}$
Ref. [37]	20	0.6	7.00×10^{-5}
Proposed structure	20	0.6	1.90×10^{-6}

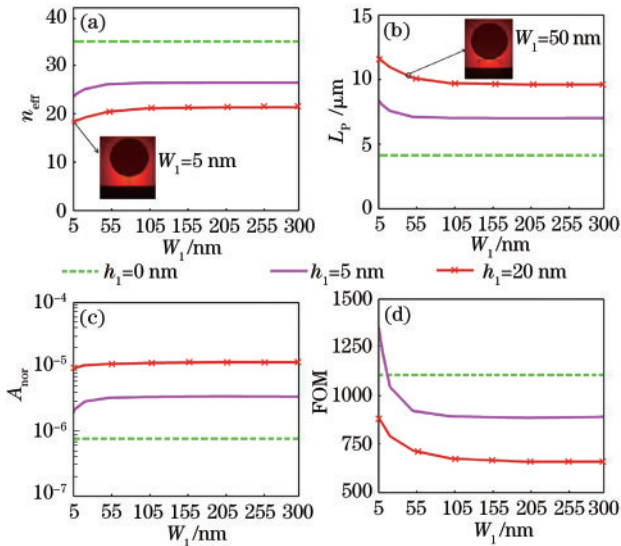


图 5 模式特性与 W_1 的关系。(a) n_{eff} ; (b) L_p ; (c) A_{nor} ; (d) FOM
Fig. 5 Relationship between mode characteristics and W_1 .

(a) n_{eff} ; (b) L_p ; (c) A_{nor} ; (d) FOM

于 SOI 衬底上, n_{eff} 的特性曲线均几乎呈直线, 因此 n_{eff} 与 SiO_2 薄层的厚度无关。图 5(a) 和图 5(b) 的插图为当 $h_1=20 \text{ nm}$ 、 W_1 值分别为 5 nm 和 50 nm 时的基模场分布。从图 5 可以看到, 当 W_1 值大于 200 nm 时, 所有模式特性曲线均趋于稳定, 说明 SiO_2 薄层的宽度不需要很大。

波导性能的调控对于 PICs 的应用具有重要意义。石墨烯的特点之一是通过改变化学势来调控表面电导率, 这可以提供一种控制模式特性的可行方法。当 $f=20 \text{ THz}$ 、 $W_1=200 \text{ nm}$ 和 $R=40 \text{ nm}$ 时, 模式特性与 μ_c 的关系如图 6 所示。文献[46]表明石墨烯中的载流子浓度可高达 10^{14} cm^{-2} , 相应的化学势约为 1.17 eV, 因此 μ_c 的取值范围为 0.4~1.2 eV。从图 6 可以看到, 当 μ_c 值从 0.4 eV 增大至 1.2 eV 时, n_{eff} 值急剧降低; 当 $h_1=5 \text{ nm}$ 时, n_{eff} 值从 36.4 减小至 16.4, 损耗大幅度降低, 即 L_p 值增大; 当 $h_1=5 \text{ nm}$ 和 20 nm 以及 $\mu_c=1.2 \text{ eV}$ 时, L_p 的最大值分别为 13.6 μm 和 17.3 μm ; 在所研究的范围内,

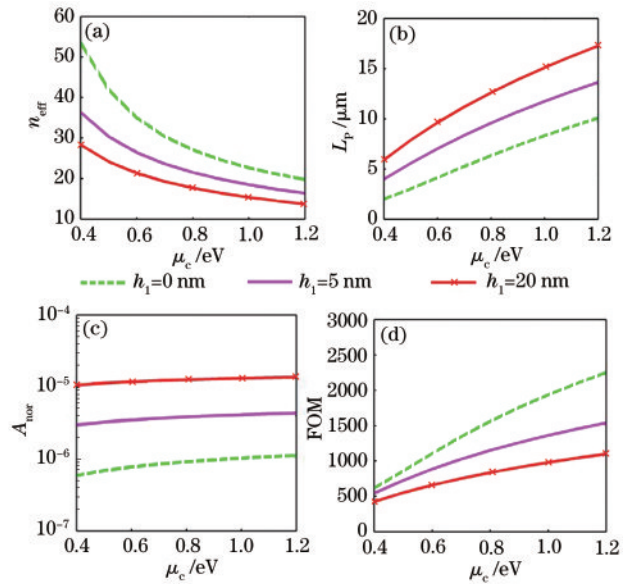


图 6 模式特性与 μ_c 的关系。(a) n_{eff} ; (b) L_p ; (c) A_{nor} ; (d) FOM
Fig. 6 Relationship between mode characteristics and μ_c .

(a) n_{eff} ; (b) L_p ; (c) A_{nor} ; (d) FOM

A_{nor} 增加不到 1 倍, 如当 $h_1=5 \text{ nm}$ 时, A_{nor} 值从 3.0×10^{-6} 增大至 4.3×10^{-6} ; 当 $h_1=20 \text{ nm}$ 时, A_{nor} 值从 1.1×10^{-5} 增大至 1.4×10^{-5} ; 当 $h_1=0 \text{ nm}$ 时, A_{nor} 值约为 10^{-7} 。此外, 从图 4(c) 可以得到, 继续减小 R 值, 可进一步减小 A_{nor} 。因此当增大 μ_c 值时, A_{nor} 值的增幅很小, 而 L_p 值显著增大, 这是由于 μ_c 值的增大会减少 σ_g 的带间贡献[37], 所以当 μ_c 值较大时, 模式传输损耗减少; 增加 μ_c 值会导致 FOM 呈线性增加。

在实际的 PICs 应用中, 波导之间的模式串扰[47] 是一个需要解决的关键问题。为了评估相邻波导之间的模式串扰, 需考虑一个并行排列的双波导结构, 耦合系统如图 7(a) 所示, 两圆中心的距离为 S , 取值范围为 300~1200 nm。当 $S=300 \text{ nm}$ 时, 耦合系统中对称模式和反对称模式下的电场分量 E_y 如图 7(c) 所示, 其中 $E_{y,s}$ 为对称模式下的电场分量, $E_{y,as}$ 为反对称模式下的电场分量。从图 7(b) 可以看到, 相邻波导之间的模场重叠面积相对较小。耦合系统中, 可用 $\text{Re}(N_{\text{eff}}) = n_{\text{eff}}$ 来评估模式串扰。耦合长度 L_c 是指能量从一个波导完全耦合到另外一个波导的所需长度, 即 $L_c = \lambda_0 / (2|n_{\text{eff},s} - n_{\text{eff},as}|)$, $n_{\text{eff},s}$ 和 $n_{\text{eff},as}$ 分别表示在对称模和反对称模下有效模式系数的实部[47]。当 $\mu_c=1 \text{ eV}$ 、 $f=20 \text{ THz}$ 、 $W_1=200 \text{ nm}$ 、 $W=2000 \text{ nm}$ 、 $R=40 \text{ nm}$ 和 h_1 分别为 5 nm 和 20 nm 时, 归一化耦合长度 (L_c/L_p) 与 S 的关系如图 7(d) 所示。从图 7(d) 可以看到, 当 L_c/L_p 值大于 10 时, 可认为相

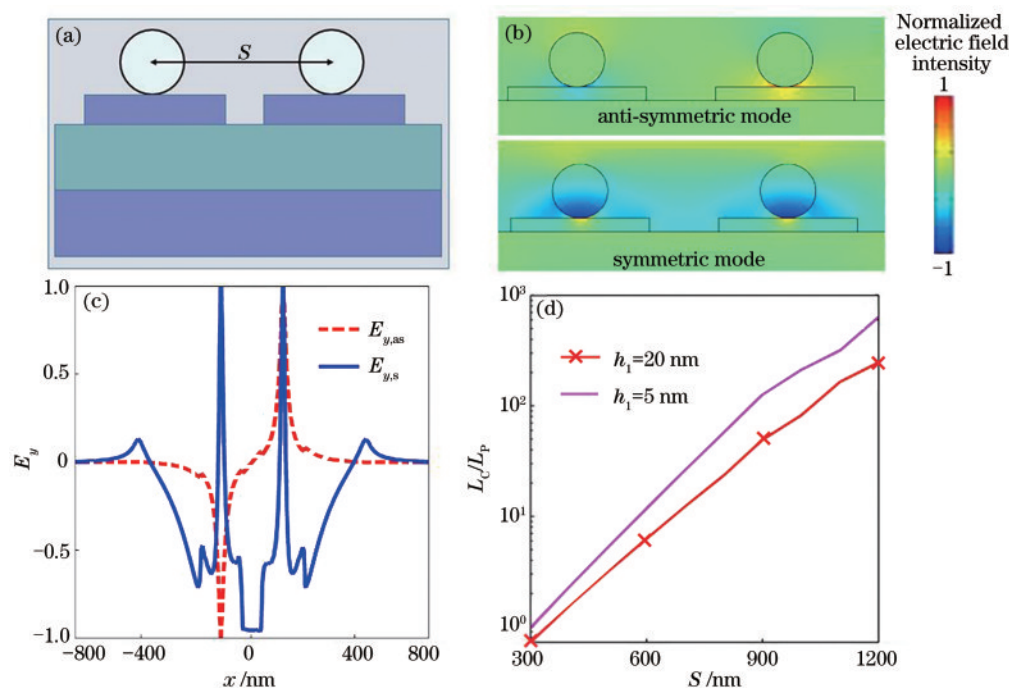


图 7 相邻结构之间的串扰。(a)耦合系统;(b) $E_{y,s}$ 和 $E_{y,as}$ 中的电场分量 E_y 分布情况;(c) $E_{y,s}$ 和 $E_{y,as}$ 中的电场分量 E_y 沿 x 方向分布曲线;(d)不同 h_1 值的归一化耦合长度

Fig. 7 Crosstalk between adjacent structures. (a) Coupled system; (b) distribution of electric field component E_y in $E_{y,s}$ and $E_{y,as}$; (c) distribution curves of the electric field component E_y in $E_{y,s}$ and $E_{y,as}$ along x direction; (d) normalized coupling lengths of different h_1 values

邻波导之间未发生耦合,因此两种模式是相互独立的; $h_1=5$ nm的 L_c/L_p 值比 $h_1=20$ nm大,这是因为 $h_1=5$ nm的模场约束性更好;当 S 值分别约为575 nm($h_1=5$ nm)和670 nm($h_1=20$ nm)时, L_c/L_p 值达到10。实验结果表明,相邻波导之间的模式串扰很小,非常适用于PICs的制备。

4 结 论

提出一种由GCNW和SOI衬底组成的等离激元波导,该结构可以实现高性能的深度亚波长光传输。低折射率的 SiO_2 薄层对等离激元模式特性的调控起着重要的作用。通过改变几何参数和材料参数可以实现等离激元模式特性的深度调制。所设计的波导结构在实现可观传输距离的同时具有超小的模场面积,比相关研究结果小一至三个数量级,而且具有很小的模式串扰。基于GCNW的等离激元波导在可调谐集成光子器件和其他纳米光器件的领域具有潜在的应用价值。

参 考 文 献

[1] Gramotnev D K, Bozhevolnyi S I. Plasmonics beyond the diffraction limit[J]. Nature Photonics,

2010, 4(2): 83-91.

- [2] Fang Y R, Sun M T. Nanoplasmonic waveguides: towards applications in integrated nanophotonic circuits [J]. Light: Science & Applications, 2015, 4(6): e294.
- [3] Alam M Z, Meier J, Aitchison J S, et al. Propagation characteristics of hybrid modes supported by metal-low-high index waveguides and bends [J]. Optics Express, 2010, 18(12): 12971-12979.
- [4] 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.
- [5] Cao Q, Lalanne P. Negative role of surface plasmons in the transmission of metallic gratings with very narrow slits [J]. Physical Review Letters, 2002, 88(5): 057403.
- [6] Lv H, Liu Y, Yu Z, et al. Hybrid plasmonic waveguides for low-threshold nanolaser applications [J]. Chinese Optics Letters, 2014, 12(11): 112401.
- [7] Zhang G M, Sun H L, Li J M, et al. Study on the transmission characteristics of symmetric hybrid long-range surface plasmon polariton waveguide [J]. Laser &

- Optoelectronics Progress, 2013, 50(12): 121301.
张冠茂, 孙海丽, 李建明, 等. 一种对称混合长程表面等离子激元波导传输特性研究[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(12): 121301.
- [8] Oulton R F, Sorger V J, Bartal G, et al. A hybrid plasmonic waveguide for sub-wavelength confinement and long range propagation [J]. Nature Photonics, 2008, 2(8): 496-500.
- [9] Teng D, Cao Q, Wang K. An extension of the generalized nonlocal theory for the mode analysis of plasmonic waveguides at telecommunication frequency [J]. Journal of Optics, 2017, 19(5): 055003.
- [10] Guo X, Ma Y G, Wang Y P, et al. Nanowire plasmonic waveguides, circuits and devices [J]. Laser & Photonics Reviews, 2013, 7(6): 855-881.
- [11] Zhang N, Fu T, Xu H X, et al. Reduced loss of plasmon propagation in a Ag nanowire on Si substrate[J]. Nano Energy, 2020, 68: 104322.
- [12] Dai Y Y, Zhu X L, Mortensen N A, et al. Nanofocusing in a tapered graphene plasmonic waveguide[J]. Journal of Optics, 2015, 17(6): 065002.
- [13] Geim A K. Graphene: status and prospects [J]. Science, 2009, 324(5934): 1530-1534.
- [14] 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.
- [15] Vakil A, Engheta N. Transformation optics using graphene[J]. Science, 2011, 332(6035): 1291-1294.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] Du W, Li K, Wu D, et al. Electrically controllable directional coupler based on tunable hybrid graphene nanoplasmonic waveguide[J]. Optics Communications, 2019, 430: 450-455.
- [19] Kim J T, Choi S Y. Graphene-based plasmonic waveguides for photonic integrated circuits [J]. Optics Express, 2011, 19(24): 24557-24562.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [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激元波导的理论分析[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(20): 202413.
- [23] Ye L F, Sui K H, Liu Y H, et al. Graphene-based hybrid plasmonic waveguide for highly efficient broadband mid-infrared propagation and modulation [J]. Optics Express, 2018, 26(12): 15935-15947.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] 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激元波导 [J]. 光学学报, 2020, 40(6): 0623002.
- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] Chen B, Meng C, Yang Z, et al. Graphene coated ZnO nanowire optical waveguides [J]. Optics Express, 2014, 22(20): 24276-24285.
- [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] 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.
- [33] 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.
- [34] 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.
- [35] 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.
- [36] Teng D, Wang K, Huan Q S, et al. High-performance transmission of surface plasmons in graphene-covered nanowire pairs with substrate [J]. Nanomaterials, 2019, 9(11): 1594.
- [37] 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.
- [38] Hajati M, Monfared Y E. Modal properties of a cylindrical graphene-coated nanowire deposited on a hexagonal boron nitride substrate [J]. Applied Optics, 2019, 58(24): 6666-6671.
- [39] Liang H W, Zhang L, Zhang S, et al. Gate-programmable electro-optical addressing array of graphene-coated nanowires with sub-10 nm resolution [J]. ACS Photonics, 2016, 3(10): 1847-1853.
- [40] Chandler-Horowitz D, Amirtharaj P M. High-accuracy, midinfrared ($450\text{ cm}^{-1} \leq \omega \leq 4000\text{ cm}^{-1}$) refractive index values of silicon [J]. Journal of Applied Physics, 2005, 97(12): 123526.
- [41] Flöry N, Ma P, Salamin Y, et al. Waveguide-integrated van der Waals heterostructure photodetector at telecom wavelengths with high speed and high responsivity [J]. Nature Nanotechnology, 2020, 15(2): 118-124.
- [42] Dong Y H, Yang Q, Du G Q, et al. Electronic manipulation of near-field nanofocusing in few-layer graphene-based hybrid nanotips [J]. Chinese Optics Letters, 2019, 17(7): 072501.
- [43] Zhou Y, Zhu Y Y, Zhang K, et al. Plasmonic band structures in doped graphene tubes [J]. Optics Express, 2017, 25(11): 12081-12089.
- [44] 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.
- [45] Buckley R, Berini P. Figures of merit for 2D surface plasmon waveguides and application to metal stripes [J]. Optics Express, 2007, 15(19): 12174-12182.
- [46] Efetov D K, Kim P. Controlling electron-phonon interactions in graphene at ultrahigh carrier densities [J]. Physical Review Letters, 2010, 105(25): 256805.
- [47] Ma J, Zeng D, Yang Y, et al. A review of crosstalk research for plasmonic waveguides [J]. Opto-Electronic Advances, 2019, 2(4): 180022.