

石墨烯-金属纳米线阵列增敏等离子体光纤传感器

曾丽珍¹, 欧泽涛², 杨宏艳³, 苏永福³, 苏佳鹏², 陈佳宇², 肖功利^{2*}¹桂林电子科技大学研究生院, 广西 桂林 541004;²桂林电子科技大学广西精密导航技术与应用重点实验室, 广西 桂林 541004;³桂林电子科技大学电子工程与自动化学院, 广西 桂林 541004

摘要 设计了一种新颖的石墨烯-金属纳米线阵列结构等离子体 D 型光纤传感器。在纤芯上利用石墨烯与金属纳米线产生的局域表面等离子体共振(LSPR)特性,达到提高折射率灵敏度的效果。采用全矢量有限元法对该结构等离子体模和纤芯模的色散关系进行分析,同时研究金属传感层厚度和金纳米线直径对传感器性能的影响,最后对三种不同结构(金膜结构、石墨烯-金膜-石墨烯结构、石墨烯-金属纳米线阵列结构)传感器的灵敏度进行比较。结果表明,采用优化后的结构参数,可使所设计的基于石墨烯-金属纳米线阵列结构的传感器灵敏度得到极大的提升。折射率为 1.33~1.40 时,所设计结构的最高灵敏度为 7383.79 nm/RIU,平均灵敏度为 4136.00 nm/RIU。该研究结果为下一代等离子体光纤传感器设计提供了理论依据。

关键词 光纤光学; 石墨烯-金属纳米线; 局域表面等离子体共振; D 型光纤; 折射率传感器

中图分类号 TN253

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.1906002

Sensitivity Improvement of Plasmonic Optical Fiber Sensors with Graphene-Metal Nanowire Array

Zeng Lizhen¹, Ou Zetao², Yang Hongyan³, Su Yongfu³, Su Jiapeng², Chen Jiayu²,
Xiao Gongli^{2*}¹Graduate School, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, Guangxi, China;²Guangxi Key Laboratory of Precision Navigation Technology and Application, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, Guangxi, China;³School of Electronic Engineering and Automation, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, Guangxi, China

Abstract A novel plasmonic D-shaped optical fiber sensor with a graphene-metal nanowire array structure was designed. The refractive index sensitivity was improved on the core by using the localized surface plasmon resonance (LSPR) produced by graphene and metal nanowires. The full-vector finite-element method was utilized to investigate the dispersion relationship between the plasmonic mode and the core mode of the structure. The effects of the thickness of the metal sensing layer and the diameter of the metal nanowires on the sensor's performance were also examined. Finally, the sensitivity of three types of sensors with different structures (gold film structure, graphene-gold film-graphene structure, and graphene-metal nanowire array structure) was compared. The results reveal that adopting the optimized structural parameters considerably improves the sensitivity of the developed sensor based on the graphene-metal nanowire array structure. Specifically, when the refractive index is between 1.33 and 1.40, the design structure obtains a maximum sensitivity of 7383.79 nm/RIU and an average sensitivity of 4136.00 nm/RIU. The findings of this study serve as a theoretical foundation for the development of next-generation plasmonic optical fiber sensors.

Key words fiber optics; graphene-metal nanowire; localized surface plasmon resonance; D-shaped optical fiber; refractive index sensor

收稿日期: 2021-12-13; 修回日期: 2022-01-21; 录用日期: 2022-04-01

基金项目: 国家自然科学基金(61765004, 62165004, 61805053)、广西自然科学基金(2017GXNSFAA198164)、桂林电子科技大学研究生教育创新计划(2021YCX040)、广西精密导航技术与应用重点实验室基金(DH202006, DH202004)、广西自动检测技术与仪器重点实验室基金(YQ20115)

通信作者: *xgl.hy@126.com

1 引言

表面等离子体激元(SPP)是由自由电子和入射光在金属表面的相互作用产生的一种特殊电磁模式。在金属-电介质界面处,当入射光在这个界面上反射时,光并不完全反射回介质中,而是以指数衰减的方式在金属中传播,其深度约为每个波长的距离,这就是倏逝波。而当SPP与倏逝波的频率接近时,两者就会发生耦合,从而产生表面等离子体共振(SPR)效应^[1-3]。由于环境介质折射率(RI)或检测溶液浓度的变化,基于SPR效应的传感器会引起相应共振波长的变化,这种SPR传感器成为一个新的研究热点。与传统Kretschmann结构SPR传感器相比,光纤SPR传感器具有制作简单、小型化、低成本的特点;但其灵敏度不够高,面临无法检测低含量或小分子质量分析物的问题^[4-6]。

局域表面等离子体共振(LSPR)是指当光线射入由贵金属组成的纳米粒子时,以及当入射光子频率与纳米粒子振动频率相匹配时,光谱中出现一个强共振吸收峰的现象^[7-8]。与SPR^[9-10]的不同之处在于,LSPR被局限在金属纳米粒子局部,是尺寸小于光波长的纳米颗粒与SPP耦合的结果。当入射光的频率和金属纳米颗粒的振荡频率接近时,金属纳米颗粒会吸收入射光的大部分能量,此时LSPR发生,在损耗谱上出现损耗共振峰。与SPR相比,LSPR一般采用体积小的金属纳米颗粒产生,这会使光吸收和散射能够更好地集中在其表面,使其在可见光和近红外光波段具有很强的吸收作用^[11-12]。近年来,SPR光纤传感器在生物化学领域得到了迅速发展,而在D型光纤生物传感器的一侧涂覆石墨烯,既能促进生物分子的吸附,又能防止银的吸附和蛋白质的变性^[13-14]。研究表明,带有石墨烯涂层的生物传感器更敏感^[15-16]。因此,关于石墨烯-金属复合物的研究很受欢迎^[17-20],而在生物传感器中,金纳米具有良好的生物相容性,能够维持生物分子的活性且其与二维石墨烯材料结合之后能同时兼备两者的优良性能^[21-23],所以相对于石墨烯金属复合物,石墨烯-金纳米复合物更受青睐。

基于以上研究背景,本文提出了一种基于石墨烯-金属纳米线阵列增敏的等离子体D型光纤传感器,在纤芯上利用石墨烯与金属纳米线产生的LSPR特性,获得提高折射率灵敏度的效果。采用全矢量有限元法对传感器等离子体模和纤芯模的色散关系进行分析,研究金属传感层厚度和金属纳米线直径等主要参数对传感器性能的影响,并对三种不同结构的传感器(在D型侧面抛光面涂覆金属薄膜、采用石墨烯-金膜-石墨烯结构、采用石墨烯-金属纳米线阵列结构)进行数值仿真比较。通过结构参数的优化,发现折射率为1.33~1.40时,采用石墨烯-金属纳米线阵列结构设计的传感器的最高灵敏度为7383.79 nm/RIU,平均灵敏度为4136.00 nm/RIU,比在D型侧面抛光面涂覆金属薄膜的传感器分别高24.47%、30.19%,比采用石

烯-金膜-石墨烯结构的传感器分别高16.7%、19.34%。该结构设计及仿真结果可为实现增敏等离子体光纤传感器提供新思路。

2 传感器设计与原理

本文提出了一种新型的等离子体D型光纤传感器,如图1所示。首先,对三种不同结构的传感器进行了比较。图1(a)所示的是仅在光纤包层的侧面抛光面涂覆一层金属薄膜结构的传感器,其利用金膜产生SPR,从而实现传感特性。图1(b)所示的是采用石墨烯-金膜-石墨烯结构的传感器。先在光纤包层的侧面抛光面上引入石墨烯层,然后在石墨烯层上涂覆金膜,最后再引入石墨烯层形成石墨烯-金膜-石墨烯的三明治结构,利用石墨烯与金膜产生的SPR可实现传感。图1(c)所示的是采用石墨烯-金属纳米线阵列结构的传感器。首先将金纳米线与石墨烯层结合,再把结合后的石墨烯与金属纳米线按阵列摆放在光纤包层的侧面抛光面上,形成LSPR传感通道,从而实现传感特性。通过对三种不同结构的传感性能进行比较,发现基于石墨烯-金属纳米线阵列结构的等离子体D型光纤传感器能够实现增敏效果,如图1(d)所示。这是由于:基于石墨烯与金属纳米线产生LSPR的特性,当被测RI发生变化、纤芯模与等离子体模相位匹配条件发生变化时,其共振波长发生显著偏移。故本文利用石墨烯与金属纳米线结构来实现增敏,再通过检测共振波长的偏移与待测液的折射率变化关系来实现折射率灵敏度的实时测量。

本文所设计的传感器的光纤衬底材料是熔融的SiO₂,其折射率 n_{SiO_2} 与波长 λ 之间的关系可以根据Sellmeier公式^[24]来定义:

$$n_{\text{SiO}_2}^2 = 1 + \frac{0.6961663\lambda^2}{\lambda^2 - 0.0684043^2} + \frac{0.4079426\lambda^2}{\lambda^2 - 0.1162414^2} + \frac{0.8974794\lambda^2}{\lambda^2 - 9.8961610^2} \quad (1)$$

金作为常用的等离子体材料,其相对介电常数 ϵ_{Au} 可以由Drude模型^[2]来描述:

$$\epsilon_{\text{Au}} = \epsilon_{\infty} - \frac{\omega_{\text{D}}^2}{\omega(\omega + j\gamma_{\text{D}})} - \frac{\Delta\epsilon \cdot \Omega_{\text{L}}^2}{(\omega^2 - \Omega_{\text{L}}^2) + j\Gamma_{\text{L}}\omega} \quad (2)$$

式中: ϵ_{∞} 为高频下的相对介电常数, $\epsilon_{\infty}=5.9673$; ω_{D} 为等离子振荡频率, $\omega_{\text{D}}/(2\pi)=2113.60$ THz; γ_{D} 为阻尼频率, $\gamma_{\text{D}}/(2\pi)=15.92$ THz; $\Delta\epsilon$ 为加权系数, $\Delta\epsilon=1.09$; ω 为入射光角频率, $\omega=2\pi c/\lambda$, c 为真空中的光速; Γ_{L} 为洛伦兹振荡的频带宽度, $\Gamma_{\text{L}}/(2\pi)=104.60$ THz; Ω_{L} 为洛伦兹振荡频率, $\Omega_{\text{L}}/(2\pi)=650.07$ THz。而对于石墨烯层,其折射率表达式^[25]如下:

$$n = 3 + \frac{ic_1\lambda}{3} \quad (3)$$

式中: c_1 为常数,其值为 $5.446 \mu\text{m}^{-1}$ 。一般来说,单层石墨烯的厚度为0.34 nm。在本设计中,石墨烯的总厚度 $D=0.34N$,其中, N 为石墨烯层数。

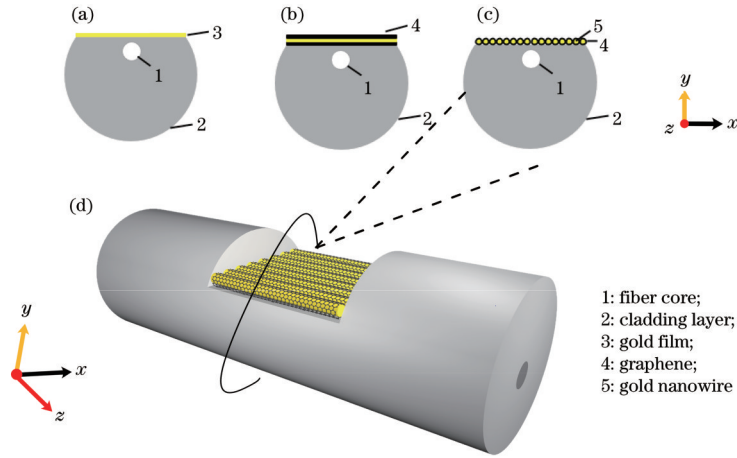


图 1 D型等离子体光纤传感器示意图。侧面抛光且涂覆(a)金膜结构、(b)石墨烯-金膜-石墨烯结构和(c)石墨烯-金属纳米线阵列结构;(d)三维结构图

Fig. 1 Schematic diagrams of D-type plasmonic optical fiber sensors. Its side is polished and coated with (a) gold film structure, (b) graphene-gold film-graphene structure, and (c) graphene-metal nanowire array structure; (d) three-dimensional structure diagram

当 SPP 模和光纤基模满足相位匹配条件时,两者会发现耦合作用,从而产生 SPR。但是,SPP 模的有效折射率受待测 RI 变化的影响较大,而基模的有效折射率受待测 RI 变化的影响较小。当外界 RI 发生变化时,基模与 SPP 模的相位匹配条件发生变化,从而导致 SPR 共振波长发生偏移。换句话说,当产生 SPR 时,纤芯模、金属和待测介质的介电常数会影响其共振角度,而纤芯模和金属的介电常数与波的角频率相关,所以,待测介质的介电常数 ϵ_1 改变,SPR 的共振角度也会发生变化,进而导致共振波长发生偏移。基于以上理论,本设计利用外界待测 RI 与共振波长的变化关系进行数值仿真,并通过计算共振波长偏移量得到待测 RI 变化。而灵敏度 $S_{(\lambda)}$ 为共振波长的偏移量与待测 RI 变化量之比^[26],这是评价传感器性能的重要参数之一,其定义如下:

$$S_{(\lambda)} = \frac{\Delta\lambda_{\text{peak}}}{\Delta n_s}, \quad (4)$$

式中: $\Delta\lambda_{\text{peak}}$ 为共振波长的偏移量; Δn_s 为待测液体折射率的变化。

对于等离子体光纤传感器来说,灵敏度不是越高越好,因为灵敏度高会导致共振峰的半峰全宽(FWHM)过大,从而导致传感器分辨率的降低,因此本文还引入另外一个重要的参数——品质因数(FOM),这样可以较全面地评价光纤传感器的性能,FOM^[27]的定义如下:

$$M_{\text{FOM}} = \frac{S_{(\lambda)}}{W_{\text{FWHM}}}, \quad (5)$$

式中: W_{FWHM} 为共振峰的 FWHM。

3 结构优化与性能分析

文中所述传感器主要利用 SPR 原理来实现对待测液体的检测,当入射光在光疏介质和金属介质表面发生全反射时,所形成的倏逝波能够引起金属介质中自由电子以一定规律振动,从而产生表面等离子体波

(SPW),并且当两者的波数矢量分量一致时,能够满足激发 SPR 的基本条件,共振的强弱可以反映出传感器的检测性能^[3]。图 2(a)展示了金膜结构、石墨烯-金膜-石墨烯结构和石墨烯-金属纳米线阵列结构的共振分析。石墨烯-金膜-石墨烯结构的共振强度小于金膜结构的共振强度,虽然石墨烯可以提供更多的电子、提高灵敏度,但石墨烯为零带隙结构,自身具有半金属特性,加速了电子在金属表面的流动,从而降低了共振强度;石墨烯-金属纳米线阵列结构的共振强度是大于金膜结构的共振强度,这是由于金属纳米线阵列结构在相同的范围内增大了金属与介质的接触面积,从而增强了共振。此外,每个金属纳米线顶部都形成了 LSPR,这也可以提高共振强度。

本文所设计的传感器在 D 型侧抛面上采用石墨烯-金属纳米线阵列结构,金纳米线在激发 LSPR 之后,其等离子体共振会分裂成两个模,分别是沿着纳米棒长轴的纵模和垂直于纵模的横模。同时,研究证明纳米棒的横向等离子体模对尺寸和待测 RI 的变化不敏感,而纵向等离子体模随纳米棒长宽比的增加发生红移,并且纵向等离子体模对待测 RI 的变化极其敏感^[28]。因此,本文设计主要考虑金纳米棒的纵向等离子体模,并且本文设计的传感器的主要工作范围是 600~1000 nm。图 2(b)为等离子体光纤传感器的等离子体模与纤芯模的色散关系和 SPR 模场分布图。从图 2(b)中的插图 I、II 可以发现,在远离相位匹配点对应的波长(共振波长)时,纤芯模和等离子体模分别被限制在纤芯和金属膜中。从图 2(b)中插图 III 可以看出,当相位匹配时,纤芯模的大部分能量耦合到金属膜中,折射率虚部急剧增大,即损耗急剧增大,在图中表现为共振峰(即共振波长)。而从图 2(b)中纤芯模可以看出,随着波长增加,纤芯模有效折射率实部逐渐下降。从虚部曲线可以发现,随着波长的变化,曲线出现一个共振峰,这就是因为纤芯模与金膜表面的 SPP 模满足了相位匹配条件,所以在金膜表面出现了 SPR

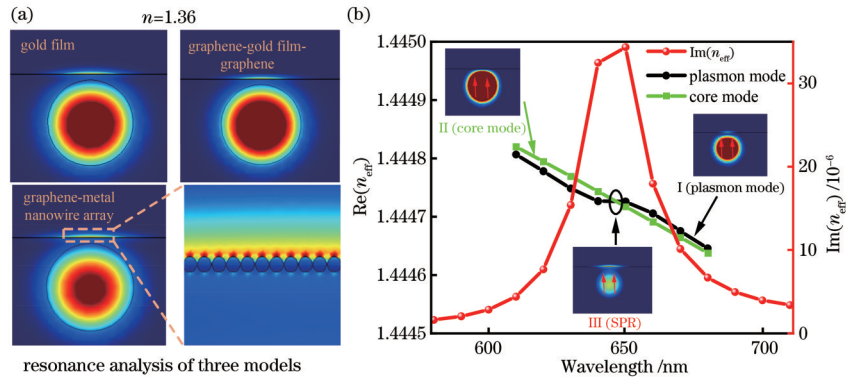


图2 等离子体光纤传感器。(a)三种模型的共振分析;(b)金膜结构模型的色散关系与模式分析

Fig. 2 Plasmonic optical fiber sensor. (a) Resonance analysis of three models; (b) dispersion relation and mode analysis of gold film structure model

现象。

传感器的模场有效折射率 n_{eff} 通过复数表示,其表达式如下:

$$n_{\text{eff}} = \text{Re}(n_{\text{eff}}) + j \text{Im}(n_{\text{eff}}), \quad (6)$$

式中: $\text{Re}(n_{\text{eff}})$ 为折射率实部,代表一般意义上的折射率; $\text{Im}(n_{\text{eff}})$ 为折射率虚部,主要与传感器的传输损耗有关。折射率虚部与限制损耗 α_{loss} 的关系^[29]可表示为

$$\alpha_{\text{loss}} = \frac{40\pi}{\lambda \ln 10} \text{Im}(n_{\text{eff}}) \times 10^6. \quad (7)$$

在模拟仿真和分析过程中,基于式(7)可以计算入射波长的光损耗,再将数据进行处理可以得到传感器的损耗谱,在损耗谱上可以很容易地发现其共振峰,从而确定共振波长。当外界待测 RI 发生变化时,纤芯模与等离子体模的相位匹配条件发生变化,从而导致 SPR 共振波长发生偏移。因此本设计是基于传感器损耗光谱,利用外界待测 RI 与共振波长的关系进行数值仿真,通过对各种状态下对应的损耗光谱进行分析,并通过计算共振波长的偏移量得到待测 RI 的变化。同时,通过数值仿真,可以发现传感器不同参数会对损耗光谱产生影响。通过优化参数,设计出一种高灵敏度的等离子体光纤传感器。

3.1 结构参数优化

为了获得更好的传感器性能,需要优化传感器侧抛深度(纤芯到 D 型侧抛面的距离)、石墨烯层数、金属膜厚度 t 和金纳米线直径 d 这 4 个主要结构参数;而对于侧抛深度,随着侧抛深度的增加,纤芯模和 SPP 模之间的距离增加,导致纤芯模与 SPP 模的耦合强度降低,并且从纤芯模传递到 SPP 模的能量减少,从而在损耗峰值谱中表现出峰值减小、FWHM 逐渐降低的现象;但由于在不同的折射率环境下,侧抛深度的变化不会影响共振峰的位置,因此侧抛深度对传感器的灵敏度没有影响^[16]。

对于石墨烯而言,石墨烯会提高传感器的灵敏度^[30-32],同时,随着石墨烯厚度的增加,损耗减小,石墨烯的虚部也呈指数增加,这增加了载流子浓度,导致石墨烯的化学势 μ_c 增加,共振波长蓝移^[33],同时传感器的 FWHM 变大,因此经过综合分析,本文选择石墨烯

的层数为 3。在光纤侧抛深度和石墨烯层数保持不变的情况下,对光纤对金属膜厚度 t 和金纳米线直径 d 进行优化。由于纤芯激发的倏逝波在传播时能量以指数形式衰减,所以金膜厚度要小于倏逝波的穿透深度^[34];在可见光和近中红外频段,本设计金膜的厚度要小于 60.5 nm。当待测 RI 分别为 1.33、1.34 时, t 在 30~55 nm 范围以 5 nm 步长变化,在不同 t 条件下进行数值仿真,得到如图 3(a)所示的损耗光谱。研究发现,当 t 变大时,传感器的损耗先增大后减小,共振波长红移。这主要是因为:金膜越厚,倏逝波衰减的幅度越大,倏逝波与 SPW 模式耦合的能量就越小,所以损耗也就越小。而当金膜厚度增加时,SPW 的有效折射率增加,而纤芯的有效折射率不变,导致发生 SPR 时 SPW 模与纤芯模的共振波长发生红移。再通过数据处理得到如图 3(b)所示的 t 对传感器性能的影响图。可以发现,FWHM 随着金膜厚度的增加而减小,因为当金薄膜过薄时,倏逝场集中在薄膜处的能量很弱,此时,SPR 激发的效果不好,从而使得 FWHM 变大。因此,本文选择了 45 nm 的金膜厚度。同样地,待测 RI 分别为 1.33、1.34 时, d 在 40~60 nm 范围以 10 nm 步长变化,在不同 d 条件下进行数值仿真,得到如图 3(c)所示的损耗光谱。研究发现,传感器的损耗随着 d 的增加而增大,共振波长发生红移,随着 d 的增加,越来越多的纤芯模能量被用来克服阻尼损耗^[35-37];再通过数据处理得到如图 3(d)所示的 d 对传感器性能的影响图。传感器的 FWHM 同样是随着 d 的增加而减小。所以,通过图 3(c)、(d)的分析,最终本文选择 60 nm 的金纳米线直径。

3.2 传感器性能分析

在优化该结构主要参数后,分别选取 $t = 45 \text{ nm}$ 、 $d = 60 \text{ nm}$,在待测 RI 在 1.33~1.40 范围内以 0.01 步长变化的条件下,对图 1 所示的三种不同结构传感器进行数值仿真。图 4(a)~(c)示出随着外界待测 RI 变化时光传输损耗与波长的关系图,其分别对应图 1(a)~(c)的结构。可以发现,随着待测 RI 的增加,传感器的共振波长都发现红移,共振损耗逐渐增大,这是因为:折射率逐渐增大,使得纤芯对光的约束减少,

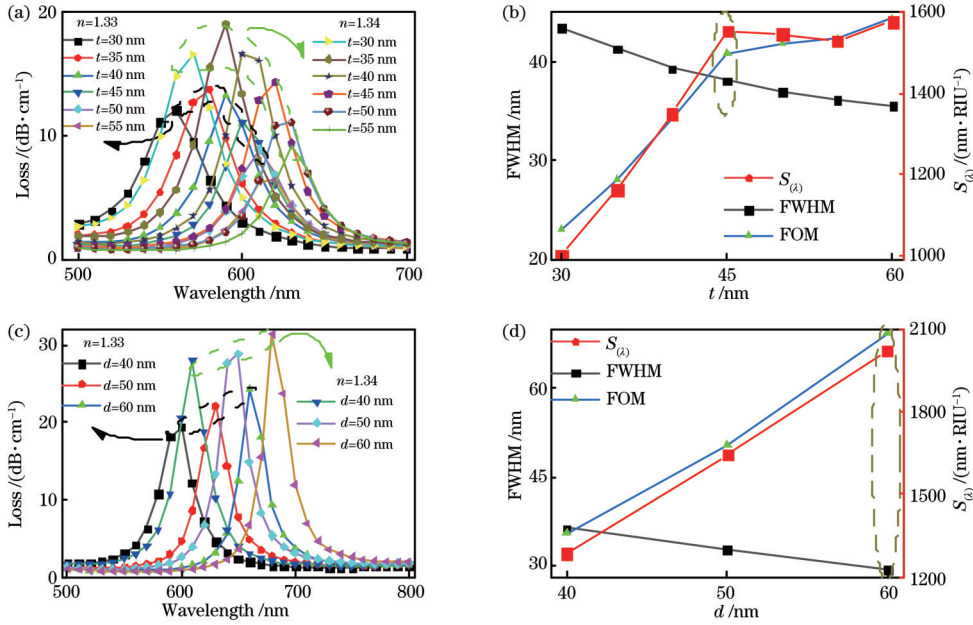


图 3 金膜厚度 t 和金纳米线直径 d 的优化。(a) 折射率分别为 1.33 和 1.34 条件下 t 与损耗的关系; (b) t 对传感器性能的影响; (c) 折射率分别为 1.33 和 1.34 条件下 d 与损耗的关系; (d) d 对传感器性能的影响
 Fig. 3 Optimization of gold film thickness t and gold nanowire diameter d . (a) Relationship between t and loss for refractive indexes of 1.33 and 1.34, respectively; (b) influence of t on performance of sensor; (c) relationship between d and loss for refractive indexes of 1.33 and 1.34, respectively; (d) influence of d on performance of sensor

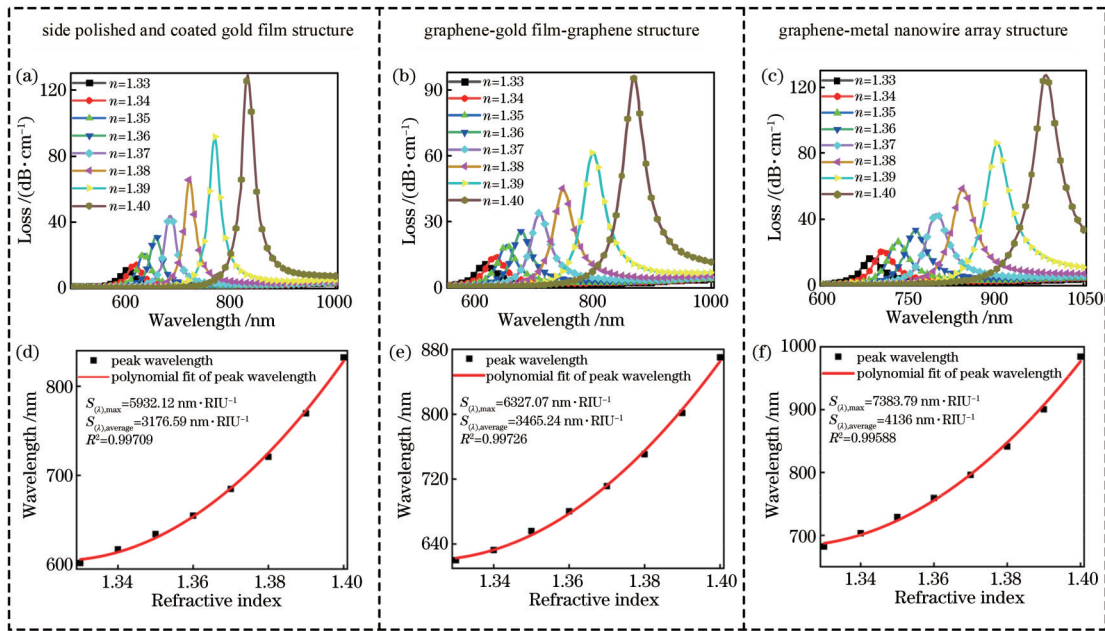


图 4 外界待测 RI 变化情况下的损耗、折射率与共振波长的变化。(a)~(c) 传输损耗随波长的变化; (d)~(f) 共振波长的变化
 Fig. 4 Loss, refractive index, and resonance wavelength when RI to be measured is changing. (a)~(c) Change of transmission loss with wavelength; (d)~(f) change of resonance wavelength

而更多的能量在共振时从纤芯模转移到 SPP 模, 从而导致损耗逐渐增大。通过将图 4(a) 与图 4(b)、(c) 进行对比分析, 发现图 4(a) 的 FWHM 比图 4(b)、(c) 的 FWHM 都小, 这是因为石墨烯加大了共振曲线频带宽度。当石墨烯涂覆在金属表面时, 金属界面的有效折射率增加, 因此, 需要更大的共振波长来满足共振条件。在 SPR 过程中, 石墨烯的阻尼损耗降低了纤芯模与

SPP 模耦合的能量, 导致共振曲线的展宽和 FWHM 的增加。图 4(c) 是一种由石墨烯-金属纳米线阵列结构形成的 LSPR 通道的结果。与金属薄膜结构相比, 金属纳米线在可见光和近红外光波段具有更强的倏逝场和光吸收能力, 这是因为它们足够小, 可以限制电子并产生量子效应。同时, 使用金纳米线的结构也可以有效提高传感器的灵敏度, 这是因为: 金纳米线的表面富集效

应和金纳米棒与金纳米棒的 LSPR 与金膜的 SPR 之间的等离子体耦合效应,可以大大加强金纳米线对传感器的增敏作用^[27],并且,本文设计的传感器的金纳米线纵向等离子体共振吸收峰非常接近 SPR 时的共振波长,对比图 4(e)、(f)可知,在相同折射率下,两者的共振波长相差只有 60~115 nm,而两者越接近,金纳米线对传感器的增敏效果就越好;从图 4(c)中可以发现基于石墨烯-金属纳米线阵列结构的传感器的共振波长偏移量比其他两种结构更大,光损耗峰值更高。

最后,对三种不同结构传感器的灵敏度进行分析和比较,如图 4(d)~(f)所示,图中 $S_{(\lambda),\max}$ 为 $S_{(\lambda)}$ 的最大值, $S_{(\lambda),\text{average}}$ 为 $S_{(\lambda)}$ 的平均值。从图 4(d)可以看出,共振波长与外界待测 RI 的关系满足二项式关系 $y=39364.70x^2-104289.04x+69678.07$ 。通过对二项式方程的求导^[3],得到了 RI 在 1.33~1.40 范围内的灵敏度曲线 $y=78729.40x-104289.04$;因此,该传感器结构的最高灵敏度可达 5932.12 nm/RIU,平均灵敏度为 3176.59 nm/RIU。从图 4(e)可以看出,共振波长与待

测外界 RI 的关系为 $y=40883.33x^2-108146.26x+72138.72$,满足二项式关系。通过对二项式方程的求导,得到了 RI 在 1.33~1.40 范围内的灵敏度曲线 $y=81766.67x-108146.26$ 。因此,该传感器结构的最高灵敏度可达 6327.07 nm/RIU,平均灵敏度为 3465.24 nm/RIU。从图 4(f)可以看出,共振波长与外界待测 RI 的关系为 $y=46403.39x^2-122545.71x+81590.16$,满足二项式关系。通过对二项式方程的求导,得到了 RI 在 1.33~1.40 范围内的灵敏度曲线 $y=92806.79x-122545.71$ 。因此,该传感器结构的最高灵敏度可达 7383.79 nm/RIU,平均灵敏度为 4136 nm/RIU。综上可知,本文所设计的基于石墨烯-金属纳米线阵列结构的传感器的最高灵敏度比第一种结构和第二种结构分别提高 24.47% 和 16.7%,平均灵敏度比第一种结构和第二种结构分别提高 30.19% 和 19.34%。结果表明,该传感器达到了增敏效果。表 1 说明本文所设计的传感器具有一定的性能优势。

表 1 各种光纤传感器的性能比较

Table 1 Performance comparison of various fiber optic sensors

Reference	RI range	Sensitivity / (nm·RIU ⁻¹)	Average sensitivity / (nm·RIU ⁻¹)	Published year
Ref. [4]	1.3332-1.3710	3074.34	—	2019
Ref. [11]	1.3200-1.3800	7000.00	—	2020
Ref. [38]	1.3300-1.4100	6875.00	—	2020
Ref. [39]	1.3300-1.3800	7000.00	—	2021
Ref. [40]	1.3300-1.3700	—	525.00	2021
Ref. [41]	1.3300-1.4000	—	3475.14	2021
Ref. [42]	1.3200-1.3600	6430.00	—	2014
Ref. [43]	1.3330-1.4040	6328.00	—	2019
Ref. [44]	1.3400-1.4200	4284.80	—	2021
Our work	1.3300-1.4000	7383.79	4136.00	—

4 结 论

提出了一种新型的石墨烯-金属纳米线阵列结构等离子体光纤传感器,采用全矢量有限元法分析了该结构的等离子体模和纤芯模的色散关系,同时研究金属膜厚度 t 和金纳米线直径 d 对其传感性能的影响,优化参数后在 $t=45\text{ nm}$ 、 $d=60\text{ nm}$ 条件下对三种不同结构(金膜、石墨烯-金膜-石墨烯、石墨烯-金属纳米线阵列)传感器的灵敏度进行分析和比较。结果表明:1)金属纳米线在可见光、近红外光波段有较强的光吸收作用,石墨烯和金属纳米线结合产生的 LSPR 效应有助于提升折射率灵敏度;2)涂覆石墨烯层后其折射率平均灵敏度和最高灵敏度均有所提高;3)通过对三种不同结构的传感器性能进行比较,发现采用石墨烯-金属纳米线阵列结构有显著增敏效果,这为新型二维材料在光纤传感检测领域的应用提供了崭新思路。

参 考 文 献

- [1] Maier S A. 离激元学:基础与应用[M]. 张彤,王琦龙,张晓阳,等,译. 南京:东南大学出版社,2014.
Maier S A. Plasmonics fundamentals and applications [M]. Zhang T, Wang Q L, Zhang X Y, et al., Transl. Nanjing: Southeast University Press, 2014.
- [2] Wang J W, Liu C, Wang F M, et al. Surface plasmon resonance sensor based on coupling effects of dual photonic crystal fibers for low refractive indexes detection [J]. Results in Physics, 2020, 18: 103240.
- [3] Homola J, Yee S S, Gauglitz G N. Surface plasmon resonance sensors: review[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 1999, 54(1/2): 3-15.
- [4] Niu L Y, Wang Q, Jing J Y, et al. Sensitivity enhanced D-type large-core fiber SPR sensor based on gold nanoparticle/Au film co-modification[J]. Optics Communications, 2019, 450: 287-295.
- [5] Jing J Y, Wang Q, Zhao W M, et al. Long-range surface plasmon resonance and its sensing applications: a review

- [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2019, 112: 103-118.
- [6] Shalabney A, Abdulhalim I. Sensitivity-enhancement methods for surface plasmon sensors[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2011, 5(4): 571-606.
- [7] Santos D F, Guerreiro A, Baptista J M. Surface plasmon resonance sensor based on D-type fiber with a gold wire [J]. *Optik*, 2017, 139: 244-249.
- [8] Zhan Y S, Li Y L, Wu Z Q, et al. Surface plasmon resonance-based microfiber sensor with enhanced sensitivity by gold nanowires[J]. *Optical Materials Express*, 2018, 8(12): 3927-3940.
- [9] Xiao G L, Li J Q, Pan Y Y, et al. Significantly enhanced sensitivity using a gold aperture arrays-dielectric hybrid structure in optical fiber sensor[J]. *Journal of Physics Communications*, 2019, 3(1): 015005.
- [10] Ritchie R H. Plasma losses by fast electrons in thin films [J]. *Physical Review*, 1957, 106(5): 874-881.
- [11] Tong K, Cai Z Y, Wang J, et al. D-type photonic crystal fiber sensor based on metal nanowire array[J]. *Optik*, 2020, 218: 165010.
- [12] Maier S A, Atwater H A. Plasmonics: localization and guiding of electromagnetic energy in metal/dielectric structures[J]. *Journal of Applied Physics*, 2005, 98(1): 011101.
- [13] Dash J N, Jha R. On the performance of graphene-based D-shaped photonic crystal fibre biosensor using surface plasmon resonance[J]. *Plasmonics*, 2015, 10(5): 1123-1131.
- [14] Tong K, Wang F C, Wang M T, et al. D-shaped photonic crystal fiber biosensor based on silver-graphene [J]. *Optik*, 2018, 168: 467-474.
- [15] An G W, Li S G, Cheng T L, et al. Ultra-stable D-shaped optical fiber refractive index sensor with graphene-gold deposited platform[J]. *Plasmonics*, 2019, 14(1): 155-163.
- [16] Xiao G L, Ou Z T, Yang H Y, et al. An integrated detection based on a multi-parameter plasmonic optical fiber sensor[J]. *Sensors*, 2021, 21(3): 803.
- [17] 赵洪霞, 程培红, 丁志群, 等. 基于交替光栅和石墨烯复合结构的折射率传感器[J]. *光学学报*, 2021, 41(7): 0728001.
- Zhao H X, Cheng P H, Ding Z Q, et al. Refractive index sensor based on alternating grating and graphene composite structure[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(7): 0728001.
- [18] 郭晨瑜, 王豆豆, 穆长龙. 基于石墨烯/氧化石墨烯的光纤传感器研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(15): 150003.
- Guo C Y, Wang D D, Mu C L. Progress on optical fiber sensors based on graphene/graphene oxide[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(15): 150003.
- [19] 石胜辉, 吴德操, 王鑫, 等. 氧化石墨烯包覆金纳米壳修饰长周期光栅的免疫传感器[J]. *光学学报*, 2020, 40(18): 1806001.
- Shi S H, Wu D C, Wang X, et al. An immunosensor based on the graphene-oxide-encapsulated Au-nanoshell-coated long-period fiber grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(18): 1806001.
- [20] 赵静, 王英, 王义平. 氧化石墨烯增强型表面等离子体共振光纤传感器[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(23): 230601.
- Zhao J, Wang Y, Wang Y P. Graphene-oxide-enhanced surface plasmon resonance fiber sensor[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(23): 230601.
- [21] Thanh T D, Balamurugan J, Hwang J Y, et al. *In situ* synthesis of graphene-encapsulated gold nanoparticle hybrid electrodes for non-enzymatic glucose sensing[J]. *Carbon*, 2016, 98: 90-98.
- [22] Zhang H F, Li P L, Wu M M. One-step electrode position of gold-graphene nanocomposite for construction of cholesterol biosensor[J]. *Biosensors Journal*, 2015, 4(2): 1000128.
- [23] Liu N, Chen X, Ma Z F. Ionic liquid functionalized graphene/Au nanocomposites and its application for electrochemical immunosensor[J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2013, 48: 33-38.
- [24] Malitson I H. Interspecimen comparison of the refractive index of fused silica[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1965, 55(10): 1205-1209.
- [25] Bruna M, Borini S. Optical constants of graphene layers in the visible range[J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 94(3): 031901.
- [26] Fu H W, Zhang M, Ding J J, et al. A high sensitivity D-type surface plasmon resonance optical fiber refractive index sensor with graphene coated silver nano-columns [J]. *Optical Fiber Technology*, 2019, 48: 34-39.
- [27] 肖功利, 张开富, 杨宏艳, 等. D型对称双芯光子晶体光纤双谐振峰折射率传感器[J]. *光学学报*, 2020, 40(12): 1206001.
- Xiao G L, Zhang K F, Yang H Y, et al. Refractive index sensor with double resonance peaks for D-type symmetric two-core photonic crystal fiber[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(12): 1206001.
- [28] Link S, Mohamed M B, El-Sayed M A. Simulation of the optical absorption spectra of gold nanorods as a function of their aspect ratio and the effect of the medium dielectric constant[J]. *The Journal of Physical Chemistry B*, 1999, 103(16): 3073-3077.
- [29] Akowuah E K, Gorman T, Ademgil H, et al. Numerical analysis of a photonic crystal fiber for biosensing applications[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2012, 48(11): 1403-1410.
- [30] Gong W, Jiang S Z, Li Z, et al. Experimental and theoretical investigation for surface plasmon resonance biosensor based on graphene/Au film/D-POF[J]. *Optics Express*, 2019, 27(3): 3483-3495.
- [31] Wei W, Nong J P, Zhang G W, et al. Graphene-based long-period fiber grating surface plasmon resonance sensor for high-sensitivity gas sensing[J]. *Sensors*, 2016, 17(1): 2.
- [32] Wei W, Nong J P, Zhu Y, et al. Graphene/Au-enhanced plastic clad silica fiber optic surface plasmon resonance sensor[J]. *Plasmonics*, 2018, 13(2): 483-491.

- [33] 肖功利, 杨秀华, 杨宏艳, 等. 可调谐交叉领结形石墨烯阵列结构等离子体折射率传感器[J]. 光学学报, 2019, 39(7): 0728011.
Xiao G L, Yang X H, Yang H Y, et al. Plasma refractive index sensor with tunable cross Tie-shaped graphene array structure[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(7): 0728011.
- [34] 姜如珊, 张汇一, 李青枫, 等. 外涂层对 SPR 型光子晶体光纤折射率传感的影响研究[J]. 光通信技术, 2021, 45(11): 18-22.
Jiang R S, Zhang H Y, Li Q F, et al. Research on the influence of outer coating on refractive index sensing of SPR photonic crystal fiber[J]. Optical Communication Technology, 2021, 45(11): 18-22.
- [35] Ahmad M, Hench L L. Effect of taper geometries and launch angle on evanescent wave penetration depth in optical fibers[J]. Biosensors and Bioelectronics, 2005, 20(7): 1312-1319.
- [36] Islam M S, Sultana J, Aoni R A, et al. Localized surface plasmon resonance biosensor: an improved technique for SERS response intensification[J]. Optics Letters, 2019, 44(5): 1134-1137.
- [37] Lu J J, Li Y, Han Y H, et al. D-shaped photonic crystal fiber plasmonic refractive index sensor based on gold grating[J]. Applied Optics, 2018, 57(19): 5268-5272.
- [38] 李峰杰, 郝鹏, 吴一辉. 金纳米棒对 SPR 生物传感器灵敏度的增强效应[J]. 传感器与微系统, 2011, 30(7): 20-23.
Li F J, Hao P, Wu Y H. Sensitivity enhancement effect of gold nanorods on SPR biosensor[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2011, 30(7): 20-23.
- [39] 郭志勇, 葛益娴, 沈令闻, 等. 基于 MSM 结构的表面等离子体共振光纤折射率传感器[J]. 半导体光电, 2020, 41(2): 205-210.
Guo Z Y, Ge Y X, Shen L W, et al. Surface plasmon resonance fiber refractive index sensor based on MSM structure[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2020, 41(2): 205-210.
- [40] 陈致远, 董兴法, 刘志伟. 基于 H 型结构光纤 SPR 的折射率传感研究[J]. 苏州科技大学学报(自然科学版), 2021, 38(4): 51-55.
Chen Z Y, Dong X F, Liu Z W. Exploring refractive index sensing based on H-shaped fiber SPR[J]. Journal of Suzhou University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2021, 38(4): 51-55.
- [41] 伍铁生, 杨祖宁, 张慧仙, 等. D 型高双折射光子晶体光纤的折射率传感特性研究[J]. 光子学报, 2022, 51(3): 0306003.
Wu T S, Yang Z N, Zhang H X, et al. Refractive index sensing characteristics of D-shaped high birefringent photonic crystal fiber[J]. Acta Photonica Sinica, 2022, 51(3): 0306003.
- [42] Tan Z X, Li X J, Chen Y Z, et al. Improving the sensitivity of fiber surface plasmon resonance sensor by filling liquid in a hollow core photonic crystal fiber[J]. Plasmonics, 2014, 9(1): 167-173.
- [43] Dong J L, Zhang Y X, Wang Y J, et al. Side-polished few-mode fiber based surface plasmon resonance biosensor[J]. Optics Express, 2019, 27(8): 11348-11360.
- [44] Liu L, Deng S J, Zheng J, et al. An enhanced plastic optical fiber-based surface plasmon resonance sensor with a double-sided polished structure[J]. Sensors, 2021, 21(4): 1516.