

基于交替光栅和石墨烯复合结构的折射率传感器

赵洪霞*, 程培红, 丁志群, 王敬蕊, 鲍吉龙

宁波工程学院电子与信息工程学院, 浙江 宁波 315016

摘要 为了消除折射率动态检测中环境温度漂移的干扰,提出了一种基于交替光栅和石墨烯复合结构的超材料传感器。利用时域有限差分法数值模拟了传感器结构设计参数对共振光谱的影响规律并研究了耦合机理,同时优化了设计结构。研究结果证明,复合结构传感器具有多通道和超窄线宽双重光谱特性,且近红外频段高吸收光谱是由 F-P 腔共振效应、磁激元共振效应和相消干涉耦合激发产生的。基于不同共振模式下折射率和温度敏感度的差异性,选择两个共振峰峰位波长作为信息载体,借助矩阵方程获得的温度补偿后的折射率传感灵敏度可达 358.6 nm/RIU。结果表明,所提传感器可对 1~1.6 RIU 超大折射率范围的样品进行实时动态监测,同时能消除温度漂移的影响,更具实用性。

关键词 传感器; 时域有限差分法; 交替光栅; 石墨烯; 折射率传感; 温度补偿

中图分类号 TN252

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.0728001

Refractive Index Sensor Based on Alternating Grating and Graphene Composite Structure

Zhao Hongxia*, Cheng Peihong, Ding Zhiqun, Wang Jingrui, Bao Jilong

School of Electronic and Information Engineering, Ningbo University of Technology, Ningbo, Zhejiang 315016, China

Abstract To eliminate the interference of ambient temperature drift in the dynamic refractive index measurement, we propose a refractive index sensor based on a metamaterial structure with alternating grating and graphene. The effect of structure parameters on the response spectra is numerically simulated by the finite-difference time-domain method, the coupling mechanism is analyzed, and the designed structure is optimized. The research results indicate that this sensor with a composite structure possesses the dual spectral characteristics of multi-channel and ultra-narrow linewidth. In addition, the high absorption spectrum at near-infrared region is attributed to the coupling and excitation by F-P cavity resonance effect, magnetic polariton resonance effect, and destructive interference. Based on the differences in refractive index and temperature sensitivity under different resonance modes, with two resonant peak position wavelengths as information carrier and under the help of a matrix equation, the refractive index sensitivity reaches 358.6 nm/RIU after temperature compensation. The results show that the proposed sensor is effective in the real-time dynamic monitoring of samples in the wide refractive index range (1–1.6 RIU), and can avoid the influence of temperature drift, and thus it has more practicability.

Key words sensors; finite-difference time-domain method; alternating grating; graphene; refractive index sensing; temperature compensation

OCIS codes 280.3420; 040.1240; 240.6680; 250.5403

1 引言

电磁超材料 (Electromagnetic Metamaterial,

EM) 传感器是近年来迅速发展起来的一种光学检测技术,其可突破传统传感器的分辨率极限,具有原理简单、待测物无需纯化并能实时、高精度地检测动

收稿日期: 2020-10-09; 修回日期: 2020-11-04; 录用日期: 2020-11-17

基金项目: 国家自然科学基金(61605097)、浙江省公益技术研究计划项目(LGC19F050001, LGC20F050001)

* E-mail: zhx-1228@163.com

态反应过程等优点,被广泛应用于高分辨率生物成像^[1]、临床检测^[2]、药物分析^[3]和食品安全^[4]等领域。随着研究的深入,超材料传感器已开发出多种典型结构,如多层介质耦合结构^[5]、光栅耦合结构^[6]和石墨烯阵列结构^[7]等。其中,光栅耦合结构呈多样性,可实现高吸收和超窄带宽光谱特性,谐振波长对环境参量更为敏感,在波长调制型光学检测领域备受关注。

Lee 等^[8]在 SiO₂ 介质层覆盖宽度为 100 nm 的石墨烯条带光栅,通过调节光栅周期,实现了波长调谐传感,同时实验证明了石墨烯光栅超材料传感应用的有效性。Zhao 等^[9]设计了一种 SiO₂ 介质光栅表面覆盖石墨烯结构传感器,吸收峰位波长为 1.55 μm,传感灵敏度可达 66 nm/RIU。Nemova 等^[10]在波导结构表面制备了 5.3 cm 长的波纹光栅传感结构,基于耦合模理论分析了其光谱特性和传感应用,折射率传感灵敏度可达 247 nm/RIU。Liu 等^[11]设计了一种 Ag 基底表面排列六边形银光栅阵列的传感结构,获得了 4.5 nm 超窄带宽吸收谱,传感灵敏度高达 320 nm/RIU 以上。Li 等^[12]针对实际应用中 Ag 光栅存在氧化的问题,提出了 Ag 光栅表面覆盖 Al₂O₃ 的策略,理论分析表明,Al₂O₃ 薄膜在不降低原有结构传感灵敏度和品质因数的情况下,具有很好的保护效果。Yang 等^[13]利用薄膜纳米压印技术,在基底材料上表面制作了顶层金光栅,获得了传感灵敏度为 226 nm/RIU、品质因数为 252 的传感特性。基于波导光栅的超材料传感结构一直是研究的热点,其在压窄共振峰带宽、提升传感灵敏度方面取得了长足进展。但在实际浓度或折射率传感应用中,存在温度等因素的干扰,这使得测量结果出现较大偏差,且灵敏度越高,影响越大。关于消除温度漂移影响的超材料传感器研究鲜有报道。

本文构建了一种基底/铝膜/交替光栅/介质层/石墨烯五层结构传感器,其能实现超大折射率范围内的线性传感,且基于两共振峰折射率敏感度的差异性,借助矩阵方程,可消除传感应用中环境温度漂移的影响,更具实用性。利用有限元法优化了设计结构,数值模拟了吸收峰峰位波长与待测折射率和环境温度的线性相关性,研究了利用峰位波长反演待测折射率的具体方法。该传感器结构简单,尺寸小,易与芯片集成,尤其是在实际传感应用中能消除温度漂移的影响,在多频成像和多参量传感等领域具有潜在的应用前景。

2 结构模型与材料参数

2.1 结构模型

图 1 是基于交替光栅和石墨烯复合结构的传感器三维示意图。共包括五层,基底是硅(Si),硅层上表面沉积厚度为 d_1 的金属铝膜(Al),用于增强光的反射,增大吸收;在铝膜上表面,含有不同光刻材料的不同尺寸条形波导构成了高度为 h 的交替光栅,宽光栅材料为贵金属金(Au),宽度为 w ,窄光栅优选二氧化硅(SiO₂)材料,光栅周期为 Δ ;交替光栅上表面生长二氧化硅介质层,厚度为 d_2 ,用于减反入射光,增强透射作用;顶层覆盖石墨烯,厚度设为 d_3 ,用于增强吸收和形成干涉效应。由于窄光栅和介质层是相同材料,可以有效避免不同材料之间的物理和化学特性导致的附着力和稳定性差的问题。

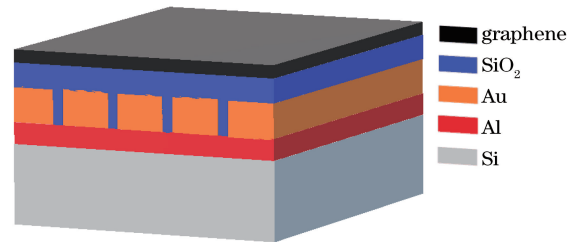


图 1 传感器结构示意图

Fig. 1 Structural diagram of sensor

2.2 材料介电函数

本文采用时域有限差分(Finite-Difference Time-Domain, FDTD)法进行了光谱特性和传感性能分析。在模拟计算中,金属铝^[14](Al)和金^[10](Au)两种材料的相对介电函数 $\epsilon(\omega)$ 采用德鲁德(Drude)模型表达为

$$\epsilon(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + i\eta\omega}, \quad (1)$$

式中: ω 为入射光波频率; ω_p 为等离子体频率; η 为阻尼系数。其中, ω_p 和 η 均为温度的函数,即

$$\omega_p(T) = \omega_{p0} \sqrt{1 + \alpha(T - T_0)}, \quad (2)$$

式中: T 为材料温度; ω_{p0} 和 T_0 分别为 $T = 20$ °C 时的等离子体频率和绝对温度; α 为材料的热膨胀系数。

$$\eta(T) = \omega_s \left[0.4 + 4 \left(\frac{T}{T_D} \right)^5 \int_0^{\frac{T_D}{T}} \frac{z^2}{\exp(z) - 1} dz \right] + \frac{\pi^2 HM}{6hE_F} \left[(KT)^2 + \left(\frac{h\omega}{4\pi^2} \right)^2 \right], \quad (3)$$

式中: h 和 K 分别为普朗克常数和玻尔兹曼常数; ω_s 为静态散射频率; M 为反转散射; E_F 为费米能级

的能量; H 为费米能级的平均散射概率; T_D 为德拜温度, 且 Au 的 $T_D = 165$, Al 的 $T_D = 382$; z 为材料厚度。

根据文献[15]可知石墨烯的介电函数为

$$\epsilon_c(\omega) = 1 + \frac{i\sigma_g}{\omega\epsilon_0 d}, \quad (4)$$

式中: ϵ_0 为真空介电常数; d 为石墨烯的厚度; σ_g 为石墨烯的电导率, 表达式为

$$\sigma_g = \frac{i2eKT}{\pi h^2(\omega + i\tau^{-1})} \left\{ \frac{E_F}{KT} + 2 \ln \left[\exp\left(-\frac{E_F}{K}\right) + 1 \right] \right\} + \frac{ie^2}{4\pi h} \ln \left[\frac{2|E_F| - \hbar(\omega + i\tau^{-1})}{2|E_F| + \hbar(\omega + i\tau^{-1})} \right], \quad (5)$$

式中: e 和 τ 分别为电子电量和载流子寿命。

在近红外波段, SiO_2 的折射率 $n = 1.45$, 热光系数为 $1.1 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$ 。

3 数值模拟和结果分析

利用 FDTD 软件对此复合结构传感器的光谱特性进行数值仿真。图 2 为理论模拟得到的所设计结构的吸收光谱, 其中有关参数为: $\Lambda = 400 \text{ nm}$, $\omega = 376 \text{ nm}$, $d_1 = 50 \text{ nm}$, $d_2 = 20 \text{ nm}$, $d_3 = 3.4 \text{ nm}$, $h = 70 \text{ nm}$, 背景折射率为 1.0, Al 膜厚度优选 50 nm , 大于其在近红外波段的趋肤深度, 因此没有透射光。入射光源采用平面波, 研究获得了横磁(TM)光波沿 y 轴反方向垂直入射的传感结构共振光谱。

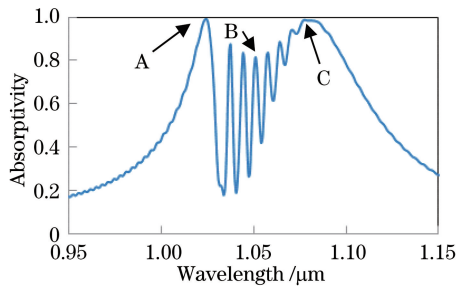


图 2 传感器的吸收光谱

Fig. 2 Absorption spectrum of sensor

由图 2 可知, 传感结构激发的共振吸收光谱主要集中在 $0.95 \sim 1.15 \mu\text{m}$ 近红外波段, 包括吸收率和半峰全宽 (Full Width at Half Maximum, FWHM) 各不相同的多个吸收通道。左边频峰 A 的共振波长 $\lambda_1 = 1.025 \mu\text{m}$, 带宽为 $0.015 \mu\text{m}$, 吸收率接近 100%。图 3(a)、(c) 是该波长处的电场 (E_x) 和磁场 (H_y) 分布。由图 3(a) 可知, 电场能量主要集中在窄光栅脊及其对应的石墨烯层区域。图 3(c) 表明, 该波长处的磁场能量局域在宽光栅狭缝

即 SiO_2 光栅脊内, 具有显著的 F-P 腔模共振特性^[16], 证明该吸收峰主要是 F-P 腔共振引起的。

右边频峰 C 的共振波长 $\lambda_2 = 1.083 \mu\text{m}$, 带宽高达 59.7 nm , 值得注意的是, 该吸收峰的上升沿由多个超窄吸收通道级联组成, 各通道的间距相等, 均为 7.5 nm , 而每个通道的带宽只有 3.5 nm , 且各通道吸收率均达 0.8 以上。为了明确该特殊光谱的产生机理, 本文数值模拟了波长 λ_2 和峰 B 共振波长 $\lambda_3 = 1.057 \mu\text{m}$ 处的场分布, 如图 3(d) 所示。由图 3(b) 可知, λ_2 处电场能量主要局域在 Au 光栅边沿的左右两端, 且明显可见能量集中点 (泛红), 这是典型的磁激元 (Magnetic Polaritons, MPs) 共振特征^[17], 证明右边频是 Au 光栅激发的磁激元共振引起的。由图 3(d) 可以看出, λ_3 处的光场能量等间距、分立集中在 SiO_2 介质层内, 具有典型的干涉相消特征, 这是由于入射光波在金属光栅边沿的左右两端激发的 MPs 模场满足相消干涉条件。由上述分析可知, 传感器吸收光谱是由 F-P 腔共振、磁激元共振和相消干涉三种耦合机制共同形成的。

4 传感器的优化设计

由仿真计算可知, 传感结构的共振光谱特性与石墨烯层厚度、介质层厚度及光栅结构参数密切相关, 而光谱特性的优劣直接影响传感器性能。为了得到最优传感器, 首先优化结构设计参数, 得到最佳光谱。由于各干涉峰随设计结构尺寸的变化而同步变化, 因此优化分析中只选择图 2 中的干涉吸收峰 B 进行研究。

有无石墨烯和不同石墨烯厚度下的光谱特性如图 4 所示, 其他参数与图 2 相同。由图 4(a) 可知, 在顶层覆盖石墨烯前, 传感结构的吸收光谱为宽带单峰, 峰位波长、带宽 F 和吸收率分别为 $1.081 \mu\text{m}$ 、 69.02 nm 和 0.855; 在覆盖石墨烯后, 在 F-P 腔共振、磁激元共振和相消干涉三种耦合机制共同作用下, 形成了窄带多通道吸收。峰 A、峰 B 的共振波长 (λ_1 、 λ_3) 和带宽 (F_1 、 F_3) 随石墨烯厚度的变化规律如图 4(b) 所示。可以看出, 两通道峰位波长均位于近红外波段, 带宽随石墨烯厚度的变化而变化, 当 $d_3 = 3.4 \text{ nm}$ 时, 两通道带宽均为最小。

图 5 是不同传感结构参数下谐振波长和带宽的变化规律。由图 5(a) 可知, 随着光栅高度从 50 nm 增大到 75 nm , 峰 A 的共振波长迅速线性增大到 $1.025 \mu\text{m}$, 伴随带宽由 77.9 nm 压窄到 16.44 nm ; 而当光栅高度为 $75 \sim 90 \text{ nm}$ 时, 峰 A 的共振波长和

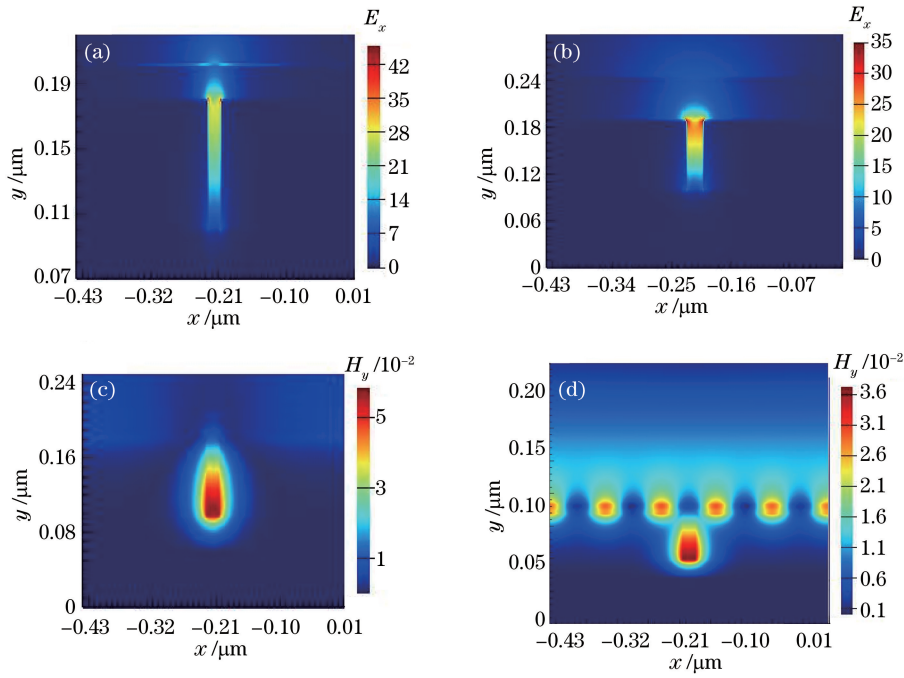


图 3 $z=0$ 平面上的电场和磁场分布。 $\lambda_1=1.025 \mu\text{m}$ 处的(a)电场和(c)磁场分布；
(b) $\lambda_2=1.083 \mu\text{m}$ 处的电场分布；(d) $\lambda_3=1.057 \mu\text{m}$ 处的磁场分布

Fig. 3 Electric field and magnetic field distributions in $z=0$ plane. (a) Electric field and (c) magnetic field distributions at $\lambda_1=1.025 \mu\text{m}$; (b) electric field distribution at $\lambda_2=1.083 \mu\text{m}$; (d) magnetic field distribution at $\lambda_3=1.057 \mu\text{m}$

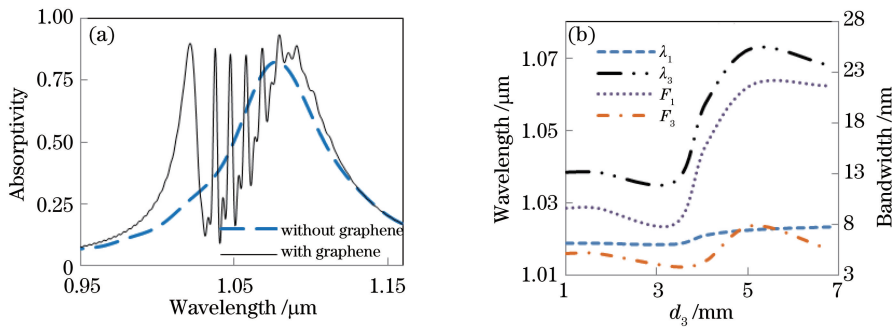


图 4 不同条件下的光谱特性。(a)有无石墨烯；(b)不同石墨烯厚度

Fig. 4 Spectral characteristics under different conditions. (a) With and without graphene; (b) different graphene thicknesses

带宽均缓慢变化；与此同时，峰 B 的共振波长右移，但带宽对光栅高度的变化不敏感。峰 A 变化的原因是 h 增高等同于 F-P 腔腔长加长，由公式^[16] $2n_{\text{eff}}L + \lambda/2 = \lambda N$ 估算的 F-P 腔共振波长右移 (L 和 n_{eff} 分别为腔长和腔内有效折射率， λ 为共振波长， N 为正整数)。另由文献^[18]可知，F-P 腔共振光谱带宽为 $\Delta\lambda_{1/2} = \lambda^2(1-R)/(2\pi n_{\text{eff}}LR^{1/2})$ ($\Delta\lambda_{1/2}$ 为光谱带宽， R 为 Au 膜反射率)，即带宽与腔长成反比，导致有效腔长随着 h 的增大而变大，峰 A 的光谱带宽减小。而峰 B 右移的原因是 h 的加大引起 MPs 模式下等效 LC 电路模型中光栅自感的增大，由公式^[17] $\lambda \propto 2\pi c [c_i(l_{m1} + l_{e1} + l_{m2} + l_{e2})]$ (c 和

c_i 分别为光波的传播速度及石墨烯与交替光栅之间的电容， l_{m1} 、 l_{e1} 、 l_{m2} 和 l_{e2} 分别为交替光栅单元的互感和自感及石墨烯的互感和自感)可知，吸收光谱的右边频右移，导致构成上升沿的各干涉峰与之同步变化。

由图 5(b)可知，随着 d_2 的增大，峰 A 的共振波长小幅缓慢红移，伴随峰 B 大幅快速蓝移。由图 3 (a)可知，F-P 腔模上行溢出并进入 SiO_2 介质层， d_2 增大，等效于 F-P 腔腔长加大，而根据文献^[16]中的理论计算公式可知，F-P 腔模激发的峰 A 共振波长与腔长成正比，所以随着 d_2 的增大，峰 A 红移。而峰 B 大幅快速蓝移的原因是随着 d_2 的增大， c_i

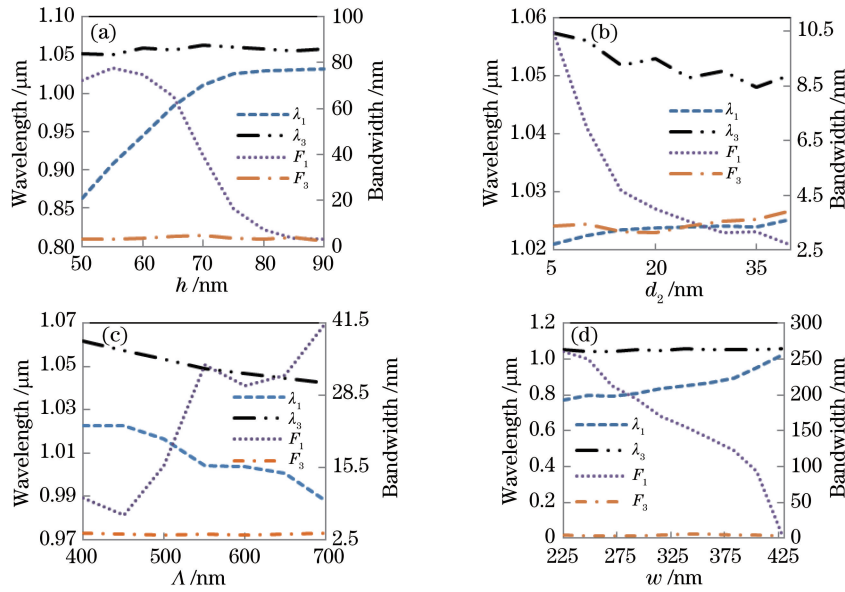


图 5 不同传感结构参数下谐振波长和带宽的变化规律。(a)光栅高度;(b)介质层厚度;(c)光栅周期;(d)宽光栅宽度

Fig. 5 Variation of resonant wavelength and bandwidth with sensing structural parameters. (a) Grating height; (b) dielectric layer thickness; (c) grating period; (d) wide-grating width

减小,与文献[17]等效 LC 电路模型公式给出的定性结果一致。当 d_2 处于 5~15 nm 区间时,峰 A 带宽快速线性压窄, d_2 大于 15 nm 后带宽缓慢变化,直逼干涉峰带宽。

图 5(c)是不同光栅周期下的模拟计算结果,其他参数与图 2 相同。可以看出,当占空比恒定为 95%时,随着光栅周期 Λ 的增大,各吸收峰峰位波长同时左移;与此同时,峰 A 的带宽从 7.01 nm 大幅增大到 41.6 nm,而峰 B 的带宽基本不变。当模拟结果与光栅占空比不变时,随着 Λ 的加大,窄光栅 SiO₂ 脊加宽,F-P 腔内 n_{eff} 减小,最后导致峰 A 共振波长左移,这与带宽加大的定性理论结果吻合。随着 Λ 的增大,金属光栅脊加宽,导致有效 LC 电路电容减小^[17],这与共振光谱左移的理论分析一致。

图 5(d)给出了不同 w 情况下峰 A、峰 B 共振波长和带宽的变化规律。可以看出,随着 w 由 225 nm 增大到 425 nm,峰 A 共振波长从 0.773 μm 缓慢增大到 1.023 μm ,伴随带宽快速由 260.99 nm 压窄为 3.44 nm,与该 w 下峰 B 的带宽几乎相等;而峰 B 共振波长和带宽对 w 的变化不敏感。峰 A 的变化源于 F-P 腔激发模式的特性,即光栅周期恒定, w 增大,窄光栅宽度减小, n_{eff} 增大,导致峰位波长右移,带宽压窄。

综上所述,当石墨烯层厚度 $d_3 = 3.4$ nm,光栅高度 $h = 90$ nm,光栅周期 $\Lambda = 450$ nm,介质层厚度 $d_2 = 20$ nm,宽光栅宽度 $w = 425$ nm 时,传感器有

最优的结构尺寸。该尺寸下 F-P 腔模和干涉模均处于近红外区域,传感器对光源谱宽的要求降低;同时两种模式的带宽均接近最小值,传感测量范围最大,传感灵敏度和品质因数得到提高。

5 传感特性

5.1 折射率传感特性

图 6(a)是数值模拟得到的不同待测折射率下传感结构的共振光谱,随着折射率由 1.0 增大到 1.3,由左边频峰 A 的峰位波长放大图可见,F-P 腔模的共振峰峰位波长由 1.019 μm 左移到 1.017 μm ,伴随各干涉峰同幅度明显右移。以峰 B 为例,共振波长随折射率的变化规律如图 6(b)所示。可以看出,腔模和干涉模的共振波长均随折射率线性变化,只是变化幅度不同,折射率传感灵敏度分别为 $N_{\lambda_1} = -9.2$ nm/RIU 和 $N_{\lambda_2} = 37.8$ nm/RIU,所以可借助共振吸收峰峰位波长值反演待测折射率的大小。同时,根据综合评价传感器性能的品质因数(Figure of Merit,FOM)计算公式 $F_{\text{OM}} = S/F$ (S 和 F 分别为传感灵敏度和吸收峰带宽),可得相应的品质因数分别为 0.61/RIU 和 10.8/RIU。但上述灵敏度计算中没有考虑实际折射率传感应用中温度漂移的影响,且灵敏度越高,温度影响越大。

5.2 温度传感特性

选取待测折射率为 1.0,数值模拟了不同温度下传感结构的共振吸收光谱,模拟结果如图 7(a)所

示。可以看出,当温度从 20 °C 增大到 40 °C 时,峰 A 的共振光谱峰位波长由 1.003 μm 右移到 1.012 μm。以峰 B 为例,模拟计算得到的共振波长随温度变化的规律如图 7(b) 所示。可以看出,腔模和干涉模的共振波长均随温度线性变化,且温度传

感灵敏度分别为 $T_{\lambda_1} = 0.5 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ 和 $T_{\lambda_2} = 0.7 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ 。由此可知,基于交替光栅和石墨烯复合结构的传感器各共振峰位波长受环境温度的影响明显,为了精准测量,在实际折射率或浓度传感应用中必须消除环境温度的干扰。

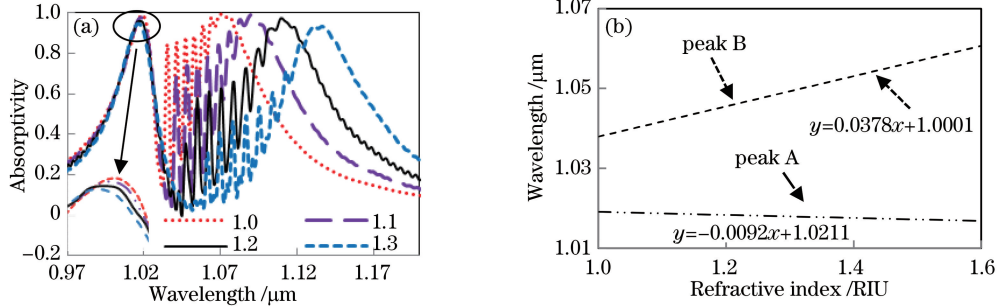


图 6 不同待测折射率下的光谱特性。(a)共振光谱;(b)折射率曲线

Fig. 6 Spectral characteristics under different refractive indexes to be measured. (a) Resonant spectra; (b) refractive index curves

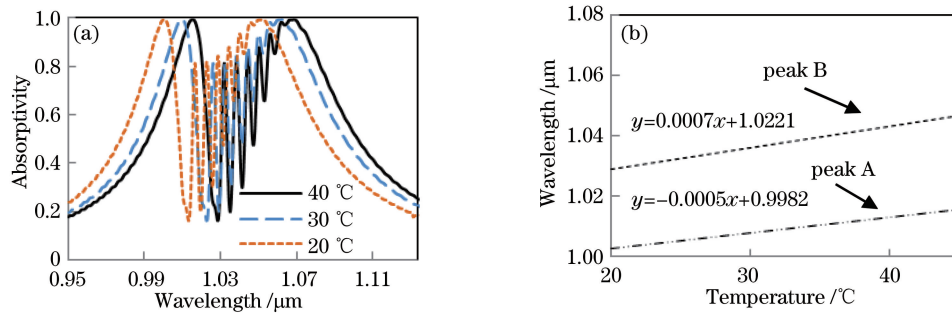


图 7 不同温度下的光谱特性。(a)共振光谱;(b)温度曲线

Fig. 7 Spectral characteristics under different temperatures. (a) Resonant spectra; (b) temperature curves

5.3 免除温度干扰的折射率传感灵敏度

为了消除折射率传感测量中温度漂移的影响,以峰 A 和峰 B 共振波长作为信息载体,将对应测得的温度传感灵敏度 T_{λ_1} 和 T_{λ_2} , 折射率传感灵敏度 N_{λ_1} 和 N_{λ_2} 分别代入矩阵方程:

$$\begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta N \end{bmatrix} = \frac{1}{F} \begin{bmatrix} T_{\lambda_2} & -T_{\lambda_1} \\ -N_{\lambda_2} & N_{\lambda_1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\lambda_1 \\ \Delta\lambda_2 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

式中: ΔT 为温度改变量; ΔN 为折射率改变量; $\Delta\lambda_1$ 为峰 A 共振波长的改变量; $\Delta\lambda_2$ 为峰 B 共振波长的改变量。 F 为矩阵系数。计算得温度补偿后的折射率传感灵敏度为 $S = 358.6 \text{ nm}/\text{RIU}$, 且模拟计算可知折射率测量范围高达 $1 \sim 1.6 \text{ RIU}$ 。

6 结 论

基于交替光栅和石墨烯设计了一种复合结构超材料传感器,利用时域有限差分法仿真研究了共振光谱特性,并获得了传感器的优化设计参数: $\Lambda =$

450 nm , $\omega = 425 \text{ nm}$, $d_2 = 20 \text{ nm}$, $d_3 = 3.4 \text{ nm}$, $h = 90 \text{ nm}$ 。基于腔模和干涉模对待测折射率和环境温度的敏感性差异,采用腔模和干涉吸收峰 B 的峰位波长作为信息载体,借助矩阵方程获得免除温度干扰后的折射率传感灵敏度为 $358.6 \text{ nm}/\text{RIU}$, 且折射率测量范围可达 $1 \sim 1.6 \text{ RIU}$ 。该传感器结构简单,体积小,易于集成,可消除温度交叉参量的干扰,具有较好的实用性。

参 考 文 献

- [1] Hua Y F, Zhang H J. Qualitative and quantitative detection of pesticides with terahertz time-domain spectroscopy[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2010, 58(7): 2064-2070.
- [2] Geng Z, Zhang X, Fan Z, et al. A route to terahertz metamaterial biosensor integrated with microfluidics for liver cancer biomarker testing in early stage[J]. Scientific Reports, 2017, 7(1): 16378-16382.

- [3] Wu X J, Quan B G, Pan X C, et al. Alkanethiol-functionalized terahertz metamaterial as label-free, highly-sensitive and specific biosensor [J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2013, 42: 626-631.
- [4] Xu W D, Xie L J, Zhu J F, et al. Terahertz sensing of chlorpyrifos-methyl using metamaterials [J]. *Food Chemistry*, 2017, 218: 330-334.
- [5] Kuang Y Q, Li G, Yan Z Q, et al. Absorption and refractive index sensitivity of the I-shaped elliptical nanostructures [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40 (14): 1424001.
旷依琴, 李刚, 闫竹青, 等. 工字形椭圆纳米结构的吸收及其折射率敏感特性研究 [J]. *光学学报*, 2020, 40(14): 1424001.
- [6] Chen Y, Zhou X D, Zhou J, et al. Fano-resonance sensing mechanism of sub-wavelength dielectric grating-metal Ag thin film-periodic photonic crystal hybrid structure [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(4): 0413001.
陈颖, 周鑫德, 周健, 等. 亚波长介质光栅-金属 Ag 薄膜-周期性光子晶体混合结构的 Fano 共振传感机理 [J]. *中国激光*, 2020, 47(4): 0413001.
- [7] 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.
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.
- [8] Lee J K, Kim H. Mid-infrared plasmonic tuning via nanogap control in periodic multilayer graphene nanoribbons [J]. *Optical Materials*, 2016, 54: 22-25.
- [9] Zhao Z Y, Li G H, Yu F L, et al. Sub-wavelength grating enhanced ultra-narrow graphene perfect absorber [J]. *Plasmonics*, 2018, 13(6): 2267-2272.
- [10] Nemova G, Kashyap R. A compact integrated planar-waveguide refractive-index sensor based on a corrugated metal grating [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2007, 25(8): 2244-2250.
- [11] Liu X S, Fu G L, Liu M L, et al. High-quality plasmon sensing with excellent intensity contrast by dual narrow-band light perfect absorbers [J]. *Plasmonics*, 2017, 12(1): 65-68.
- [12] Li Y L, An B W, Jiang S M, et al. An effective anti-oxidized strategy for ultra-narrow band absorber as plasmonic sensor [J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2016, 48(12): 530.
- [13] Yang X Y, Liu D M. Sensitivity enhancement of surface plasmon resonance sensors through planar metallic film closely coupled to nanogratings [J]. *Chinese Optics Letters*, 2007, 5(10): 563-565.
- [14] Nong J P, Wei W, Zhu Y, et al. Resonance spectra and sensing characteristics of plasmons in graphene-covered aluminum nano-grating [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2017, 37(4): 997-1002.
农金鹏, 韦玮, 朱永, 等. 石墨烯覆盖铝纳米光栅表面等离激元共振光谱及传感特性 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2017, 37(4): 997-1002.
- [15] Chen P Y, Alù A. Atomically thin surface cloak using graphene monolayers [J]. *ACS Nano*, 2011, 5 (7): 5855-5863.
- [16] Gao J, Sang T, Li J L, et al. Double-channel absorption enhancement of graphene using narrow groove metal grating [J]. *Acta Physica Sinica*, 2018, 67(18): 184210.
高健, 桑田, 李俊浪, 等. 利用窄刻槽金属光栅实现石墨烯双通道吸收增强 [J]. *物理学报*, 2018, 67 (18): 184210.
- [17] Jiang X W, Wu H, Yuan S C. Enhancement of graphene three-channel optical absorption based on metal grating [J]. *Acta Physica Sinica*, 2019, 68 (13): 138101.
江孝伟, 武华, 袁寿财. 基于金属光栅实现石墨烯三通道光吸收增强 [J]. *物理学报*, 2019, 68 (13): 138101.
- [18] Shi S X, Zhang H X, Liu J S, et al. *Physical optics and applied optics* [M]. Xi'an: University of Electronic Science and Technology of China Press, 2006: 72.
石顺祥, 张海兴, 刘劲松, 等. *物理光学与应用光学* [M]. 西安: 电子科技大学出版社, 2006: 72.