

基于黑磷的多共振折射率传感器研究

张俊傲¹, 李国民¹, 周远国^{1*}, 蔡艺军^{2*}

(1. 西安科技大学通信与信息工程学院, 西安, 710054; 2. 厦门理工学院光电与通信工程学院, 厦门, 361000)

摘要 为解决传统等离子光学传感器的局限性, 提出了一种基于黑磷(BP)的多共振非等离子体的光学传感器, 该传感器采用单层黑磷和简单的介质结构, 通过磁共振增强红外波吸收。由于黑磷的各向异性, 该传感器可以在不同晶体方向上实现不同的灵敏度和品质因数(FOM)。通过优化传感结构, 在8 μm 波长附近的黑磷晶体方向上均得到了2个极窄的共振峰、极低的半高宽, 提高了传感器的灵敏度, 吸收率最高达到了99.6%, 灵敏度最高可达180 nm/RIU, FOM可以达到261 nm/RIU。并利用耦合模理论对仿真结果进行了验证, 揭示了其物理机理, 证实了该传感结构在未来的光学传感领域有巨大的潜力。

关键词 纳米光学传感器; 黑磷; 磁共振; 耦合模理论

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2022.01.006

中图分类号 TP212 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2022)01-0043-06

Research on Multi-Resonant Refractive Index Sensor Based on Black Phosphorus

ZHANG Junao¹, LI Guomin¹, ZHOU Yuanguo^{1*}, CAI Yijun^{2*}

(1. Department of Communication and Information Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 2. School of Optoelectronic and Communication Engineering, Xiamen University of Technology, Xiamen 361000, China)

Abstract In view of the limitation of traditional plasma optical sensors, and being capable of enhancement of absorbing infrared waves by magnetic resonance, a multi-resonant non-plasma optical sensor based on black phosphorus (BP) is proposed. A BP monolayer and a simple dielectric structure are adopted by the sensor. Due to the anisotropy of BP, the sensor can achieve different sensitivities and figure of merits (FOMs) in different crystal directions. Through optimizing the sensor structure, two resonant peaks which are very narrow are obtained in different directions of BP crystals around 8 μm wavelength, and the sensitivity of the sensor is improved by the relatively low full width at half maximum. The highest absorption rate reaches up to 99.6%, while the highest sensitivity reaches up to 180 nm/RIU and FOM reaches up to 261 nm/RIU. The simulation results are verified by the coupled mode theory, and the physical mechanism is revealed. The sensor structure has great potentials for the future optical sensing application.

Key words nanophotonic sensor; black phosphorus; magnetic resonance; coupled-mode theory

收稿日期: 2021-07-29

基金项目: 国家自然科学基金(62005232); 福建省自然科学基金(2020J01130859); 陕西省重点研发计划(2018GY-151); 陕西省自然科学基金基础研究计划(2020JM-515)

作者简介: 张俊傲(1997—), 男, 湖北襄阳人, 硕士生, 研究方向为微纳光学。E-mail: zhangjunaoxust@163.com

通信作者: 周远国(1981—), 男, 辽宁丹东人, 副教授, 研究方向为计算电磁学。E-mail: zyg@xust.edu.cn

蔡艺军(1987—), 男, 福建厦门人, 副教授, 研究方向为微纳光学传感器。E-mail: yijunca@foxmail.com

引用格式: 张俊傲, 李国民, 周远国, 等. 基于黑磷的多共振折射率传感器研究[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2022, 23(1): 43-48.
ZHANG Junao, LI Guomin, ZHOU Yuanguo, et al. Research on Multi-Resonant Refractive Index Sensor Based on Black Phosphorus[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2022, 23(1): 43-48.

随着科技发展,光学折射率传感器广泛应用于化学^[1]、医学检测^[2]、环境工程^[3]等领域,同时引起了纳米光学领域的关注。近年来,基于等离子体纳米结构的光学传感器由于其高灵敏度而被广泛研究^[4]。等离子体传感的基本机制是激发沿介质与金属交界的电荷密度振荡。与这些振荡相关的光谱响应对折射率变化非常敏感,因此等离子体传感器可以检测到非常细小的折射率变化^[5]。虽然等离子体结构可以提高光学传感器的灵敏度,但是等离子体中的金属易被腐蚀,并且它们的制备往往需要复杂而昂贵的微纳米加工技术。另外,由于等离子体金属表面的吸附性能较差,传统的等离子体传感器对生物分子如 DNA,蛋白质等的检测效果不佳。

二维材料是指从层状的三维材料中剥离出来,层数有限,处于纳米级别尺寸的材料。自从 2004 年首个二维材料石墨烯被剥离出来后,越来越多的二维材料逐渐被发现,它们具有独特的光学特性和电学特性,并且易于集成,成为了纳米光学领域的研究热点。近几年,二维材料已被认为可以用来提高传感结构的性能^[6-8]、研究人员开始利用石墨烯^[9-10]、过渡金属硫化物^[11]等来提高等离子体传感结构的灵敏度,并且这些二维材料具有不易腐蚀和吸附能较高等优点。文献^[12]提出了一种基于表面等离子体共振的生物传感器,通过增加石墨烯的层数来提高灵敏度。研究表明,当石墨烯层数增加到 10 层时,灵敏度可以提高近 25%。文献^[13]设计了一种基于石墨烯和二硫化钼杂化纳米结构的表面等离子体共振生物传感器,以提高灵敏度。黑磷(BP)是二维层状材料,具有优异的光电特性,例如高载流子迁移率^[14]和可调直接带隙^[15]。层数不同的黑磷也可以通过类似石墨烯之间的范德华力结合在一起。此外,黑磷的摩尔响应因子是二硫化钼和石墨烯的 20 倍^[16]。同时黑磷的吸附能也高于石墨烯和二硫化钼。并且,黑磷具有褶皱的晶格结构,这使得黑磷相对于其他二维材料具有更高的表面体积比。因此,黑磷在光学折射率传感方面有巨大的潜力。

本文提出了一种基于黑磷的多共振光学折射率传感器,其中单层黑磷被放置 Al_2O_3 层上方。利用磁共振增强吸收,并且通过耦合模理论(CMT)验证了数值模拟的结果。通过优化传感结构,在 $8\ \mu\text{m}$ 波长附近的的黑磷晶体排列方向上均得到了 2 个极窄的共振峰,极低的半高宽提高了传感器的分辨率,吸收率最高达到了 99.6%,并且在不同的晶体排列方向上可以分别得到不同的灵敏度和 FOM,灵敏度最高可达 $180\ \text{nm}/\text{RIU}$, FOM 可以达到 $261\ \text{nm}/\text{RIU}$,本文验证了黑磷二维材料与折射率传感

器可以有效结合,又表明该传感结构在传感器领域有巨大潜力。

1 设计与结构

图 1 描述了基于黑磷的多共振折射率传感器结构,该结构由周期性的二氧化硅(SiO_2)纳米带、单层黑磷、三氧化二铝(Al_2O_3)层和金镜衬底(Gold)组成,底层金镜衬底用来阻挡透射波。

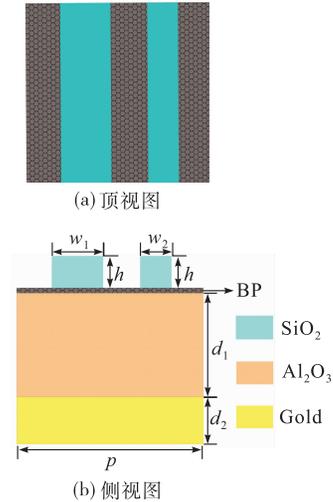


图 1 基于黑磷的多共振折射率传感器示意图

使用有限元方法(FEM)对本结构的传感性能进行了仿真研究,红外波从传感结构顶端垂直入射。在仿真中, SiO_2 、 Al_2O_3 的折射率(RI)分别为 1.35、1.7。通过优化结构参数,以提高光学传感器的传感性能。其中 w_1 、 w_2 分别代表 SiO_2 纳米带的不同宽度, p 代表纳米带的周期, h 代表 SiO_2 的厚度, d_1 和 d_2 分别代表 Al_2O_3 和衬底(Gold)的厚度。黑磷的光学性质可以用一个简单的德鲁德(Drude)模型来描述,其电导率可以表示为^[17]:

$$\sigma_{jj} = \frac{iD_j}{\pi(\omega + \frac{i\eta}{\hbar})} \quad (1)$$

$$D_j = \frac{\pi e^2 n}{m_j} \quad (2)$$

式中: j 表示 x 、 y 方向; ω 为角频率; D_j 为德鲁德质量;弛豫速率 $\eta=10\ \text{meV}$; n 为电子掺杂浓度; \hbar 为普朗克常量; e 为电子电荷量,沿 x 方向和 y 方向的有效质量表示为:

$$m_{cx} = \frac{\hbar^2}{\frac{2\gamma^2}{\Delta} + \eta_c} \quad (3)$$

$$m_{cy} = \frac{\hbar^2}{2v_c} \quad (4)$$

对于单层黑磷,得到 $\gamma = \frac{4\alpha}{\pi} \text{eV}$, $\Delta = 2\ \text{eV}$, $\eta_c =$

$\frac{\hbar^2}{0.4m_0}, v_c = \frac{\hbar^2}{1.4m_0}$, 电子掺杂浓度 $n=10^{13}/\text{cm}^2$ 。此

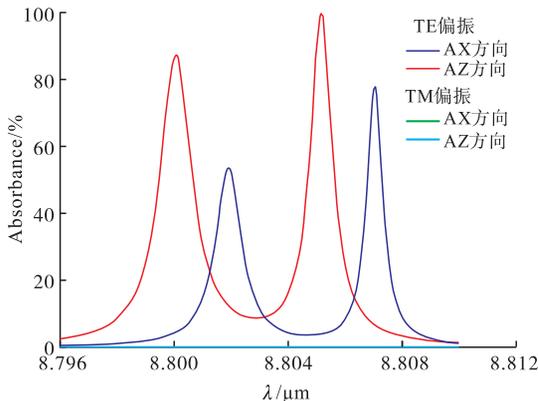
外 α 是黑磷的特征长度, $\frac{\pi}{\alpha}$ 是布里渊区宽度。具有二维导电性的介电常数可以表示为^[17]:

$$\epsilon_{jj} = \epsilon_r + \frac{i\sigma_{jj}}{\epsilon_0\omega\alpha} \quad (5)$$

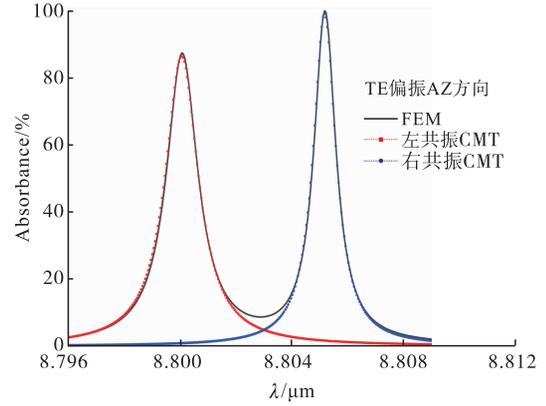
式中: ϵ_0 是自由空间的介电常数, 单层黑磷的介电常数 $\epsilon_r = 5.76$ 。在黑磷内部具有 2 种不同的排列方式, 黑磷沿 x 轴方向排列(简称为 AX 方向)和沿 z 轴方向排列(简称为 AZ 方向), 这两种不同的排列方式也导致了黑磷的各向异性。

2 结果和讨论

图 2(a) 比较了在不同偏振方向下沿不同黑磷晶体方向排列的传感器结构的吸收光谱。其中 $\omega_1 = 1.5 \mu\text{m}, \omega_2 = 2.3 \mu\text{m}, p = 10.0 \mu\text{m}, nb = 4.0 \mu\text{m}, h = 2.0 \mu\text{m}$ 和 $d_1 = 5.0 \mu\text{m}$, TM 偏振的入射波在 AX 方向和 AZ 方向上均不产生吸收。而在 TE 偏振下, 传感器在 AX 方向上产生了 2 个明显的共振。左共振峰处于波长 $\lambda = 8.802 \mu\text{m}$ 处, 此时吸收率为 53.7%, 相应吸收峰的半高宽 $\lambda_1 = 1.1 \text{ nm}$; 右共振峰处于波长 $\lambda = 8.807 \mu\text{m}$ 处, 此时吸收率为 77.8%, 相应吸收峰的半高宽 $\lambda_2 = 0.7 \text{ nm}$ 。为了验证仿真结果的准确性, 我们使用了耦合模理论(CMT)解析在 TE 偏振下吸收效果较好的 AZ 方向上光学传感器的吸收光谱, 如图 2(b) 所示。在 AZ 方向上也产生了 2 个明显的共振, 左共振峰处于波长 $\lambda = 8.800 \mu\text{m}$ 处, 此时吸收率为 87.0%, 相应吸收峰的半高宽 $\lambda_3 = 1.4 \text{ nm}$, 可以定义品质因子 $Q_1 = \lambda/\lambda_3 = 6406.5$; 右共振峰处于波长 $\lambda = 8.805 \mu\text{m}$ 处, 此时吸收率为 99.6%, 相应吸收峰的半高宽 $\lambda_4 = 1.0 \text{ nm}$, 此时品质因子 $Q_2 = 9204.2$ 。因此, 后续的研究基于电磁波 TE 偏振入射的情况下开展, 因为 TM 偏振入射下不产生有效吸收。



(a) 在TE和TM偏振下不同黑磷排列方向的吸收光谱



(b) 基于FEM数值模拟和CMT理论分析的吸收光谱

图2 光学传感器的吸收光谱对比

基于 CMT 分析, 该结构的光学特性可用以下方程描述^[18-20]:

$$\frac{da}{dt} = (j\omega_0 - \delta - \gamma)a + \sqrt{2\gamma}S_+ \quad (6)$$

$$S_- = -S_+ + \sqrt{2\gamma}a \quad (7)$$

式中: a 表示谐振幅度; ω_0 表示谐振频率; S_+ 和 S_- 表示输入和输出波幅度; γ 和 δ 分别表示外部漏率和本征损耗。系统的反射系数为:

$$\Gamma = \frac{y}{u} = \frac{i(\omega - \omega_0) + \delta + \gamma_e}{i(\omega - \omega_0) + \delta + \gamma_e} \quad (8)$$

吸收系数如下:

$$A = 1 - |\Gamma|^2 = \frac{4\delta\gamma_e}{(\omega - \omega_0)^2 + (\delta + \gamma_e)^2} \quad (9)$$

通过式(9)可以得到, 当外部漏率 γ 等于本征损耗 δ 时, 在工作频率与谐振频率 ω_0 相同时发生临界耦合得到完全吸收, 此时传感结构阻抗与自由空间阻抗匹配, 有效阻抗可以表示为^[20]:

$$Z = \frac{(T_{22} - T_{11}) \pm \sqrt{(T_{22} - T_{11})^2 + 4T_{12}T_{21}}}{2T_{21}} \quad (10)$$

这个方程中每个根对应各自光传播的路径, 加号表示正方向, 减号表示负方向, T_{11} 、 T_{12} 、 T_{21} 、 T_{22} 表示结构的转移矩阵 T 的元素, 他们的值可以从散射矩阵 S 计算如下:

$$T_{11} = \frac{(1 + S_{11})(1 - S_{22}) + S_{21}S_{12}}{2S_{21}} \quad (11)$$

$$T_{12} = \frac{(1 + S_{11})(1 + S_{22}) + S_{21}S_{12}}{2S_{21}} \quad (12)$$

$$T_{21} = \frac{(1 - S_{11})(1 - S_{22}) + S_{21}S_{12}}{2S_{21}} \quad (13)$$

$$T_{22} = \frac{(1 - S_{11})(1 + S_{22}) + S_{21}S_{12}}{2S_{21}} \quad (14)$$

在文中 CMT 解析模型中, 左共振峰的光学传感损耗为 $\delta = 0.95 \times 10^8 \text{ Hz}$ 和漏率为 $\gamma_e = 1.55 \times 10^9 \text{ Hz}$ 。定义此时左共振品质因子 $Q_{\text{CMT1}} = Q_0Q_\gamma / (Q_0 + Q_\gamma)$, Q_{CMT1} 为 6829.4, 这与 Q_1 的值接近一致, 其中 $Q_0 = \omega_0 / (2\delta)$ 定义为系统损耗, $Q_\gamma = \omega_0 / (2\gamma_e)$ 定

义为系统外漏。右共振峰的光学传感损耗和漏率分别为 $\delta=0.66 \times 10^8$ Hz 和 $\gamma_e=4.34 \times 10^9$ Hz, 右共振品质因子 Q_{CMT_2} 为 9 460.5, 这与 Q_2 接近一致。解析的结果与仿真结果大致吻合, 为光学传感结构提供了理论支持。

为了阐明多共振光学传感器内部传感机理, 图 3 描绘了光学折射率传感器内部磁场和电场振幅的分布, 图中从上到下依次是空气, 检测物层, SiO_2 周期纳米带, Al_2O_3 层。图 3(a) 为 AX 方向左共振谐振点 $\lambda=8.802 \mu\text{m}$ 和右共振谐振点 $\lambda=8.807 \mu\text{m}$, AZ 方向左共振谐振点 $\lambda=8.800 \mu\text{m}$ 和右共振谐振点 $\lambda=8.805 \mu\text{m}$, 和 AX 方向非谐振点 $\lambda=8.810 \mu\text{m}$ 处的磁场振幅分布; 图 3(b) 为 AX 方向左共振谐振点 $\lambda=8.802 \mu\text{m}$ 和右共振谐振点 $\lambda=8.807 \mu\text{m}$, AZ 方向左共振谐振点 $\lambda=8.800 \mu\text{m}$ 和右共振谐振点 $\lambda=8.805 \mu\text{m}$, 和 AX 方向非谐振点 $\lambda=8.810 \mu\text{m}$ 处的电场振幅分布。

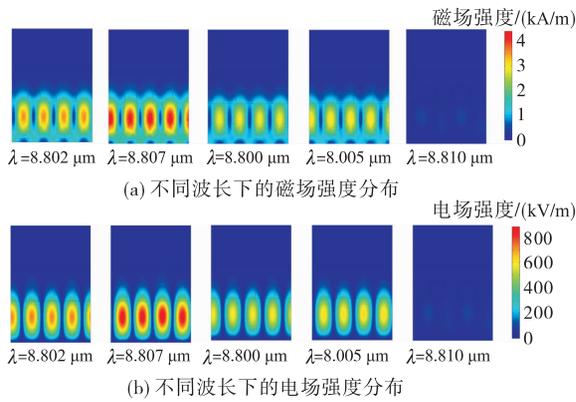


图 3 光学折射率传感器内部电磁场分布对比

如图 3(a) 所示, 与在 AX 方向上非谐振点 $\lambda=15.000 \mu\text{m}$ 处的磁场相比, 折射率传感器在 AX 方向上谐振点 $\lambda=8.802 \mu\text{m}$ 和 $\lambda=8.807 \mu\text{m}$ 处具有明显的磁偶极子共振, 它捕获了 SiO_2 纳米带和金镜之间的红外光磁场。磁共振是沿入射磁场方向激发的, 与 $\lambda=8.810 \mu\text{m}$ 处的非共振态相比, 磁偶极子导致了磁场的增强和集中。磁场主要分布在 Al_2O_3 层和黑磷的间隙内。同时, 在 AZ 方向上谐振点 $\lambda=8.800 \mu\text{m}$ 和 $\lambda=8.805 \mu\text{m}$ 处, 也具有一定的磁偶极子共振。在图 3(b) 中, 折射率传感器在 AX 方向上谐振点处的电场在 Al_2O_3 层与黑磷层之间的区域被限制和增强, 并且沿垂直于入射面的方向被引导。光吸收依赖于黑磷表面的电场强度, 因此, 在 AX 方向上 $\lambda=8.802 \mu\text{m}$ 和 $\lambda=8.807 \mu\text{m}$ 处的共振状态下, 黑磷原子层上产生的局域电场增强导致了红外光的吸收。同时, 我们可以观察到在 AZ 方向上谐振点 $\lambda=8.800 \mu\text{m}$ 和 $\lambda=8.805 \mu\text{m}$ 处电场分布的

区域和在 AX 方向上谐振点处相同, 只是电场强度发生了一定程度的变化。

研究光学折射率传感的传感特性, 主要研究光学灵敏度(S)和品质因数(FOM)。灵敏度如式(15)所示:

$$S = \frac{\Delta\lambda}{\Delta n} \quad (15)$$

式中: $\Delta\lambda$ 为传感器谐振波长的变化; Δn 为待测物折射率的变化。FOM 的表达式如式(16)所示:

$$FOM = \frac{S}{FWHM} \quad (16)$$

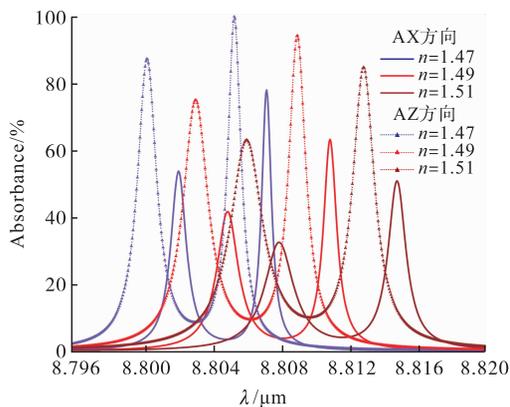
式中: $FWHM$ 为谐振峰的半高宽。

为了研究该多共振传感器对不同的待测物进行传感检测时的灵敏度和 FOM, 在待测物折射率 n 发生变化时, 对其相应的吸收特性进行了一系列的仿真研究。在整个仿真过程中, 待测物的厚度 nb 固定为 $4 \mu\text{m}$, 并将待测分析物的折射率范围设定为 $1.47 \sim 1.52$ 。

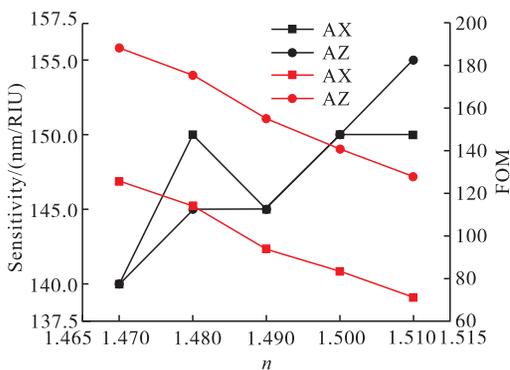
在图 4(a) 中, 当待测物的折射率 $n=1.47$ 时, 在 AX 方向上该传感器的左共振和右共振的谐振波长分别为 $\lambda=8.802 \mu\text{m}$, $\lambda=8.807 \mu\text{m}$, 吸收率为 53.7%, 77.8%, 而当待测物的折射率以 0.01 为增量增大到 $n=1.52$ 时, 红外传感器的谐振峰向长波段方向分别移动到 $\lambda=8.809 \mu\text{m}$, $\lambda=8.817 \mu\text{m}$, 吸收率为 28.8%, 45.6%, 波长偏移量 $\Delta\lambda$ 分别为 $0.007 \mu\text{m}$ 和 $0.010 \mu\text{m}$ 。在 AZ 方向上该传感器的左共振和右共振的谐振波长分别为 $\lambda=8.800 \mu\text{m}$, $\lambda=8.805 \mu\text{m}$, 吸收率为 87.0%, 99.6%, 而当分析物的折射率以 0.01 为增量增大到 $n=1.52$ 时, 红外传感器谐振峰向长波段方向分别移动到 $\lambda=8.807 \mu\text{m}$, $\lambda=8.815 \mu\text{m}$, 吸收率为 54.4%, 79.4%, 波长偏移量 $\Delta\lambda$ 分别为 $0.007 \mu\text{m}$ 和 $0.010 \mu\text{m}$ 。同时, 通过吸收光谱可以观测到在对应的谐振波长上 AX 方向的光学损耗更大。

在图 4(b) 和图 4(c) 中, 描述了该传感器左共振峰和右共振峰的灵敏度和 FOM 在 AX 方向上, 左共振峰和右共振峰灵敏度在 $n=1.47$ 时分别为 140 nm/RIU 和 180 nm/RIU, FOM 分别为 125 和 261, 随后在 $n=1.48$ 至 $n=1.52$ 的变化范围内灵敏度分别上升到 150 nm/RIU 和 205 nm/RIU, FOM 降低到了 72 和 159。在 AZ 方向上, 左共振峰和右共振峰灵敏度在 $n=1.47$ 时分别为 140 nm/RIU 和 180 nm/RIU, FOM 分别为 102 和 188, 随后在 $n=1.48$ 至 $n=1.52$ 的变化范围内灵敏度分别上升到 155 nm/RIU 和 200 nm/RIU, FOM 分别降低到了 66 和 128。基于黑磷的传感器在不同的晶体排列方向

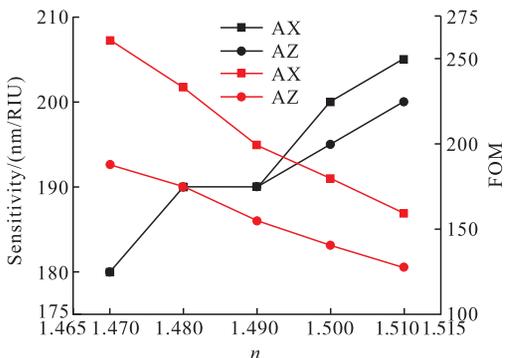
上具有不同的灵敏度和 FOM, 在 AX 方向上的传感性能略好于 AZ 方向, 而在 AZ 方向上的吸收率更高, 这也体现了黑磷的各向异性。



(a) 不同待测物的吸收光谱



(b) 左共振的灵敏度和品质因数

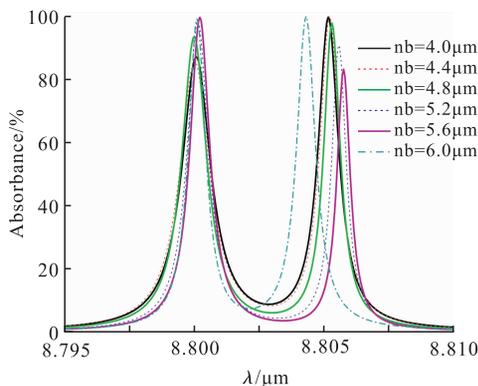


(c) 右共振的灵敏度和品质因数

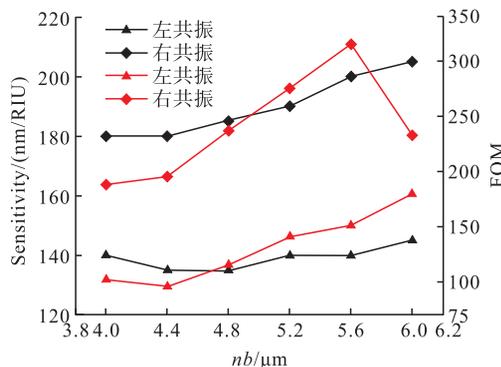
图 4 不同待测物时的吸收光谱和传感性能

随后, 为了进一步研究待测分析物厚度对红外传感器灵敏度和 FOM 的影响, 绘制了折射率保持在 $n=1.47$ 时不同待测物厚度的吸收光谱。选用整体效果较好的 AZ 方向, 如图 5(a) 所示, 对谐振波长进行数据绘制发现, 当待测分析物的折射率固定为 $n=1.47$ 时, 待测物厚度从 $4.0 \mu\text{m}$ 变化到 $5.6 \mu\text{m}$, 红外折射率传感器的谐振波长向长波段发生细微移动, 左共振峰波长几乎保持不变, 吸收率逐渐上升到了 99.6% , 右共振峰从 $8.805 \mu\text{m}$ 移动到了 $\lambda=8.806 \mu\text{m}$, 吸收率逐渐下降到了 83.1% 。当 nb 增加到 $6.0 \mu\text{m}$ 时, 左共振峰吸收率提高到 92.3% , 右共振峰吸收率提高到 99.9% 。如图 5(b), 在

$nb=6.0 \mu\text{m}$ 时, 传感器具有最高的灵敏度, 此时左共振峰灵敏度为 145 nm/RIU , FOM 达到了 179 nm/RIU 。右共振峰灵敏度为 205 nm/RIU , FOM 达到了 233 nm/RIU 。随着厚度增加, 传感器灵敏度整体增大。



(a) 吸收光谱



(b) 灵敏度和 FOM

图 5 AZ 方向上, 不同待测物厚度的吸收光谱和传感性能

3 结语

本文提出了一种基于黑磷的多共振传感器, 使用黑磷二维材料代替了传统等离子金属, 降低了成本。并且在不同的晶体方向上分别得到了不同的灵敏度和 FOM, 灵敏度可以达到 180 nm/RIU , FOM 可达 261 nm/RIU 。同时获得了极低的共振峰半高宽, 有利于提高传感器分辨率, 吸收率可达 99.6% 。本文验证了黑磷二维材料在光学折射率传感器方面的巨大前景, 并且为利用黑磷二维材料实现各种折射率传感器提供了新思路。

参考文献

[1] 郑荣升, 鲁拥华, 林开群, 等. 表面等离子体共振传感器研究的新进展[J]. 量子电子学报, 2008, 25(6): 657-664.
 [2] 苏艳阳, 李锐, 陈宇, 等. 传感技术综述[J]. 数字通信, 2009, 36(4): 20-26.
 [3] LONG F, ZHU A, SHI H. Recent Advances in Optical Biosensors for Environmental Monitoring and Early

- Warning [J]. *Sensors*, 2013, 13(10): 13928-13948.
- [4] GEDDES C D. *Reviews in Plasmonics 2016*[M]. [S. l.]: Springer, 2017.
- [5] 柳纳生. 等离子体理论及其应用研究[J]. *青海师范大学学报(自然科学版)*, 2003(3): 40-42.
- [6] MAURYA J B, PRAJAPATI Y K. A Comparative Study of Different Metal and Prism in the Surface Plasmon Resonance Biosensor Having MoS₂-Graphene[J]. *Optical & Quantum Electronics*, 2016, 48(5): 280.
- [7] MAURYA J B, PRAJAPATI Y K. Influence of Dielectric Coating on Performance of Surface Plasmon Resonance Sensor[J]. *Plasmonics*, 2017, 12(4): 1121-1130.
- [8] MAURYA J B, PRAJAPATI Y K, SINGH V, et al. Sensitivity Enhancement of Surface Plasmon Resonance Sensor Based on Graphene-MoS₂ Hybrid Structure with TiO₂-SiO₂ Composite Layer[J]. *Applied Physics a Materials Science & Processing*, 2015, 121(2): 525-533.
- [9] WU L, JIA Y, JIANG L, et al. Sensitivity Improved SPR Biosensor Based on the MoS₂/Graphene-Aluminum Hybrid Structure[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, 35(1): 82-85.
- [10] WANG X, JONES A M, SEYLER K L, et al. Highly Anisotropic and Robust Excitons in Monolayer Black Phosphorus [J]. *Nature Nanotechnology*, 2015, 10(6): 517-521.
- [11] CAI Y, XU K D, FENG N, et al. Anisotropic Infrared Plasmonic Broadband Absorber Based on Graphene-Black Phosphorus Multilayers [J]. *Optics Express*, 2019, 27(3): 3101-3112.
- [12] MAO N N, TANG J Y, XIE L M, et al. Optical Anisotropy of Black Phosphorus in the Visible Regime[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2016, 138(1): 300-305.
- [13] WU L, CHU H S, KOH W S, et al. Highly Sensitive Graphene Biosensors Based on Surface Plasmon Resonance[J]. *Optics Express*, 2010, 18(14): 395-400.
- [14] ZENG S, HU S, XIA J, et al. Graphene-MoS₂ Hybrid Nanostructures Enhanced Surface Plasmon Resonance Biosensors[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2015, 207: 801-810.
- [15] WANG X, JONES A M, SEYLER K L, et al. Highly Anisotropic and Robust Excitons in Monolayer Black Phosphorus [J]. *Nature Nanotechnology*, 2015, 10(6): 517-521.
- [16] CHO S Y, LEE Y H, KOH H J, et al. Superior Chemical Sensing Performance of Black Phosphorus: Comparison with MoS₂ and Graphene [J]. *Advanced Materials*, 2016, 28(32): 7020-7028.
- [17] LIU Z, AYDIN K. Localized Surface Plasmons in Nanostructured Monolayer Black Phosphorus [J]. *Nano Letters*, 2017, 16(6): 3457-3462.
- [18] LIU T, JIANG X, ZHOU C, et al. Black Phosphorus-Based Anisotropic Absorption Structure in the Mid-Infrared [J]. *Optics Express*, 2019, 27(20): 27618-27627.
- [19] LI H, JI C, REN Y, et al. Investigation of Multiband Plasmonic Metamaterial Perfect Absorbers Based on Graphene Ribbons by the Phase-Coupled Method[J]. *Carbon*, 2019, 141: 481-487.
- [20] XIAO S, LIU T, WANG X, et al. Tailoring the Absorption Bandwidth of Graphene at Critical Coupling [J]. *Physical Review B*, 2020, 102(8): 085410.

(编辑:徐楠楠)