

## 激光与光电子学进展

## 基于氧化石墨烯功能化锥形光纤的血红蛋白传感研究

刘壮<sup>1</sup>, 杨玲珍<sup>1,2\*</sup>, 王娟芬<sup>1</sup>, 冯纪鑫<sup>1</sup>, 刘娇娇<sup>1</sup>, 姜琦<sup>1</sup><sup>1</sup>太原理工大学物理与光电工程学院, 山西 太原 030024;<sup>2</sup>太原理工大学新型传感器与智能控制教育部重点实验室, 山西 太原 030024

**摘要** 通过混沌相关光纤环衰荡传感系统实时监测氧化石墨烯沉积过程, 并采用氧化石墨烯功能化锥形光纤作为传感元件对血红蛋白传感进行了实验研究。通过实时监测氧化石墨烯对锥形光纤功能化过程中衰荡时间的变化, 分析了功能化过程中锥形光纤表面羟基化、硅烷化和氧化石墨烯沉积对光传输损耗的影响。通过扫描电子显微镜对氧化石墨烯功能化锥形光纤效果进行检测。研究了不同浓度的氧化石墨烯功能化锥形光纤作为传感元件时对血红蛋白传感灵敏度的影响, 实验结果表明: 与未功能化锥形光纤相比, 使用氧化石墨烯功能化锥形光纤进行血红蛋白传感, 灵敏度提高了一个数量级。在功能化过程中, 氧化石墨烯浓度将影响功能化后锥形光纤的传感灵敏度, 且随着浓度的增加传感灵敏度增强。该研究成果有望在生物传感领域得到应用。

**关键词** 医用光学与生物技术; 锥形光纤; 氧化石墨烯; 光纤环衰荡; 血红蛋白; 传感

中图分类号 TP212.3 文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP220537

## Study on Hemoglobin Sensing by Graphene Oxide Functionalized Tapered Optical Fiber

Liu Zhuang<sup>1</sup>, Yang Lingzhen<sup>1,2\*</sup>, Wang Juanfen<sup>1</sup>, Feng Jixin<sup>1</sup>, Liu Jiaojiao<sup>1</sup>, Jiang Qi<sup>1</sup><sup>1</sup>College of Physics and Optoelectronics, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, Shanxi, China;<sup>2</sup>Key Lab of Advanced Transducers and Intelligent Control System, Ministry of Education, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, Shanxi, China

**Abstract** In this study, the functionalization of a tapered optical fiber using graphene oxide is monitored in real time by a chaotic correlation fiber loop ringdown system, and hemoglobin sensing is achieved experimentally with the functionalized graphene oxide tapered optical fiber as the sensor element. The functionalization of the tapered optical fiber surface using graphene oxide can be divided into hydroxylation, silanization, and graphene-oxide deposition. The effect of transmission loss is analyzed during functionalization according to the change in the ringdown time. The functionalized tapered optical fiber is tested via scanning electron microscopy. Moreover, the sensitivity of hemoglobin sensing is evaluated using different concentrations of graphene oxide in the functionalization process. The experimental results show that the functionalized tapered optical fiber exhibits a considerable increase in sensitivity by an order of magnitude compared with the unfunctionalized tapered optical fiber. The sensitivity of the functionalized tapered optical fiber is influenced by the concentration of graphene oxide during functionalization; sensitivity increases with concentration. These results can potentially be applied in the field of biosensing.

**Key words** medical optics and biotechnology; tapered optical fiber; graphene oxide; fiber loop ringdown; hemoglobin; sensing

## 1 引言

血红蛋白是红细胞的主要成分, 约占红细胞干含量的 92%<sup>[1]</sup>, 在人体健康检测方面, 血液系统疾病和恶

性肿瘤在发展的过程中会伴随有血红蛋白特性的变化, 因此血红蛋白检测结果是许多疾病辅助诊断和疾病预后判断的重要指标<sup>[2]</sup>。血红蛋白检测是医院血液检查的一项常规项目, 检测的基本原理是比色法, 其中

收稿日期: 2022-01-13; 修回日期: 2022-02-13; 录用日期: 2022-02-27; 网络首发日期: 2022-03-11

基金项目: 国家自然科学基金(61975141, 61575137, 61675144)

通信作者: \*office-science@tyut.edu.cn

氰化高铁血红蛋白是世界卫生组织(WHO)推荐的标准化血红蛋白测定法<sup>[3]</sup>。

随着光纤生物传感器的发展,研究人员采用锥形光纤<sup>[4]</sup>、U型光纤<sup>[5]</sup>、长周期光纤光栅<sup>[6]</sup>、倾斜光纤光栅<sup>[7]</sup>等特殊结构的光纤增强光与目标分子的相互作用实现高灵敏度的生物传感。锥形光纤由于光纤的锥化,部分传播光被引导到光纤外,从而诱导出倏逝场,使其对外界环境折射率变化高度敏感<sup>[8]</sup>。锥形光纤产生的倏逝场与周围分子相互作用而变化<sup>[9]</sup>,增加了锥形光纤在生物传感器技术领域的潜在用途,已用于蛋白质<sup>[10]</sup>、酶<sup>[11]</sup>和胆固醇<sup>[12]</sup>的检测。为了进一步实现对生物分子的高灵敏检测,锥形光纤还需要特殊的材料来区分和捕捉外界环境中的目标分子,即在锥形光纤表面沉积特殊薄膜材料进行功能化。

二维材料因其独特的光学、化学和电学性质引起了全世界的关注<sup>[13]</sup>。石墨烯是一种新型的二维材料,具有优异的光子和光电性能<sup>[14]</sup>,而氧化石墨烯是石墨烯的一种重要衍生物,其性质与石墨烯相似如高表面活性、高热导率等<sup>[15]</sup>。此外,其边缘和顶部含有大量的含氧官能团如羧基、羟基和环氧基<sup>[16]</sup>,因此可以通过静电相互作用<sup>[17]</sup>、氢键、 $\pi$ - $\pi$ 堆积等非共价相互作用吸附生物分子,即有着良好的生物相容性能够用于湿度<sup>[18]</sup>、蛋白质<sup>[19]</sup>、DNA<sup>[20]</sup>和禽流感病毒<sup>[21]</sup>等生物传感,得益于这些独特的性质,氧化石墨烯能够为血红蛋白

分子提供结合位点,被认为是检测血红蛋白的理想材料。

本文采用氧化石墨烯功能化锥形光纤作为混沌相关光纤环衰荡系统中的传感元件,实现血红蛋白传感,对其传感性能进行了实验研究。利用混沌相关光纤环衰荡系统监测氧化石墨烯沉积过程,能够将频域的变化转为时域的变化,通过记录衰荡时间的变化从而达到实时监测的目的。通过扫描电子显微镜对氧化石墨烯功能化锥形光纤效果进行检测。研究了不同浓度的氧化石墨烯功能化锥形光纤对灵敏度的影响,最终实现血红蛋白的微量检测。

## 2 实验装置与传感原理

### 2.1 实验装置

图 1 所示为混沌相关光纤环衰荡系统装置图。混沌激光(chaotic laser)注入光纤环形腔,光纤环形腔由两个 95:5 耦合器(OC1、OC2)、传感元件(sensing unit)和一段单模光纤连接而成。混沌激光器的光从 OC1 的 5% 端口进入光纤环形腔,在腔内循环。一小部分光通过 OC2 的 5% 端口输出,由光电探测器(PD)将光信号转换为电信号,通过示波器(OSC)将数据采集到计算机中,实时进行处理数据。

混沌光纤激光器的输出特性如图 2 所示,图 2(a)是混沌光纤激光器的光谱图,可以看出中心波长为

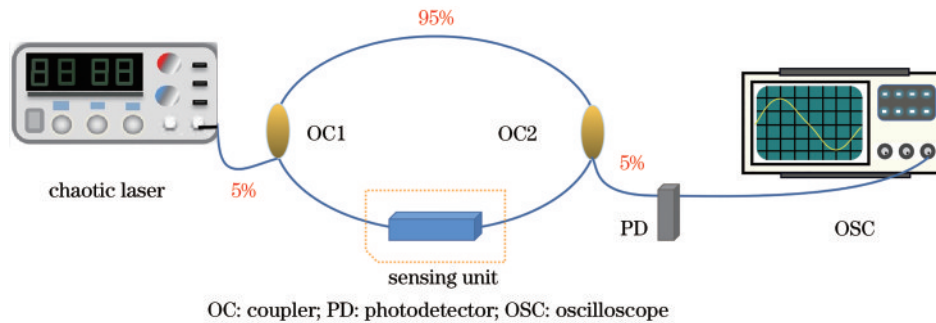


图 1 混沌相关光纤环衰荡系统装置图

Fig. 1 Experimental setup of chaotic correlation fiber loop ringdown system

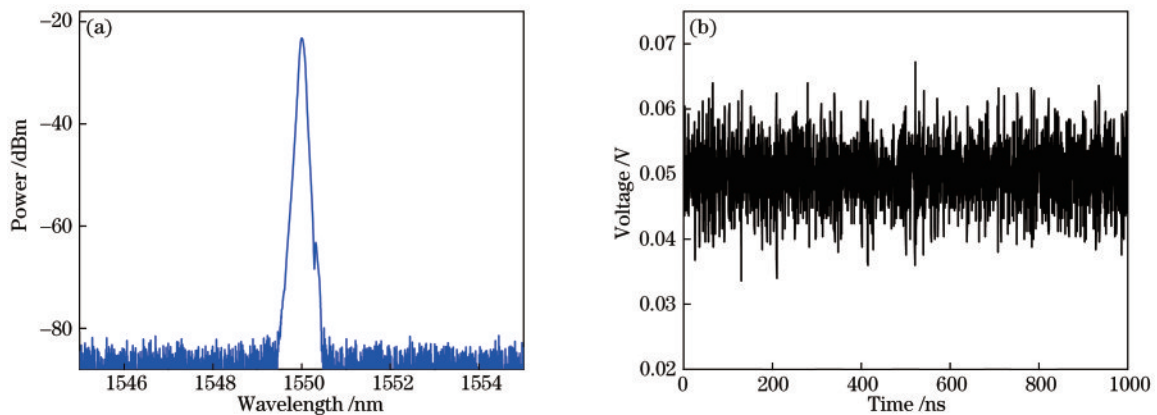


图 2 混沌光纤激光器的特性。(a) 光谱;(b) 时序

Fig. 2 Characteristics of chaotic fiber laser. (a) Spectrum; (b) time series

1550 nm。图 2(b) 是混沌光纤激光输出的时间序列，可以看出时间序列具有类噪声特性。

混沌相关光纤环衰荡系统通过检测自相关系数峰值的衰荡时间来实现传感，在本实验中：

$$\tau_{R0} = \frac{n_c L}{cA} = \frac{\tau_r}{A}, \quad (1)$$

式中， $L$ 、 $c$ 、 $n_c$ 、 $A$  和  $\tau_r$  分别是光纤环的长度、真空中的光速、光纤的折射率、系统的固有损耗（包括耦合器的传输损耗、熔接损耗和耦合损耗）和光在环路中循环一圈的时间，对于给定的混沌相关光纤环衰荡系统， $\tau_r$  和  $A$  是常数。当系统在进行传感时，光进入传感元件中传播，一个来自高折射率介质的微弱的瞬变场将会进入低折射率介质<sup>[22]</sup>，这时光纤环路中会引入额外的损耗  $B$ ， $B$  是与分析物浓度相关的变量，从而导致衰荡时间从  $\tau_{R0}$  变为  $\tau_R$ ，其中  $\tau_R$  由下式给出：

$$\tau_R = \frac{n_c L}{c(A+B)}. \quad (2)$$

由式(1)和式(2)可得额外的损耗  $B$  为

$$B = \frac{n_c L}{c} \left( \frac{1}{\tau_R} - \frac{1}{\tau_{R0}} \right) = \tau_r \left( \frac{1}{\tau_R} - \frac{1}{\tau_{R0}} \right). \quad (3)$$

混沌相关光纤环衰荡系统血红蛋白传感器的基本原理由式(3)表示，该式也表明传感系统中损耗  $B$  与  $(1/\tau_R - 1/\tau_{R0})$  呈线性关系，即额外的损耗  $B$  可以通过测量  $\tau_R$  和  $\tau_{R0}$  获得。

## 2.2 锥形光纤原理

锥形光纤由 3 个部分构成，包括两个过渡区域和锥腰区域部分，两个完全对称的过渡区域分布在锥腰部分的两边。锥形光纤能产生极强的倏逝场，倏逝场能够与外部环境相互作用并提供定量信息，对周围变化高度敏感。倏逝场由穿透深度决定：

$$d_p = \frac{\lambda}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{n_c^2 \sin^2 \theta - n_{cl}^2}}, \quad (4)$$

式中： $\lambda$  是入射波长； $n_c$  是纤芯改变后的折射率； $n_{cl}$  是包层与外界的折射率； $\theta$  是新纤芯与外部介质界面上从法线上测量的入射角，根据穿透深度公式可以设计不同形态的锥形光纤。这时锥形光纤原理与马赫-曾德尔干涉仪的原理相同，模式之间的耦合导致强度变化。

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\Delta\Phi), \quad (5)$$

式中： $I$  表示输出处的干涉强度； $I_1$  和  $I_2$  表示两种普通模式（引导模式和非引导模式）的光强度， $\Delta\Phi$  是两种模式之间的相位差，表示为

$$\Delta\Phi = \left[ \frac{2\pi(\Delta n_{\text{eff}})l}{\lambda} \right], \quad (6)$$

式中： $\Delta n_{\text{eff}}$  是光纤芯和包层的有效折射率的差值 ( $n_c^{\text{eff}} - n_{cl}^{\text{eff}}$ )； $l$  是锥区长度，由此可知，外部介质之间的折射率差变化导致强度变化，在频域中表现为波长的偏移，在时域中，强度变化即损耗变化，表现为衰荡时间的变化。

氧化石墨烯功能化后的锥形光纤，倏逝场增强，外部介质之间的折射率差变化更大，即  $\Delta n_{\text{eff}}$  发生变化，导致干涉强度发生变化，最终表现为衰荡时间的变化，从而使氧化石墨烯功能化锥形光纤成为具有良好性能的传感元件。

## 3 传感元件制作与实验研究

### 3.1 氧化石墨烯功能化锥形光纤制作

使用化学方法<sup>[23]</sup>将氧化石墨烯沉积到锥形光纤表面进行功能化，主要分为表面羟基化、表面硅烷化、氧化石墨烯沉积 3 个过程。通过混沌相关光纤环衰荡系统实时监测氧化石墨烯功能化过程中衰荡时间的变化，分析各个过程中光传输损耗的影响。图 3 显示了使用化学方法沉积氧化石墨烯过程中衰荡时间的实时变化。A：用 NaOH 溶液处理锥形光纤 1 h 进行表面羟基化，可以观察到锥形光纤从空气到 NaOH 溶液中，衰荡时间有了明显的提高并稳定，清洗干燥后衰荡时间变大，即表面羟基化结束后，锥形光纤表面上的 Si-OH 导致损耗变小；B：用体积浓度为 5% 的 APTES 乙醇溶液处理锥形光纤 1 h 进行表面硅烷化，加入 APTES 乙醇溶液衰荡时间迅速减小后增加最后趋于稳定，使用无水乙醇清洗干燥结束时，衰荡时间与表面羟基化之后相差不大，即锥形光纤表面形成的氨基 ( $-\text{NH}_2$ ) 对其损耗影响不大；C：氧化石墨烯的沉积，加入 1 mg/mL 氧化石墨烯溶液后，氧化石墨烯的环氧基与表面硅烷化的  $-\text{NH}_2$  反应，同时，水溶液缓慢蒸发，氧化石墨烯逐渐吸附在锥形光纤表面，衰荡时间先减小后迅速增加，然后衰荡时间逐渐减小，待凹槽内氧化石墨烯溶液蒸发完时停止监测，最终衰荡时间比一开始在空气中低很多，即在监测结束时氧化石墨烯沉积到锥形光纤表面，损耗比未功能化锥形光纤的大。

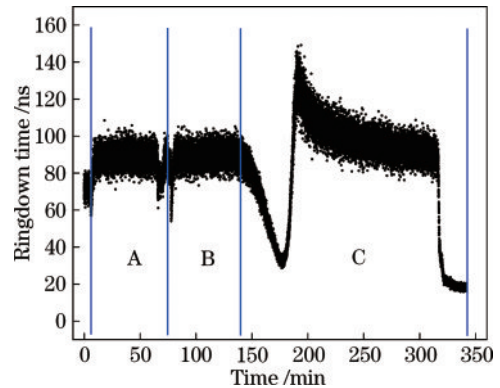


图 3 氧化石墨烯沉积过程实时在线监测

Fig. 3 On line and real-time monitoring of graphene oxide deposition process

在扫描电子显微镜 (SEM) 下对氧化石墨烯功能化锥形光纤效果进行检测，从图 4(a) 所示图像可以看出，氧化石墨烯沉积在锥形光纤表面，图 4(b) 和 4(c)

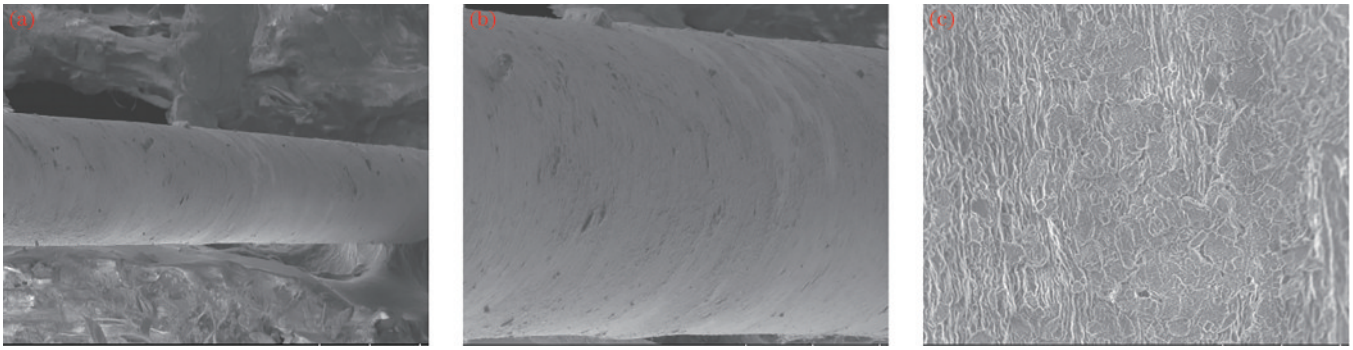


图4 氧化石墨烯功能化锥形光纤的SEM图像。(a) 氧化石墨烯功能化锥形光纤;(b) 氧化石墨烯功能化锥形光纤的表面;(c) 放大的氧化石墨烯SEM图像

Fig. 4 Scanning electron microscope (SEM) images of graphene oxide functionalized tapered optical fiber. (a) Graphene oxide functionalized tapered optical fiber; (b) surface of graphene oxide functionalized tapered optical fiber; (c) enlarged SEM image of graphene oxide

表明锥形光纤表面形成了一层致密的氧化石墨烯膜。氧化石墨烯薄膜的厚度可以根据氧化石墨烯溶液的浓度和体积进行调节,一般来说,在较高的石墨烯浓度下,可以获得较厚的氧化石墨烯膜。

### 3.2 氧化石墨烯功能化锥形光纤传感特性

本实验中,首先用锥形光纤作为传感元件引入到混沌相关光纤环衰荡系统中,将锥形光纤浸入去离子水中,通过OC2输出的混沌激光的自相关衰荡曲线如图5(a)所示,可以看出混沌激光的自相关衰荡曲线是一系列衰减峰,两个相邻尖峰之间的时间间隔为37 ns,对应实验中光纤环的长度为7.54 m,  $\tau_{R0}$  为

77.88 ns。实验中血红蛋白溶液均由灭菌的去离子水配制,对不同浓度的血红蛋白溶液进行检测,每次测量前用去离子水冲洗传感元件数次,衰荡时间随血红蛋白浓度的变化如图5(b)所示,随着血红蛋白浓度的增加,衰荡时间在不断减小,线性拟合度为0.925。经过数据处理,结果如图6(a)所示,测量灵敏度达到  $0.400 \mu\text{s}^{-1}(\text{mg}/\text{mL})^{-1}$ 。将  $0.5 \text{ mg}/\text{mL}$  氧化石墨烯功能化之后的锥形光纤作为传感元件引入到混沌相关光纤环衰荡系统中,重复之前测量过程,结果如图6(b)所示,测量灵敏度达到  $1.059 \mu\text{s}^{-1}(\text{mg}/\text{mL})^{-1}$ ,与未功能化锥形光纤相比,灵敏度提升2.65倍。

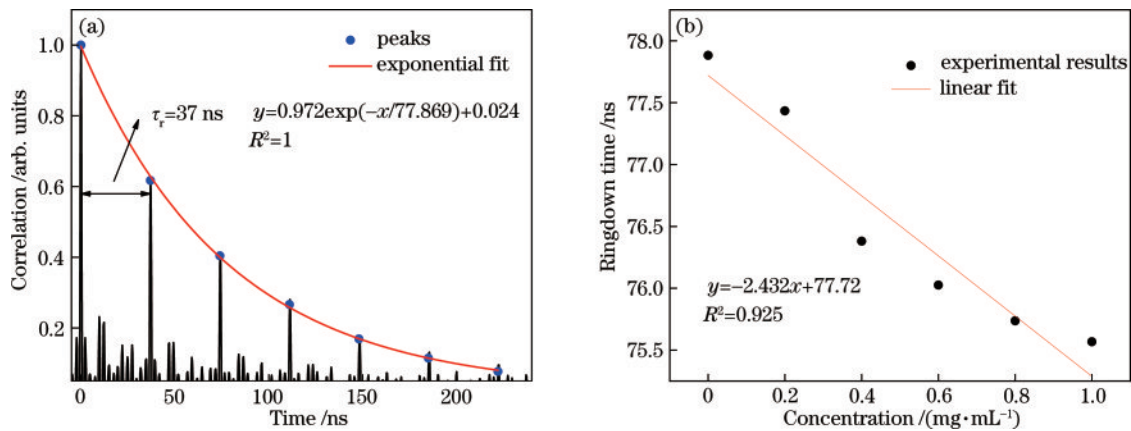


图5 锥形光纤的传感性能。(a) 自相关衰荡曲线;(b) 衰荡时间随血红蛋白浓度的变化关系

Fig. 5 Sensing performance of tapered optical fiber. (a) Autocorrelation ringdown curve; (b) relationship between hemoglobin concentration and ringdown time

为进一步研究氧化石墨烯厚度对灵敏度的影响,先将锥形光纤作为传感元件引入到混沌相关光纤环衰荡系统中,进行血红蛋白检测,经过数据处理,结果如图6(c)所示,测量灵敏度达到  $0.418 \mu\text{s}^{-1}(\text{mg}/\text{mL})^{-1}$ ;然后将  $1 \text{ mg}/\text{mL}$  氧化石墨烯功能化之后的锥形光纤作为传感元件进行血红蛋白检测,结果如图6(d)所示,测量灵敏度达到  $8.917 \mu\text{s}^{-1}(\text{mg}/\text{mL})^{-1}$ ,灵敏度提升20倍。随着氧化石墨烯厚度的增加,灵敏度也会增加,最

终在最佳的氧化石墨烯厚度下,灵敏度将达到最大值。因为氧化石墨烯和血红蛋白的反应不是特异性结合,所以氧化石墨烯功能化锥形光纤对血红蛋白没有选择性。

表1列出了一些血红蛋白传感器的传感性能,与基于频域解调的血红蛋白传感器相比,本文在时域上实现血红蛋白的检测,在血红蛋白传感灵敏度  $8.917 \mu\text{s}^{-1}(\text{mg}/\text{mL})^{-1}$  下,对应探测极限达到  $38 \mu\text{g}/\text{mL}$ 。

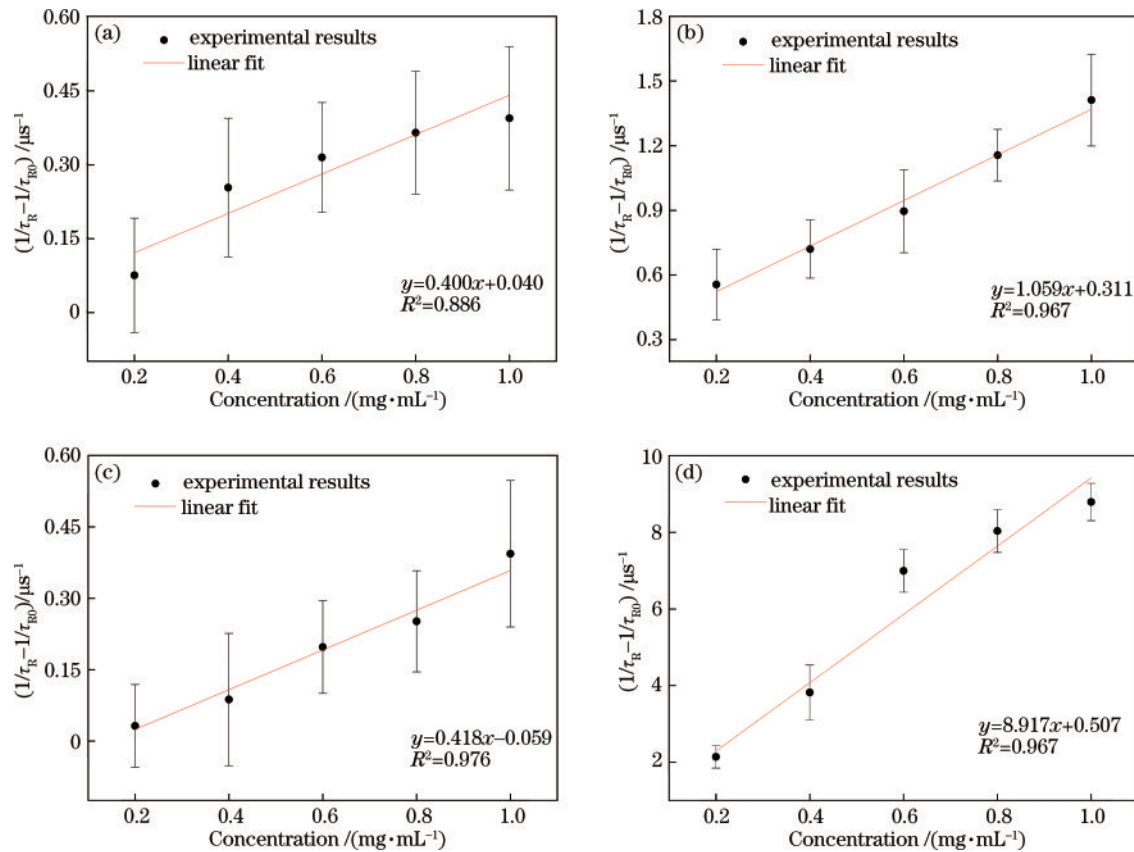


图6 未功能化锥形光纤与氧化石墨烯功能化锥形光纤的传感性能。(a)、(c) 未功能化锥形光纤;(b) 0.5 mg/mL 氧化石墨烯功能化锥形光纤;(d) 1 mg/mL 氧化石墨烯功能化锥形光纤

Fig. 6 Sensing performances of unfunctionalized tapered optical fiber and graphene oxide functionalized tapered optical fiber. (a), (c) Unfunctionalized tapered optical fiber; (b) 0.5 mg/mL graphene oxide functionalized tapered optical fiber; (d) 1 mg/mL graphene oxide functionalized tapered optical fiber

表1 不同血红蛋白传感器的传感性能比较

Table 1 Comparison of sensing performances among different hemoglobin sensors

Type of sensor	Sensing unit	Sensitivity	Reference
Electrochemical sensor	Nanoparticles modified electrode	$0.17 \text{ mA}/(\text{mg} \cdot \text{mL}^{-1})$	[24]
Optic fiber sensor	D-shaped photonic crystal fiber	$0.83 \text{ nm}/(\text{g} \cdot \text{L}^{-1})$	[25]
Optic fiber sensor	Micro-tapered long period fiber grating	$2 \text{ nm}/(\text{mg} \cdot \text{mL}^{-1})$	[26]
Optic fiber sensor	Tilted fiber Bragg gratings	$8.144 \text{ nm}/(\text{mg} \cdot \text{mL}^{-1})$	[27]
Optic fiber sensor	Graphene oxide functionalized tapered optical fiber	$8.917 \mu\text{s}^{-1}/(\text{mg} \cdot \text{mL}^{-1})$	Proposed

## 4 结 论

采用氧化石墨烯功能化锥形光纤作为传感元件引入到混沌相关光纤环衰荡系统中,实现血红蛋白传感,并对其传感性能进行了实验研究。通过混沌相关光纤环衰荡系统实时监测氧化石墨烯沉积过程中衰荡时间的变化,分析了锥形光纤表面羟基化、硅烷化和氧化石墨烯沉积对光传输损耗的影响,为进一步对化学沉积过程进行优化改进提供基础。在SEM下对氧化石墨烯功能化锥形光纤效果进行鉴定。研究了不同浓度的氧化石墨烯功能化锥形光纤作为传感元件时对传感灵敏度的影响,实验结果表明:使用0.5 mg/mL氧化石

墨烯溶液对锥形光纤进行功能化时,测量灵敏度达到 $1.059 \mu\text{s}^{-1}(\text{mg}/\text{mL})^{-1}$ ,与未氧化石墨烯功能化锥形光纤相比,灵敏度提高2.65倍;使用1 mg/mL氧化石墨烯溶液对锥形光纤进行功能化时,灵敏度提高一个数量级,达到 $8.917 \mu\text{s}^{-1}(\text{mg}/\text{mL})^{-1}$ ,探测极限达到 $38 \mu\text{g}/\text{mL}$ 。对氧化石墨烯功能化锥形光纤进行了初步研究,实现了生物分子的微量检测,该研究结果在生物传感领域有着一定的应用前景。

## 参 考 文 献

- [1] Krueger S, Nossal R. SANS studies of interacting hemoglobin in intact erythrocytes[J]. Biophysical Journal, 1988, 53(1): 97-105.

- [2] Sharma K, Johnson D J, Johnson B, et al. Hemoglobin concentration does not impact 3-month outcome following acute ischemic stroke[J]. BMC Neurology, 2018, 18(1): 78.
- [3] 彭明婷, 艾承锦, 李臣宾, 等. 氧化高铁血红蛋白国家一级标准物质的研制[J]. 中华检验医学杂志, 2009, 32(1): 97-101.  
Peng M T, Ai C J, Li C B, et al. Establishment of the national standard materials for haemoglobin cyanide[J]. Chinese Journal of Laboratory Medicine, 2009, 32(1): 97-101.
- [4] Liyanage T, Lai M M, Slaughter G. Label-free tapered optical fiber plasmonic biosensor[J]. Analytica Chimica Acta, 2021, 1169: 338629.
- [5] Li Y X, Pu S L, Hao Z J, et al. Vector magnetic field sensor based on U-bent single-mode fiber and magnetic fluid[J]. Optics Express, 2021, 29(4): 5236-5246.
- [6] Deng H C, Wang R, Jiang X W, et al. A long period grating sensor based on helical capillary optical fiber[J]. Journal of Lightwave Technology, 2021, 39(14): 4884-4891.
- [7] Ma P L, Hu N, Ruan J J, et al. *In-situ* measurement of ammonium in wastewater using a tilted fiber grating sensor[J]. Journal of Lightwave Technology, 2021, 39(12): 4055-4061.
- [8] Idris S, Azeman N H, Azmy N A N, et al. Gamma irradiated Py/PVA for GO<sub>x</sub> immobilization on tapered optical fiber for glucose biosensing[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2018, 273: 1404-1412.
- [9] Ding Z Y, Sun K L, Liu K, et al. Distributed refractive index sensing based on tapered fibers in optical frequency domain reflectometry[J]. Optics Express, 2018, 26(10): 13042-13054.
- [10] Kamil Y M, Bakar M H A, Mustapa M A, et al. Label-free Dengue E protein detection using a functionalized tapered optical fiber sensor[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2018, 257: 820-828.
- [11] Sun D D, Sun L P, Guo T, et al. Label-free thrombin detection using a tapered fiber-optic interferometric aptasensor[J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(11): 2756-2761.
- [12] Kumar S, Kaushik B K, Singh R, et al. LSPR-based cholesterol biosensor using a tapered optical fiber structure[J]. Biomedical Optics Express, 2019, 10(5): 2150-2160.
- [13] Tan C L, Cao X H, Wu X J, et al. Recent advances in ultrathin two-dimensional nanomaterials[J]. Chemical Reviews, 2017, 117(9): 6225-6331.
- [14] Geim A K. Graphene: status and prospects[J]. Science, 2009, 324(5934): 1530-1534.
- [15] Zhu Y W, Murali S, Cai W W, et al. Graphene and graphene oxide: synthesis, properties, and applications [J]. Advanced Materials, 2010, 22(35): 3906-3924.
- [16] Sun Y Q, Wu Q, Shi G Q. Graphene based new energy materials[J]. Energy & Environmental Science, 2011, 4(4): 1113-1132.
- [17] Georgakilas V, Otyepka M, Bourlino A B, et al. Functionalization of graphene: covalent and non-covalent approaches, derivatives and applications[J]. Chemical Reviews, 2012, 112(11): 6156-6214.
- [18] 张平, 刘彬, 刘正达, 等. 基于氧化石墨烯涂层的侧抛光纤马赫-曾德尔干涉仪温湿度传感器[J]. 光学学报, 2021, 41(3): 0306003.  
Zhang P, Liu B, Liu Z D, et al. Temperature and humidity sensor based on a graphene oxide-coated side-polished fiber Mach-Zehnder interferometer[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(3): 0306003.
- [19] Liu C, Xu B J, Zhou L, et al. Graphene oxide functionalized long period fiber grating for highly sensitive hemoglobin detection[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2018, 261: 91-96.
- [20] Gao L, Lian C Q, Zhou Y, et al. Graphene oxide-DNA based sensors[J]. Biosensors and Bioelectronics, 2014, 60: 22-29.
- [21] 石胜辉, 王鑫, 罗彬彬, 等. 氧化石墨烯修饰腐蚀型长周期光纤光栅的禽流感病毒免疫传感器[J]. 光子学报, 2020, 49(1): 0106002.  
Shi S H, Wang X, Luo B B, et al. Avian influenza virus immunosensor based on etched long period fiber grating coated with graphene oxide[J]. Acta Photonica Sinica, 2020, 49(1): 0106002.
- [22] Zhao Y, Bai L, Han B, et al. Review on advances of sensors based on fiber loop ring-down spectroscopy[J]. Instrumentation Science & Technology, 2013, 41(4): 349-364.
- [23] Liu C, Cai Q, Xu B J, et al. Graphene oxide functionalized long period grating for ultrasensitive label-free immunosensing[J]. Biosensors and Bioelectronics, 2017, 94: 200-206.
- [24] Sun B H, Ni X J, Cao Y H, et al. Electrochemical sensor based on magnetic molecularly imprinted nanoparticles modified magnetic electrode for determination of Hb[J]. Biosensors and Bioelectronics, 2017, 91: 354-358.
- [25] Lidiya A E, Raja R V J, Pham V D, et al. Detecting hemoglobin content blood glucose using surface plasmon resonance in D-shaped photonic crystal fiber[J]. Optical Fiber Technology, 2019, 50: 132-138.
- [26] Wang R D, Ren Z Y, Kong D P, et al. Highly sensitive label-free biosensor based on graphene-oxide functionalized micro-tapered long period fiber grating[J]. Optical Materials, 2020, 109: 110253.
- [27] Moreno Y, Song Q G, Xing Z K, et al. Hybrid tilted fiber gratings-based surface plasmon resonance sensor and its application for hemoglobin detection[J]. Chinese Optics Letters, 2020, 18(10): 100601.