

基于石墨烯的全光纤温度传感器的研究

廖国珍¹ 张 军^{1,2} 蔡 祥³ 谭绍早³ 唐洁媛^{1,2} 肖 毅^{1,2}
陈 哲^{1,2} 余健辉^{1,2*} 庞其昌^{1,2}

¹ 暨南大学光电工程系, 广东 广州 510632
² 暨南大学光电信息与传感技术广东高校重点实验室, 广东 广州 510632
³ 暨南大学化学系, 广东 广州 510632

摘要 研究了一种基于还原氧化石墨烯(rGO)的全光纤温度传感器。此传感器利用侧边抛磨光纤(SPF)作为基底,采用改进氧化-还原法得到的石墨烯作为敏感材料。通过自然蒸发沉积方法,将 rGO 沉积于 SPF 的抛磨区,使 rGO 与光纤光场发生相互作用。实验结果表明温度变化可明显改变 rGO 对传输光场的作用,使通过传感器的光功率发生显著的变化。当温度从 $-7.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 到 $77\text{ }^{\circ}\text{C}$ 变化时,通过传感器的光功率发生 11.3 dB 的变化,光功率随温度变化的线性相关系数高达 99.4%。测温精度可达 $0.03\text{ }^{\circ}\text{C}$,灵敏度为 $0.134\text{ dB}/^{\circ}\text{C}$,响应速度大于 $0.0228\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 。

关键词 光纤光学;侧边抛磨光纤;温度传感器;光纤传感;还原氧化石墨烯

中图分类号 TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0706004

All-Fiber Temperature Sensor Based on Graphene

Liao Guozhen¹ Zhang Jun^{1,2} Cai Xiang³ Tan Shaozao³ Tang Jieyuan^{1,2}
Xiao Yi^{1,2} Chen Zhe^{1,2} Yu Jianhui^{1,2} Pang Qichang^{1,2}

¹ Department of Optoelectronic Engineering, Jinan University, Guangzhou, Guangdong 510632, China

² Key Laboratory of Optoelectronic Information and Sensing Technologies of Guangdong Higher Education Institutes, Jinan University, Guangzhou, Guangdong 510632, China

³ Department of Chemistry, Jinan University, Guangzhou, Guangdong 510632, China

Abstract An all-fiber temperature sensor based on reduced graphene oxide (rGO) is studied. Such a sensor consists of two key parts, including a section of side polished fiber (SPF) as a substrate and rGO film as temperature sensitive material which is deposited onto the SPF by spontaneous evaporation. Experimental results show that temperature change can affect the interaction between rGO film and propagation mode in SPF, and change the transmitting optical power through rGO-based SPF sensor. When temperature changes from $-7.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $77\text{ }^{\circ}\text{C}$, the transmitting optical power of the sensors spans over 11.3 dB. The sensitivity and temperature measurement accuracy of the rGO-based SPF sensor are measured to be $0.134\text{ dB}/^{\circ}\text{C}$ and $0.03\text{ }^{\circ}\text{C}$, respectively. The linear correlation of the sensor between temperature and transmission optical power is 99.4% and response rate is at least $0.0228\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$.

Key words fiber optics; side polished fiber; temperature sensor; optical fiber sensing; reduced graphene oxide

OCIS codes 060.2370; 230.1150; 310.6845

收稿日期: 2013-02-06; 收到修改稿日期: 2013-04-07

基金项目: 国家自然科学基金(51172099, 61275046, 21006038, 11004086)、广东省战略性新兴产业核心技术攻关项目(2012A032300016)、广东高校优秀青年创新人才培养计划项目(LYM10024)

作者简介: 廖国珍(1979—),女,硕士研究生,主要从事光纤无源器件方面的研究。E-mail: lgz406@163.com

导师简介: 张 军(1968—),女,博士,研究员,主要从事光电检测技术、光谱分析、光学设计等方面的研究。

E-mail: cedbys@163.com

* 通信联系人。E-mail: kensomyu@gmail.com

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

1 引 言

侧边抛磨光纤(SPF)是标准单模光纤通过侧边抛磨技术去掉部分包层后所形成的特殊光纤。光纤中被抛磨去掉部分包层的区域称为抛磨区。在抛磨区,原被束缚在纤芯的光场以消逝场形式泄漏在光纤外部,致使外界环境与光场相互作用。利用这一特性,SPF已被制作成为各类光纤器件和光纤传感器^[1-5],如紫外光功率传感器^[6-8]、全光纤集成化光功率监控器^[9]和光控偏振控制器^[10]。

石墨烯为二维蜂窝状结构的单层碳原子。由于其特殊结构,电子呈现出独特的线性色散关系,电子作为无静止质量的狄拉克粒子,具有很高的迁移速率^[11]。因此,石墨烯具有超高的导热性^[12]、超高的电导率^[13]、超宽带宽的光子响应^[14]和超宽的光学吸收带宽^[15-16]等特性。因此石墨烯受到了广泛关注,并被用作各种各样的传感器。Yavari等^[17]使用泡沫状石墨烯作为气体传感器,发现其对气体 NH_3 和 NO_2 具有极高的灵敏度,灵敏度可达 10^{-6} 量级;另外具有超高灵敏度的石墨烯生物传感器也不断被报道^[18-19]。

石墨烯在光电子领域的应用,已成为研究热点^[20-23]。其中将石墨烯直接与光波导结合形成光电子器件,利用石墨烯与波导模场的作用改变传输光场的性质,可以实现调控波导光子的作用。Liu等^[24]利用单层石墨烯覆盖在脊型波导上,通过电场调控石墨烯的费米能级调控石墨烯对波导光子吸收,从而实现小型化的高速宽带宽电光调制器;而Bao等^[25]则利用石墨烯超宽光学吸收的性质,将石墨烯覆盖在SPF的抛磨区,制成了宽带宽的石墨烯光纤起偏器;Kim等^[26]则在聚合物波导上形成了石

墨烯波导起偏器;Ma等^[27]则利用石墨烯覆盖在光纤-毛细管结构的光纤端面,形成法布里-珀罗腔式的压力传感器。由于石墨烯具有极高的热导率^[12]及高灵敏的温度响应特性^[28],基于石墨烯的光纤温度传感器因而具有响应速度快、灵敏度高等优点。本文制备了基于石墨烯的SPF温度传感器,实验研究了此温度传感器的灵敏度、分辨率、响应速度及其重复性。

2 传感器的制作

传感器使用的还原氧化石墨烯(rGO)是采用改进的氧化-还原法得到的。具体方法分为氧化和还原两步完成。第一步制备纯净的氧化石墨。采用Hummers法^[29-30]得到石墨粉,通过透析的方法完全去除氧化石墨中的盐和酸,再通过离心方法收集氧化石墨(GO)且风干。第二步还原氧化石墨得到rGO。把GO分散在超纯水中,并用超声波处理3 h,使大块的GO变成片状的纳米颗粒;然后取出上层清液,用离心分离法去除大片GO,剩下小片的GO溶液;再用质量分数为5%的氢氧化铵把制备好GO溶液的PH值调到11后,往溶液中添加水合肼,形成混合物。最后,通过水冷式冷凝器,将此混合物加热到 $95\text{ }^\circ\text{C}\sim 100\text{ }^\circ\text{C}$,保持2 h后自然冷却到室温,再用介质多孔玻璃过滤得到rGO,并将得到的rGO溶解于乙醇溶液,形成浓度为10%的石墨烯溶液以供使用。

传感器所采用的SPF是采用轮式侧边抛磨技术对标准的通信单模光纤加工而成。用精度为 $0.1\text{ }\mu\text{m}$ 的细丝测量仪(型号xs-01-05-001),对其抛磨深度进行测量,抛磨深度随光纤纵向位置变化如图1(a)所

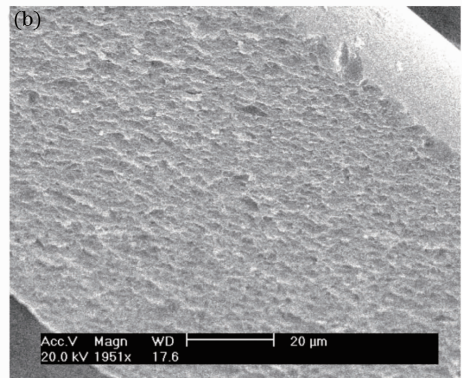
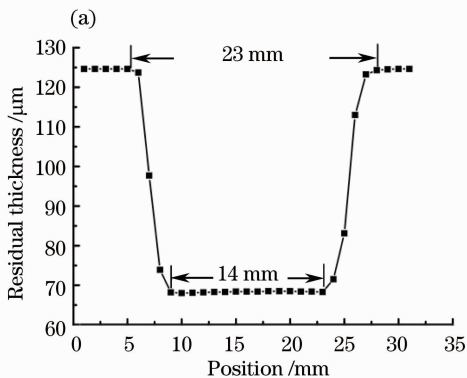


图1 SPF的几何特性。(a)抛磨深度随光纤纵向的变化;(b)抛磨光纤平坦区的SEM照片

Fig. 1 Morphological characteristic of SPF. (a) Vertical profile of side polished fiber; (b) SEM photograph of top flat plane on polished region

示。由图 1(a)可知,抛磨区长度约为 23 mm,抛磨平坦区长度约为 14 mm,光纤抛磨深度为 $57\ \mu\text{m}$ 。由于标准光纤的直径为 $125\ \mu\text{m}$,其纤芯直径约为 $8\ \mu\text{m}$,计算可知抛磨后光纤的包层剩余厚度(即抛磨面与纤芯界面的距离)为 $1.5\ \mu\text{m}$,此包层的剩余厚度既可保证抛磨光纤的损耗较小,同时可保证光场有足够的消逝场与石墨烯相互作用,保证传感器的灵敏度。图 1(b)为抛磨平坦区俯视扫描电子显微镜(SEM)照片。从图 1(b)中可以看出,抛磨平面存在 $1\sim 2\ \mu\text{m}$ 的凹凸起伏,这增加了光纤的散射损耗。

为了防止沉积使用的石墨烯溶液流动,并确保抛磨光纤的抛磨面朝上,在沉积石墨烯之前,用紫外胶将光纤固定在载玻片上,并在抛磨区附近用固化胶围成一个 $2.7\ \text{cm}\times 0.7\ \text{cm}\times 0.1\ \text{cm}$ 的凹槽,其三维示意图如图 2 所示。

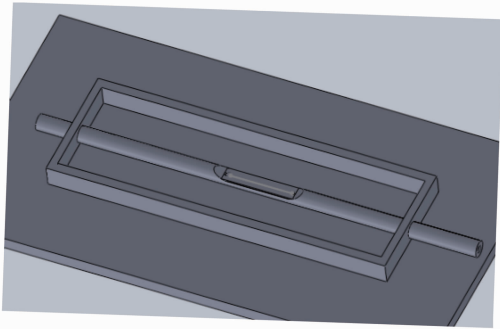


图 2 沉积石墨烯所使用的凹槽和 SPF 姿态的三维示意图

Fig. 2 Three-dimensional schematic of groove used in deposition of graphene and configuration of SPF fixed on glass slide

把制备好的石墨烯溶液用超声波机器超声处理 20 min,使石墨烯均匀地分布在乙醇中,避免石墨烯结块。取出约 20 mL 处理好的石墨烯溶液滴入以

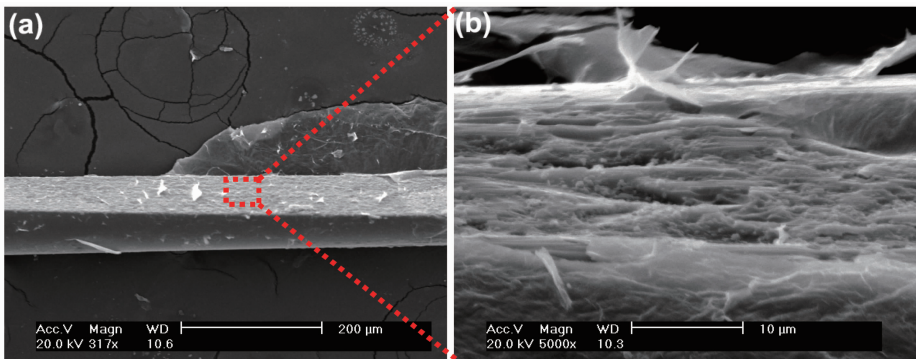


图 4 (a)沉积 rGO 后 SPF 的 SEM 照片; (b)沉积 rGO 后的抛磨表面形貌的 SEM 照片

Fig. 4 (a) SEM photograph of SPF after deposition of rGO sheets; (b) SEM photograph of surface of flat polished region after deposition of rGO sheets

上制好的凹槽中,让其在室温条件下放置 7.9 h,乙醇可自然蒸发,使石墨烯片沉积于 SPF 的抛磨面上。沉积过程采用 $1550\ \text{nm}$ 的分布反馈式(DFB)激光器作为光源监控,沉积期间透过功率随时间的变化如图 3 所示。从图 3 可知,原来裸露在空气中的抛磨光纤透过功率为 $-5.0\ \text{dBm}$ 。当滴入石墨烯溶液后,石墨烯溶液使抛磨面凹凸起伏引起的散射损耗减少,抛磨光纤透过功率增大至 $-2.6\ \text{dBm}$ 。当乙醇蒸发 4.5 h 后,石墨烯沉积于抛磨面上形成石墨烯薄膜,抛磨光纤透过功率减少至 $-3.6\ \text{dBm}$,并且功率维持不变,这表明乙醇不再发生蒸发,石墨烯已沉积完毕。

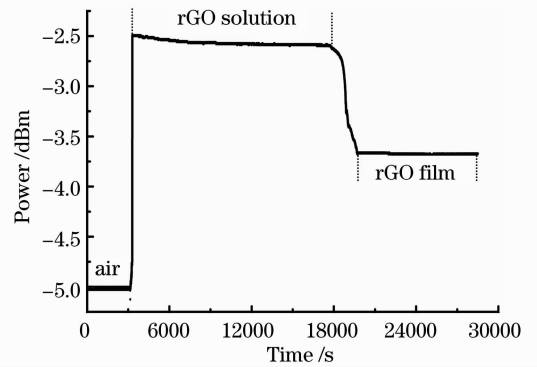


图 3 石墨烯沉积过程的透过光功率随时间变化

Fig. 3 Transmission optical power during the deposition of rGO versus time

图 4(a)、(b)为 SEM 的图片,它们给出了 rGO 沉积于 SPF 抛磨面上形态。图 4(b)为图 4(a)中的沉积 rGO 后光纤侧边抛磨面的局部放大图,其放大区域由图 4(a)中虚线标出。从图 4(b)可以看出,相比沉积 rGO 前,光纤抛磨平面覆盖了一层 rGO 薄膜。大片的 rGO(尺寸为 $10\ \mu\text{m}$ 左右)平铺在抛磨面上,而少量的小片 rGO(尺寸为 $1\sim 2\ \mu\text{m}$)在抛磨面上聚集成颗粒状。

图 5 给出了 rGO 沉积在 SPF 后的拉曼光谱。拉曼光谱采用 514.5 nm 的激光激发。激发激光由空气冷却的氩离子激光器产生,功率为 20 mW。从拉曼光谱可见,测量得到的 G 峰在 1592 cm^{-1} , 2D 峰在 2706 cm^{-1} , 表明沉积后的 rGO 仍存在^[30]。根据此激发波长作用下 2D 峰位置随石墨烯层数增大而变化的对应关系^[31-32], 可推算此 rGO 的层数应在 2~4 层, 这与文献[33]采用原子力显微镜测量结果一致。实验中使用的 rGO 与文献[30,33]中采用

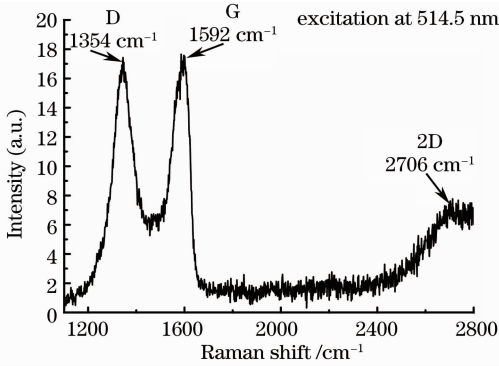


图 5 rGO 沉积在 SPF 后的拉曼光谱

Fig. 5 Raman spectrum of the rGO film deposited on SPF

相同制作过程制备。另外,拉曼谱中出现较强的 D 峰(1354 cm^{-1}), 这是由沉积后 rGO 的边缘效应^[31]和遗留的少量氧化石墨烯所造成^[30]。

3 传感实验装置及原理

传感实验系统主要由激光器、 1×3 耦合器、恒温恒湿箱、光电探测器、计算机五部分组成,如图 6 所示。实验中采用 1550 nm 的带有光纤输出的 DFB 激光器作为光源。光源输出的光波经过耦合器分成功率相等的三束光波。如图 6 插图所示,此三束光波分别经过三种光纤样品:去除涂敷层的标准光纤;裸露空气中的 SPF;沉积石墨烯的 SPF。其中标准光纤用于监控光源功率随时间的变化。光功率计测量三束光波透过光功率,并计算机采集光功率随时间变化的数据。将以上这三种光纤被放入恒温恒湿箱中,设定温箱的湿度恒定定为 40%相对湿度。设定恒温箱温度从 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 增加至 $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$, 然后从 $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 减少至 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, 每次变化 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$, 每个温度保持至少 20 min。以保证有足够长的时间让三种光纤样品达到温箱温度。实验中,恒温箱的温度采用热电偶式温度计监控,同时用计算机采集恒温箱温度随时间变化的数据。

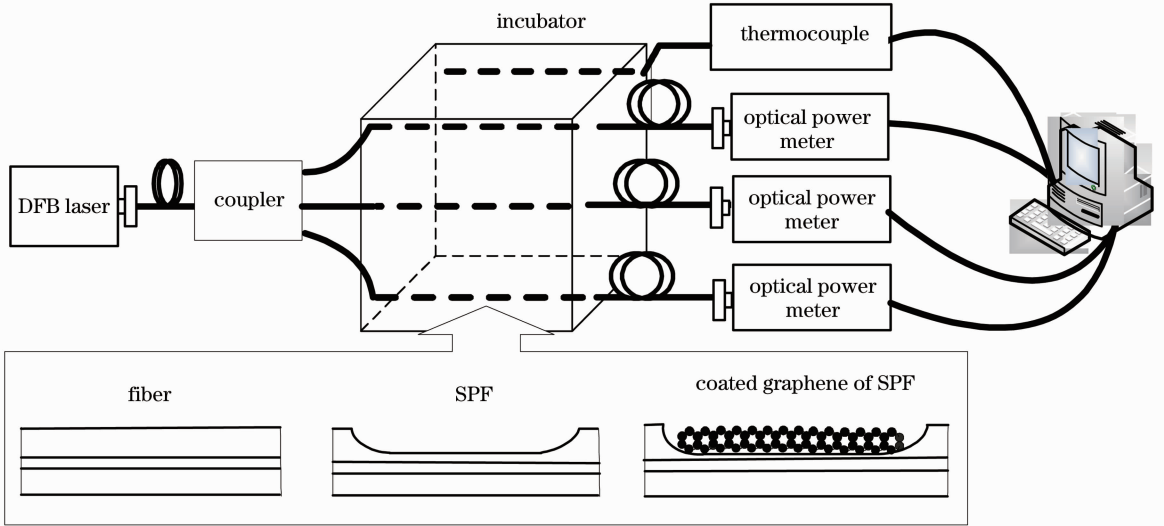


图 6 石墨烯光纤温度传感实验装置示意图

Fig. 6 Schematic of experimental setup for graphene-based optical fiber temperature sensor

根据文献[34],当温箱温度升高时,一方面,热激发的电子空穴浓度增加,改变了石墨烯电子的统计分布(费米-狄拉克分布),导致与电子带内跃迁对应的动态电导率变小^[34];另一方面,温度升高加剧了声子对电子和空穴的散射作用,导致电子和空穴的散射率增加,致使石墨烯的动态电导率变小^[34]。另外,根据考虑电导率得到的光波波动方程,可知电

导率的实部决定了对光波的吸收,而其虚部则对应于光波的相位传播速度。因此,由上述可知随着温度升高,石墨烯动态电导率变小,对光波的吸收减小,致使覆盖石墨烯的 SPF 的光损耗减少,使其透过光功率增加,从而实现了对温度的传感功能。

4 实验结果与讨论

实验测量结果如图 7 所示。图 7 给出了恒湿恒

温箱内温度随时间的变化曲线,温度数据通过热电偶温度计测量得到。实验中设定,温箱内温度先从 $-7.8\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 77\text{ }^{\circ}\text{C}$ 阶梯增加上升,每次增加 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,且维持时间为 20 min 左右,温箱温度上升至最高温度 $77\text{ }^{\circ}\text{C}$ 后,以相同的方式开始下降回到 $-7.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。在每次温度改变后的 20 min 内,温箱温度会在期望温度附近出现 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的波动,这是由于温箱恒温控制系统所导致。图7右上角的插图给出了温箱温度下降过程中期望温度在 $31.5\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 33\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时温度的局部波动曲线。

图8(a)~(c)给出了三种光纤样品透过光功率随时间的变化曲线,其分别对应标准光纤、裸露空气中的SPF和沉积rGO后SPF三种样品。从图8(a)可见,在温度变化循环过程中($-7.8\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 77\text{ }^{\circ}\text{C}\sim -7.8\text{ }^{\circ}\text{C}$),去包层后的标准光纤透过光功率随时间变化非常小,最大功率变化为 0.06 dB ,这和DFB激光器的功率稳定性指标(3 h内输出光功率波动最大为 0.05 dB)一致。另外,从图8(a)可知,透过光功率在前5 ks时间平均功率为 -3.45 dBm ,功率起

伏为 0.04 dB ,而在 10 ks 至 40 ks 时间后,平均透过光功率为 -3.465 dBm ,功率起伏为 0.05 dB ,这也和激光器预热过程输出功率变化一致。因此,标准光纤透过光功率随时间的变化是由激光器自身的稳定因素造成,与外界温度无关,可用于监控光源的光功率。

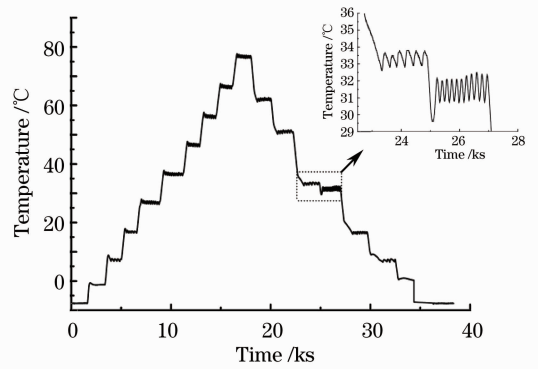


图7 热电偶温度计测得的恒温箱温度随时间变化
Fig. 7 Temperature in the incubator measured by thermocouple thermometer versus time

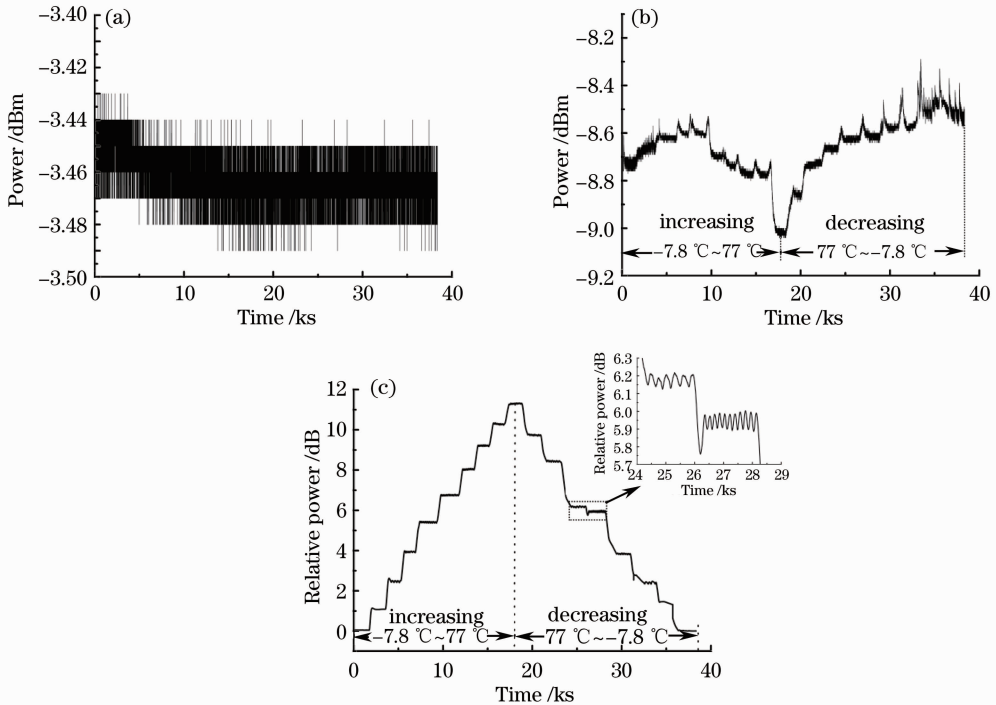


图8 三种光纤样品的透过光功率随时间的变化。(a)标准单模光纤;(b)裸露空气中的SPF;(c)沉积rGO后SPF
Fig. 8 Transmission optical power of three fibers versus time. (a) Standard single mode fiber; (b) bare side polished fiber without deposited rGO film; (c) SPF with deposited rGO film

相比标准单模光纤的情况,裸露的SPF[见图8(b)]和沉积rGO的SPF[见图8(c)]都对温度变化有响应,它们的透过光功率都随温箱温度的变化而改变。然而,沉积rGO后的SPF对温度的灵敏度远超

过无rGO的裸露SPF。从图8(b)可以看出,在温度变化循环的过程,裸露SPF的透过光功率的最大变化为 0.7 dB ,其功率随着温度增大而减少,且没有线性关系。另外,当温度经历一个变化循环回到

起始温度 $-7.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,它透过光功率比起始时的光功率要大。且裸 SPF 的实验重复性较差。相比之下,从图 8(c)可以看出,沉积 rGO 的 SPF 的透过光功率最大变化高达 11.3 dB,其透过光功率随温度增加而增加。其透过光功率变化曲线与图 7 的温箱温度变化曲线一致,也相应出现阶梯状的变化。当温度从 $-7.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 增至 $77\text{ }^{\circ}\text{C}$,其透过光功率增加了 13.5 倍,这表明沉积的 rGO 具有很强的温度传感增敏作用。对于实验中样品,rGO 使 SPF 温度传感灵敏度增加了 16 倍。

图 8(c)右上角插图给出了对应于图 7 插图温度波动曲线的透过光功率变化曲线。比较图 8(c)和图 7 的插图可知实验中使用的 rGO 的 SPF 光纤温度传感器具有很高的测量精度,可测量振幅为 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度波动。另外,图 7 插图可知,温度变化率最大为 $0.0228\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 。与图 8(c)中插图比较可知,此传感器的透过光功率曲线与温度波动曲线相符合,这表明此温度传感器的响应速度至少为 $0.0228\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 。

根据图 8(c)中透过光功率的阶梯平台,可以求出不同温度下透过光功率的平均值和标准误差,从而得到沉积 rGO 的 SPF 平均透过光功率随温度变化的关系,如图 9 所示,图中空心小正方形和空心圆圈分别表示温度上升和下降过程中,实验测量所得的温度和相对透过光功率。在温度变化循环过程中,实验测得透过光功率的标准误差非常小,最大标准误差仅为 0.004 dB ,这表明此温度传感器非常稳定。红色实线和黑色虚线分别为温度上升和下降过程透过光功率随温度变化的线性拟合曲线。对于温度上升和下降过程,拟合得到的线性方程分别为 $P_i = 0.13384T + 1.40421$ 和 $P_d = 0.13432T + 1.40598$,且拟合得到的线性相关系数分别为 99.3% 和 99.4% 。这里 P_i, P_d 分别表示在温度上升和下降过程中透过石墨烯光纤传感器的相对功率,而 T 表示温箱的实际温度。线性拟合表明透过传感器的相对光功率与温度具有很好的线性依赖关系。另外,比较温度上升和下降的拟合方程,它们的斜率和截距都非常接近,这表明所制作的石墨烯光纤传感器具有非常好的重复性。从拟合方程可知,此温度传感器的灵敏度为 $0.134\text{ dB}/^{\circ}\text{C}$ 。测量得到的最大标准误差为 0.004 dB ,根据灵敏度可知,此传感器的测温精度为 $0.03\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。这也可以从图 8(c)插图得到证明。根据信号处理工程原则可知,如果要能很好地重现幅度为 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的波动信号,那么传感器的测温精度应至少为 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的 $1/10$,即 $0.05\text{ }^{\circ}\text{C}$,这测温精度

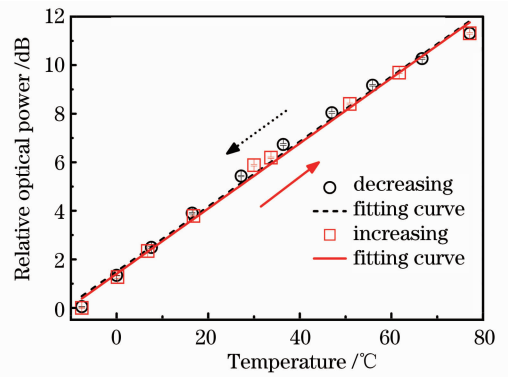


图 9 沉积 rGO 的 SPF 的透过光功率随温箱温度的变化
Fig. 9 Transmission optical power of the SPF deposited by rGO film versus temperature of incubator
与以上分析所得数值接近。

5 结 论

制作了基于 rGO 的全光纤温度传感器。实验结果表明,标准单模光纤对温度无响应,裸露的 SPF 对温度响应不灵敏,最大透过光功率变化仅为 0.7 dB 。相比之下,沉积 rGO 的 SPF 对温度变化非常灵敏。在实验温度在 $-7.8\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 78\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内,其最大透过光功率的变化可达 11.3 dB ,而且具有很好的重复性,可用作温度传感器。实验测量表明这种基于 rGO 光纤温度传感器的灵敏度为 $0.134\text{ dB}/^{\circ}\text{C}$,测温精度为 $0.03\text{ }^{\circ}\text{C}$,响应速度至少为 $0.0228\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$,线性系数为 99.4% 。

参 考 文 献

- 1 Tang Jieyuan, Chen Zhe, Fan Ruoyan, *et al.*. Optical fiber sensor for the concentration of acetic acid based on fiber side polishing technique [J]. *J Applied Optics*, 2011, 32 (1): 115-119.
- 2 唐洁媛, 陈 哲, 范若岩, 等. 基于光纤侧边抛磨技术的醋酸浓度光纤传感器[J]. *应用光学*, 2011, 32(1): 115-119.
- 3 Zhang Yuncong, Chen Zhe, Jiang Peifan, *et al.*. All-fiber thermo-optical variable optical attenuator [J]. *Chinese J Lasers*, 2007, 34(8): 1110-1114.
- 4 张云聪, 陈 哲, 江沛凡, 等. 全光纤热光型可变光衰减器[J]. *中国激光*, 2007, 34(8): 1110-1114.
- 5 Zhe Chen, Yanbiao Liao, Yongming Hu, *et al.*. Thermally poled PANDA fibre device with microstrip electrode [J]. *Electron Lett*, 2000, 36(12): 1839-1840.
- 6 Fan Ruoyan, Chen Zhe, Liu Linhe, *et al.*. Optical fiber refractive sensor with double reflective wavelengths based on side polished fiber Bragg grating [J]. *Chinese J Lasers*, 2009, 36(5): 1134-1139.
- 7 范若岩, 陈 哲, 刘林和, 等. 基于侧边抛磨光纤光栅双反射峰的折射率传感器[J]. *中国激光*, 2009, 36(5): 1134-1139.
- 8 Tang Jieyuan, Chen Zhe, Fan Ruoyan, *et al.*. Thermo-optic effect of liquid materials based on side polished fiber Bragg grating sensor [J]. *Chinese J Lasers*, 2010, 37(6): 1434-1439.
- 9 唐洁媛, 陈 哲, 范若岩, 等. 基于侧边抛磨光纤光栅传感器的

- 液体材料热光特性[J]. 中国激光, 2010, 37(6): 1434-1439.
- 6 Jianhui Yu, Haozhi Li, V K Hsiao, *et al.*. Light power sensor by using a photosensitive liquid crystal hybrid film on side polished fiber [C]. SPIE, 2012, 8421: 842196.
 - 7 Jong-Kuk Yoon, Gyoo-Won Seo, Kang-Min Cho, *et al.*. Controllable in-line UV sensor using a side-polished fiber coupler with photofunctional polymer [J]. IEEE Photon Technol Lett, 2003, 15(6): 837-839.
 - 8 Weihuan Fu, V Hsiao, Jieyang Tang, *et al.*. All fiber-optic sensing of light using side-polished fiber overlaid with photoresponsive liquid crystals [J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2011, 156(1): 423-427.
 - 9 Chen Zhe, Qin Jiarong, Pan Hao, *et al.*. All-fiber integrated optical power monitor-controller [J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(4): 1047-1052.
陈哲, 覃家荣, 潘昊, 等. 全光纤集成化光功率监控器[J]. 中国激光, 2010, 37(4): 1047-1052.
 - 10 V Hsiao, Weihuan Fu, Chingyun Huang, *et al.*. Optically switchable all-fiber optic polarization rotator [J]. Opt Commun, 2012, 285(6): 1155-1158.
 - 11 K Bolotin, K Sikes, Z Jiang, *et al.*. Ultrahigh electron mobility in suspended graphene [J]. Solid State Communications, 2008, 146(9-10): 351-355.
 - 12 A A Balandin, S Ghosh, W Bao, *et al.*. Superior thermal conductivity of single-layer graphene [J]. Nano Lett, 2008, 8(3): 902-907.
 - 13 Xiaolin Li, Guangyu Zhang, Xuedong Bai, *et al.*. Highly conducting graphene sheets and Langmuir-Blodgett films [J]. Nature Nanotechnology, 2008, 3(9): 538-542.
 - 14 Fengnian Xia, T Mueller, Yuming Lin, *et al.*. Ultrafast graphene photodetector [J]. Nature Nanotechnology, 2009, 4(12): 839-843.
 - 15 R R Nair, P Blake, A N Grigorenko, *et al.*. Fine structure constant defines visual transparency of graphene [J]. Science, 2008, 320(5881): 1308.
 - 16 J M Dawlty, S Shivaraman, J Strait, *et al.*. Measurement of the optical absorption spectra of epitaxial graphene from terahertz to visible [J]. Appl Phys Lett, 2008, 93(13): 131905.
 - 17 F Yavari, Zongping Chen, A V Thomas, *et al.*. High sensitivity gas detection using a macroscopic three-dimensional graphene foam network [J]. Sci Rep, 2011, 1: 166.
 - 18 Chunhua Lu, Huanghao Yang, Chunling Zhu, *et al.*. A graphene platform for sensing biomolecules [J]. Angewandte Chemie, 2009, 48(26): 4785-4787.
 - 19 Xiaochen Dong, Yumeng Shi, Wei Huang, *et al.*. Electrical detection of DNA hybridization with single-base specificity using transistors based on CVD-grown graphene sheets [J]. Adv Mater, 2010, 22(14): 1-5.
 - 20 Liu Jiang, Wu Sida, Wang Ke, *et al.*. Passive mode-locked and Q-switched Yb-doped fiber lasers with graphene-based saturable absorber [J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(8): 0802001.
 - 刘江, 吴思达, 王科, 等. 基于石墨烯可饱和吸收体的被动锁模被动调Q掺镱光纤激光器[J]. 中国激光, 2011, 38(8): 0802001.
 - 21 Zhang Cheng, Luo Zhengqian, Wang Jinzhang, *et al.*. Dual-wavelength mode-locked Yb-doped fiber laser based on the interaction of graphene and fiber-taper evanescent field [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(6): 0602006.
张成, 罗正钱, 王金章, 等. 熔锥光纤倏逝场作用石墨烯双波长锁模掺镱光纤激光器[J]. 中国激光, 2012, 39(6): 0602006.
 - 22 于海娟, 林学春, 张玲, 等. 瓦级石墨烯被动锁模全固态激光器[J]. 中国激光, 2011, 38(2): 0202004.
 - 23 He Jingliang, Hao Xiaopeng, Xu Jinlong, *et al.*. Ultrafast mode-locked solid-state lasers with graphene saturable absorber [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(9): 0900138.
何京良, 郝霄鹏, 徐金龙, 等. 基于石墨烯可饱和吸收被动锁模超快全固体激光器的研究[J]. 光学学报, 2011, 31(9): 0900138.
 - 24 Ming Liu, Xiaobo Yin, Ulin-Avila Erick, *et al.*. A graphene-based broadband optical modulator [J]. Nature, 2011, 474(7349): 64-67.
 - 25 Qiaoliang Bao, Han Zhang, Bing Wang, *et al.*. Broadband graphene polarizer [J]. Nature Photonics, 2011, 5(7): 411-415.
 - 26 J T Kim, C G Choi. Graphene-based polymer waveguide polarizer [J]. Opt Express, 2012, 20(4): 3556-3562.
 - 27 Jun Ma, Wei Jin, H L Ho, *et al.*. High-sensitivity fiber-tip pressure sensor with graphene diaphragm [J]. Opt Lett, 2012, 37(13): 2493-2495.
 - 28 I Calizo, S Ghosh, F Miao, *et al.*. Raman nanometrology of graphene: temperature and substrate effects [J]. Solid State Communications, 2009, 149(27-28): 1132-1135.
 - 29 W S Hummers Jr, R E Offeman. Preparation of graphitic oxide [J]. J American Chemical Society, 1958, 80(6): 1339.
 - 30 Xiang Cai, Shaozao Tan, Agui Xie, *et al.*. Conductive methyl blue-functionalized reduced graphene oxide with excellent stability and solubility in water [J]. Materials Research Bulletin, 2011, 46(12): 2353-2358.
 - 31 A C Ferrari, J C Meyer, V Scardaci, *et al.*. Raman spectrum of graphene and graphene layers [J]. Phys Rev Lett, 2006, 97(18): 187401.
 - 32 A C Ferrari. Raman spectroscopy of graphene and graphite: disorder, electron-phonon coupling, doping and nonadiabatic effects [J]. Solid State Communications, 2007, 143(1-2): 47-57.
 - 33 Zhiwei Liang, Xiang Cai, Shaozao Tan, *et al.*. Fabrication of n-type ZnO nanowire/graphene/p-type silicon hybrid structures and electrical properties of heterojunctions [J]. Phys Chem Chem Phys, 2012, 14(46): 16111-16114.
 - 34 G W Hanson, Dyadic Green's functions and guided surface waves for a surface conductivity model of graphene [J]. J Appl Phys, 2008, 103(6): 064302.

栏目编辑: 王晓球