

# 基于氧化石墨烯的长周期光纤光栅的全光控制\*

马裕宽<sup>1</sup>, 陈晓旭<sup>1</sup>, 周寿桓<sup>1,2</sup>, 冯国英<sup>1</sup>, 周昊<sup>1</sup>, 刘鹏宇<sup>1</sup>

(1. 四川大学电子信息学院激光微纳研究所, 成都 610064; 2. 华北光电技术研究所, 北京 100015)

**摘 要:** 实验验证了一种通过将氧化石墨烯分散液沉积在长周期光纤光栅的全光控制的相关研究。通过外加的垂直泵浦光的作用, 氧化石墨烯吸收泵浦光产生热量, 改变长周期光纤光栅的包层模式的相位差, 由于热膨胀的作用改变了氧化石墨烯所覆盖部分的光栅周期, 使得谐振谱发生了移动, 其最大调制深度可达 10.6 dB, 谐振谱最大可红移 12.8 nm。通过实验发现, 沉积相同浓度氧化石墨烯分散液的次数影响实验结果, 通过在相同光栅的相同位置分别沉积三次, 发现沉积三次可以在光纤表面获得更加均匀的氧化石墨烯膜, 进行了时间响应的测试, 其中沉积三次后的长周期光纤光栅的响应速度可达 0.61 ms, 沉积多次氧化石墨烯分散液可以在光纤表面沉积得更加平整均匀, 从而获得更大的导热性能。

**关键词:** 全光控制; 光热效应; 氧化石墨烯; 长周期光纤光栅; 全光纤相移器

**中图分类号:** TN201 **文献标志码:** A **doi:** 10.11884/HPLPB202032.190468

## All optical control of long period fiber grating based on graphene oxide

Ma Yukuan<sup>1</sup>, Chen Xiaoxu<sup>1</sup>, Zhou Shouhuan<sup>1,2</sup>, Feng Guoying<sup>1</sup>, Zhou Hao<sup>1</sup>, Liu Pengyu<sup>1</sup>

(1. College of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610064, China;

2. North China Research Institute of Electro-Optics, Beijing 100015, China)

**Abstract:** A kind of all-optical control method based on the deposition of graphene oxide dispersion in long period fiber grating is proposed and experimentally validated. Pumped by an external vertical light, graphene oxide generates heat and changes the phase difference of the cladding mode of long-period fiber grating. Due to the effect of thermal expansion, the grating period of the part covered by graphene oxide is changed, which makes the resonance spectrum shift. The maximum modulation depth can reach 10.6 dB, and the maximum resonance spectrum can be red-shifted by 12.8 nm. It is found that the number of times to deposit graphene oxide dispersion with the same concentration influences the experimental results. By depositing graphene oxide dispersion at the same position of the same grating once and three times respectively, it is found that the more uniform graphene oxide film can be obtained on the surface of optical fiber by three times of deposition, which enhances the interaction between light and graphene oxide, and has higher modulation efficiency and tuning efficiency. Finally, the time response test is carried out, and the response speed of the long period fiber grating after three times of deposition can reach 0.61 ms. It is found that the graphene oxide dispersion can be deposited more evenly on the surface of the optical fiber, thus obtaining greater thermal conductivity.

**Key words:** all-optical control; photothermal effect; graphene oxide; long period fiber grating; all fiber phase shifter

全光控制器件在光纤通信系统中有着很大的潜在应用, 光纤光栅是在光纤纤芯里引入一个周期性变化的折射率区域来引导光在光纤中的传输, 光纤光栅制作较为简单, 插入损耗低, 而且容易与其他光纤器件集成, 所以光纤光栅在光通信和传感领域有着很大的应用。光纤光栅按照周期长度可分为布拉格光纤光栅和长周期光纤光栅, 其中布拉格光纤光栅的光栅周期通常小于 1  $\mu\text{m}$ , 长周期光纤光栅的光栅周期一般在几十到几百  $\mu\text{m}$ , 布拉格光栅属于反射型光栅, 而长周期光纤光栅属于透射型光栅, 是通过包层模式和纤芯模式的耦合形成一个谐振谱, 由于包层模式的存在, 所以长周期光纤光栅比布拉格光纤光栅具有更大的灵敏度, 在传感和通信领域具有更大的应用, 是在

\* 收稿日期: 2019-11-30; 修订日期: 2019-12-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(11574221)

作者简介: 马裕宽(1994—), 男, 硕士研究生, 从事光纤传感与通信研究; 542600404@qq.com。

通信作者: 冯国英(1969—), 女, 教授, 从事新型激光技术研究; guoying\_feng@scu.edu.cn。

波长选择和编码上最具有使用价值的光纤无源器件之一。之前利用克尔效应,报道了光纤光栅的全光开关,但是因为光纤材料是二氧化硅,具有很低的非线性,所以需要超高的峰值功率去转换,非常难实现,不具有较高的实现价值<sup>[1]</sup>。之后在光纤光栅中掺杂了稀土离子,但是仍然需要较高的泵浦功率,而且制作的过程复杂,成本较大<sup>[2-3]</sup>。最近几年,报道了利用石墨烯,二硫化物等光热效率较大的材料制作的光热调制的器件<sup>[4-10]</sup>,2016年,GAN等人将CVD制作的石墨烯覆盖在直径为16 μm的布拉格光纤光栅上,利用光纤耦合器将信号光和泵浦光同时输入布拉格光栅中,利用石墨烯吸收倏逝波产生热量去调谐光谱,转换的消光比达20 dB,响应时间为20.7 ms<sup>[4]</sup>。2017年Zhang等人报道了将MoS<sub>2</sub>沉积在直径为12.5 μm的微纳光纤锥上,利用垂直泵浦光的作用,对透过光谱进行调制,获得了0.851 dB/mW的调制效率,响应时间为400 ms<sup>[5]</sup>。2018年陈等人将二硫化钨沉积在微纳光纤环形腔上,也通过垂直泵浦光的作用,利用二硫化钨的光热作用对谐振谱进行全光调谐,消光比变化量可达17.1 dB,响应时间为120 ms<sup>[6]</sup>。2019年Li等人将二硫化钨沉积在直径为9.7 μm的微纳光纤锥上,利用同样的泵浦光作用方式,获得了3.99 dB的透过率变化量,响应时间为20.5 ms<sup>[7]</sup>。

本文将氧化石墨烯的水溶液沉积在长周期光纤光栅上,利用980 nm的泵浦光垂直作用在氧化石墨烯表面上,氧化石墨烯产生大量的热量,改变了长周期光纤光栅的包层模与纤芯模的耦合,同时也改变了原本均匀分布的光栅周期,所以对光栅的谐振谱进行了调谐,其最大调制深度可达10.6 dB,谐振谱最大可红移12.8 nm,利用斩波器调制连续的泵浦光,用光电探测器和示波器测得响应时间为0.61 ms。并且,对比了沉积不同次数的长周期光纤光栅,在同等浓度的情况下,沉积较多次数可以使得光纤表面的氧化石墨烯膜更加均匀,覆盖面积更大,导热性能也更加优异。

## 1 器件制备与操作原理

### 1.1 器件制备

我们这里使用的长周期光纤光栅是用紫外光曝光法制作的,其周期为540 μm。使用通过Hummers方法制作的氧化石墨烯粉末,用低速洗涤去除氧化石墨烯中的杂质,将洗涤过的氧化石墨烯加入去离子水中,用超声波清洗机震荡分散40 min,获得浓度为2 mg/mL的无淀氧化石墨烯分散液,制备方法如图1所示。

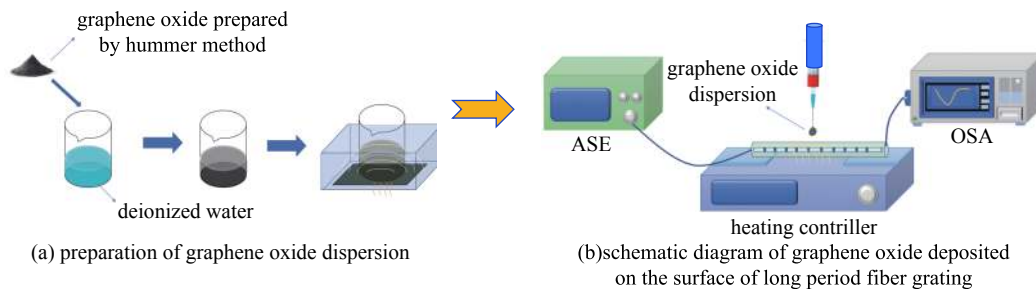


Fig. 1 Preparation of graphene oxide deposited on optical fiber surface

图1 沉积氧化石墨烯光纤的制作

将制备好的氧化石墨烯分散液滴在长周期光纤光栅上,先在室温环境中自然蒸发水分,随后放置在温度控制台上用160 °C加热30 min,使得石墨烯与光纤光栅表面牢固贴合,如图1(b)所示。分别将2 mg/mL氧化石墨烯分散液分次沉积在两根相同的长周期光纤光栅的同一位置上,待水分蒸发完全后,对其表面做电子扫描电镜的观察,如图2示,其中图2(a)是经过一次沉积的长周期光纤光栅表面扫描电镜图,图2(c)是经过三次沉积的长周期光纤光栅表面扫描电镜图。对比发现,多次沉积可以使得氧化石墨烯在光纤表面沉积得更加均匀,覆盖光纤面积更大。

### 1.2 操作原理

搭建的实验系统如图3所示,1550 nm的ASE光源通过长周期光纤光栅后,与光谱仪连接,将980 nm的连续激光用透镜聚焦于长周期光纤光栅的氧化石墨烯薄膜上。

由于石墨烯优异的光热特性,石墨烯具有零带隙,可以宽带吸收,当泵浦光垂直照射在石墨烯表面时,将与激光相互作用,产生光致载流子(电子-空穴对),产生大量焦耳热<sup>[11]</sup>,温度改变值 $\Delta T$ 将使长周期光纤光栅包层与纤芯的有效折射率差 $\Delta n_{\text{neff}}$ 发生明显变化,根据模式耦合理论,长周期光纤光栅的相位匹配条件为

$$n_{\text{core}} - n_{\text{clad}} = \lambda/\Lambda \quad (1)$$

其中 $n_{\text{core}}$ 和 $n_{\text{clad}}$ 分别为光栅包层和纤芯的折射率, $\lambda$ 为波长,可以得到光纤光栅的谐振波长主要取决于纤芯和包层

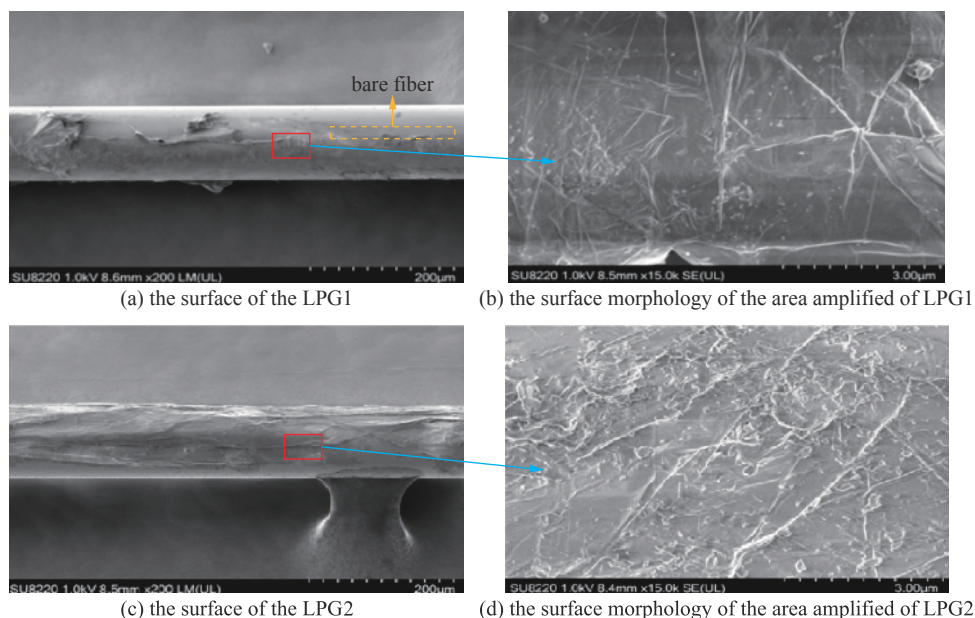


Fig. 2 SEM images of graphene on the surface of optical fiber

图 2 沉积不同次数后光纤表面石墨烯扫描电镜图

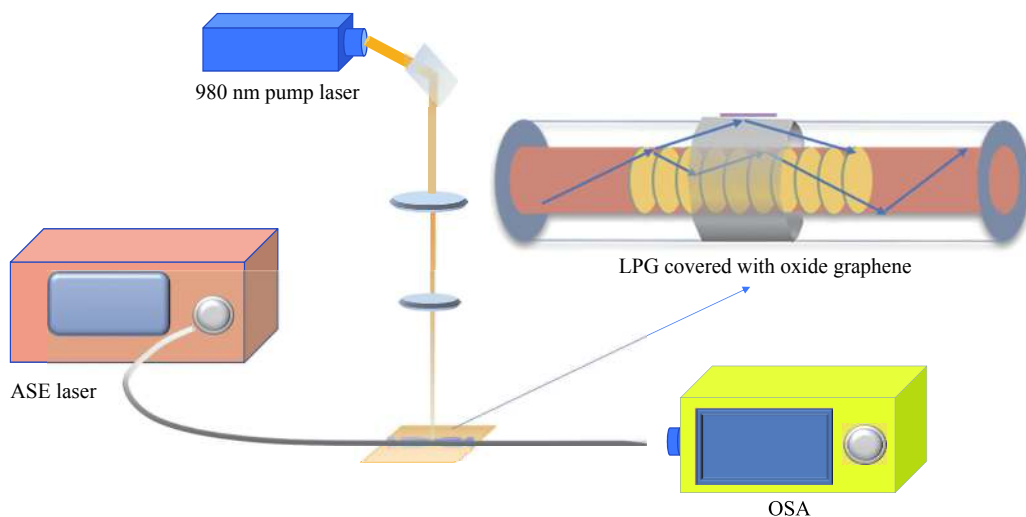


Fig. 3 Experimental device diagram

图 3 实验装置示意图

的折射率之差 $n_{\text{neff}}$ 和光栅的周期,其中被热源覆盖部分的光栅周期 $\Lambda$ 也将因热膨胀而改变,其谐振波长的谱移可以由下式表示<sup>[1]</sup>

$$\Delta\lambda = 2\left(\Lambda \frac{\partial n}{\partial T} + n \frac{\partial \Lambda}{\partial T}\right)\Delta T \quad (2)$$

其中 $\Lambda \frac{\partial n}{\partial T}$ 代表有效折射率差随温度变化值的变化, $n \frac{\partial \Lambda}{\partial T}$ 代表光栅周期随温度变化的变化。所以可以得出当泵浦光照射在氧化石墨烯薄膜上时,石墨烯产生的热量可以对长周期光纤光栅的谐振谱进行调制。

## 2 结果分析

通过改变泵浦光的功率,进行了对长周期光纤光栅光谱全光调谐的实验,聚焦的 980 nm 激光束在氧化石墨烯上,谐振光谱发生红移。进行对比实验可发现,将光束聚焦于同规格无氧化石墨烯覆盖的光栅上,谐振谱没有发生移动,这是因为光纤几乎无法吸收泵浦光。由于氧化石墨烯与泵浦光可互相作用,从而产生大量热量,光热作用会使得有氧化石墨烯覆盖的长周期光栅发生光谱移动。当增大泵浦光功率,石墨烯将产生更多的焦耳热,所以长周期光纤光栅的变化量将增大,我们把光谱的变化量分为谐振谱移动量与调制深度,我们定义调制深度为对应波长

的改变差值, 图 4(a) 所示。测试了沉积了三次长周期光纤光栅, 如图 4(b), (c) 所示, 其中沉积了三次长周期光纤光栅 (LPG2) 的最大调制深度可达 10.6 dB, 谐振波长红移量为 12.8 nm, 调制效率与调谐移动效率分别为 0.11 dB/mW, 131 pm/mW。

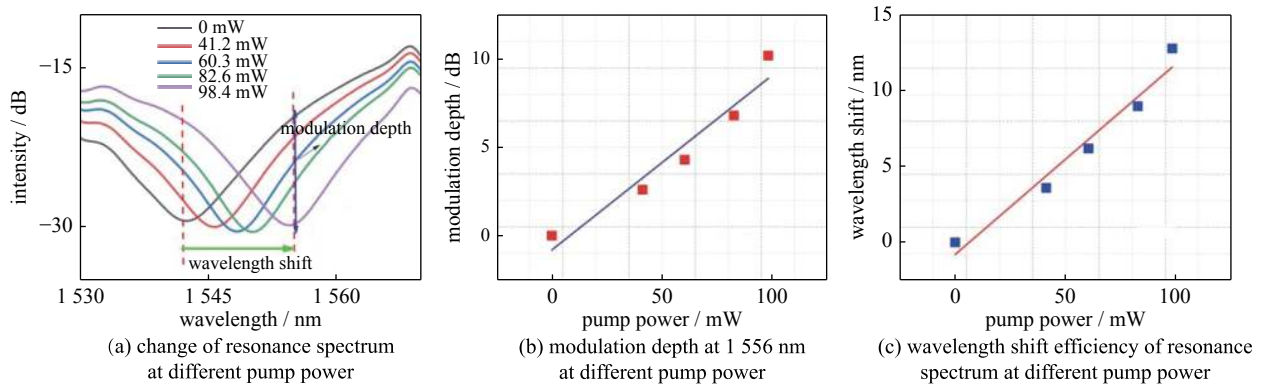


Fig. 4 Modulation of 980 nm pump light to the device

图 4 980 nm 泵浦光对 LPG2 的调制

为了测试器件的响应时间, 利用机械斩波器把泵浦光调制成方波, 将原本作为信号光的 ASE 光源换为只有单一波长的 1550 nm 窄带激光器 (带宽约为 1 nm), 输出端连好光电探测器模块和示波器。

接下来测量了信号从 10% 变为 90% 阶跃高度所需的时间, 根据定义, 得到 LPG1 与 LPG2 的上升时间分别为 1.02 ms 与 0.61 ms, 如图 5 所示。使得氧化石墨烯可以在光纤基底上更好地沉积, 形成较为完整均匀的表面导热体, 均匀连续的氧化石墨烯膜与有断层的氧化石墨烯膜相比, 可看作增加了氧化石墨烯膜的长度, 增加了导热系数<sup>[12]</sup>, 所以覆盖有较为平整的氧化石墨烯薄膜的 LPG2, 可以测得较快的响应时间。

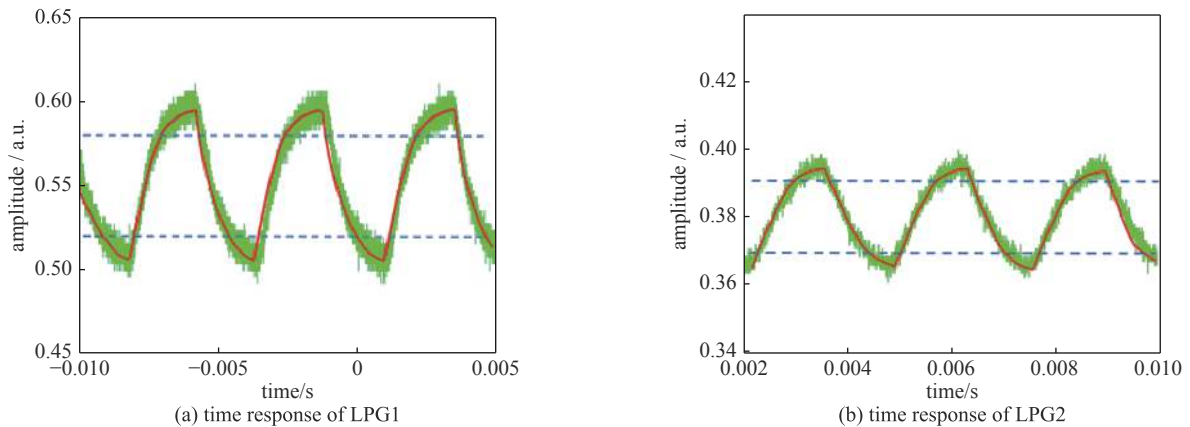


Fig. 5 Experimental device diagram of test time response

图 5 时间响应测试

### 3 结论

本文提出了一种基于氧化石墨烯分散液沉积长周期光纤光栅的全光控制器件, 获得了 0.11 dB/mW 的调制效率与 131 pm/mW 的波长红移效率, 响应时间可达 0.61 ms, 制作更加简便, 成本大大降低, 具有更大的机械性能。并且通过实验验证了, 沉积次数增加可以使得氧化石墨烯分散液在光纤表面获得较为均匀平整的氧化石墨烯薄膜, 较为均匀平整的氧化石墨烯薄膜可以获得更好的导热性能。

#### 参考文献:

- [1] Broderick N G R, Richardson D J, Ibsen M. Nonlinear switching in a 20-cm-long fiber Bragg grating [J]. *Opt Lett*, 2000, 25: 536-538.
- [2] Lee H, Agrawal G P. Nonlinear switching of optical pulses in fiber Bragg gratings [J]. *IEEE J Quantum Elect*, 2003, 39: 508-515.
- [3] Liu Weilin, Yao Jianping. Ultra-wideband microwave photonic phase shifter with a 360° tunable phase shift based on an erbium-ytterbium co-doped linearly chirped FBG [J]. *Opt Lett*, 2014, 39: 922-924.
- [4] Gan Xuetao, Wang Yadong, Zhang Fanlu, et al. Graphene-controlled fiber Bragg grating and enabled optical bistability [J]. *Opt Lett*, 2016, 41: 603-606.

- [5] Zhang Dao, Guan Heyuan, Zhu Wenguo, et al. All light-control-light properties of molybdenum diselenide (MoSe<sub>2</sub>)-coated-microfiber[J]. *Opt Express*, 2017, 25: 28536-28546.
- [6] Chen Guowei, Zhang Zijian, Wang Xiaoli, et al. Highly sensitive all-optical control of light in WS<sub>2</sub> coated microfiber knot resonator[J]. *Opt Express*, 2018, 26: 27650-27658.
- [7] Li Hanguang, Huang Zhijin, Lang Yuwei, et al. Broadband all-light-control with WS<sub>2</sub> coated microfibers[J]. *Opt Express*, 2019, 27: 12817-12831.
- [8] Wu Qing, Chen Si, Wang Yunzheng, et al. MZI-based all-optical modulator using MXene Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub>(T=F, O, or OH) deposited microfiber[J]. *Adv Mater Technol*, 2019, 4: 1800532.
- [9] Wang C, Wang Y Z, Jiang X T, et al. Thermal stress-induced all-optical modulation in MXene-coated polarization maintaining fiber[J]. *Laser Phys Lett*, 2019, 16: 065107.
- [10] Yang Xinghu, Long Qunlong, Liu Zhihai, et al. Microfiber interferometer integrated with Au nanorods for an all-fiber phase shifter and switch[J]. *Opt Lett*, 2019, 44: 1092-1095.
- [11] Shivananju B N, Bao X Z, Yu W Z, et al. Graphene heterostructure integrated optical fiber Bragg grating for light motion tracking and ultrabroadband photodetection from 400 nm to 10.768 μm[J]. *Adv Funct Mater*, 2019, 29: 1807274.
- [12] Xu Xiangfan, Pereira L F C, Wang Yu, et al, Length-dependent thermal conductivity in suspended single-layer graphene[J]. *Nature Communications*, 2014, 5:36895.