

基于 PbSe 量子点的全光纤光功率密度和温度传感器

严金华**, 徐帅锋*, 沈旭辉, 李泽林

浙江工业大学光电子智能化技术研究所, 浙江 杭州 310023

摘要 光功率密度和温度监测在工业生产和日常生活中具有重要意义,依据 PbSe 量子点具有较高热光系数的特性,设计了一种 PbSe 量子点传感材料的全光纤马赫-曾德尔型传感器,并在不同光功率密度和不同温度条件下对该传感器进行测试。实验结果表明:对波长为 473 nm 的光源光功率密度灵敏度达到 $1.455 \text{ nm} \cdot (\text{mW}^{-1} \cdot \text{mm}^2)$,温度灵敏度达到 $0.67 \text{ nm} \cdot \text{C}^{-1}$ 。不仅实现了高灵敏度温度传感器,而且也为 PbSe 量子点制作热光型光器件打下了基础。

关键词 光纤光学; 传感器; PbSe 量子点; 马赫-曾德尔干涉; 热光系数

中图分类号 TP212.14

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.100602

All Fiber-Optic Sensor Measuring Optical Power Density and Temperature Based on PbSe Quantum Dots

Yan Jinhua**, Xu Shuaifeng*, Shen Xuhui, Li Zelin

*Institute of Intelligent Optoelectronics Technology, Zhejiang University of Technology,
Hangzhou, Zhejiang 310023, China*

Abstract Optical power density monitoring and temperature monitoring play an important role in the industrial production and day-to-day life. In this study, an all fiber-optic Mach-Zehnder sensor with PbSe quantum dots as the sensing material is fabricated on the basis of thermo-optical characteristic of PbSe quantum dots, and the sensor is tested under different optical power densities and temperatures. The results show that the power density sensitivity of the sensor to a light with a wavelength of 473 nm is $1.455 \text{ nm} \cdot (\text{mW}^{-1} \cdot \text{mm}^2)$ and the temperature sensitivity is $0.67 \text{ nm} \cdot \text{C}^{-1}$. This study not only realizes a high-sensitivity temperature sensor, but also lays the foundation for the thermal-optical devices made by PbSe quantum dots.

Key words fiber optics; sensors; quantum dots; Mach-Zehnder interferometer; thermo-optic coefficient

OCIS codes 060.2370; 280.6780; 280.4788

1 引言

量子点(QDs)是一种准零维的纳米半导体材料,其空穴和电子的运动在空间中受到限制,电子能级发生量子化,在物理特性上表现为量子限域效应、量子尺寸效应、表面效应以及量子隧穿效应等。近年来,量子点的研究硕果累累,例如在半导体放大^[1]、生物传感^[2]、金属离子监测以及太阳能电池^[3]等方面有着广泛的应用。本课题组研究表明:PbSe 量子点具有较高的热光系数^[4],材料的热光效应是指材料的折射率随着温度的改变而变化的性质,热

光材料通常具有较高的热光系数,在实验研究中通过激光热效应的现象验证了 PbSe 量子点具有热透镜效应的结论;此外,采用 Z-scan 扫描的方法测量 PbSe 量子点材料非线性折射率系数,并通过公式计算得到不同浓度 PbSe 量子点薄膜的非线性折射率系数,通过计算发现 PbSe 量子点材料的热光系数在 10^{-4} 量级,相比于其他材料其具有较大的热光系数,这一特点为 PbSe 量子点在热光领域的应用打开了广阔的空间。

由于 PbSe 量子点物理外形为粉末状,在与光纤结合的应用中,通常将量子点与紫外(UV)固化

收稿日期: 2018-04-11; 修回日期: 2018-05-07; 录用日期: 2018-05-09

基金项目: 浙江省自然科学基金(LY15F050011)

* E-mail: xsf030@126.com; ** E-mail: jinhua@zjut.edu.cn

胶均匀混合后灌入空心光纤,再与普通单模光纤相连接,这为搭建全光纤传感器提供了便利,可充分发挥全光纤传感器的特点。

光纤传感器具有抗电磁干扰能力强、灵敏度高、质量小等优点,全光纤马赫-曾德尔(M-Z)干涉仪在微小位移测量^[5]、温度测量^[6-7]、折射率测量^[7-8]等方面已有成熟的应用。本文将 PbSe 量子点作为传感材料,依据 M-Z 干涉原理,搭建全光纤 M-Z 干涉仪,并将灌有 PbSe 量子点的空心光纤作为传感臂的传感单元,测试传感器对光功率密度和温度的响应。该传感器结构简单,灵敏度高,成本较低。

2 基本原理

如图 1 所示,全光纤 M-Z 干涉仪是由两个光纤耦合器连接而成,耦合器的两臂长分别为 L_1 和 L_2 ,其中, L_1 为探测臂, L_2 为参考臂。宽带光源(BBS)发出的光经耦合器 1 分向干涉仪的两臂,经过不同的路径之后,由耦合器 2 将输出的光叠加后产生干涉效应,通过光谱仪(OSA)测试透射干涉光谱,透射光谱的光强可表示为^[9]

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\Delta\Phi), \quad (1)$$

式中: I_1 和 I_2 分别为通过光路 L_1 和 L_2 的光强; $\Delta\Phi$ 为 L_1 和 L_2 光路的相位差,表达式为^[5]

$$\Delta\Phi = \Delta\varphi + \Delta\delta = \frac{2\pi n_{\text{eff}} \Delta L}{\lambda_k} + \frac{2\pi \Delta n_{\text{eff}} l}{\lambda_k}, \quad (2)$$

其中 $\Delta\varphi$ 为 L_1 和 L_2 两光路的光纤长度差(系统固有光程差) ΔL ($\Delta L = L_1 - L_2$) 引起的相位差; $\Delta\delta$ 为胶体量子点有效折射率变化引起的相位差; n_{eff} 为光纤有效折射率; Δn_{eff} 为胶体量子点材料的有效折射率变化; l 为探测臂填充胶体量子点的长度; λ_k 为 k 级干涉条纹的最大中心波长,可表示为

$$\lambda_k = \frac{n_{\text{eff}} \Delta L + \Delta n_{\text{eff}} l}{k}. \quad (3)$$

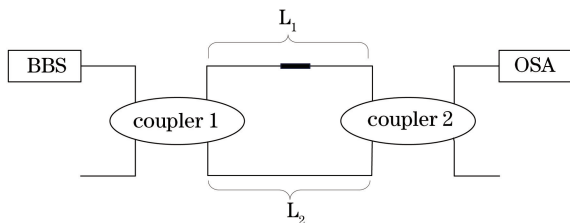


图 1 全光纤 M-Z 干涉原理图

Fig. 1 Schematic of the all fiber M-Z interference

对于本实验, $\Delta\varphi$ 是一定值,因此某一干涉最大中心波长 λ_k 移动只与 $\Delta\delta$ 有关。由(2)式可知,材料折射率的变化将引起干涉最大中心波长 λ_k 移动,

λ_k 移动方向与相位差的变化有关。由于 PbSe 量子点具有较高的热光系数,则折射率变化可表示为

$$\delta\Delta n_{\text{eff}} = \frac{dn}{dT} \Delta T, \quad (4)$$

则 λ_k 可表示为

$$\delta\lambda_k = \frac{(n_{\text{eff}} \Delta L + \Delta n_{\text{eff}} l)}{k} - \frac{[n_{\text{eff}} \Delta L + (\Delta n_{\text{eff}} + \delta\Delta n_{\text{eff}}) l]}{k} = \frac{\delta\Delta n_{\text{eff}} l}{k}. \quad (5)$$

两波峰间距离 $\Delta\lambda$ ^[10],即自由光谱范围 R_{fs} , (式中忽略了量子点材料折射率变化对 R_{fs} 的影响):

$$\Delta\lambda_k = \lambda_{k+1} - \lambda_k \approx \frac{\lambda^2}{n_{\text{eff}} \Delta L}. \quad (6)$$

由于 PbSe 量子点具有较高的热光系数,达到 10^{-4} 量级,由(4)式可知当量子点材料温度变化时材料折射率将会改变($\delta\Delta n_{\text{eff}} < 0$),从而可通过观察干涉条纹的移动计算材料折射率的变化。

3 实验设计与数据分析

M-Z 干涉仪设计如图 1 所示,宽带光源(BBS)(浩源光电)通过通道 1 进入耦合比为 10 : 90 的耦合器 1,由于探测光路 L_1 中填充了胶体量子点,对光路损耗较大,因此将分光比为 90% 的光路设计为探测光路;然后将两束光通过耦合器 2 耦合在一起,并通过光谱仪(AQ6317C,光谱范围:600 ~ 1750 nm;灵敏度:0.01 nm)检测输出光强 I ,得到了稳定的干涉图。

本实验采用的 PbSe/UV 胶的质量浓度为 $2 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$,其中探测光路 L_1 中填充了 2.7 mm 的胶体 PbSe 量子点,如图 2 所示,并使用紫外灯进行固化,将填充量子点的这段作为该传感器的传感单元放入干涉仪的探测臂。

光功率密度实验的整体设计如图 3 所示,在室温条件下,将传感器粘牢在塑料平板上,塑料平板固定在稳定的光学平台上,波长为 473 nm 的半导体激光器发出的激光经衰减器调节,通过扩束镜将光斑放大,再通过反射镜将光斑照射在传感单元上,使照射在 PbSe 量子点上的光斑比较均匀,实验时用直尺测量出经扩束后的光斑大小并计算光斑面积。用光功率计(Thorlabs, S121)来测量光功率,进而得到光功率密度大小。实验时通过衰减片调节照射在材料上的光功率,记录不同光功率密度条件下的干涉条纹。

实验得到的干涉条纹移动情况如图 4 所示。

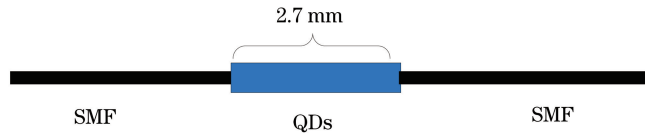


图 2 胶体量子点与单模光纤的连接

Fig. 2 Connection between the colloidal quantum dots and the single mode fiber

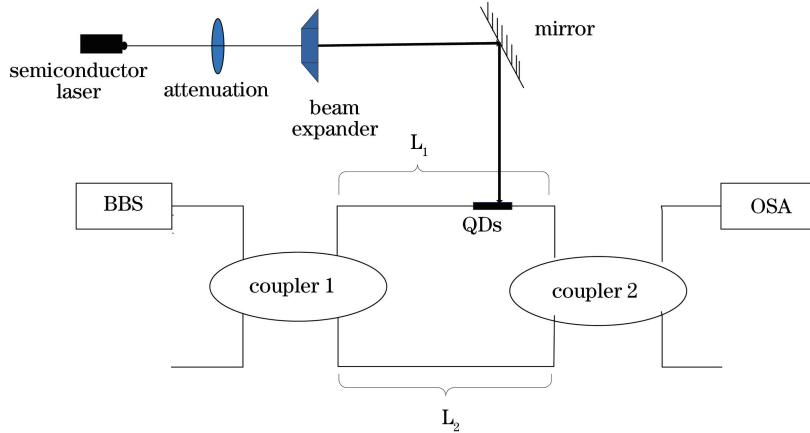


图 3 光功率密度传感实验光路设计原理图

Fig. 3 Schematic of the light path for the optical power density sensing test

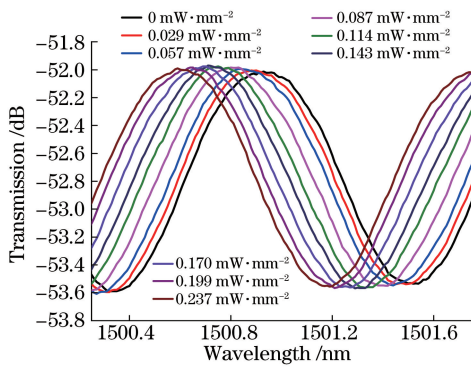


图 4 干涉条纹随着 473 nm 光源光功率密度的增加向左移动
Fig. 4 Interference fringes move to the left with an increase in the optical power density of the 473 nm light source
在进行温度实验时将制作的M-Z传感器的探测臂

和参考臂都放到高精密温控炉中,这样可以排除光纤材料热胀冷缩对实验结果的影响,测量温度从 25.5 °C 上升至 34.5 °C 时的干涉条纹变化情况如图 5 所示。实验结果表明在不同光功率密度和温度条件下,干涉条纹中 k 级干涉最大中心波长 λ_k 向左线性移动。

由图 6 可知,随着光功率密度的增加,该传感器干涉条纹向短波长处发生明显移动,且移动速度与光功率密度增量成正比。由图 7 可知,随着温度的升高,该传感器干涉条纹向短波长处发生明显移动,且移动速度与温度增量成正比,该传感器对温度的灵敏度约为 $0.67 \text{ nm} \cdot \text{°C}^{-1}$,高于传统传感器,这表明该传感器对温度具有较高的灵敏度,多次光功率密度传感实验和温度传感实验均得出同样的实验结果。

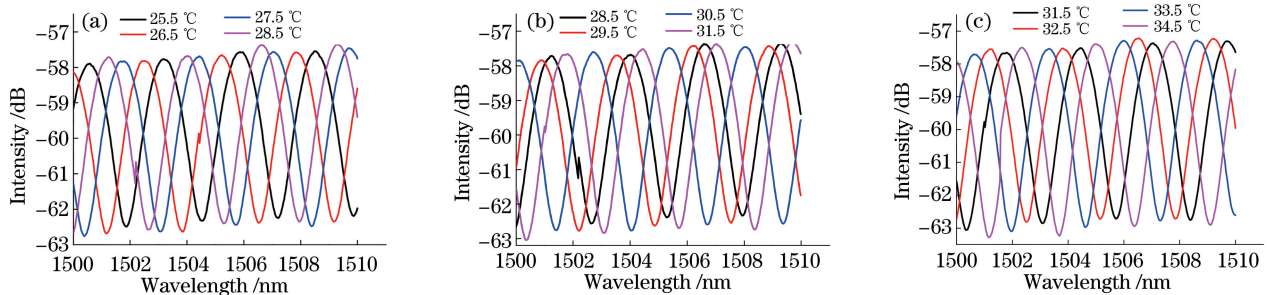


图 5 干涉条纹随着温度增加向左移动。(a) 25.5~28.5 °C;(b) 28.5~31.5 °C;(c) 31.5~34.5 °C

Fig. 5 Interference fringes move to the left with an increase in temperature.

(a) 25.5-28.5 °C; (b) 28.5-31.5 °C; (c) 31.5-34.5 °C

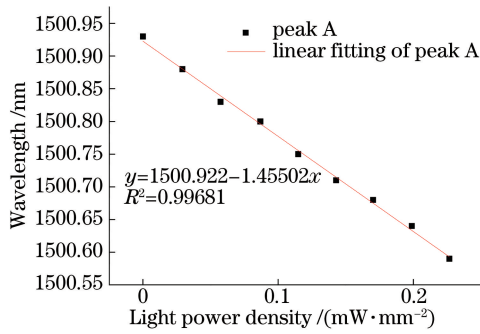


图 6 λ_k 的移动与 473 nm 波长光源功率密度的关系

Fig. 6 Relationship between the movement of λ_k and the power density of light with a wavelength of 473 nm

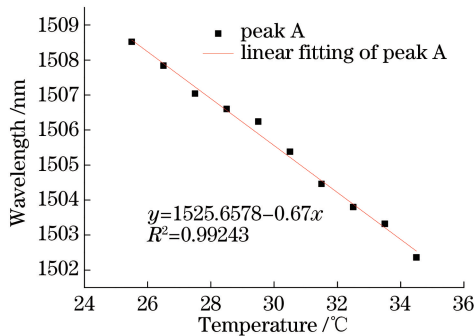


图 7 λ_k 的移动与温度的关系

Fig. 7 Relationship between the movement of λ_k and the temperature

4 结 论

利用 PbSe 量子点材料做传感材料,制作了一个 M-Z 干涉仪。通过大量实验,该传感器在不同光功率密度或温度条件下,干涉条纹的移动量均与光功率密度增量或温度增量成正比。该传感器具有较高的温度灵敏度,高达 $0.67 \text{ nm} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$;对 473 nm 光源的光功率密度灵敏度达 $1.455 \text{ nm} \cdot (\text{mW}^{-1} \cdot \text{mm}^2)$,实验结果表明,PbSe 量子点是制作温度传感等高热光器件的理想材料。

参 考 文 献

[1] Cheng C, Hu N. Broadband PbSe quantum-dot-doped fiber amplifiers from 1250 nm to 1370 nm[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(4): 0406002.

程成, 胡能树. 1250~1370 nm 波带 PbSe 量子点宽带光纤放大器[J]. 光学学报, 2016, 36(4): 0406002.

- [2] Scheibner M, Schmidt T, Worschech L, *et al.* Superradiance of quantum dots[J]. Nature Physics, 2007, 3(2): 106-110.
- [3] Peng L. CdSe, PbS quantum dot materials and solar cell devices [D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2013. 彭立. 硒化镉、硫化铅量子点材料及太阳能电池研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2013.
- [4] Yan J, Lyu J, Zhang H, *et al.* The thermo-optic characteristics of CdSe/ZnS quantum dot with Z-scan measurement method using a CW laser [J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9673: 967311.
- [5] Shen C Y, Chu J L, Lu Y F, *et al.* High sensitive micro-displacement sensor based on M-Z interferometer by a bowknot type taper[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2014, 26(1): 62-65.
- [6] Guan X W, Wang X Y, Frandsen L H. Optical temperature sensor with enhanced sensitivity by employing hybrid waveguides in a silicon Mach-Zehnder interferometer [J]. Optics Express, 2016, 24(15): 16349-16356.
- [7] Lu P, Men L Q, Sooley K, *et al.* Tapered fiber Mach-Zehnder interferometer for simultaneous measurement of refractive index and temperature[J]. Applied Physics Letters, 2009, 94(13): 131110.
- [8] Lu Y F, Shen C Y, Zhong C, *et al.* Refractive index and temperature sensor based on double-pass M-Z interferometer with an FBG [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2014, 26(11): 1124-1127.
- [9] Salceda-Delgado G, Monzon-Hernandez D, Martinez-Rios A, *et al.* Optical microfiber mode interferometer for temperature-independent refractometric sensing[J]. Optics Letters, 2012, 37(11): 1974-1976.
- [10] Tian Z B, Yam S S H, Barnes J, *et al.* Refractive index sensing with Mach-Zehnder interferometer based on concatenating two single-mode fiber tapers [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2008, 20(8): 626-628.