

双粒度 CdSe/ZnS 掺杂量子点薄膜的反射式 荧光温度传感器

耿 琰 王河林

浙江工业大学理学院光学与光电子中心, 浙江 杭州 310023

摘要 设计了一种双粒度 CdSe/ZnS 掺杂量子点薄膜的反射式荧光温度传感器。以发射波长分别为 540 nm 和 610 nm 的 CdSe/ZnS 掺杂量子点薄膜作为核心器件,研究了其光致发光光谱的峰值波长、量子点带隙、峰值强度和自参考光谱强度等参量随温度的变化特性。结果表明,在 30~100 °C 的测量范围内,掺杂量子点薄膜的光致发光光谱峰值强度随着温度的增加而逐渐减小;峰值波长、量子点带隙和自参考光谱强度与温度均呈线性关系;峰值强度与温度呈指数规律关系;证明了自参考光谱强度在升温与降温的过程中具有较好的稳定性;峰值波长随温度升高出现红移,平均灵敏度可达到 0.055 nm/°C。

关键词 传感器;探测器;双粒度;CdSe/ZnS 量子点;荧光;温度

中图分类号 O433.2; O482.31

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0514003

Reflective Fluorescence Temperature Sensor Based on Dual-Granularity CdSe/ZnS Doped Quantum Dots Thin Films

Geng Yan Wang Helin

Center for Optics and Optoelectronics Research, College of Science, Zhejiang University of Technology,
Hangzhou, Zhejiang 310023, China

Abstract A reflective fluorescence temperature sensor based on the dual-granularity CdSe/ZnS doped quantum dots (QDs) thin films is designed. The CdSe/ZnS doped quantum dots thin films with the emitting wavelengths of 540 nm and 610 nm are applied to the system as a key device. The optical characteristics of photoluminescence (PL) spectra with the change of temperature between 30 °C to 100 °C are studied, such as the peak wavelengths of PL spectra, the energy bandgaps of the QDs, the peak intensity of PL spectra and the self-referenced intensity of PL spectra. Results show that, the peak intensity of PL spectra decreases gradually with the increase of temperature; the peak wavelengths of PL spectra, the energy bandgaps of the QDs and the self-referenced intensity of PL spectra vary linearly with the temperature; the peak intensity of PL spectra can be denoted by exponential function of the temperature; the stability of the self-referenced intensity of PL spectra shows good during heating and cooling; the red shift of the the peak wavelengths happens with the increase of the temperature, and the average resolution of the designed reflective fluorescence QDs temperature sensor can reach 0.055 nm/°C.

Key words sensors; detectors; dual-granularity; CdSe/ZnS quantum dots; fluorescence; temperature

OCIS codes 280.4788; 230.0040; 160.4670; 220.4241; 270.5570

1 引 言

温度是一个基本的物理参量,无论是在日常生产,还是在科学研究中都具有很高的测量和参考价值。温

收稿日期: 2015-10-30; 收到修改稿日期: 2016-02-03

基金项目: 浙江省自然科学基金(LY15F050010)、浙江工业大学校重点基金(1401109012408)

作者简介: 耿 琰(1989—),男,硕士研究生,主要从事光纤传感方面的研究。E-mail: 380612771@qq.com

导师简介: 王河林(1977—),男,博士,副教授,硕士生导师,主要从事光纤传感及通信技术方面的研究。

E-mail: whl982032@siom.ac.cn(通信联系人)

度传感器作为一种常用的测量温度的器件,广泛应用于日常家居、医疗保健和航空航天等重要领域。传统的温度传感器主要包括热电偶^[1]、热电阻^[2]和红外传感器^[3]等,虽然这些测温元件具有价格低廉、结构简易和技术成熟等优点,但是在应用环境、测温范围和测温精度上具有一定的局限性。半导体量子点(QD)作为一种新型的材料,已经广泛应用于光放大器^[4]、光开关^[5]、细胞生物学^[6]、基因组学^[7]和蛋白质组学^[8]等相关领域。利用量子点的光致荧光特性研制出的光学传感器^[9]、生物传感器^[10]和温度传感器^[11-13]等元器件也表现出一系列优异性能。其中量子点温度传感器具有测温参量多、测温准确度高、测量范围广、分辨率高和动态响应好等优点,使其具有较高的研究价值。

近年来,许多科研工作者已经对量子点光致荧光(PL)的温变特性进行了多方面的研究。2008年,闫海珍等^[14]对CdSe/ZnS量子点的光致发光光谱温变特性进行了研究,结果表明,在25~100℃温度范围内,光致发光光谱峰值波长略有红移,荧光发射强度与温度呈线性增强关系。2012年,陈肖慧等^[15]测量了ZnCuInS量子点在100~300K温度范围内的光致发光光谱,结果表明ZnCuInS量子点的发光峰值位置随温度的升高而表现蓝移,且其发光线宽较宽。2014年,林以军等^[16]对ZnCuInS/ZnSe/ZnS量子点的光致发光光谱进行了测量,结果表明,当温度在15~90℃范围内变化时,发射峰值波长随温度的升高而红移,发光强度随温度的升高而降低。然而,以上的研究均只针对单量子点的光致发光光谱,至于多量子点掺杂情况并未涉及。相较于单量子点,多量子点由于具有更多的测温参量和较宽的光致发光光谱,对于阵列型量子点光源和白光量子点光源的研发均具有一定的指导作用,因此多量子点具有一定的研究价值。

本文设计了一种双粒度CdSe/ZnS掺杂量子点薄膜的反射式荧光温度传感器,研究了其光致发光光谱的多种参量,如峰值强度、峰值波长、量子点带隙和自参考光谱强度等参量随温度的变化特性。

2 实 验

量子点温度传感器的核心部分是量子点薄膜,而量子点薄膜一般选用低温保存并以紫外(UV)胶或甲苯作为溶剂制备成量子点试剂。本文采用的是杭州纳晶科技有限公司提供的以UV胶为溶剂的CdSe/ZnS量子点试剂,两种量子点的半径分别约为4nm和9nm,质量浓度均为5mg/mL,室温下其吸收谱和发射谱如图1所示。由图1可知,室温下两种量子点发射谱的峰值波长分别为540nm和610nm(以下分别用QD₅₄₀和QD₆₁₀表征两种量子点),且吸收谱的第一吸收峰均出现在发射谱峰值波长之前。在实验中将量子点溶解在盛放适量UV胶的试管中,然后用超声波振荡器振荡试管半小时左右,待振荡均匀后用一次性针管抽取一定试剂均匀地滴在SiO₂玻璃基片上,最后使用工作波长分别为254nm和365nm的紫外光灯同时照射样品半小时左右,待UV胶固化后便可得到以SiO₂玻璃片作为衬底的载有双粒度CdSe/ZnS量子点的薄膜样品。

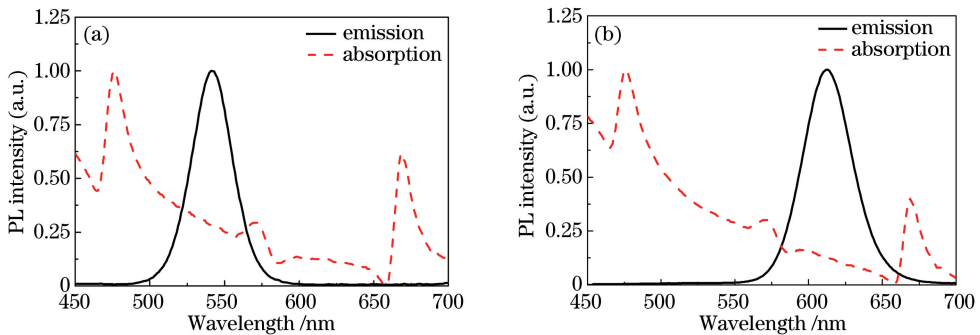


图1 室温下QD₅₄₀和QD₆₁₀的激发谱和发射谱。(a) QD₅₄₀; (b) QD₆₁₀

Fig. 1 Absorption and emission spectra of CdSe/ZnS QDs at room temperature. (a) QD₅₄₀; (b) QD₆₁₀

整个量子点温度传感器装置结构如图2所示。激光光源采用的是西安思拓光电技术有限公司提供的型号为ST-457-(200-500)的激光器,工作波长为450nm。温控设备采用的是福建福晶科技股份有限公司提供的型号为AI-708的温控炉,温度可控范围为20~199℃,温控精度为0.1℃。光谱采集设备采用的是杭州塞曼科技有限公司的S3000-UV-NIR型的光纤光谱仪,测量范围为190~1100nm,分辨率小于0.3nm。激

光器产生的 450 nm 激光先经光纤准直头耦合入 Y 型光纤的一根分支,然后激发处于温控炉中的量子点薄膜,从而产生量子点光致荧光。量子点光致荧光经器壁发射后通过 Y 型光纤的另一根分支,再经 490 nm 的高通滤波片滤波后只剩余量子点荧光,最后使用多模光纤采集荧光信号,通过光谱仪和电脑终端检测并保存量子点光致荧光光谱。温控炉温度变化范围控制在 30~100 °C,每 10 °C 为一间隔,每次待温度稳定 3 min 后记录光谱,以保证采样数据的稳定性。

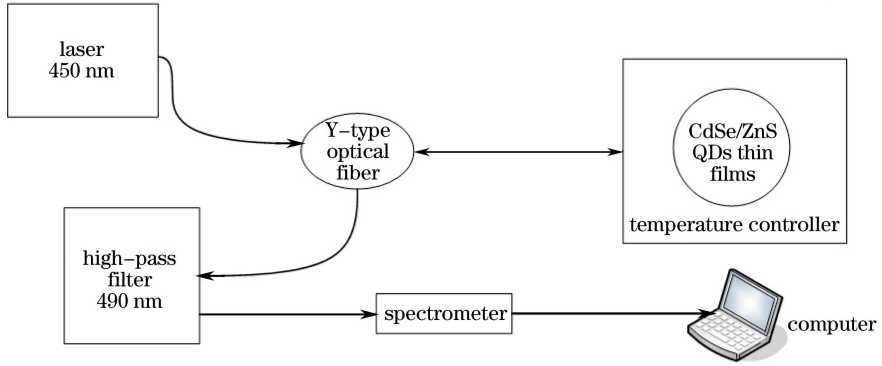


图 2 双粒度 CdSe/ZnS 量子点薄膜反射式温度传感器系统

Fig. 2 Reflective temperature sensor system based on dual-granularity CdSe/ZnS QDs thin films

3 结果与分析

图 3 给出了 30~100 °C 测量范围内 CdSe/ZnS 量子点薄膜的光致发光光谱。从图 3 可以看出,双粒度 CdSe/ZnS 量子点的光致发光光谱拥有两个较为显著的反射峰并在 500~700 nm 范围形成了一个宽带光谱。当温度升高时,量子点的光致发光光谱强度整体逐渐减小,峰值强度也逐渐减小,双峰的峰值波长出现红移。所以可以利用光致发光光谱峰值强度和峰值波长随温度的变化关系来设计一种多参数量子点温度传感器。

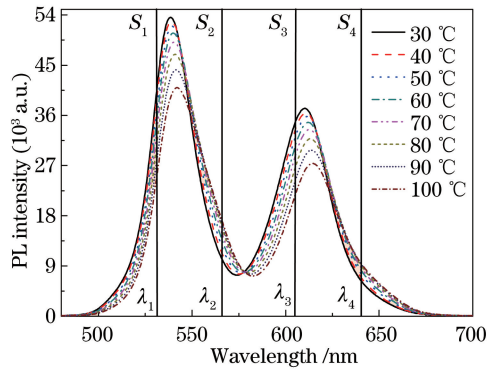


图 3 双粒度 CdSe/ZnS 量子点薄膜的光致发光光谱的温变曲线

Fig. 3 Measured PL spectra of dual-granularity CdSe/ZnS QDs thin films at different temperatures

图 4 给出了 CdSe/ZnS 量子点的带隙与温度的关系。对于宽带隙量子点材料,如 CdSe/ZnS 量子点,激子结合能比带隙 E_g 小得多,因此,在光学吸收谱中,能量带隙 E_g 可近似认为是第一激射峰的能量。通常情况下,块状半导体材料的能量带隙的温度相关特性可用 Varshni 经验公式表示为

$$E_g(T) = E_{g0} - \alpha \frac{T^2}{T + \beta}, \quad (1)$$

式中 E_{g0} 表示在 0 K 时半导体的带隙, α 是拟合参数, β 是在 0 K 时的近似 Debye 温度, T 表示温度。通过拟合最终得到 QD_{540} 和实验数据最匹配的 α 和 β 的值分别为 2.8×10^{-4} eV/K 和 159 K; QD_{610} 对应的值分别为 2.2×10^{-4} eV/K 和 188 K。这两组数据与现有数据处于同一数量级且相近^[17]。

图 4 表明,使用 Varshni 经验公式获得的带隙与温度的变化关系都是线性的。当温度升高时,两种量子点带隙线性的从 2.302 eV 和 2.032 eV 降到 2.288 eV 和 2.018 eV,这说明经验公式(1)式中的 β 的影响很小,可以

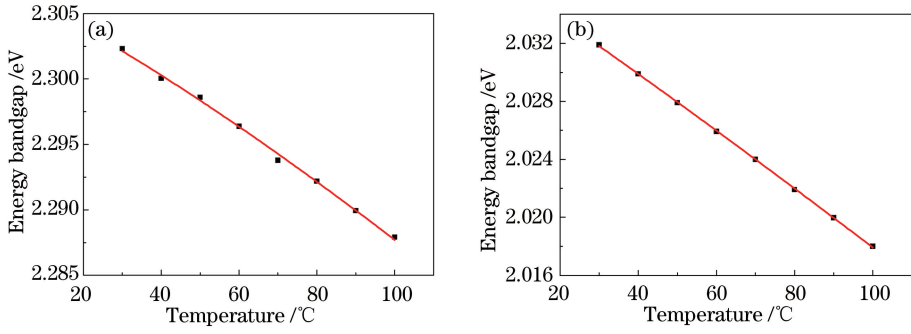


图 4 双粒度 CdSe/ZnS 量子点温变带隙曲线。(a) QD₅₄₀; (b) QD₆₁₀

Fig. 4 Measured energy bandgaps of CdSe/ZnS QDs at different temperatures. (a) QD₅₄₀; (b) QD₆₁₀

忽略。而且在 30~100 °C 的温度范围内,所得到的拟合参数与块状 CdSe 材料的参数接近^[17],这表明,CdSe/ZnS 量子点的主要辐射源自于 CdSe 量子点带隙中电子和空穴的复合产生,而由热膨胀导致的量子点尺寸的改变,引起的辐射很小,对辐射波长几乎没有影响。因而峰值波长与温度的线性关系可表示为

$$\lambda_{\text{peak}} = \lambda_0 + kT, \quad (2)$$

式中 λ_{peak} 表示峰值波长, λ_0 表示初始峰值波长, k 表示灵敏度。从图 5 可以看出,两种量子点的光致发光光谱峰值波长都随温度的增加出现红移,线性相关系数 R^2 都达到 0.99 以上。由图 5(a)可知,QD₅₄₀ 在 30 °C 时的峰值波长约为 538.52 nm,在 100 °C 时的峰值波长约为 541.91 nm,红移总量约为 3.4 nm,灵敏度达到 0.05 nm/°C。由图 5(b)可知 QD₆₁₀ 在 30 °C 时的峰值波长约为 610.19 nm,在 100 °C 时的峰值波长约为 614.39 nm,红移总量约为 4.2 nm,灵敏度达到 0.06 nm/°C。综合来看,两种量子点的平均灵敏度可达到 0.55 nm/°C,所以量子点的光致发光光谱峰值波长可作为量子点温度传感器的测量参量之一。

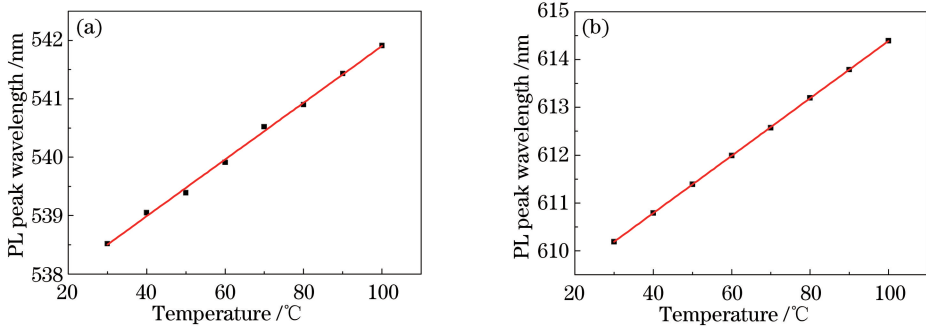


图 5 双粒度 CdSe/ZnS 量子点薄膜的光致发光光谱峰值波长温变曲线。(a) QD₅₄₀; (b) QD₆₁₀

Fig. 5 Measured peak wavelengths of PL spectra of of dual-granularity CdSe/ZnS QDs thin films at different temperatures.

(a) QD₅₄₀; (b) QD₆₁₀

除了量子点辐射峰值波长与温度有关之外,从图 3 还可以看出,量子点 PL 谱的峰值强度也与温度有关,并且随着温度的增加而减小。图 6 给出了量子点 PL 谱峰值强度与温度的变化关系。分析 PL 谱峰值强度的变化可以发现,PL 谱峰值强度随着温度的增加按指数规律减小。这可通过量子点发光机理来理解,量子点发光强度与量子点辐射复合以及非辐射复合相关。辐射复合过程产生光子输出,非辐射复合过程转换成其他能量消耗掉,如转化成声子能量。在该实验中,当量子点所处的环境温度升高时,载流子与纵向光学声子之间的散射效应增强,导致载流子热逃脱增强,复合几率降低,致使发光强度减弱。同时,量子点表面缺陷态的热捕获,致使载流子辐射复合减少,也会导致发光强度减弱。基于 Valerini 等^[18]的研究成果,量子点 PL 谱峰值强度的温度相关特性可表示为

$$I_{\text{PL}}(T) = \frac{N_0}{1 + A \exp[-E_a/(k_B T)] + B \{\exp[-E_{\text{LO}}/(k_B T)] - 1\}^m}, \quad (3)$$

式中 $I_{\text{PL}}(T)$ 表示 PL 谱在温度为 T 时的峰值强度, N_0 是处于激发态的初始载流子数目, m 是辅助量子点中的载流子进行热逃逸的纵向光学声子数, E_a 是表面缺陷态的激活能, E_{LO} 是纵向光学声子能量, k_B 为玻尔

兹曼常数, $A = \tau_{\text{rad}}/\tau_a$ 和 $B = \tau_{\text{rad}}/\tau$ 分别表示的是辐射时间 τ_{rad} 与载流子热捕获时间 τ_a 、载流子和光学声子之间的散射时间 τ 之比。有研究表明^[19], CdSe 量子点中纵向光学声子能量通过拉曼光谱测量得到的值为 0.025 eV, 因此, 运用(3)式对实验测量数据进行拟合前, 可把 E_{LO} 确定为 0.025 eV, 然后通过最优化拟合得到 QD₅₄₀: $(A, B, E_a, m) = (1.18, 10, 0.0128 \text{ eV}, 6.1)$; QD₆₁₀: $(A, B, E_a, m) = (1.23, 11, 0.0142 \text{ eV}, 6.8)$ 。这些值与 Valerini 等^[18]得到的参数处于同一数量级且相近, 说明这些实验结果是可靠的。由于 CdSe/ZnS 量子点的光致发光光谱本身具有一定的波动性, 若采用指数规律作为衡量温度变化的标准, 难免增加了结果的不稳定性并使荧光温度传感器的精度降低, 所以除了量子点峰值波长和峰值强度可以用来表征温度外, 在这里还可以使用一种自参考方法来研究量子点的光致发光光谱强度和温度的变化关系^[20]:

$$S_{540} = \frac{S_1 - S_2}{S_1 + S_2}, \quad (4)$$

式中 S_{540} 表示 QD₅₄₀ 自参考光谱强度, S_1 和 S_2 分别表示在 QD₅₄₀ 光致发光光谱峰值波长两侧 λ_1 和 λ_2 波长处各选取相对应的峰值强度。 S_{610} 表示 QD₆₁₀ 自参考光谱强度, S_3 和 S_4 分别表示在 QD₆₁₀ 光致发光光谱峰值波长两侧 λ_3 和 λ_4 波长处各选取相对应的峰值强度, 如图 3 所示。

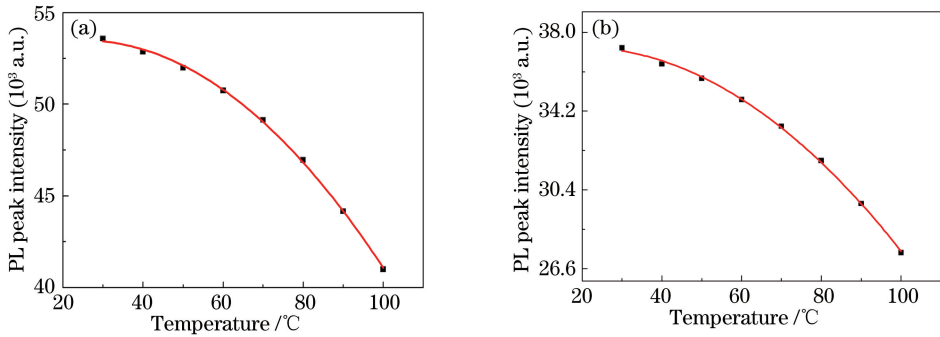


图 6 双粒度 CdSe/ZnS 量子点薄膜的光致发光光谱峰值强度曲线。(a) QD₅₄₀; (b) QD₆₁₀
Fig. 6 Measured peak intensity of PL spectra of dual-granularity CdSe/ZnS QDs thin films at different temperatures. (a) QD₅₄₀; (b) QD₆₁₀

图 7 给出了 CdSe/ZnS 量子点薄膜的光致发光光谱的自参考光谱强度和温度的变化关系。由图 7 可知, 两种量子点的光致发光光谱的自参考光谱强度都随温度的增加而下降。从图 7 还可以发现, 两种量子点的光致发光光谱的自参考光谱强度和温度也基本呈线性关系。虽然图 7(b)中的 QD₆₁₀ 线性度并不如图 7(a)中的 QD₅₄₀ 线性度好, 但作为一种多掺杂量子点温度传感器, 可采用相关系数 R^2 较高的曲线即 QD₅₄₀ 作为温度测量参量。

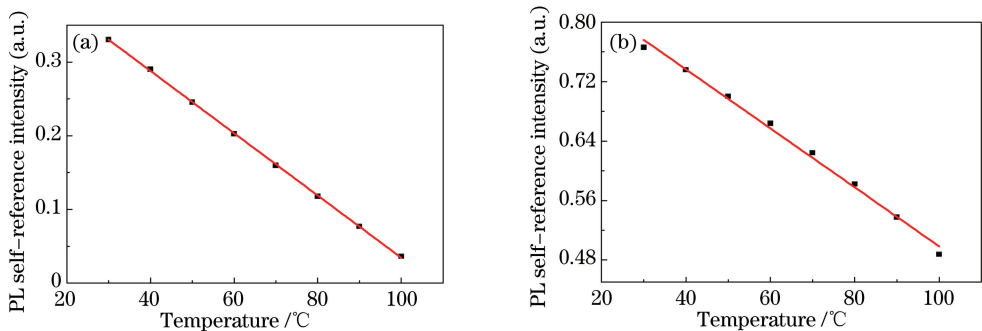


图 7 双粒度 CdSe/ZnS 量子点薄膜的光致发光光谱自参考光谱强度曲线。(a) QD₅₄₀; (b) QD₆₁₀
Fig. 7 Measured self-referenced intensity of PL spectra of dual-granularity CdSe/ZnS QDs thin films at different temperatures. (a) QD₅₄₀; (b) QD₆₁₀

图 8 给出了 CdSe/ZnS 量子点薄膜的光致发光光谱的自参考光谱强度在升温 and 降温过程中的变化特性。实验中 CdSe/ZnS 量子点薄膜经历了从 30 °C 到 100 °C 的升温过程和从 100 °C 到 30 °C 的降温过程并在 30、50、70、90 °C 温度处均记录一次数据, 每次记录数据维持 5 min, 用以保证数据的稳定性和可靠性。从图

8(a)可以看出, QD₅₄₀ 自参考光谱强度在升温过程与降温过程中的稳定性较好, 而且在同一温度处的自参考光谱强度在升温过程与降温过程中基本一致, 如 30 °C 的自参考光谱强度在升温过程与降温过程中基本维持在 0.33 左右。虽然图 8(b)中的 QD₆₁₀ 自参考光谱强度在降温过程中出现些许波动, 但总体依然维持在一个稳定值。因此量子点的光致发光光谱的自参考光谱强度也可作为量子点温度传感器的测量参量之一。

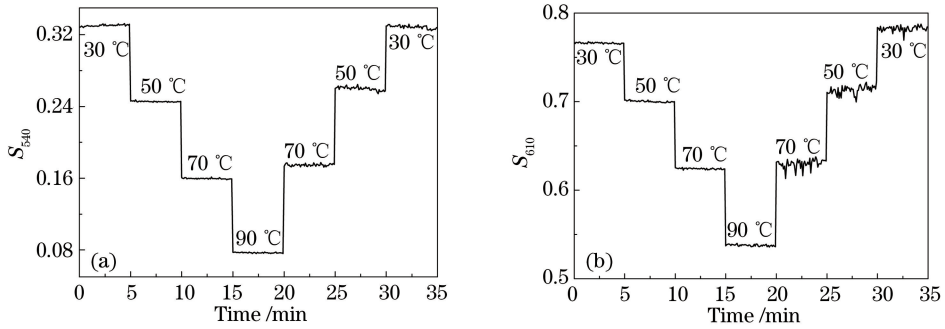


图 8 双粒度 CdSe/ZnS 量子点薄膜的光致发光光谱的自参考光谱强度的升温与降温曲线。(a) QD₅₄₀; (b) QD₆₁₀
 Fig. 8 Measured self-referenced intensity of PL spectra of dual-granularity CdSe/ZnS QDs thin films during heating and cooling. (a) QD₅₄₀; (b) QD₆₁₀

4 结 论

设计了一种基于双粒度 CdSe/ZnS 掺杂量子点薄膜的反射式荧光温度传感器, 研究了其光致发光光谱和相关的多种参量随温度变化的特性, 如光谱峰值强度、峰值波长、量子点带隙、自参考光谱强度等。结果表明, 在 30~100 °C 测量范围内, 光致发光光谱强度随着温度的增加而逐渐减小; 峰值波长、量子点带隙和自参考光谱强度与温度均呈线性关系, 峰值强度与温度呈指数规律关系; 峰值波长随温度升高出现红移, 平均灵敏度达到 0.055 nm/°C; 自参考光谱强度在升温过程与降温过程中的测量稳定性较好。最终证明峰值波长和自参考光谱强度都可以作为量子点温度传感器的测量参量。

参 考 文 献

- Liu Haijun, Jiang Hongchuan, Wu Meng, *et al.*. Preparation and properties study of Pt/ITO thin-film thermocouple on ceramic substrates[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2015, 34(3): 18-20.
 刘海军, 蒋洪川, 吴 劼, 等. 陶瓷基 Pt/ITO 薄膜热电偶的制备与性能研究[J]. *传感器与微系统*, 2015, 34(3): 18-20.
- Yan Changcheng, Ying Guiping. The design of a temperature collection system with high precision based on PT100[J]. *Mechanical & Electrical Engineering Technology*, 2015, 44(3): 71-74.
 严长城, 应贵平. 基于 PT100 铂热电阻的高精度测温系统的设计[J]. *机电工程技术*, 2015, 44(3): 71-74.
- Song Nianlong, Li Qi, Zhang Xinyu, *et al.*. The research on an intelligent temperature sensor based on the infrared sensor array[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2010, 23(12): 1713-1717.
 宋念龙, 李 琦, 张新雨, 等. 基于红外传感器阵列的智能温度传感器研究[J]. *传感技术学报*, 2010, 23(12): 1713-1717.
- Shen Suqi, Ling Yun, Liao Lidan, *et al.*. High pass filter characteristics of saturated quantum dot semiconductor optical amplifiers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(10): 1025001.
 申甦祺, 凌 云, 廖丽丹, 等. 饱和量子点半导体光放大器高通滤波特性[J]. *光学学报*, 2014, 34(10): 1025001.
- Zhong Wenxue, Wang Yiping, Cheng Guangling. Nanomechanical-resonator-assisted induced optical switching in quantum dot system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(8): 0827001.
 钟文学, 王一平, 程广玲. 量子点系统中纳米机械振子诱导的光开关[J]. *光学学报*, 2015, 35(8): 0827001.
- Zhu Xiaomei, Wang Xiaomei, Feng Gang, *et al.*. Quantum dot conjugated RGD for targeted *in vivo* imaging of laryngocarcinoma vessel[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(5): 0504002.
 朱小妹, 王晓梅, 冯 刚, 等. 量子点偶联 RGD 用于喉癌血管的靶向活体成像[J]. *中国激光*, 2014, 41(5): 0504002.
- Zhao Wei, Zhang Zhiling, Pang Daiwen. Application of quantum dots as flourescent labels in medicine and biology[J].

- Chemical Sensors, 2008, 28(1): 8-14.
- 赵 薇, 张志凌, 庞代文. 量子点荧光标记技术在生物医学领域的应用[J]. 化学传感器, 2008, 28(1): 8-14.
- 8 Yang Dongzhi, Xu Shukun, Chen Qifan. Application of quantum dots to biology probes[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2007, 27(9): 1807-1810.
- 杨冬芝, 徐淑坤, 陈启凡. 量子点的荧光特性在生物探针方面的应用[J]. 光谱学与光谱分析, 2007, 27(9): 1807-1810.
- 9 Lai Shoujun. Research development of optical sensor based on quantum dots[J]. Materials Review, 2008, 22(9): 8-10.
- 来守军. 量子点光学传感器的研究进展[J]. 材料导报, 2008, 22(9): 8-10.
- 10 Liu Xing, Luo Yang. Surface modification technologies of quantum dots based biosensors and their medical applications [J]. Chinese Journal of Analytical Chemistry, 2014, 42(7): 1061-1069.
- 刘 星, 罗 阳. 量子点生物传感器中的表面修饰技术及其医学应用[J]. 分析化学, 2014, 42(7): 1061-1069.
- 11 De Bastida Gonzaga, Arregui Francisco J, Goicoechea Javier, *et al.*. Quantum dots-based optical fiber temperature sensors fabricated by layer-by-layer[J]. IEEE Sensors Journal, 2006, 6(6): 1378-1379.
- 12 Walker Glen W, Sundar Vikram C, Rudzinski Christina M, *et al.*. Quantum-dot optical temperature probes[J]. Applied Physics Letters, 2003, 83(17): 3555-3557.
- 13 Bozolan Alexandre, Gerosa Rodrigo M, De Matos Christiano J S, *et al.*. Temperature sensing using colloidal-core photonic crystal fiber[J]. IEEE Sensors Journal, 2012, 12(1): 195-200.
- 14 Yan Haizhen, Cheng Cheng, Zhang Qinghao. Effect of the temperature on absorption and photoluminescence spectra of CdSe/ZnS quantum dots[J]. Chinese Journal of Luminescence, 2008, 29(1): 166-170.
- 闫海珍, 程 成, 张庆豪. 温度对 CdSe/ZnS 量子点吸收光谱和光致发光谱的影响[J]. 发光学报, 2008, 29(1): 166-170.
- 15 Chen Xiaohui, Wang Xiuying, Zhao Jialong. Temperature-dependent photoluminescence of ZnCuInS quantum dots [J]. Chinese Journal of Luminescence, 2012, 33(9): 923-928.
- 陈肖慧, 王秀英, 赵家龙. ZnCuInS 量子点的变温光致发光[J]. 发光学报, 2012, 33(9): 923-928.
- 16 Lin Yijun, Liu Wenyan, Zhang Yu, *et al.*. Investigation of spectroscopy ZnCuInS/ZnSe/ZnS quantum dots [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2014, 34(1): 20-22.
- 林以军, 刘文闫, 张 宇. ZnCuInS/ZnSe/ZnS 量子点发光光谱特性的研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2014, 34(1): 20-22.
- 17 Joshi Abhishek, Narsingi K Y, Manasreh M O, *et al.*. Temperature dependence of the band gap of colloidal CdSe/ZnS core/shell nanocrystals embedded into an ultraviolet curable resin[J]. Applied Physics Letters, 2006, 89(13): 131907.
- 18 Valerini D, Cretí A, Lomascolo M, *et al.*. Temperature dependence of the photoluminescence properties of colloidal CdSe/ZnS core/shell quantum dots embedded in a polystyrene matrix[J]. Physical Review B, 2005, 71(23): 235409.
- 19 Lange H, Artemyev M, Woggon U, *et al.*. Experimental investigation of exciton-LO-phonon couplings in CdSe/ZnS core/shell nanorods[J]. Physical Review B, 2008, 77(19): 193303.
- 20 Jorge P A S, Mayeh M, Benrashid R, *et al.*. Quantum dots as self-referenced optical fibre temperature probes for luminescent chemical sensors[J]. Measurement Science and Technology, 2006, 17(5): 1032-1038.