

## CoTe<sub>2</sub> 量子点的制备、结构及光学性质研究 (特邀)

李 斌<sup>1,2,3</sup>, 陈星帆<sup>1,2,3</sup>, 梁 晶<sup>1,2,3</sup>, 李学铭<sup>1\*</sup>, 唐利斌<sup>2,3\*</sup>, 杨培志<sup>1</sup>

1. 云南师范大学 能源与环境科学学院 可再生能源材料先进技术与制备教育部重点实验室, 云南 昆明 650500;
2. 昆明物理研究所, 云南 昆明 650223;
3. 云南省先进光电材料与器件重点实验室, 云南 昆明 650223)

**摘 要:** 近年来,过渡金属碲化物 (TMTs) 以其独特的晶体结构和优异的物化特性引起了科学界的广泛关注和研究。本文采用超声法制备 CoTe<sub>2</sub> 量子点 (QDs), 通过 TEM、AFM、EDS、XPS、XRD、FTIR 等技术手段对制备的 CoTe<sub>2</sub> QDs 进行了形貌和结构的表征, 同时使用分光光度计 (UV-Vis)、光致发光谱 (PL) 和光致发光激发光谱 (PLE) 研究了 CoTe<sub>2</sub> QDs 的光学性质。结果表明, 制备得到的 CoTe<sub>2</sub> QDs 分散性良好、粒径均匀、呈现球形形貌, 晶粒的平均直径约为 3.1 nm, 平均高度约为 2.9 nm; CoTe<sub>2</sub> QDs 在红外波段存在明显的吸收, 吸收值随稀释浓度的增加而降低; 当激发光波长和发射光波长依次增加时, PL 和 PLE 峰出现红移, 具有明显的 Stokes 位移效应, 表明 CoTe<sub>2</sub> QDs 的光致发光具有激发波长依赖性; CoTe<sub>2</sub> QDs 具有光致多色发光特性, 不同激发光波长可发出不同颜色的光; 荧光量子产率可达 62.6%。CoTe<sub>2</sub> QDs 优异的光学特性尤其是在红外波段的吸收和发光特性, 表明其在红外探测、激光防护涂层、荧光成像、多色发光和纳米光子器件等研究领域具有重要的潜在应用价值, 有望成为一种新型红外探测材料。

**关键词:** 超声法; 过渡金属碲化物; CoTe<sub>2</sub>; 量子点; 红外性质

**中图分类号:** O433.4; O472; O641.1; O644.3 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20211021

## CoTe<sub>2</sub> QDs: preparation, structure and optical properties (*Invited*)

Li Bin<sup>1,2,3</sup>, Chen Xingfan<sup>1,2,3</sup>, Liang Jing<sup>1,2,3</sup>, Li Xueming<sup>1\*</sup>, Tang Libin<sup>2,3\*</sup>, Yang Peizhi<sup>1</sup>

1. School of Energy and Environmental Sciences, Key Laboratory of Advanced Technique & Preparation for Renewable Energy Materials, Ministry of Education, Yunnan Normal University, Kunming 650500, China;
2. Kunming Institute of Physics, Kunming 650223, China;
3. Yunnan Key Laboratory of Advanced Photoelectric Materials & Devices, Kunming 650223, China)

**Abstract:** In recent years, transition metal telluride (TMTs) has attracted extensive attention and research in the scientific field due to its unique crystal structure and excellent physical and chemical properties. In this paper, CoTe<sub>2</sub> quantum dots (QDs) was prepared by ultrasonic method, the morphology and structure of the prepared CoTe<sub>2</sub> QDs were characterized by TEM, AFM, EDS, XPS, XRD and FTIR. The optical properties of the prepared CoTe<sub>2</sub> QDs were investigated by Spectrophotometer (UV-Vis), Photoluminescence (PL) and Photoluminescence Excitation (PLE). CoTe<sub>2</sub> QDs shows good dispersion, uniform particle size and spherical morphology. The average diameter and height of the grains are about 3.1 nm and 2.9 nm respectively. CoTe<sub>2</sub> QDs shows the

收稿日期: 2020-11-05; 修订日期: 2020-12-05

基金项目: 国家自然科学基金 (51462037, 61106098, U1802257); 云南省应用基础研究重点项目 (2012FA003); 云南省创新团队 (2018HC020); 云南省高校科技创新团队支持计划

obvious absorption in the infrared band, and the absorption value decreases with the increase of dilution concentration. When the wavelength of excitation light and emission light increases in turn, the PL and PLE peaks have a red shift, and they have an obvious Stokes shift effect. It shows that the photoluminescence of CoTe<sub>2</sub> QDs is wavelength dependent. CoTe<sub>2</sub> QDs has the photoluminescence characteristic of multicolor, different excitation light wavelength can emit different colors of light. The fluorescence quantum yield of QDs is 62.6%. The excellent optical characteristics of CoTe<sub>2</sub> QDs, especially its absorption and luminescence characteristics in the infrared band, shows that it has important potential application value in infrared detection, laser protective coating, fluorescence imaging, multicolor luminescence and nano-phonic devices, and is expected to become a new type of infrared detection material.

**Key words:** ultrasonic method; transition-metal tellurides; CoTe<sub>2</sub>; quantum dots; infrared properties

## 0 引言

过渡金属碲化物 (Transition-metal Tellurides, TMTs) 有着独特的晶体结构和优异的物理化学特性, 研究者因此对它们产生了极大的研究兴趣。目前 TMTs 在光电子学、催化、电极及磁性材料等诸多领域<sup>[1-4]</sup> 具有广泛的应用前景。有研究表明, IV-VII 族过渡金属与碲元素生成的 TMTs 主要为层状材料, 而 VIII-X 族过渡金属与碲元素则是生成三维的 TMTs 晶体<sup>[5]</sup>; 理论和实验均表明, 若改变 TMTs 的元素组成和形貌, 其相应的物理、化学性质都会发生变化, 且在较低维数下, 它的物化性能会得到一定的增强<sup>[6-7]</sup>。CoTe<sub>2</sub> 是 TMTs 中的一种, 具有稳定的白铁矿型结构, 也称为斜方碲钴矿 (Mattagamite)<sup>[8]</sup>, CoTe<sub>2</sub> 晶体属正交晶系, 空间群为 Pnnm(58), 具备良好的对称性, 其晶体结构具体参数见表 1。CoTe<sub>2</sub> 具有半金属性质, 取向为自旋向上的电子呈现金属性, 取向为自旋向下的电子呈现非金属性, 此时带隙为 1.063 eV<sup>[9]</sup>。近年来通过制备 CoTe<sub>2</sub> 纳米材料, 发现它具有诸多独特的性质, 例如, Lu 等人使用水热法制备出尺寸为 20~50 nm 的 CoTe<sub>2</sub> 纳米粒 (NPs), 可作为析氢反应 (HER) 高效、稳定的催化剂, 稳定性可达 2 天及以上<sup>[9]</sup>; Shi 等人利用简单水热共还原路线成功合成了直径约为 50 nm、长度为 1 μm 的 CoTe 和 CoTe<sub>2</sub> 纳米管, 所得产物具有优异的磁性能<sup>[10]</sup>; Yin 等人利用单步水热工艺成功开发了一种新型 CoTe<sub>2</sub> 纳米膜电极, 该电极在析氧反应/析氢反应 (OER/HER) 中具有优异的活性、耐久性和稳定性<sup>[11]</sup>; Xie 等人采用一步溶剂热路线, 以乙二醇为溶剂, 在高压釜中制备了直径为 30 nm、长度大于 1.2 μm 的 CoTe<sub>2</sub> 纳米棒<sup>[12]</sup>, 通过能谱测试证实了

CoTe<sub>2</sub> 纳米棒为斜方晶系; Jiang 等人通过溶剂热法合成了五种不同物质的纳米片, 其中 CoTe<sub>2</sub> 纳米片的厚度约为 10~15 nm, 研究结果表明: 其 PL 光谱存在很宽的发射带<sup>[13]</sup>; Ian G. McKendry 等人采用化学合成法制备了 CoTe<sub>2</sub> 纳米晶, 发现它是一种优良的电催化水氧化反应 (WOR) 的催化剂<sup>[14]</sup>; Huang 等人合成了具有均匀多面体形状的 CoTe<sub>2</sub> 纳米复合材料, 并首次将其作为染料敏化太阳能电池的电催化剂, 该复合材料具有优异的光伏性能, 光电转换效率 (PCE) 为 9.02%<sup>[15]</sup>。

表 1 CoTe<sub>2</sub> 的晶体结构参数 (PDF#011-0553)

Tab.1 Crystal parameters of CoTe<sub>2</sub>(PDF#011-0553)

CoTe <sub>2</sub>	Crystal parameters
Crystal System	Orthorhombic
Space group	Pnnm (58)
Lattice parameters	$a=5.312 \text{ \AA} (1 \text{ \AA}=10^{-10} \text{ m}), b=6.311 \text{ \AA}, c=3.889 \text{ \AA}$
Angle	$\alpha=90^\circ, \beta=90^\circ, \gamma=90^\circ$
Z	2

基于当前报道的 CoTe<sub>2</sub> 纳米材料研究现状, 发现对于 CoTe<sub>2</sub> 量子点 (QDs) 的制备和光学性质的研究相对较少, 目前 CoTe<sub>2</sub> 纳米材料制备主要采用水热法、溶剂热法等, 但是这些合成方法所需实验条件相对较为严苛, 液相超声剥离法 (以下简称超声法) 在常温常压下可在溶液中形成局部的高温高压, 大幅度降低了实验反应条件的要求, 同时它还具有污染小、操作方便、成本较低等优点。实验采用自上而下<sup>[16]</sup> 的超声法制备 CoTe<sub>2</sub> QDs, 并对制备得到的 CoTe<sub>2</sub> QDs 进行测试表征, 分析其形貌、结构特征, 研究其近红外

光学性能。

## 1 实验

### 1.1 CoTe<sub>2</sub> QDs 的制备

实验采用的超声法主要步骤包括研磨、超声和离心,制备步骤如下:称取 0.4 g CoTe<sub>2</sub> 粉末(纯度 ≥ 99.95%)放至研钵中充分研磨 2 h。然后将研磨后的样品转移至烧杯中,加入 50 mL 的 N-甲基吡咯烷酮(NMP,纯度 ≥ 99.9%)作为分散剂混合均匀。将上述混合液置于超声仪(180 W)中累计超声 4 h。将超声后的溶液转移至离心管,置于离心机中离心,离心机参数设置(转速:5000 r/min,时间:15 min),离心结束后收集上层清液。

### 1.2 CoTe<sub>2</sub> QDs 的测试与表征

CoTe<sub>2</sub> QDs 的尺寸、形貌、结构及元素组分分别使用透射电镜(TEM, Tecnai G2 TF30 S-Twin)、原子力显微镜(AFM, 日本精工 SPA-400)及能谱仪(EDS, NOVA NANOSEM 450)进行表征;物相组成及成键特性使用 X 射线光电子能谱(XPS, PHI Versa 探针 II)、X 射线衍射仪(XRD, EMPYREAN, X 射线源:Cu Ka,  $\lambda=0.154178$  nm)、傅里叶变换红外光谱仪(FTIR, Nicolet iS10)和拉曼光谱仪(Raman Renishaw-InVia)进行分析;光学性能使用紫外-可见分光光度计(UV-Vis, Shimadzu UV-3600)和荧光光谱仪(PL&PLE, Hitachi, F-4500)进行测试。

## 2 结果与讨论

CoTe<sub>2</sub> QDs 的制备机理如图 1(a)所示,CoTe<sub>2</sub> 体材料在经过研磨、超声和离心三个流程后可以得到 CoTe<sub>2</sub> QDs;图 1(a)的红色实线方框代表单个 CoTe<sub>2</sub> 晶胞;通过 PDF#011-0553 卡片分析得出 CoTe<sub>2</sub> 晶胞中轴向的 Co-Te 键长为 2.550 Å,轴间 Co-Te 键长为 2.598 Å,这与 Afshar<sup>[17]</sup>等人报道的基本一致。

图 1(b)是 CoTe<sub>2</sub> QDs 的 TEM 图和粒径分布直方图,图中的黑色小点即为 CoTe<sub>2</sub> QDs,可看出量子点分散性良好,通过对量子点尺寸进行分析发现其符合正态分布,高斯拟合得到 CoTe<sub>2</sub> QDs 的平均直径( $W_c$  约为 3.1 nm,半峰宽(FWHM)为 0.95 nm;图 1(c)是 CoTe<sub>2</sub> QDs 的高分辨率 TEM 图,对其中单个量子点使用 Line Profile 分析(图中右上角方框图),得出晶

格间距  $d=0.182$  nm,此时对应晶面是(221)面;图 1(d)是 CoTe<sub>2</sub> QDs 的高分辨率 TEM 图,选取其中一个量子点进行快速傅里叶变换分析(FFT),观察到 CoTe<sub>2</sub> QDs 呈现立方晶型结构,表明 CoTe<sub>2</sub> QDs 与 CoTe<sub>2</sub> 体材料的晶体结构相同。

图 1(e)为 AFM 测试结果,从图中可以看出量子点尺寸均一、分布均匀,从中随机选取三个量子点,标记为 1、2、3,经粒径高度分析,其值分别为 2.8 nm、2.8 nm 和 3.1 nm,平均高度为 2.9 nm,如图 1(f)所示,该结果与上述 TEM 的粒径分析相吻合;

图 1(g)是 CoTe<sub>2</sub> QDs 的 EDS 元素分析图,EDS 能谱可定性分析 CoTe<sub>2</sub> QDs 中元素的相对含量,在去除硅衬底峰的干扰后,从图中可看到 Co 元素(33.2%)和 Te 元素(66.8%)的原子比例约为 1:2,这符合 1 个 Co 原子与 2 个 Te 原子相结合的结构模型。

图 2(a)为 CoTe<sub>2</sub> QDs 的 XPS 全谱图,从中可以清晰地看到 Te 3d 和 Co 2p 的 XPS 峰,C 1s 可能是分散剂 NMP 的残余,O 1s 可能是样品 CoTe<sub>2</sub> 表面被氧化的缘故或是分散剂 NMP 的残余;为了深入分析 CoTe<sub>2</sub> QDs 中 Te 3d 和 Co 2p 的存在形式,进行 XPS 分峰拟合,Te 3d 的 XPS 谱如图 2(b)所示,共有 3 种组成成分,分别为 Te 3d<sub>5/2</sub>(574.6 eV)、Te 3d<sub>3/2</sub>(585.2 eV)和 Te 的氧化态(578 eV),根据峰值强度进行分析,样品氧化程度很低,Te 3d<sub>5/2</sub> 态占主导;Co 2p 的 XPS 谱如图 2(c)所示。表明 Co 2p 主要存在形式为 Co 2p<sub>3/2</sub>(772.9 eV),Co 2p<sub>1/2</sub>(794.9 eV),而 784.1 eV 和 806.2 eV 处的峰是它们的 Satellite Peak(卫星峰),这与参考文献[10, 18-19]报道的峰位位置相吻合。

FTIR 结果如图 2(d)所示,在指纹区 507 cm<sup>-1</sup>处观测到 Co-Te 的伸缩振动吸收峰,其他伸缩振动吸收峰为有机溶剂 NMP 中的 C、H 和 O 所结合的化学键。CoTe<sub>2</sub> QDs 的 XRD 测试结果如图 2(e)所示,经与标准 PDF 卡片(PDF#11-0553)对比可知,图中  $2\theta=31.7^\circ$ ( $d=0.282$  nm)、 $2\theta=33.0^\circ$ ( $d=0.271$  nm)和  $2\theta=43.6^\circ$ ( $d=0.207$  nm)处的衍射峰分别对应于 CoTe<sub>2</sub> 样品的(111)、(120)和(211)晶面衍射峰,除此之外不存在其他的衍射峰,表明样品纯度较高;图 2(f)为 CoTe<sub>2</sub> QDs 的拉曼光谱图,在波数 122.8 cm<sup>-1</sup>和 140.7 cm<sup>-1</sup>处观察到 Te-Te 键的振动模式与碲元素<sup>[20]</sup>基本相同,可能对应于 A<sub>1</sub> 弯曲振动模式和拉伸振动模式或三角碲化物的

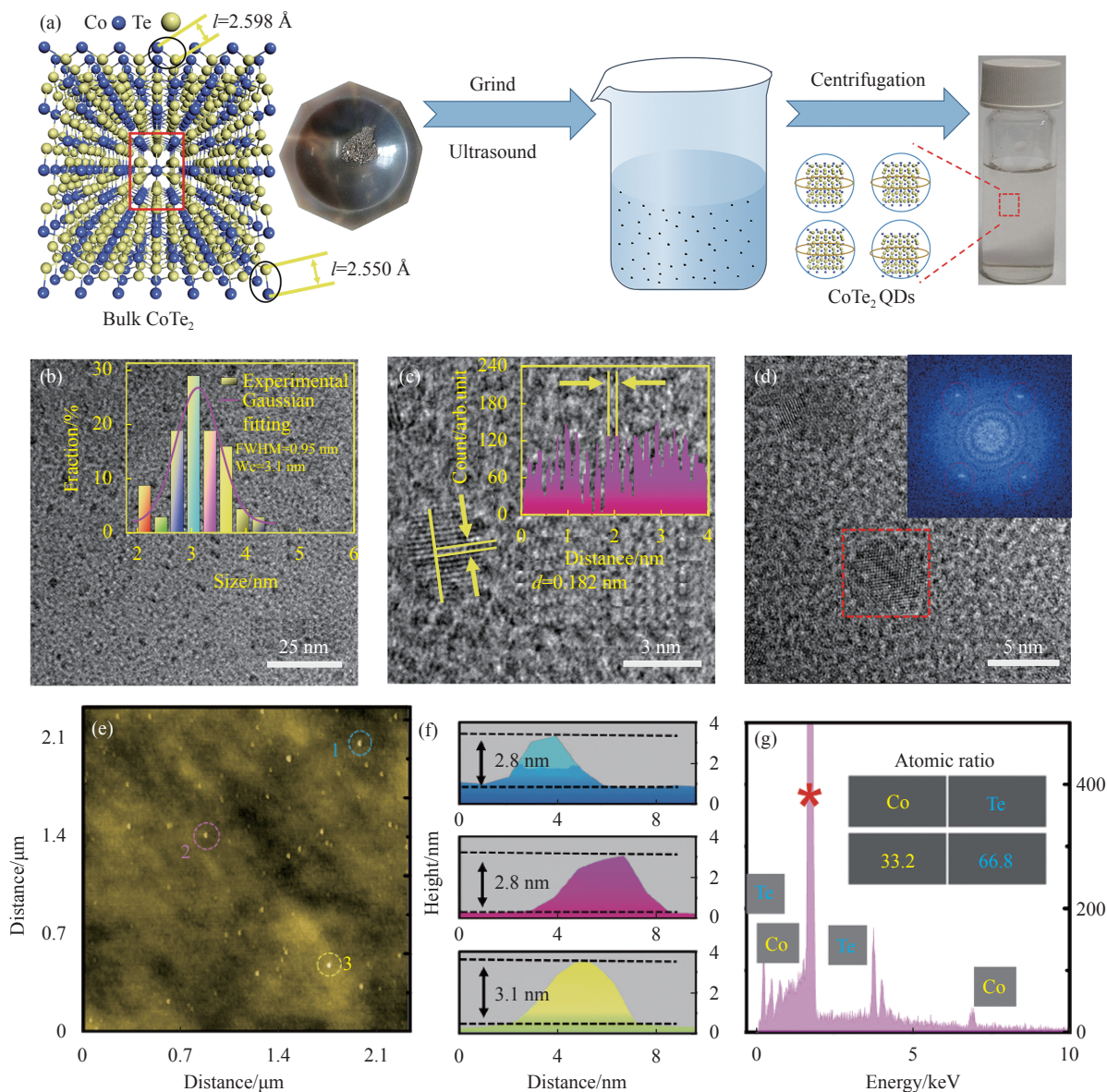


图 1 (a) CoTe<sub>2</sub> QDs 制备流程图; (b) TEM 图 (插图为符合高斯分布的粒径分布图); (c) 高倍透射电镜 (HR-TEM) 图 (插图为晶格条纹分析图); (d) HR-TEM 图 (插图为 FFT 图); (e) AFM 图; (f) 针对 (e) 中所标 1,2 和 3 处位置的高度分析图; (g) EDS 能谱

Fig.1 (a) The schematic diagram of the preparation of CoTe<sub>2</sub> QDs; (b) TEM image (inset: the particle size distribution fitted with Gaussian distribution); (c) High-Resolution Transmission Electron Microscope (HR-TEM) image (inset: Lattice fringe analysis); (d) HR-TEM image (inset: FFT image); (e) AFM image; (f) Height analysis for locations 1,2 and 3 indicated in (e); (g) EDS spectrum

E 模<sup>[21-23]</sup>, 表明碲化物切实存在。

CoTe<sub>2</sub> QDs 的 UV-Vis 吸收光谱如图 2(g) 和图 2(h) 所示, 图中清楚表明 CoTe<sub>2</sub> QDs 在红外到紫外波段都存在吸收, 且吸收强度随稀释浓度的增加而降低。此外, 研究表明 CoTe<sub>2</sub> QDs 溶液存在荧光效应, 如图 2(g) 插图所示的溶液颜色变化过程, 自然光照射下的样品溶液呈现淡黄色, 在波长为 254 nm 和 365 nm 的紫外光照射下, 样品分别呈现为淡紫色和蓝色。为了检测

量子点薄膜的吸收特性, 将 CoTe<sub>2</sub> QDs 溶液在石英衬底上制备成膜, 如图 2(i) 的插图所示, 图 2(i) 为薄膜的 UV-Vis 吸收光谱, 从中可以看出量子点薄膜在紫外到红外波段同样存在吸收, 且相对于量子点溶液吸收更为明显; 插图为 UV-Vis 吸收光谱的吸收值取对数之后的图像, 其更能反映出量子点材料受波长的改变而发生变化的情况。

光致发光谱 (Photoluminescence, PL) 是固定激发

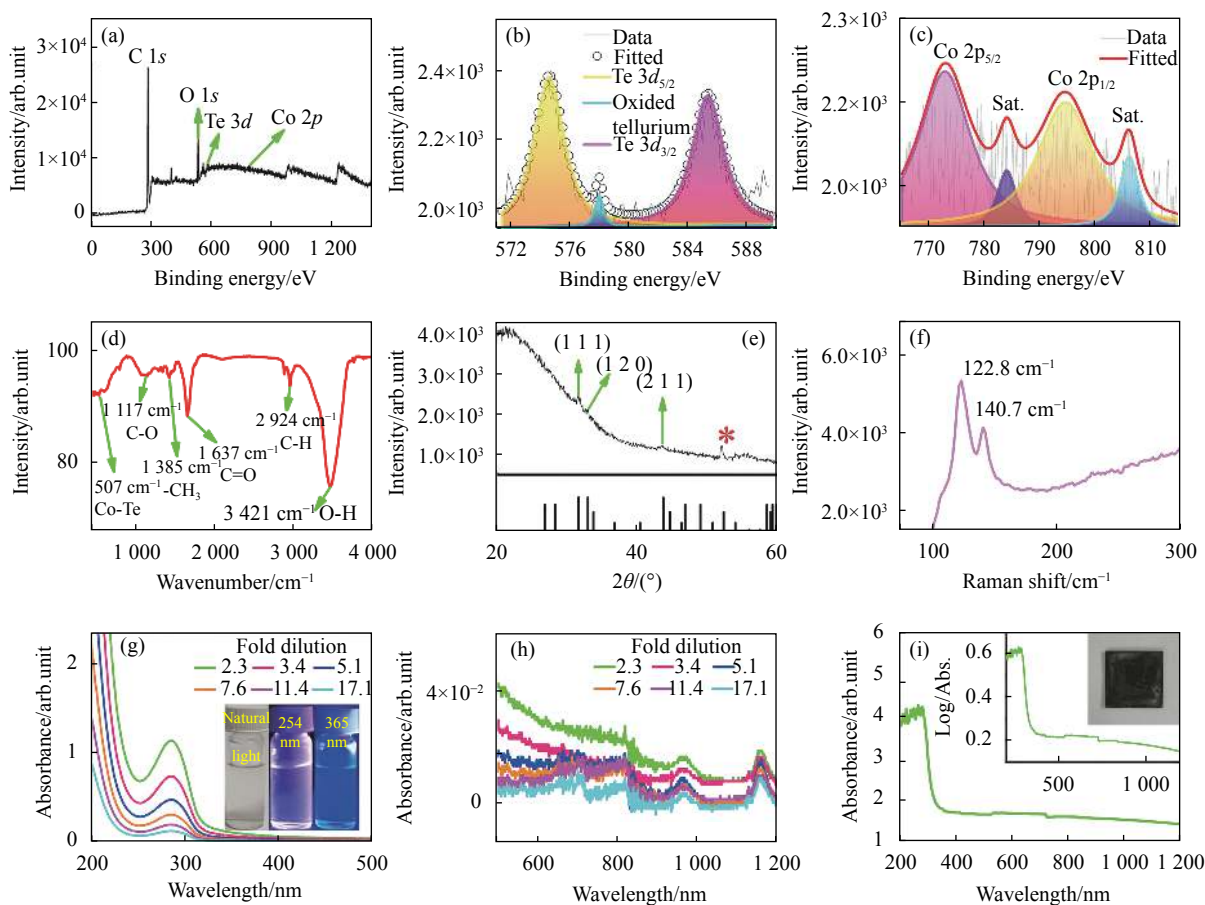


图 2 (a) XPS 全谱图; (b) Te 3d XPS 图; (c) Co 2p XPS 图; (d) FTIR 图; (e) XRD 图; (f) Ramam 图; (g) 不同浓度的 UV-Vis 吸收光谱 (200~500 nm), (插图: 自然光和紫外灯照射下的 CoTe<sub>2</sub> QDs 溶液); (h) 浓度不同的 UV-Vis 吸收光谱 (500-1200 nm); (i) 样品在石英片上的 UV-Vis 吸收光谱  
Fig.2 (a) XPS full spectrum; (b) Te 3d XPS spectrum; (c) Co 2p XPS spectrum; (d) FTIR spectrum; (e) XRD diffraction pattern; (f) Raman spectrum; (g) UV-Vis absorption spectra at different concentrations (200-500 nm) (inset: photos of CoTe<sub>2</sub> QDs under natural light and UV light); (h) UV-Vis absorption spectra at different concentrations (500-1200 nm); (i) UV-Vis absorption spectrum of the sample on a quartz substrate

光波长, 检测材料的发光光谱, 可测得最强发射峰的位置。光致发光激发光谱 (Photoluminescence Excitation, PLE) 是固定待测材料荧光光谱的某一段, 改变激发激光波长, 检测此波段强度对激发波长的响应。图 3(a) 和图 3(e) 分别为 CoTe<sub>2</sub> QDs 的 PL 和 PLE 图, 由图可知, 当激发光波长和发射光波长依次增加时, PL 和 PLE 峰的峰位均呈现红移; 归一化处理 PL 和 PLE 图, 如图 3(b) 和图 3(f) 所示, 处理后的图像更能反映这一红移过程, 其峰值所对应波长的变化为 PL: 400 nm→405 nm→409 nm→421 nm→434 nm→448 nm; PLE: 326 nm→329 nm→332 nm→340 nm→348 nm→358 nm; 图 3(c) 和图 3(f) 分别为 PL 与 PLE 峰波长和能量之间的关系, 其红移的峰值能量范围为 PL: 3.12 eV → 2.76 eV, PLE: 3.80 eV → 3.46 eV, 表明不同的激发波长会直接影响 CoTe<sub>2</sub> QDs 的光致发光; 通过

比较 PL 和 PLE, 发现 CoTe<sub>2</sub> QDs 具有明显的 Stokes 位移效应。图 3(g) 是 CoTe<sub>2</sub> QDs 在近红外波段的 PL 图, 当激发光波长从 600 nm 到 750 nm (步长 50 nm) 时, CoTe<sub>2</sub> QDs 在近红外波段仍存在发光现象。图 3(h) 是 CoTe<sub>2</sub> QDs 发射波长在近红外波段 600~750 nm (步长 50 nm) 的 PLE 图, 表明近红外波段的 CoTe<sub>2</sub> QDs 发射光谱在不同波长都存在一定程度的响应。

通过上述对样品的表征测试, 发现 CoTe<sub>2</sub> QDs 具有较宽的光致发光光谱, 表明可能存在光致多色发光的特性。量子点材料中电子接受外来能量后达到激发态, 在电子回复至基态的过程中, 会释放能量, 这种能量通常以光的形式发射出去。量子点材料在不同的激发光波长激发下, 电子会到达不同能级的激发态, 在电子回复至基态的过程中, 会发射出不同波长的光, 呈现出不同的颜色。为了更直观地表现样品在

不同激发波长下的发光过程,使用三刺激值公式(1)<sup>[24]</sup>进行色坐标的计算:

$$\begin{aligned} X &= k \sum_{\lambda} \varphi(\lambda) \bar{x}(\lambda) \Delta\lambda \\ Y &= k \sum_{\lambda} \varphi(\lambda) \bar{y}(\lambda) \Delta\lambda \\ Z &= k \sum_{\lambda} \varphi(\lambda) \bar{z}(\lambda) \Delta\lambda \end{aligned} \quad (1)$$

式中:  $\varphi(\lambda)$  为颜色刺激函数,  $\varphi(\lambda) = T(\lambda) \cdot S(\lambda)$ ,  $S(\lambda)$  为照明光源的相对光谱功率分布,  $T(\lambda)$  为光谱透射率;  $\bar{x}(\lambda)$ 、 $\bar{y}(\lambda)$ 、 $\bar{z}(\lambda)$  分别为标准观察者光谱三刺激值;  $k$  值由照明光源确定比例系数。样品的色坐标数值采用公式(2)进行计算<sup>[25]</sup>:

$$\begin{aligned} x &= X/(X+Y+Z) \\ y &= Y/(X+Y+Z) \\ z &= Z/(X+Y+Z) \end{aligned} \quad (2)$$

式中:  $X+Y+Z=1$ ;  $x, y, z$  为色坐标值。通过计算得出当激发波长从 300 nm→500 nm (步长 20 nm) 时的色坐标  $xyz$ , 如图 3(i) 中的 A→J 所示, 相应的颜色发生了如下变化: 紫调蓝-蓝色-蓝绿-绿色-黄调绿, 表明样品具有优异的多色发光特性。

荧光性能是衡量量子点材料的重要指标, 因此, 实验使用硫酸奎宁 ( $Q_s=0.48$ )<sup>[26]</sup> 作为参比, 计算了 CoTe<sub>2</sub> QDs 的荧光量子产率 ( $Q_s$ ), 计算公式如公式(3)所示<sup>[27]</sup>:

$$Q_s = Q_r \times (I_s/I_r) \times (A_r/A_s) \times (n_s/n_r)^2 \quad (3)$$

式中:  $Q$  为荧光量子产率;  $A$  为特定激发光波长处的吸光度;  $I$  为荧光的发光峰积分面积;  $n$  为折射率; 下标  $s$  为样品;  $r$  为参比。通过计算 CoTe<sub>2</sub> QDs 的荧光量子产率可达 62.6%, 表明 CoTe<sub>2</sub> QDs 具有优良的荧

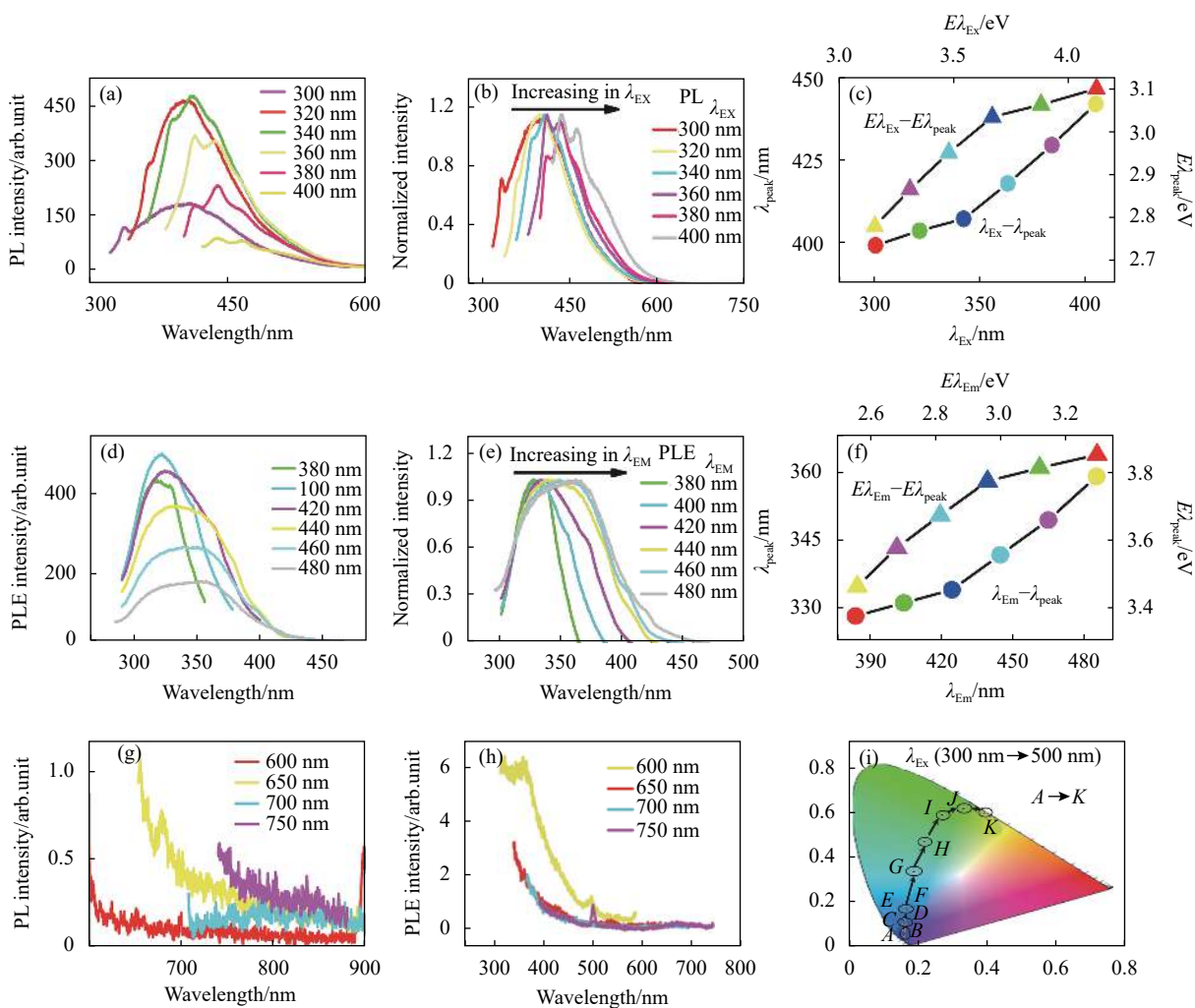


图 3 CoTe<sub>2</sub> QDs 的光致发光性质。(a), (d) PL 和 PLE 图; (b), (e) 归一化的 PL 和 PLE 图; (c), (f) PL 和 PLE 峰值与能量关系图; (g) 近红外 PL 图; (h) 近红外 PLE 图; (i) 色坐标图

Fig.3 Photoluminescence properties of CoTe<sub>2</sub> QDs. (a), (d) PL and PLE spectra; (b), (e) Normalized PL and PLE spectra; (c), (f) the relationship between the peak value and energy of PL and PLE; (g) near-infrared PL spectra; (h) near-infrared PLE spectra; (i) color coordinate

光性能。

### 3 结 论

文中使用“自上而下”的液相超声剥离法成功制备出分散性良好、尺寸均匀、平均粒径约为 3 nm 的球形形貌 CoTe<sub>2</sub> QDs; 根据 UV-Vis 测试, CoTe<sub>2</sub> QDs 从紫外到红外波段都存在吸收, 吸收强度随稀释浓度的增加而降低; 通过对 PL 和 PLE 的分析, CoTe<sub>2</sub> QDs 在红外波段存在光致发光, PL 与 PLE 峰位有明显红移, 存在明显的 Stokes 位移效应, 表明光致发光具有激发波长依赖性; CoTe<sub>2</sub> QDs 存在光致多色发光特性, 在不同激发光波长下可发出不同颜色的光; 荧光量子产率可达 62.6%。CoTe<sub>2</sub> QDs 优异的光学特性尤其是其在红外波段的吸收和发光特性, 表明其在红外探测、激光防护涂层、多色发光、荧光成像和纳米光子器件等研究领域具有重要的潜在应用价值。此外, 该方法亦可用于制备其他高质量的碲化物量子点。

#### 参考文献:

- [1] Hirayama M, Misawa T, Miyake T et al. Ab initio studies of magnetism in the iron chalcogenides FeTe and FeSe [J]. *Journal of the Physical Society of Japan*, 2015, 84(9): 93-103.
- [2] Seok J, Lee J H, Cho S, et al. Active hydrogen evolution through lattice distortion in metallic MoTe<sub>2</sub> [J]. *2D Materials*, 2017, 4(2): 025061.
- [3] Gao M R, Xu Y F, Jiang J, et al. Nanostructured metal chalcogenides: Synthesis, modification, and applications in energy conversion and storage devices [J]. *Chemical Society Reviews*, 2013, 42(7): 2986-3017.
- [4] Liu X, Li D, Yang W, et al. Controlled calcination of ZnSe and ZnTe nanospheres to prepare visible-light catalysts with enhanced photostability and photoactivity [J]. *Journal of Materials Science*, 2016, 51(24): 11021-11037.
- [5] Chia H L, Latiff N M, Sofer Z, et al. Cytotoxicity of group 5 transition metal ditellurides (MTe<sub>2</sub>; M=V, Nb, Ta) [J]. *Chemistry - A European Journal*, 2018, 24(1): 206-211.
- [6] Hicks L, Dresselhaus M S. Thermoelectric figure of merit of a one-dimensional conductor [J]. *Phys Rev B*, 1993, 47(24): 8-11.
- [7] Zhu H T, Luo J, Liang J K. Synthesis of highly crystalline Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> nanotubes and their enhanced thermoelectric properties [J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2014, 2(32): 12821-12826.
- [8] Muhler M, Bensch W, Schur M. Preparation, crystal structures, experimental and theoretical electronic band structures of cobalt tellurides in the composition range CoTe<sub>1.3</sub>-CoTe<sub>2</sub> [J]. *Journal of Physics Condensed Matter*, 1998, 10(13): 2947-2962.
- [9] Lu T H, Chen C J, Basu M, et al. The CoTe<sub>2</sub> nanostructure: An efficient and robust catalyst for hydrogen evolution [J]. *Chemical Communications*, 2015, 51(95): 17012-17015.
- [10] Shi R, Liu X, Shi Y, et al. Selective synthesis and magnetic properties of uniform CoTe and CoTe<sub>2</sub> nanotubes [J]. *Journal of Materials Chemistry*, 2010, 20(36): 7634-7636.
- [11] Yin Y, Xu J, Guo W, et al. A single-step fabrication of CoTe<sub>2</sub> nanofilm electrode toward efficient overall water splitting [J]. *Electrochimica Acta*, 2019, 307: 451-458.
- [12] Xie Y, Li B, Su H, et al. Solvothermal route to CoTe<sub>2</sub> nanorods [J]. *Nanostructured Materials*, 1999, 11(4): 539-544.
- [13] Jiang L, Zhu Y J, Cui J B. Nanostructures of metal tellurides (PbTe, CdTe, CoTe<sub>2</sub>, Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>, and Cu<sub>7</sub>Te<sub>4</sub>) with various morphologies: A general solvothermal synthesis and optical properties [J]. *European Journal of Inorganic Chemistry*, 2010(19): 3005-3011.
- [14] Mckendry I G, Thenuwara A C, Sun J, et al. Water oxidation catalyzed by cobalt oxide supported on the mattagamite phase of CoTe<sub>2</sub> [J]. *ACS Catalysis*, 2016, 6(11): 7393-7397.
- [15] Huang S, Li S, He Q, et al. Formation of CoTe<sub>2</sub> embedded in nitrogen-doped carbon nanotubes-grafted polyhedrons with boosted electrocatalytic properties in dye-sensitized solar cells [J]. *Applied Surface Science*, 2019, 476: 769-777.
- [16] Yang W, Zhang B, Ding N, et al. Fast synthesise ZnO quantum dots via ultrasonic method [J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2016, 30: 103-112.
- [17] Afshar M, Sargolzaei M, Kordbacheh A H A. Relativistic first-principles study on spin and orbital magnetism of mattagamite (CoTe<sub>2</sub>) [J]. *Physics of Metals and Metallography*, 2015, 116(4): 341-345.
- [18] Wang Z, Ren X, Wang L, et al. A hierarchical CoTe<sub>2</sub>-MnTe<sub>2</sub> hybrid nanowire array enables high activity for oxygen evolution reactions [J]. *Chemical Communications*, 2018, 54(78): 10993-10996.
- [19] Liu M, Lu X, Guo C, et al. Architecting a mesoporous N-doped graphitic carbon framework encapsulating CoTe<sub>2</sub> as an efficient oxygen evolution electrocatalyst [J]. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 2017, 9(41): 36146-36153.
- [20] Li H H, Zhang P, Liang C, L et al. Facile electrochemical synthesis of tellurium nanorods and their photoconductive

- properties [J]. *Crystal Research and Technology*, 2012, 47(10): 1069-1074.
- [21] Liu J W, Chen F, Zhang M, et al. Rapid microwave-assisted synthesis of uniform ultralong te nanowires, optical property, and chemical stability [J]. *Langmuir*, 2010, 26(13): 11372-11377.
- [22] Zhang L, Wang C, Wen D. Preparation by hydrothermal techniques in a tungstosilicate acid solution system and optical properties of tellurium nanotubes [J]. *European Journal of Inorganic Chemistry*, 2009(22): 3291-3297.
- [23] Song J, Lin Y, Zhan Y, et al. Superlong High-Quality Tellurium Nanotubes: Synthesis, Characterization, and Optical Property [J]. *Crystal Growth & Design*, 2008, 8(6): 1902-1908.
- [24] Wang Z, Zhao B, Li J, et al. Interpolation, extrapolation, and truncation in computations of CIE tristimulus values [J]. *Color Research and Application*, 2017, 42(1): 10-18.
- [25] Gentili P L. The fuzziness of a chromogenic spirooxazine [J]. *Dyes and Pigments*, 2014, 110: 235-248.
- [26] Liu Cuige, Xu Yizhuang, Wei Yongju, et al. ciprofloxacin(CIP)spectral properties, protonation and fluorescence quantum yield [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2005, 25(9): 1446-1450. (in Chinese)  
刘翠格, 徐怡庄, 魏永巨, 等. 环丙沙星的光谱性质、质子化作用与荧光量子产率[J]. *光谱学与光谱学分析*, 2005, 25(9): 1446-1450.
- [27] Qian Fuli, Li Xueming, Tang Libin, et al. Potassium doping: Tuning the optical properties of graphene quantum dots [J]. *AIP Advances*, 2016, 6(7): 075116.

第一作者简介: 李斌 (1997-), 男, 硕士生, 就读于云南师范大学, 研究方向主要是量子点材料及其聚合物薄膜制备和光学性质研究。

通讯作者简介: 李学铭 (1978-), 女, 博士 (后), 副教授, 博士生导师。云南师范大学工作, 从事低维材料制备及性能研究。Email: lxmscience@163.com

通讯作者简介: 唐利斌 (1978-), 男, 博士 (后), 研究员级高级工程师 (正高), 博士生导师。昆明物理研究所工作, 从事光电材料与器件的研究工作, 科技带头人。Email: sscitang@163.com