第40卷，第11期
2020年11月

光谱学与光谱分析
Spectroscopy and Spectral Analysis

Vol. 40, No. 11, pp3409-3415
November, 2020

基于紫外光辐照条件下制备 ZnSe/ZnS 核壳结构量子点

张丛丛[1]，刘连栋[2]，夏　蕾[1]，李　学[3]，张晓凯[1*]

1. 山东师范大学物理与电子科学学院，山东 济南　250014
2. 山东师范大学化学化工与材料科学学院，山东 济南　250014
3. 济南大学化学化工学院，山东 济南　250022

摘　要　对传统的水相合成法进行改进，采用更加安全、简便、经济、环保的紫外光辐照方法在室温下合成了 ZnSe/ZnS 核壳结构量子点。调节 pH 值、光照时间、反应物配比等实验条件，优化了制备 ZnSe/ZnS 量子点核壳结构的最佳生长与修饰条件，使其具有良好色散、时间稳定性和发光特性。紫外线照射可以激发自由电子引发化学反应，研究使用了巯基乙酸(TGA)和谷胱甘肽(GSH)作为稳定剂和分散剂，用来控制 ZnSe 量子点的生长，得到分散均匀的 ZnSe 量子点。引入的光敏材料是形成 ZnS 的 S 源。利用 X 射线衍射(XRD)、电子显微镜(EM)、能量色散谱仪(EDX)、光致发光光谱(PL)和紫外可见光谱(UV-Vis)对量子点的晶体结构和光学性质进行了表征。结果表明，GSH 修饰的 ZnSe 量子点相比于 TGA 修饰的 ZnSe 量子点呈现出更好的稳定性与较少的表面缺陷。ZnS 的壳层生长能有效地弥补这一缺陷，但过厚的壳层会导致本征辐射的猝灭。该实验深入探索此类制备方法，并就各类影响因素和合成条件做出细致补充。实验结果结合理论分析得出 ZnSe/ZnS 核壳结构量子点的最佳合成条件。

关键词　量子点；紫外光辐照；核壳结构；谷胱甘肽修饰；硫化锌壳层
中图分类号：O657.3　　**文献标识码**：A　　**DOI**：10.3964/j.issn.1000-0593(2020)11-3409-07

引　言

近十年来，Ⅱ-Ⅵ族半导体纳米晶以其独特的光电特性和半导体特性，使得制备Ⅱ-Ⅵ族半导体纳米晶的研究成为跨学科研究的重要领域[1]。已经报道了从水沉淀法[2]到高温热注射法[3]等各种半导体纳米晶的合成方法。ZnSe 是一类重要的Ⅱ-Ⅵ族半导体材料，具有闪锌矿结构，低毒，且 2.7 eV 宽带隙，其发光带在紫外和蓝光范围以外。因此，它在发光二极管、传感器等基础研究等方面具有巨大的应用潜力[4]。可广泛应用于光电器件(如蓝绿激光)、荧光屏器件[5-6]、荧光探针[7]、医学成像[8]、太阳能电池[9]等领域。纳米 ZnSe 材料由于体积小，表现出比大块体积材料更优越的性能，但其具体应用受到形貌、尺寸、物象等因素的限制。因此，控制 ZnSe 纳米材料的形貌、尺寸和物象一直是研究的热点。在过去几十年里，CdSe 纳米晶体一直是生物标志物领域中最活跃的发光材料，Cd 基复合纳米晶体在这一领域中起着重要的作用。然而，含有镉重金属离子的纳米晶体的毒性在未来的生物学、医学和药学应用中存在着潜在的危险。ZnSe 纳米晶在基体选择上符合绿色环保要求。本实验借鉴了 Khafajeh 等光催化合成 ZnSe/ZnS 的试验方法，对水热法、巯基水相法、微波法等传统的水相合成法进行改进，摒弃了传统水相相合成法高温高压等苛刻的实验条件、昂贵的成本、复杂的操作步骤和可能对环境造成污染的副产物，采用常温常压下紫外光催化的水相合成法制备 ZnSe 量子点，并对 Khafajeh 等的实验进行补充与改进，加以三类修饰方法对比和讨论各条件对量子点合成的影响，结合理论分析对最优合成条件进行补充。对量子点表面进行修饰后，可提高其发光稳定性和量子产率，形成强的荧光发射。

1　实验部分

1.1　材料

二水合醋酸锌[$Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O$]、亚硒酸钠($Na_2SeO_3$)、巯基乙酸(TGA)、氢氧化钠(NaOH)和谷胱甘肽(GSH)。化学药品均为分析纯，未经进一步净化使用。

收稿日期：2020-04-07，**修订日期**：2020-07-13
基金项目：国家自然科学基金项目(51175069)，山东师范大学大型仪器设备开放基金项目(KFJJ2017008)资助
作者简介：张丛丛，女，1992 年生，山东师范大学物理与电子科学学院硕士研究生　　e-mail：1185058648@qq.com
*通讯联系人　　e-mail：minliyil@163.com

1.2 ZnSe 量子点的合成

实验采用紫外光辐照方法合成了 ZnSe 量子点。在 TGA 保护剂的作用下，实现醋酸锌与 Na_2SeO_3 反应生成 ZnSe 量子点的水相生长。在一个典型的反应中，将 0.065 9 g $Zn(Ac)_2$ 溶解在 50 mL 去离子(DI)水中，加入 0.1 mL TGA 作为封盖剂。加入氢氧化钠调整 pH 值到 9。将 0.017 3 g Na_2SeO_3 溶解于 30 mL DI 水中，然后将 Na_2SeO_3 溶液加入到 $Zn(Ac)_2$+TGA 或 $Zn(Ac)_2$+GSH 溶液中。将制备好的溶液置于波长为 365 nm 的紫外灯下室温照射 20 min 后，立即放入冰箱冷藏室中及时停止反应。相关反应如下：

$$Zn(Ac)2+Na_2SeO_3+TGA/GSH \xrightarrow[\text{illumination}]{UV} ZnSe\ QDs$$

图 1 描述了反应过程：制备好的 ZnSe 量子点原液与丙酮以 3∶1 的比例混合，量子点产生絮凝。用丙酮和去离子水快速洗涤沉淀的 ZnSe 量子点。使用 GSH 修饰 ZnSe 量子点的过程与上述没有太大差别。为保证实验结果的完美，将 $Zn(Ac)_2$ 调整为 0.065 9 g，GSH 调整为 0.122 8 g，Na_2SeO_3 调整为 0.017 3 g。pH 值维持在 9，照射时间调整为 23 min。

1.3 ZnS 壳层的生长

TGA/GSH 是一种对紫外线光敏感的材料，在紫外线照射下，TGA/GSH 会分解并释放 S^{2-}，为 ZnS 外壳的生长提

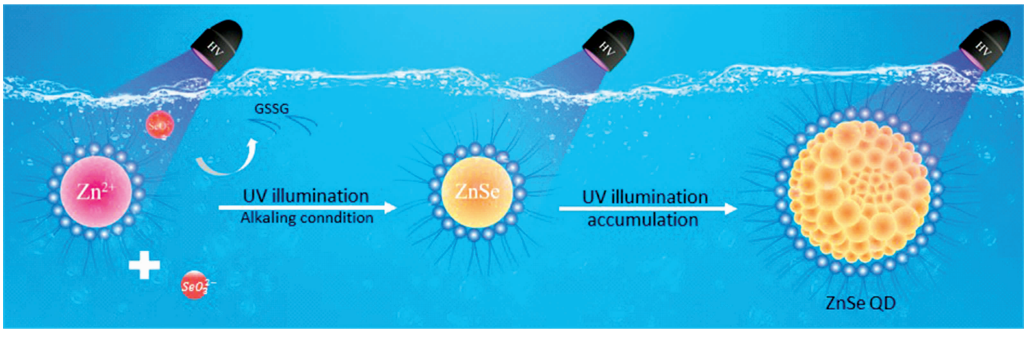

图 1 ZnSe 水相合成法反应过程模式图

Fig. 1 Reaction process pattern of ZnSe water phase method

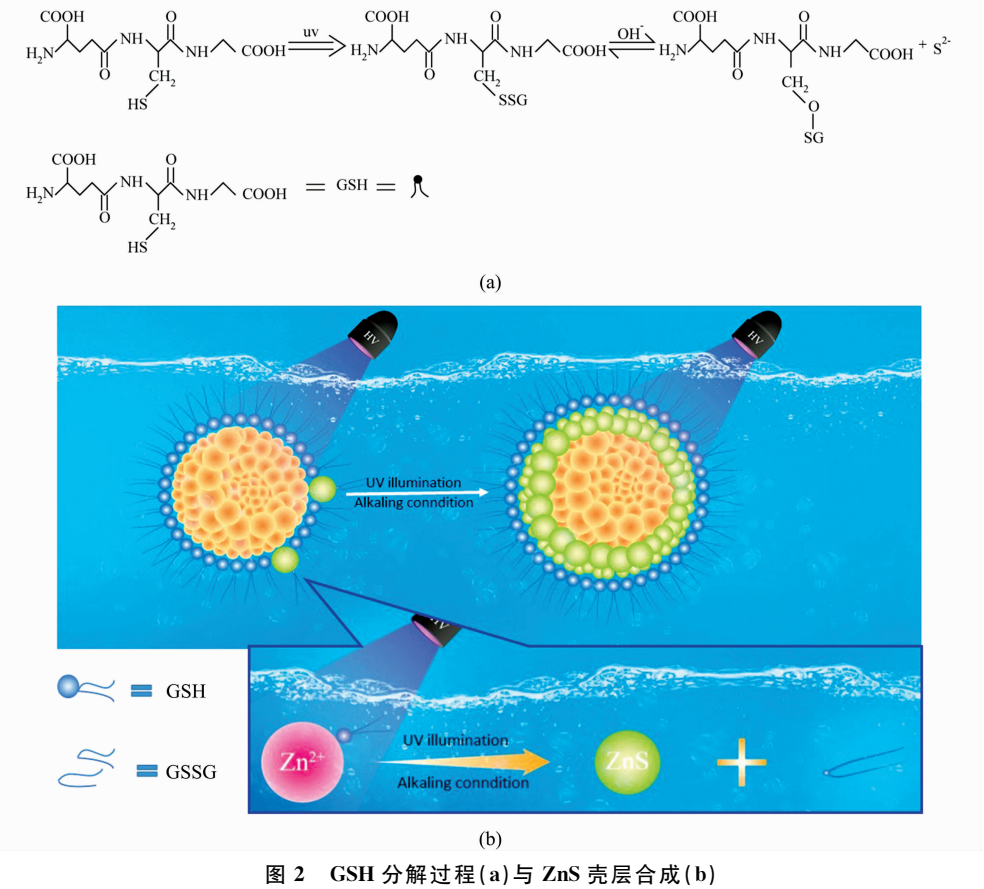

图 2 GSH 分解过程(a)与 ZnS 壳层合成(b)

Fig. 2 Synthesis of GSH decomposition (a) and ZnS shell synthesis (b)

供原料。事实上，TGA/GSH 同时起着盖层剂和 S 源的作用[10]。GSH 分解过程和 ZnSe/ZnS 量子点的形成如图 2 所示。0.13 g 真空干燥 ZnSe 量子点超声溶解于 10 mL 去离子水中。将制备好的 10 mL ZnSe 量子点溶液与 30 mL 去离子水混合，分别溶解 0.065 9 g $Zn(Ac)_2$ 和 0.122 8 g GSH。加入适量 NaOH，溶液 pH 值调整为 9。将制备好的 10 mL ZnSe 溶液缓慢加入溶液中，最后用波长为 365 nm 的紫外灯照射 30 min，后立即放入冷藏室停止反应。由于此项步骤中，反应物只有 $Zn(Ac)_2$ 和 GSH，GSH 分解可提供硫源，因此壳层为 ZnS。

1.4　仪器分析与表征

利用 X 射线粉末衍射仪 smart lab se 记录了 X 射线衍射(XRD)数据。能量色散谱仪(EDS)采用牛津仪器的 Swift ED3000。TEM 图像使用 H800 透射电子显微镜拍摄。采用 Bio-DL 微滴超微紫外分光光度计记录量子点的紫外吸收特性。用 FLS980 荧光分光光度计记录 PL 光谱。

2　结果与讨论

2.1　采用透射电镜观察量子点

将沉淀的 ZnSe 量子点和 ZnSe/ZnS 量子点用超声波清洗器分散 5 min，转速为 5 000 r·min^{-1}低速离心。吸取离心管底端溶液滴加到铜网上观察。图 3 显示了三种修饰状态下 ZnSe 量子点的形貌与尺寸。在这三种状态下，ZnSe 量子点呈现球状，分布较为均匀，呈单层分布。TGA 修饰的 ZnSe 量子点和具有核壳结构的量子点表面光滑，而 GSH 修饰的 ZnSe 量子点表面稍粗糙。经 TGA 修饰的 ZnSe 量子点倾向于附着在较大材料的边缘。图 3(a)，(b)和(c)分别为 ZnSe 量子点在三种状态下的分布状况。经 TGA 修饰的 ZnSe 量子点光照 15 min 和经 GSH 修饰的 ZnSe 量子点光照 23 min，其大小差别不大，平均直径为 4 nm。ZnSe/ZnS 核-壳结构的量子点平均直径为4.8 nm。与TGA修饰ZnSe量子点相比，GSH 修饰的 ZnSe 量子点表面更粗糙，比表面积更大，表面缺陷更明显。核壳结构很好地改变了 ZnSe 量子点的表面状态。

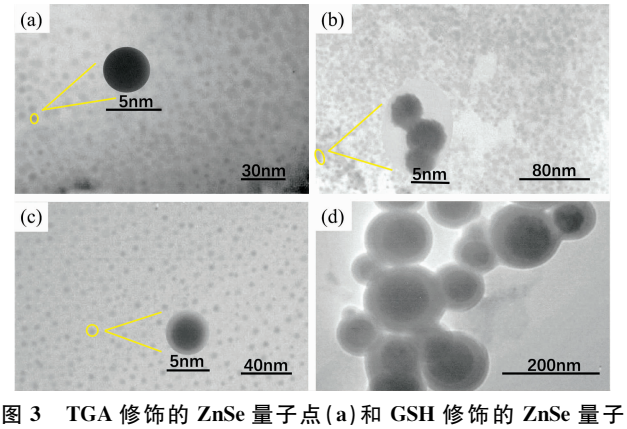

图 3　TGA 修饰的 ZnSe 量子点(a)和 GSH 修饰的 ZnSe 量子点(b)以及 GSH 修饰的 ZnSe/ZnS 核壳结构(c)和 ZnSe/ZnS 核壳结构(d)

Fig. 3　ZnSe quantum dots modified by TGA (a) and ZnSe quantum dots modified by GSH(b) as well as ZnSe/ZnS core-shell structure (c) and ZnSe/ZnS core-shell structure modified by GSH (d)

文献[9]报道，光照时间是控制 ZnSe 量子点尺寸的主要影响因素。为了进一步观察核壳结构变化，分别增加 ZnSe 核和 ZnS 壳的光照时间，出现了明显的核壳结构体积增大，如图 3(d)所示。由于不可控因素，如过长的光照时间，不完整的修饰状态导致了量子点体积生长至几十纳米，甚至更大，明显超出量子点尺寸范围，且有聚合倾向，并伴有不均匀增长现象。

2.2　X 射线衍射(XRD)分析

采用 XRD 对样品进行了观察。图 4 为 TGA 修饰的 ZnSe 量子点、GSH 修饰的 ZnSe 量子点、TGA 修饰的 ZnSe/ZnS 核壳结构型量子点和 GSH 修饰的 ZnSe/ZnS 核壳结构型量子点的 XRD 图谱。四条曲线上都有三个明显的峰，其中经 TGA 修饰的 ZnSe 量子点和 GSH 修饰的 ZnSe 量子点三峰位置相近，衍射角分别为在 27.7°，46.8°和 54.0°，对应(111)，(220)和(311)晶面，与(JCPDS 卡 80-0021)标准卡一致。TGA 修饰的 ZnSe/ZnS 核壳结构型量子点和 GSH 修饰的 ZnSe/ZnS 核壳结构型量子点也有三个不同的峰，且峰的位置十分接近，位置相对于 ZnSe 单量子点稍有偏移，三个峰值分别为 29.2°，47.5°和 56.3°。XRD 分析证实，ZnSe 单量子点表面存在 ZnS 晶格结构，ZnS 外延生长，形成独特的核-壳结构，而不是 ZnSe 与 ZnS 简单的混合[11]。ZnSe/ZnS 量子点 XRD 曲线的三个峰明显比 ZnSe 量子点的三个峰窄，这是由于 ZnSe 量子点在涂覆 ZnS 壳层后的粒径变大，衍射峰相对较窄。利用(111)面对应的峰值半高宽(FWHM)，利用式[12]计算量子点的大小：$D=\frac{k\lambda}{\beta\cos\theta}$。其中 D 为晶体尺寸，k 为常数，约为 0.89，λ 为 X 射线波长(0.154 nm)，β 为衍射峰的半高宽，θ 为衍射角。ZnSe 量子点的尺寸 D 约为 3.5 nm，ZnSe/ZnS 的尺寸 D 约为 4.2 nm。

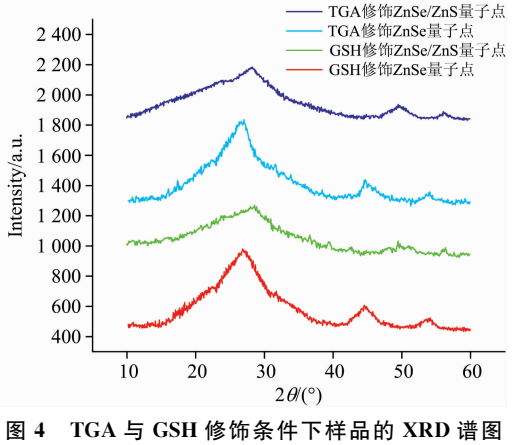

图 4　TGA 与 GSH 修饰条件下样品的 XRD 谱图

Fig. 4　XRD patterns of samples under TGA and GSH modification

2.3　能量色散(EDS)分析

将沉淀的 ZnSe 量子点用去离子水稀释 5 min，滴加样品，并真空干燥。图 5 显示了处于 GSH 修饰状态的 ZnSe 量

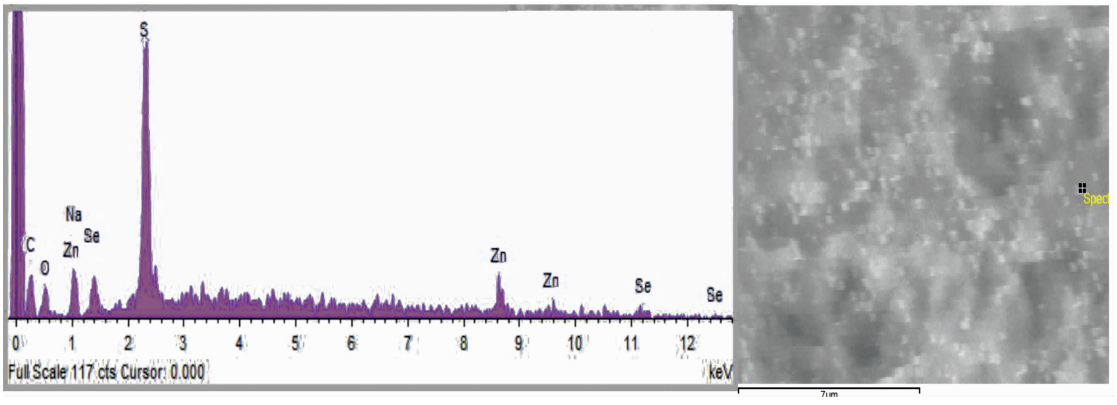

图 5 ZnSe 量子点元素组成分析

Fig. 5 Elemental composition analysis of ZnSe QDs

子点。锌元素与硒元素物质量比为 1∶1，所得结果与合成粒子的化学组成相一致。

2.4 光学特性

将沉淀的 ZnSe 量子点和 ZnSe/ZnS 核壳结构量子点用去离子水稀释后静置 5 min，以 5 000 r·min^{-1}的转速低速离心得到下清液，用于检测光学性质。参考 Dr. F. Dehghan 的研究，获得了最佳的 TGA 修饰的 ZnSe 量子点。图 6(a,b)为不同 pH 条件下 GSH 修饰下 ZnSe 量子点的光致发光(PL)。结果表明，在 pH 值为 9 时，GSH 修饰 ZnSe 量子点的发光效果最好。在 pH 值小于 6 和大于 11 时电子显微镜下没有观察到 ZnSe 量子点的存在。在强酸性 pH<6 时，因为谷胱甘肽巯基上的质子不易解离，因此不能很好的与 Zn^{2+} 形成配合物，这样造成 Zn^{2+} 与 NaOH 结合成 $Zn(OH)_2$，所以此时 NaOH 的加入使得 Zn^{2+} 量急剧减少，这时如果不能形成 Zn^{2+} 的配合物，对 ZnSe 量子点的合成是极为不利。相反，当 pH>11 时，Zn^{2+} 的数量再次减少，因为 Zn^{2+} 与 OH^- 在溶液中结合形成 $Zn(OH)_2$，也降低了 Zn^{2+}-GSH 配合物在溶液中的浓度。当 pH=9 时，形成配合物的 Zn^{2+} 来源于 $Zn(OH)_2$，溶液中的 Zn^{2+} 不再被消耗，因此 Zn^{2+} 的浓度保持在接近平衡位置。

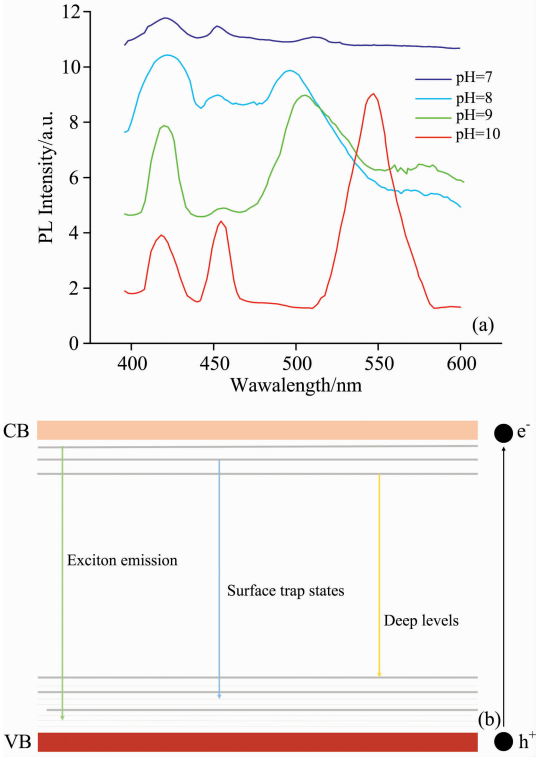

图 6 不同 pH 下 ZnSe 量子点的光致发光状态(a) ZnSe 量子点电子跃迁模式图(b)

Fig. 6 Photoluminescence of quantum dots at different pH (a) and ZnSe electron transition mode (b)

图 7(a,b)为不同光照时间对 ZnSe 量子点光学性质的影响。如果光照时间过短，成核不明显容易附着和聚集，导致比表面积增大，表面缺陷严重。过长的光照时间增加了新的成核中心的附着等不确定性，导致表面缺陷再次增加。由于上述原因，表面缺陷的荧光随着光照时间的增加先减小后增大。随着光照时间的延长，吸收光谱出现了明显的红移[图 7(b)]，这是因为 ZnSe 量子点体积的增大引起了斯托克斯位移。光照时间短，形成的核心不明显，表面缺陷严重。过多的光照时间导致 ZnSe 量子点[13]体积过大。

图 8(c)展示了不同组分对 ZnSe 量子点光学性能的影响。光照 23 min，Zn∶GSH∶Se=3∶4∶1 时 ZnSe 量子点荧光效果最好。Se 浓度越高，成核中心越多，ZnSe 量子点生长速率越快。电子显微镜观察到高浓度 Se 的配比要比低浓度表现出较大尺寸。因此，Se 的摩尔浓度并不是形成 ZnSe 量子点的决定性因素，但它对成核状态和后续的生长有很大的影响。Se 的浓度过大 ZnSe 量子点在生长时出现的表面缺陷也会更多。当 ZnSe 量子点具有较大的比表面积时，其表面会出现许多不同类型的悬空键或非饱和键，从而在带隙中形成一些缺陷能级。当硒的摩尔比较大时，合成的 ZnSe 量子点存在较大的表面缺陷，分离出的产物与单质硒混合，如图 8(a)所示。同时，考虑到量子点在应用过程中需要明显的吸收峰，最合适的合成比例是 Zn∶GSH∶Se=3∶4∶1。

—COOH 基团不仅提高了量子点的稳定性，而且提高了量子点的亲水性和分散性。但是，如果 GSH 浓度过高，则会引起架桥作用[14]导致量子点的聚集。如图 8(b)所示。

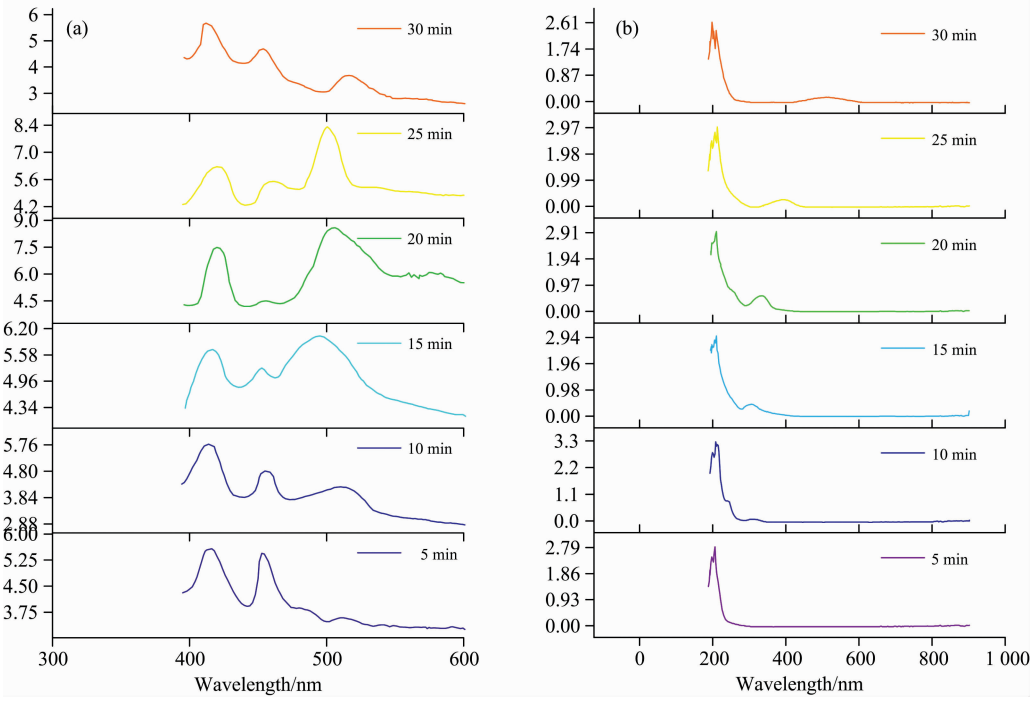

图 7　不同光照时间下 ZnSe 量子点的发射(a)和吸收(b)曲线

Fig. 7　Emission (a) and absorption (b) of ZnSe QDs at different illumination times

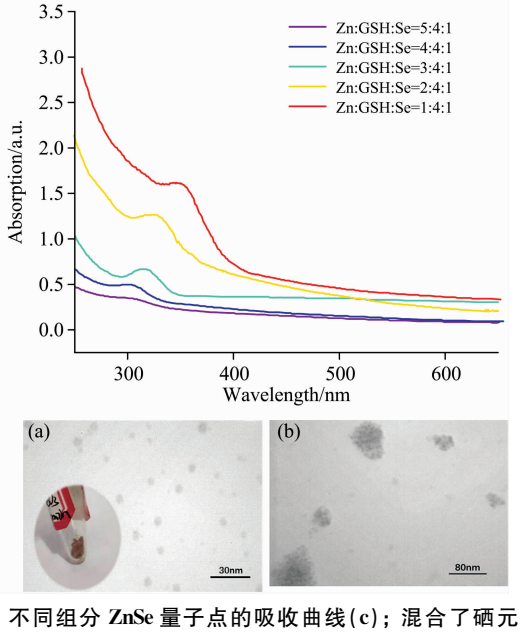

图 8　不同组分 ZnSe 量子点的吸收曲线(c)；混合了硒元素的 ZnSe 量子点和富硒条件下产生的 ZnSe 量子点的电子显微镜图像(a)；由于架桥作用而聚集的 ZnSe 量子点(b)

Fig. 8　Absorption of ZnSe ODs at different components; production of containing selenium elemental and electron microscopy images in selenium rich condition (a); Quantum dots gatheredbecause of bridging (b)

图 9(a—g)为经 TGA 修饰的 ZnSe 量子点和经 GSH 修饰的 ZnSe 量子点时间稳定性的对比。在低温条件下，经 TGA 修饰的 ZnSe 量子点溶液在 3 天后变为黄色，随后出现黑灰色沉淀，紫外检测未见吸收峰，说明 ZnSe 量子点均被氧化并产生沉淀。荧光性质明显降低。在室温下，溶液在空气中暴露约 10 min 后变为橙红色悬浊液，25 min 后变为浅灰色，并出现黑色沉淀。这是因为生成的 ZnSe 量子点不稳定，在室温下容易被氧化成硒单质。从红色到灰色再到黑色的颜色变化是纳米硒向更稳定的形态转变所表现出来的颜色变化。溶液在室温下暴露约 10 min 后变黄，15 min 后变黑，这正是由于稳定性差导致氧化造成的。经 GSH 修饰的 ZnSe 量子点在低温下保持半个月宏观未发生明显变化。因此，GSH 修饰的 ZnSe 量子点比 TGA 修饰的 ZnSe 量子点更稳定。半个月后，GSH 修饰的 ZnSe 量子点白色沉淀呈微黄色，但溶液的荧光性质和吸收曲线变化不大，如图 10 所示。说明 GSH 修饰的 ZnSe 量子点稳定性优于 TGA 修饰的 ZnSe 量子点。

核-壳结构能明显改善 ZnSe 量子点的表面缺陷。与 ZnSe 相比，ZnS 具有更高的导带和更低的价带。ZnSe/ZnS 为 Ⅰ 型核-壳结构，GSH 被选为 ZnSe/ZnS 核-壳结构生长的保护剂[15]。ZnSe/ZnS 核壳结构电子跃迁模式如图 11(a)所示。从图 11(b)可以看出，ZnSe/ZnS 核壳不仅比 GSH 修饰的 ZnSe 量子点的发光强度有了明显的提高，而且对表面缺陷也有明显的修饰作用。具有核-壳结构的 ZnSe/ZnS 量子点在低温下两个月仍保持澄清和稳定，荧光状态没有明显变化。

3　结　论

(1) 实验比较了 TGA，GSH 和 ZnSe/ZnS 核壳结构三种修饰状态下ZnSe量子点的尺寸大小、分布的均匀性、表面

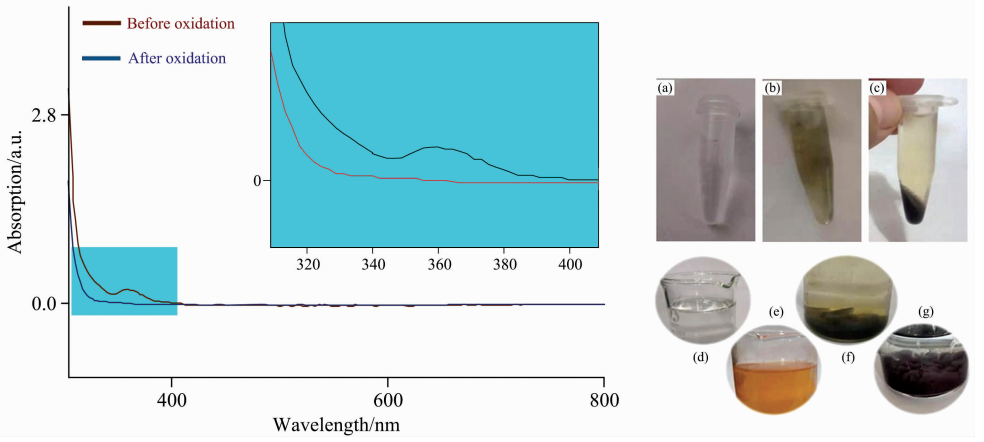

图 9 TGA 修饰的 ZnSe 量子点在 4 ℃ 下的宏观变化(a)→(b)→(c)；TGA 修饰的 ZnSe 量子点在室温条件下的宏观变化(d)→(e)→(f)→(g)；TGA 修饰的 ZnSe 量子点氧化前后吸收曲线的对比(h)

Fig. 9 The variation trend of TGA-modified ZnSe QDs with time is (a)→(b)→(c) at 4 ℃; The variation trend of TGA-modified ZnSe QDs with time is (d)→(e)→(f)→(g) atroom temperature; Absorption curves of TGA-modified QDs before and after oxidation (h)

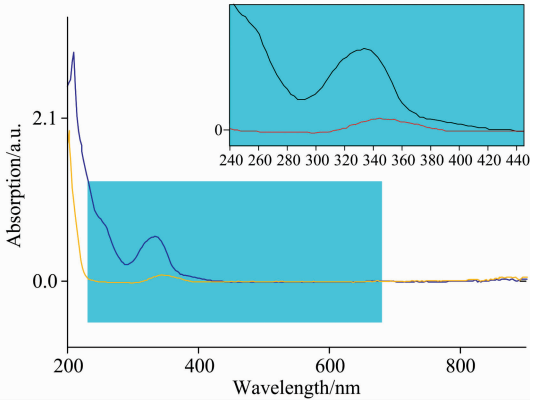

图 10 GSH 修饰的 ZnSe 量子点氧化前后吸收曲线的对比

Fig. 10 Absorption curves of GSH-modified QDs before and after oxidation

缺陷和时间稳定性。(2) 得出了 ZnSe 量子点最佳修饰条件为 GSH 修饰的 ZnSe/ZnS 核壳结构和最佳生长条件：室温下 pH=9，生长时间 23 min，锌：谷胱甘肽：硒三种反应物的摩尔比率 3∶4∶1。(3) 制备的 ZnSe 量子点均一稳定，在电子显微镜下可观察到单层 ZnSe 量子点薄膜。(4) 实验结果证实，核-壳结构不仅可以增强 ZnSe 量子点的荧光特性，而且可以减弱其表面缺陷。结果表明，GSH 修饰的 ZnSe/ZnS 核-壳结构的荧光性质提高了一倍，时间稳定性提高了 10 倍以上，抗氧化能力增强。

因此，在 ZnSe 量子点合成后再生长一个 ZnS 壳层，并对量子点进行进一步的修饰，是提高其稳定性和发光特性的好方法。

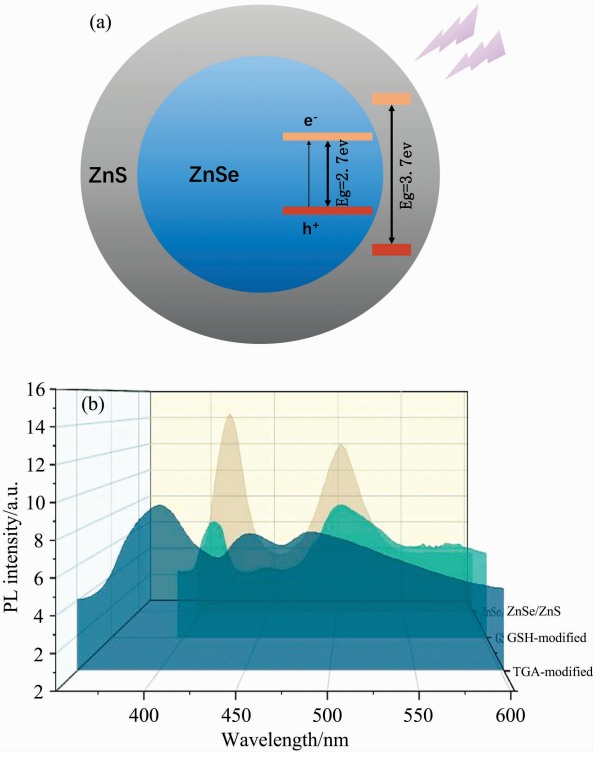

图 11 ZnSe/ZnS 核-壳结构的电子跃迁模式图(a)及不同修饰条件下的发光状态比较(b)

Fig. 11 Electron transition pattern of ZnSe/ZnS core-shell structure (a) and comparison of luminescence states under different modification conditions (b)

References

[1] Smruti Das B P W, Laurene Tetard. Environmental Science: Nano, 2015, 2: 203.
[2] Dhanya A C, Deepa K, Remadevi T L. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2013, 24(12): 4782.
[3] Wickham J A, Kadavanich A P, Andreas. Nature, 2000, 404: 59.
[4] Khafajeh R, Karimipour M. Luminesence, 2016, 32: 581.
[5] Ravindran S C, Colburn B, Ozkan M, et al. Nano Lett., 2003; 3: 447.
[6] Luo G Q, Chen K, Zou M, et al. Adv. Funct. Mater., 2016, (26): 2739.
[7] Yu D, Qi Y, Ding S, et al. Sensors and Actuators B: Chemical, 2016, 235: 394.
[8] Michalet X, Bentolila L A, Tsay J M, et al. Science, 2005, 307: 538.
[9] Jin Shan, Gu Zhanjun, Liu Lei, et al. Journal of Nanomaterials, 2014, 4(1): 11.
[10] Amirian F, Molaei M, Karimipour M, et al. Journal of Luminescence, 2018, 196: 174.
[11] Lin M W, Wei L, Song X, et al. Journal of Alloys and Compounds, 2011, 509(33): 8356.
[12] Klong H P. X-Ray Diffraction Procedures for Crystalline and Amorphous Materials. Wiley, NewYork, 1954, 2: 1-137.
[13] Zhu H, Hu M Z, Shao L, et al. Journal of Nanomaterials, 2014, 2014: 1.
[14] Chan W C, Gao X, Bailey R E, et al. Current Opinion in Biotechnology, 2002, 13: 40.
[15] Premkumar S, Nataraj D, Bharathi G, et al. Sci. Rep., 2019, 9(1): 18704.

Preparation of ZnSe/ZnS Core-Shell Quantum Dots Under UV Irradiation

ZHANG Cong-cong[1], LIU Lian-dong[2], XIA Lei[1], LI Xue[3], ZHANG Xiao-kai[1*]
1. School of Physics and Electronics, Shandong Normal University, Ji'nan 250014, China
2. School of Chemical Engineering and Materials Science, Shandong Normal University, Ji'nan 250014, China
3. School of Chemical Engineering and Materials Science, University of Ji'nan, Ji'nan 250022, China

Abstract In order to improve the traditional water phase method, ZnSe/ZnS core-shell quantum dots were synthesized at room temperature by ultraviolet irradiation method, which is more safe, simple, economical and environmentally friendly. The optimal growth and modification conditions for the core-shell structure of ZnSe/ZnS QDs were optimized by adjusting the experimental conditions such as pH value, illumination time and reactant ratio, so that it has good dispersion, time stability and luminescent properties. Ultraviolet irradiation can stimulate free electrons to trigger chemical reactions. In this study, thioglycolic acid (TGA) and glutathione (GSH) were used as both stabilizers and dispersants to control the growth of QDs and obtain evenly dispersed QDs. The introduced photosensitive material is also the S source to form ZnS. The crystal structure and optical properties of QDs were characterized by X-ray diffraction (XRD), electron microscopy (EM), Energy Dispersive X-ray spectroscopy (EDX), photoluminescence spectroscopy (PL) and UV-Vis. The results show that GSH-modified QDs have better stability and fewer surface defects than TGA-modified QDs. ZnS shell growth can effectively improve this defect, but the over-thick shell will lead to a risk of quenching the intrinsic radiation. This experiment explored this preparation method in-depth, and for the first time, various influencing factors and synthetic conditions were supplemented. Based on the analysis of the theory and the experiment results, the optimal synthesis conditions of ZnSe/ZnS core-shell quantum dots are obtained.

Keywords Quantum dots (QDs); Ultraviolet irradiation; Core-shell structure; Glutathione modification; Zinc sulfide shell

(Received Apr. 7, 2020; accepted Jul. 13, 2020)

* Corresponding author