

Photo-Luminescence Properties of Doubly-Doped Mn^{2+} , Eu^{3+} , and Y^{3+} Ag_2S

Lingyu Wang, Shengtao Lu, Tiansheng Gu, Xingping Zhou

College of Chemistry, Chemical Engineering and Biotechnology, Donghua University, Shanghai
Email: xpzhou@dhu.edu.cn, 2150439@mail.dhu.edu.cn

Received: Jan. 10th, 2018; accepted: Jan. 22nd, 2018; published: Jan. 30th, 2018

Abstract

Silver sulfide nanoparticles doubly-doped with ions have been prepared by the oil-water interface method. The influence of Mn^{2+} , Eu^{3+} and Y^{3+} on the luminescent properties of silver sulfide has been studied. The X-ray diffraction pattern shows that the doped silver sulfide nanoparticles are all α - Ag_2S crystals, which does not change the crystal form and crystal structure of silver sulfide. The TEM diagram shows that the prepared silver sulfide nanoparticles are evenly dispersed and the particle size is 15.0 nm. The UV spectra and the energy band gap diagrams show that the doping can change the band gap of the material and affects the optical properties. It can be seen from the fluorescence patterns that by controlling the kind and concentration of doped metal ions, the fluorescence intensity of the composites will change correspondingly, resulting in the quantum confinement effect, which further regulates the optical properties of the composite nanoparticles. Overall, the luminescent materials of doped ions prepared by the oil-water interface method can change the energy band gap and regulate the luminescence properties.

Keywords

Nano- Ag_2S , Ions Doping, Fluorescence Intensity

双掺杂 Mn^{2+} 、 Eu^{3+} 、 Y^{3+} 离子硫化银纳米颗粒发光性能研究

王玲玉, 陆胜涛, 顾天生, 周兴平

东华大学化学化工与生物工程学院, 上海
Email: xpzhou@dhu.edu.cn, 2150439@mail.dhu.edu.cn

收稿日期: 2018年1月10日; 录用日期: 2018年1月22日; 发布日期: 2018年1月30日

文章引用: 王玲玉, 陆胜涛, 顾天生, 周兴平. 双掺杂 Mn^{2+} 、 Eu^{3+} 、 Y^{3+} 离子硫化银纳米颗粒发光性能研究[J]. 物理化学进展, 2018, 7(1): 1-8. DOI: 10.12677/japc.2018.71001

摘要

本文用油-水界面法制备了双掺杂金属离子硫化银纳米颗粒,并研究了掺杂 Mn^{2+} 、 Eu^{3+} 、 Y^{3+} ,对其发光性能的影响。X射线衍射图谱表明:掺杂硫化银纳米颗粒均为 $\alpha-Ag_2S$ 晶型,未改变硫化银的晶型及晶体结构;由TEM图可见制备的硫化银纳米颗粒分散均匀,粒径为15.0 nm。同时,由紫外光谱及其能量带隙图分析可知,掺杂可以改变颗粒的带隙宽带,从而影响光学性能;由荧光图谱可得,通过控制掺杂金属离子的种类和浓度,复合材料的荧光强度会发生相应的变化,从而产生量子限域效应,进一步调控量子点的光学性能。以上分析说明了油-水界面法制备的荧光材料掺杂后可以改变其能量带隙并调节发光性能。

关键词

纳米 Ag_2S , 掺杂离子, 荧光强度

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

过渡或稀有金属离子(Mn^{2+} , Eu^{3+} , Y^{3+})掺杂 CdS, CdSe, ZnS 和 Ag_2S 等量子点在发光二极管,生物荧光标记和新型太阳能电池等领域有着广阔的前景[1] [2]。荧光量子点有很多优异的性能,比如高的光化学稳定性,大斯托克斯位移,荧光寿命长,宽激发光谱,和窄的发射光谱等,因而受到越来越多科研工作者的关注。量子点的发光性质是由电子、空穴以及它们周围环境的相互作用而引起的,当激发能级超过带隙时,量子点就会吸收光子使电子从价带跃迁到导带,导带上的电子还可以再跃迁回价带,使发射光子进而产生荧光效应[3]。在已有的报道中,紫外或者可见波长范围的光常被作为量子点的激发光源。然而,紫外以及可见波长范围的光能量较高可能会对生物组织产生损伤[4],因此在生物医学领域,紫外和可见波长的光都不适合作为激发光源。相比较而言,以近红外光作为激发光源的量子点则没有以上的缺点,因此合成可以被近红外光源激发的量子点材料有很重要的意义。目前多数量子点均为重金属硫化物硒化物量子点,由于含有重金属有毒离子,使其难以广泛应用。因此,迫切需要生产一种近红外量子点,既有优良的光化学性能,强的组织穿透性,而且低毒或无毒,以便在活体生物标记及成像领域、光电子材料等领域得以应用。硫化银是一种化学稳定性高的窄带隙半导体材料,具有较好的光电、热电、光吸收和光催化性能,在光催化、光电池、光电导元件以及荧光成像等领域中有着独特的应用[5]。掺杂硫化银不仅具有硫化银本身的理化性能,毒性小,而且因掺杂可获得近红外光的荧光标记材料,能够促进其应用尤其是在活体生物成像领域的应用。

目前报道的量子点主要是由 II-VI 族(如 CdS、CdSe、CdTe)元素组成的均一或核/壳结构(如 CdS/HgS/CdS)的纳米颗粒, CdHgTe/ZnS, CdTe/CdSe, ZnTe/CdSe, CdTeSe, 和 CdHgTe 等各种近红外量子点材料已被成功合成。然而,目前多数量子点都为重金属硫化物、硒化物量子点,由于含有重金属有毒离子,使其难以广泛应用。油-水界面法合成单分散无机纳米晶,是指在一定的条件下,合成原料分别来自上层油相和下层水相,它们由于分子的热运动而扩散至油-水界面层,从而使溶质单体在油-水界面层组装成核生长,使其具备一些特殊的性质而得到广泛的关注。本文采用油-水界面法合成双掺

杂 Mn^{2+} 、 Eu^{3+} 和 Y^{3+} 离子的硫化银纳米颗粒，具有操作简单、反应条件温和、成本低以及无需焙烧等优点，同时研究和分析了其光学级发光性能等。

2. 实验部分

2.1. 实验原料

硬脂酸钠(AR, 国药集团化学试剂有限公司, 99.0%); 硝酸银(AR, 上海精细化工研究所, 99.9%); 油酸(AR, 国药集团化学试剂有限公司, 99.0%); 环己烷(AR, 国药集团化学试剂有限公司, 99.5%); 九水·硫化钠(AR, 国药集团化学试剂有限公司, 99.0%); 氧化铈(AR, 国药集团化学试剂有限公司, 99.0%); 硫酸锰(AR, 国药集团化学试剂有限公司, 98.0%); 六水硝酸钇(AR, 国药集团化学试剂有限公司, 99.0%); 硬脂酸银、硬脂酸锰、硬脂酸铈、硬脂酸钇(本实验室自制)。

2.2. 仪器与设备

磁力加热搅拌器(S21-2, 上海司乐仪器); 电热恒温鼓风干燥箱(DHG-9140A 型, 上海一恒科学仪器有限公司); 超声波清洗器(SK1200H 型, 上海科导超声仪器有限公司); 紫外分光光度计(V-530, JASCO, Japan); 荧光分光光度计(F-4500, HITACHI, Japan); 高速离心机(Centrifuge5810, 德国艾本德股份公司); 透射电子显微镜(TEM, H-800 型, 日本 HITACHI 公司); X 射线衍射仪(XRD, D/max-2550PC 型, 日本 Rigaku 公司)。

2.3. 硬脂酸银、硬脂酸锰、硬脂酸铈、硬脂酸钇等材料的制备

称取 0.015 mol (4.597 g)硬脂酸钠放入烧杯中, 加入 500 ml 去离子水, 放入磁子, 开启磁力搅拌, 升温到 40℃, 使溶液变为澄清透明。称取 0.015 mol (2.63 g)硝酸银溶于 100 ml 烧杯中, 加入 50 ml 水, 搅拌均匀。将溶解的硝酸银缓慢加入到硬脂酸钠溶液中, 开启磁力搅拌, 反应 1 h。反应完全后, 抽滤产品, 用去离子水和乙醇各洗 2 遍, 把最终产物放入干燥箱中, 65℃烘烤 24 h 后得到较纯的硬脂酸银。同理, 使用硫酸锰、氧化铈、硝酸钇替换硝酸银, 可得到硬脂酸锰、硬脂酸铈和硬脂酸钇原料[6]。

2.4. 掺杂离子的硫化银复合材料的制备

将一定量的硬脂酸铈(或硬脂酸锰或硬脂酸钇)与 1.24 g 硬脂酸银加入到三口烧瓶中再加入环己烷和油酸混合加热熔融, 冷凝回流, 搅拌至无色透明溶液, 然后缓慢滴加一定量的九水硫化钠溶液, 并充分搅拌使溶液分散在熔融的环己烷溶液中; 然后将混合液转移至高压反应釜中 180℃保温 2 h, 冷却后用无水乙醇和去离子水交替洗涤, 用离心机进行离心三次, 再将沉淀转移至电热恒温鼓风干燥箱干燥, 得到掺杂相应离子的样品。

2.5. 测试与表征

2.5.1. 透射电镜显微镜测试(TEM)

取清洗后的上层油相 1 ml 分散在 25 ml 环己烷中, 超声分散 30 min, 滴数滴在超薄铜网上, 风干, 采用日本 HITACHI 公司 H-800 型透射电子显微镜观察其形貌、分散程度及颗粒大小等。

2.5.2. 紫外分光光度法测试

移取上述分散的油相放置在石英皿中, 使用 JASCO V-530 紫外可见分光光度计测被吸收光的波长和强度等信息, 并在下式基础上对样品进行光学性能分析:

$$(\text{ah}\nu)^2 = A(\text{h}\nu - E_g) \quad (1)$$

其中 a 是吸收系数, A 是常数, E_g 是颗粒的带隙宽度。

2.5.3. 荧光分光光度法测试

采用 Hitachi 公司 FL-4500 型荧光分光光度计, 测试样品光的波长和强度, 得到荧光光谱。

2.5.4. X 射线衍射测试(XRD)

采用日本 Rigaku 公司的 D/max-2550PC 型 X 射线衍射仪对样品进行测定, 采用 Cu-K α 射线光源, 管压为 40.0 kV, 管电流为 200 mA, 扫描速度 4°/min, 扫描角度为 5°~70°。

3. 结果与讨论

3.1. 掺杂样品的 XRD 图和双掺杂硫化银纳米颗粒的 TEM 图

掺杂不同离子硫化银纳米颗粒的 XRD 及 TEM 图谱如图 1 所示。

由图 1(a)可以看出掺杂不同的离子对硫化银的晶体结构没有影响, 产物的衍射峰的峰位 2θ 为 28.945, 31.550, 34.370 和 40.700 均与硫化银 JC-PDS(No.14-1072)中{111}, {-112}, {-121}和{031}相一致, 为单斜结构, 都属于 α -Ag $_2$ S 晶型。同时, 衍射峰的宽化为材料尺寸纳米化所致, 这说明 Mn $^{2+}$, Eu $^{3+}$, 或 Y $^{3+}$ 已掺入到 Ag $_2$ S 基质中, 占据 Ag $^+$ 的晶格位置, 并形成和 Ag $_2$ S 相同的晶体结构。图 1(b)是本实验所得硫化银的 TEM 图, 可以看出颗粒形状近似球形, 分散均匀, 经统计计算其平均粒径为 15.0 nm。

3.2. 硫化银复合结构能带性能探究

室温下油性纳米硫化银的紫外吸收图谱如图 2 所示。与大块硫化银相比, 产物的紫外可见吸收峰明显蓝移, 展示了其显著的量子尺寸效应。将油性纳米硫化银的紫外可见吸收曲线转换可得到如图 2(b)所示的 $(ah\nu)^2-E_{hv}$ 曲线。将曲线的直线部分外推至 $a = 0$, 即得油性纳米硫化银的直接跃迁禁带宽度为 4.1 eV。显然, 与大块硫化银($E_g = 1.0$ eV) [7]相比, 本次制备的纳米硫化银的禁带宽度明显增大。造成这种现象的原因, 主要来自于以下两个方面: 第一, 由于亲油性纳米硫化银颗粒的平均直径较小, 为 15.0 nm, 具有明显的纳米尺寸效应, 可以增加材料的禁带宽度; 第二, 颗粒为非规则球形, 其光学性能与其最小部位的具体形貌有关, 其相应的半导体禁带宽度可受该部位几何尺寸大小的直接影响。

从图 3 中可以看出, 随着不同含量 Mn $^{2+}$ 的加入, 将纳米硫化银的紫外可见吸收曲线转换可得到如图 3(b)所示的 $(ah\nu)^2-E_{hv}$ 曲线, 将曲线的直线部分外推至 $a = 0$, 即得掺杂锰的纳米硫化银的直接跃迁禁带宽度分别为 3.83 eV、3.49 eV、3.67 eV。随含量的增加, 带隙宽度在减小, Mn $^{2+}$ 进入 Ag $^+$ 的间隙中填充其小的空隙, 在 3%时带隙宽度最小, 可知为颗粒内部最大应力时。因在粒径减小的同时颗粒内部会发生挤压, 彼此之间的作用力在增强, 能带的结构随之变化, 彼此的电子波函数相互重叠的部分在加大, 使得晶体的带隙宽度减小, 半导体电子由低级向高级跃迁, 从导带到达价带时引起光吸收带和吸收边红移。

由图 4 可以看出, 在掺杂 Mn $^{2+}$ 和 Eu $^{3+}$ 的紫外可见吸收曲线转换可得到如图 4(b)所示的 $(ah\nu)^2-E_{hv}$ 曲线, 将曲线的直线部分外推至 $a = 0$, 禁带宽度分别为 3.83 eV、3.92 eV, 可能是因为 Mn $^{2+}$ 的离子半径(0.67 Å)小于 Eu $^{3+}$ 的离子半径(0.95 Å), 可以更容易的进入 Ag $^+$ 的间隙, 所受作用力不同, 而能带改变。由此可知, 掺杂不同含量不同离子可以改变不同的禁带宽度, 从而可推断出掺杂不同的量, 得到的能带不同[8]。

3.3. 掺杂对硫化银纳米颗粒发光性能的影响

掺杂性纳米材料是指在传统纳米材料中掺入过渡金属离子或稀有金属离子, 从而增强传统纳米材料的发光性能。

由图 5 不同 Eu $^{3+}$ 掺杂量荧光曲线可见, 在激发波长为 390 nm 掺杂 Eu $^{3+}$ 时, 复合物发出的 765 nm 处

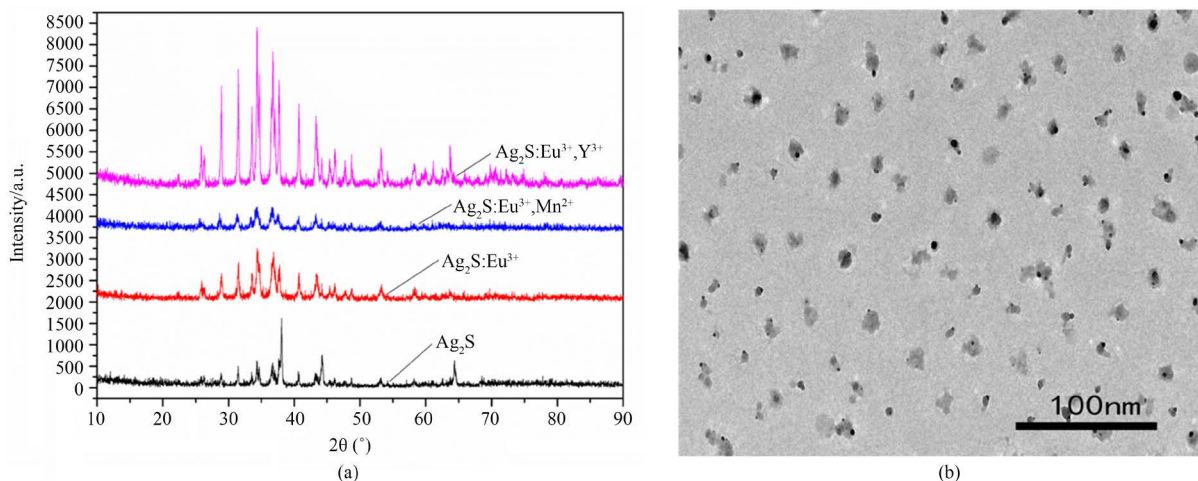


Figure 1. (a) XRD diagrams of silver sulfide doped with different ions; (b) TEM image of nano silver sulfide obtained by the oil-water interface method

图 1. 掺杂不同离子硫化银所得的 XRD 图(a)和油-水界面法制得的纳米硫化银的 TEM (b)

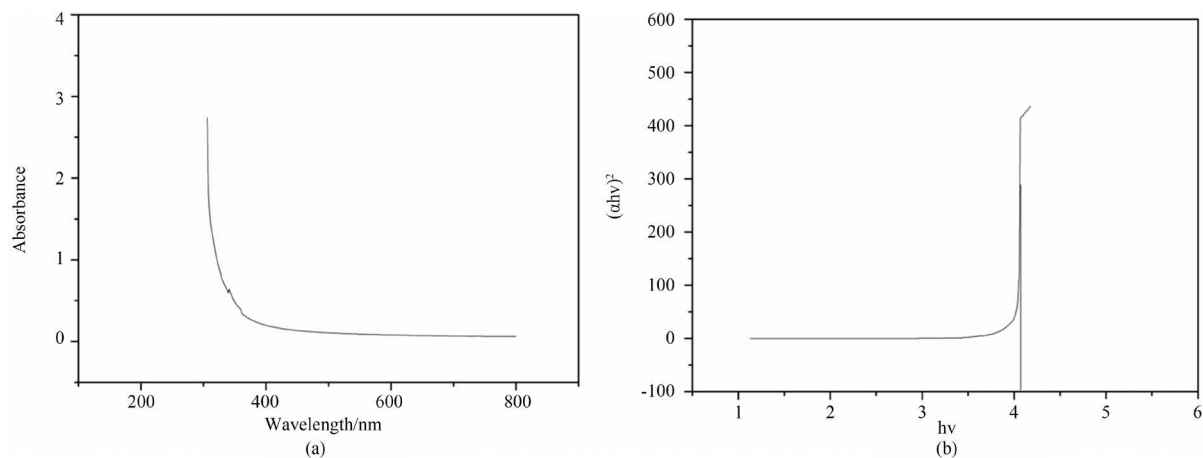


Figure 2. UV absorption curves (a) and E_g calculation diagrams (b) of silver sulfide nanoparticles

图 2. 硫化银纳米粒子的紫外吸收曲线(a)及 E_g 计算图(b)

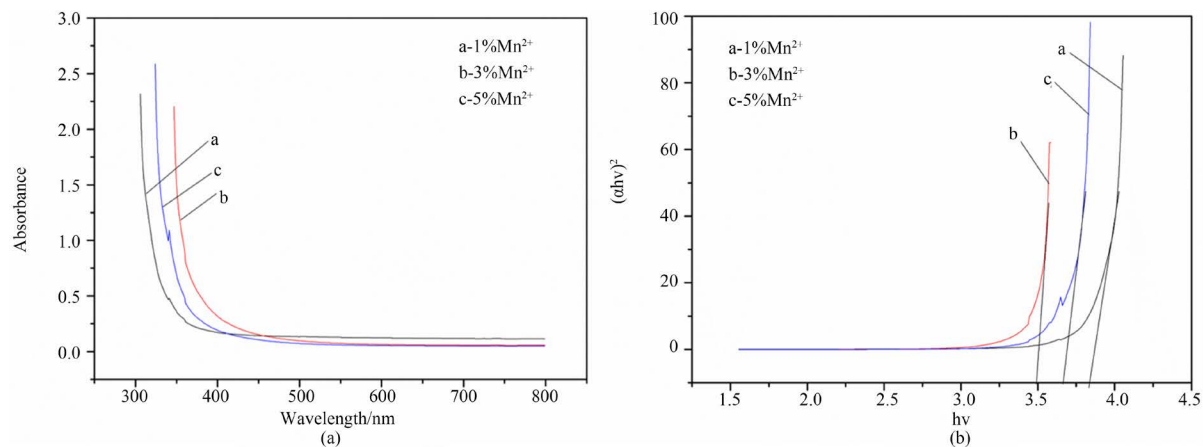


Figure 3. UV absorption curves (a) and E_g calculation diagrams (b) of silver sulfide nanoparticles doped with different contents of Mn^{2+}

图 3. 掺杂不同含量 Mn^{2+} 的硫化银纳米粒子的紫外吸收曲线(a)及 E_g 计算图(b)

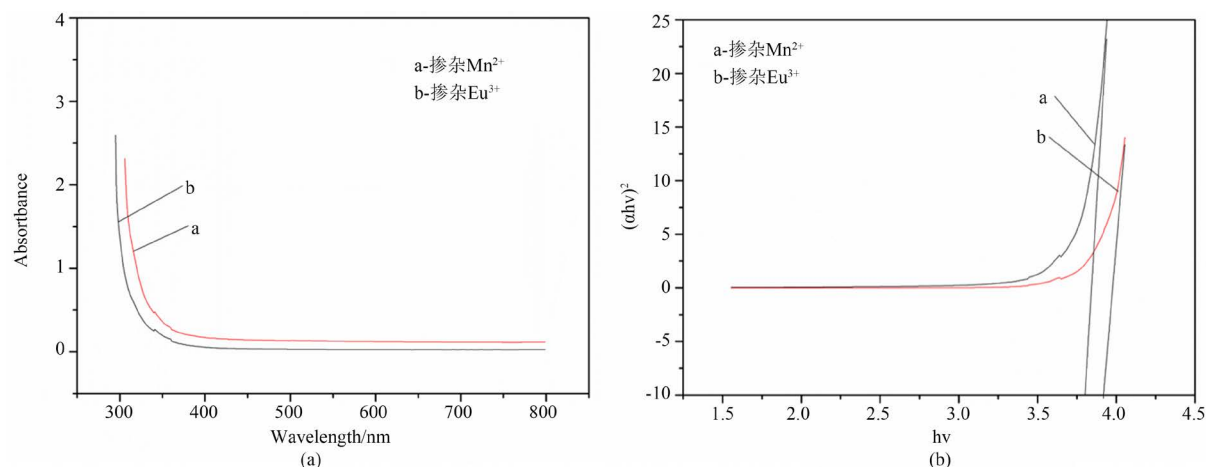


Figure 4. UV absorption curves (a) and E_g calculation diagrams (b) of silver sulfide nanoparticles doped with different ions
图 4. 掺杂不同离子的硫化银纳米粒子的紫外吸收曲线(a)及 E_g 计算图(b)

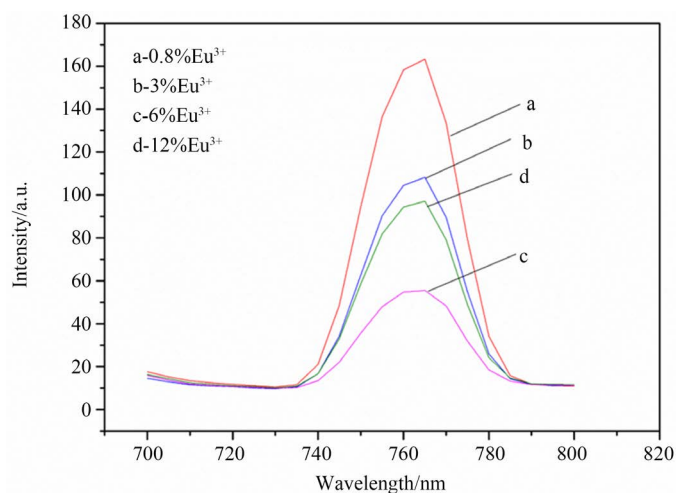


Figure 5. Effect of Eu^{3+} doping with different contents on the luminescence of silver sulfide nanoparticles

图 5. 掺杂不同含量的 Eu^{3+} 对硫化银纳米颗粒发光性能影响

的光是银簇[9]的特征发射,实现了近红外光的发射。其荧光强度先随掺杂量的增加而下降,达到最小后,荧光强度随掺杂量的增加,又开始增加。这是因为 Eu^{3+} 的离子半径(0.95 \AA)比 Ag^+ 半径(1.26 \AA)小,可以掺杂进 S^{2-} 和 Ag^+ 基质中,覆盖了一部分发光的 Ag^+ , 使荧光强度降低。6%的掺杂量时,荧光强度最低,有可能发生杂质堆积,多余的掺杂引起能量在 Eu^{3+} 中心间传递,从而会降低发射能量。在晶体中,当掺杂含量足够高,一个格点上的原子被杂质替位,形成一个 B_A , 而在其相邻的 Z 个格点上又出现一个 B_A 时,两个 B_A 相遇,会造成杂质堆积,这时的掺杂破坏了晶体的结构,是原来的晶体结构所不能容忍的掺杂含量[10],使得发光最小。当掺杂率为 12% 时,足量的离子减小了表面的悬空键和缺陷,从而影响发光性质,荧光强度又增加。由图看出掺杂 0.8% Eu^{3+} 效果最好。

由图 6(a)不同 Eu^{3+} 、 Mn^{2+} 双掺杂荧光曲线可知,在激发波长为 390 nm 时,固定 Eu^{3+} 的掺杂,加入 Mn^{2+} 时,发光位置仍在 765 nm 附近,荧光强度总体比单掺杂 Eu^{3+} 强度增加很多,不发光的 Mn^{2+} 的掺杂对复合物的发光是有利的。随着掺杂量的加大,荧光强度降低,应该是由 Mn^{2+} 和 Eu^{3+} 都进入硫化银基质的空隙中,掺杂增多而取代了一部分发光的 Ag^+ , 使得荧光强度降低。从图 6(b)可知,固定 Mn^{2+} 的掺

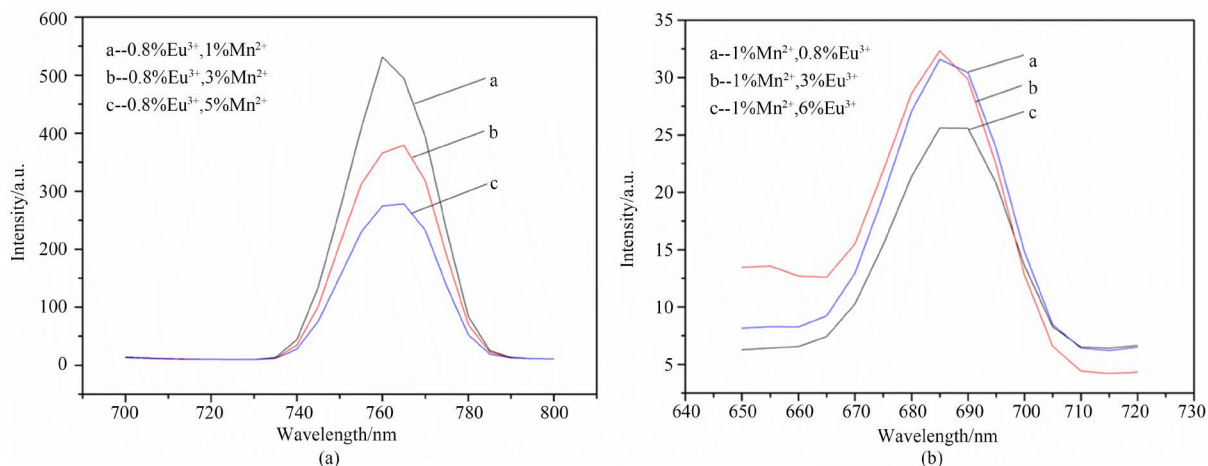


Figure 6. Luminescence intensities of the Ag_2S nanocomposite particles with doping of 0.8% Eu^{3+} and different contents of Mn^{2+} (a), and those with doping of 1.0% Mn^{2+} and different contents of Eu^{3+} (b)

图 6. 0.8% Eu^{3+} 时, 加入不同含量的 Mn^{2+} (a), 1.0% Mn^{2+} 时, 加入不同含量的 Eu^{3+} (b) 对硫化银纳米颗粒发光影响

杂量不变时, 在激发波长为 380 nm 时, 总体的荧光强度随着下降, 发射峰的位置却移到了 685 nm 附近, 表明激发波长的位置明显影响了发射波长的位置。这是因为掺杂导致颗粒减小从而发生了蓝移, 同时由于振动的耦合而引起 Mn^{2+} 的 ${}^6\text{A}_1\text{-}{}^4\text{T}_1$ 谱带的宽度变化。掺入 Eu^{3+} 时, 振动谱带随之改变, 从而改变了晶场的强度, 随着 Eu^{3+} 掺杂量的增加, 发生了荧光的猝灭, 所以在 1.0% Mn^{2+} 时, 0.8% Eu^{3+} 时效果最好。

由图 7(a) 不同 Eu^{3+} 、 Y^{3+} 双掺杂量荧光曲线可知, 固定 Eu^{3+} 的量, 激发波长为 390 nm 时, 发光位置没有变化, 总体的荧光强度在增强。随着 Y^{3+} 的量增加, 荧光强度在增加, Y^{3+} 进入硫化银的基质, 与 Eu^{3+} 一起促进了发光效应, 说明两者共掺杂有很强的敏化增强作用, 从而引起荧光强度的提升。由图 7(b) 可见, 固定 Y^{3+} 的量时, 激发波长为 362 nm, 总体的荧光强度没有大的变化, 但发光位置却移到了 720 nm 附近。加入 Eu^{3+} 时, 发射出了 Eu^{3+} 的特征发射 ${}^5\text{D}_0\text{-}{}^7\text{F}_4$ (720 nm), 跃迁的 Eu^{3+} 与 Ag^+ 发生了荧光猝灭效应, 使得荧光强度降低, 也有可能是不发光的 Y^{3+} 对发光的 Eu^{3+} 的跃迁发射有禁戒作用, 或因为 Eu^{3+} 的离子半径 (0.95 Å) 比 Y^{3+} 的离子半径大, Eu^{3+} 和 Y^{3+} 掺杂进 Ag^+ 中为竞争关系, 由于敏化效应减弱, 造成 Y^{3+} 猝灭了 Eu^{3+} 的发光。

总之, 硫化银基的纳米颗粒在这些离子掺杂或双掺杂后, 发光性能发生了显著的变化, 这对于促进这类材料的实际应用具有重要的意义。

4. 结论

通过油水界面法合成了双掺杂 (Mn^{2+} 、 Eu^{3+} 、 Y^{3+}) 硫化银复合颗粒, 测试了其能带性能和荧光性能, 其基本的一些性能如下。

- 1) 掺杂这些离子不会改变硫化银纳米粒子的晶型都为单斜结构, 属于 $\alpha\text{-Ag}_2\text{S}$ 晶型。
- 2) 掺杂离子的含量和种类不同时, 对硫化银粒子的带隙改变不同, 对其能带性能有不同的影响。
- 3) 以 0.8% Eu^{3+} 掺杂硫化银基纳米颗粒时, 复合物的总体荧光强度在增强, 而且掺杂这些离子对荧光发射峰位的影响很小。以 8.0% Y^{3+} 或 1.0% Mn^{2+} 掺杂硫化银基纳米颗粒时, 复合物的总体荧光强度不变或在急速减小, 对总体的发光效果影响很小或在减弱其效果。
- 4) 激发波长为 390 nm 时, 当单一掺杂 Eu^{3+} 时, 随着掺杂量的增加, 荧光强度在降低。当双掺杂时, 以 0.8% Eu^{3+} 掺杂硫化银基纳米颗粒时, 掺杂 Mn^{2+} 会发生猝灭作用, 掺杂 Y^{3+} 发生共发光作用。以 8.0% Y^{3+} 或 1.0% Mn^{2+} 掺杂硫化银基纳米颗粒时, Eu^{3+} 的增加使得复合物间发生荧光猝灭效应, 荧光强度在减小。

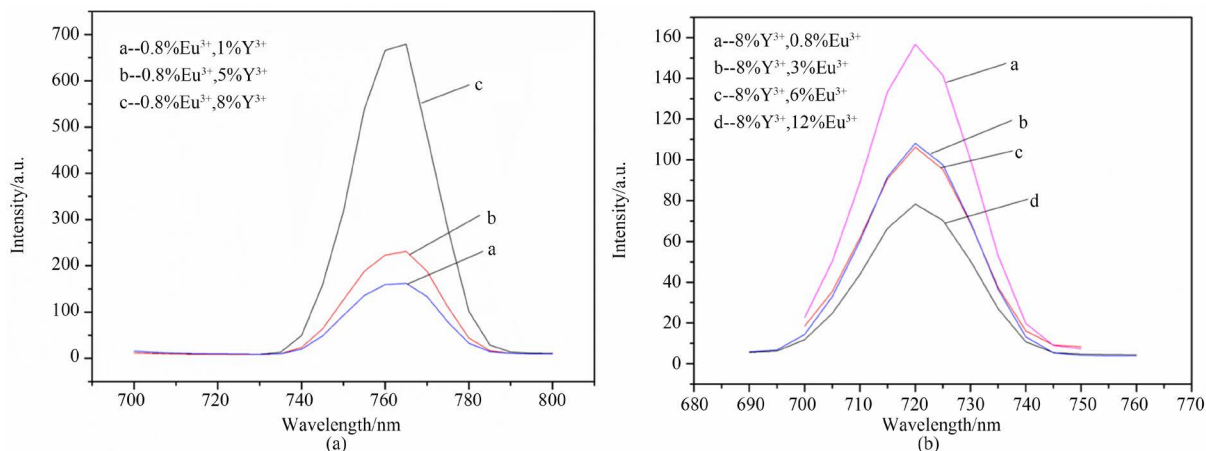


Figure 7. Luminescence intensities of the Ag₂S nanocomposite particles with doping of 0.8% Eu³⁺ and different contents of Y³⁺ (a), and those with doping of 8.0% Y³⁺ and different contents of Eu³⁺ (b)

图 7. 0.8% Eu³⁺时, 加入不同含量的 Y³⁺ (a), 8.0% Y³⁺时, 加入不同含量的 Eu³⁺ (b)对硫化银纳米颗粒发光影响

综上所述表明油水界面法制备的掺杂离子的荧光发光材料可以改变其能量带隙并调节发光性能。

致谢

在论文完成之际, 我要特别感谢我的指导老师周兴平老师的热情关怀和悉心指导。在我撰写论文的过程中, 周老师倾注了大量的心血和汗水, 无论是在论文的构思和资料的收集方面, 还是在论文的研究方法以及成文定稿方面, 我都得到了周老师悉心细致的教诲和无私的帮助, 周老师严肃的科学态度, 严谨的治学精神, 精益求精的工作作风, 开阔的视野和敏锐的思维给了我深深的启迪使我终生受益, 在此表示真诚地感谢和深深的谢意。感谢所有关心、支持、帮助过我的良师益友。最后, 向在百忙中抽出时间对本文进行评审并提出宝贵意见的各位专家表示衷心地感谢!

参考文献 (References)

- [1] Wang, L., Xu, X. and Yuan, X. (2010) Preparation and Photoluminescent Properties of Doped Nanoparticles of ZnS by Solid-State Reaction. *Journal of Luminescence*, **130**, 137-140. <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2009.07.036>
- [2] Li, X.X., Chen, Z., Du, G., et al. (2013) Synthesis and Photoluminescence Properties of Cl⁻-Doped ZnS Nanoparticles Prepared by a Solid-State Reaction. *Materials Science and Engineering: B*, **178**, 917-922. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2013.05.003>
- [3] 邹明强, 杨蕊, 李锦丰, 等. 量子点的光学特征及其在生命科学中的应用[J]. 分析测试学报, 2005, 24(6): 133-137.
- [4] Kim, S., Yong, T.L., Soltesz, E.G., et al. (2004) Near-Infrared Fluorescent Type II Quantum Dots for Sentinel Lymph Node Mapping. *Nature Biotechnology*, **22**, 93-97. <https://doi.org/10.1038/nbt920>
- [5] 杨小红, 郭冬勇, 陈平. 半导体硫化银纳米晶的控制合成与光学性能研究[J]. 合肥师范学院学报, 2005, 23(3): 70-72.
- [6] 杜运兴. ZnS 荧光量子点的油水界面法合成及发光性质研究[D]: [硕士学位论文]. 上海: 东华大学, 2011.
- [7] 苏伟. 微波辅助下不同形貌 Ag₂S 制备、性能和应用研究[D]: [硕士学位论文]. 上海: 东华大学, 2016.
- [8] 侯清玉, 董红英, 迎春, 等. Mn 高掺杂浓度对 ZnO 禁带宽度和吸收光谱影响的第一性原理研究[J]. 物理学报, 2013, 62(3): 37101-037101.
- [9] Pan, S., Liu, X. and Wang, X. (2011) Preparation of Ag₂S-Graphene Nanocomposite from a Single Source Precursor and Its Surface-Enhanced Raman Scattering and Photoluminescent Activity. *Materials Characterization*, **62**, 1094-1101. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2011.08.004>
- [10] Liu, C., Sun, L., Liao, C., et al. (1999) Photoluminescence Properties of ZnS:Cu Colloid. *Chinese Journal of Luminescence*, **44**, 23-30.

知网检索的两种方式：

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2168-6122，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：japc@hanspub.org