

量子点的制备及分散性研究进展

曹源¹, 马向东^{1*}, 刘军库²

¹中国矿业大学(北京)材料科学与工程系, 北京

²中国空间技术研究院, 北京

收稿日期: 2021年9月27日; 录用日期: 2021年10月19日; 发布日期: 2021年10月26日

摘要

本文简要介绍了量子点的性质和应用, 并概述了量子点的制备方法, 分析了三种基本方法各自的优缺点及应用场景。其次简述了量子点团聚的原因, 通过胶体化学的颗粒稳定机制对量子点的分散做出解释, 并提出了量子点的分散方法。最后, 概述了近些年应用较多量子点材料和一些新兴的量子点材料, 阐述了量子点应用中遇到的问题, 并对量子点的发展做出了展望。

关键词

量子点, 外延生长, 机械球磨, 团聚与分散

Research Progress on Preparation and Dispersion of Quantum Dots

Yuan Cao¹, Xiangdong Ma^{1*}, Junku Liu²

¹Department of Materials Science and Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing

²China Academy of Space Technology, Beijing

Received: Sep. 27th, 2021; accepted: Oct. 19th, 2021; published: Oct. 26th, 2021

Abstract

This paper briefly introduces the properties and applications of quantum dots and summarizes the preparation methods of quantum dots. We analyze the advantages and disadvantages of three basic methods and their application scenarios. Secondly, the reason for the agglomeration of quantum dots is briefly described. The dispersion of quantum dots is explained by the particle

*通讯作者。

stabilization mechanism of colloidal chemistry, and the dispersion method of quantum dots is proposed. Finally, some emerging quantum dot materials in recent years are summarized, the problems encountered in the application of quantum dots are described, and the development prospect of quantum dots is also given.

Keywords

Quantum Dot, Epitaxial Growth, Mechanical Ball Mill, Aggregation and Dispersion

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

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



Open Access

1. 引言

近年来, 低维半导体材料因其独特的特性受到研究者广泛的关注。可以根据维度将低维材料分成几类: 二维的量子阱(Quantum Well), 一维的量子线(Quantum Wire)和零维的量子点(Quantum Dot)。从图 1 中我们不难看出, 量子点是一种粒子在三个维度尺寸都很小的体系。当粒径小于或接近物质的激子波尔半径时, 由于量子效应, 会产生许多块体材料不具备的性质[1]。

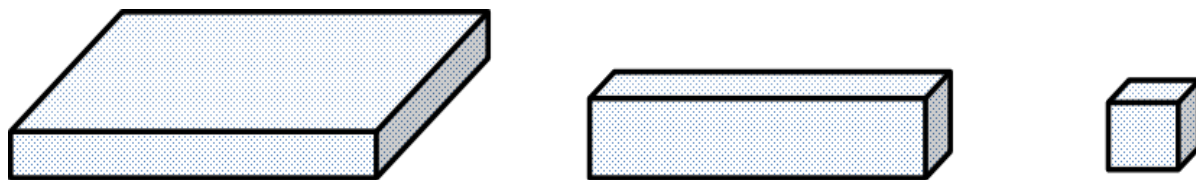


Figure 1. Diagram of quantum well, quantum wire, quantum dot

图 1. 量子阱、量子线、量子点示意图

量子限域效应: 由于粒子尺寸很小, 与电子的德布罗意波长及激子波尔半径在同一数量级, 电子受限在纳米空间, 载流子的输运会被限制, 电子的平均自由程很短, 电子的局限性和相干性增强, 极易形成激子强吸收。由于量子约束, 其价带和导带的能级会从连续变成离散分布的形式, 类似于原子光谱性质。因此, 通过改变量子点的大小, 可以使量子点覆盖从紫外到红外的光谱范围。当量子点尺寸减小时, 禁带宽度增大, 就会导致发射波长的蓝移[2]。利用量子点禁带宽度可调的性质, 可以通过改变量子点的尺寸来调控发射波长的位置, 使其发射波长覆盖可见光区和近、中红外区, 使得量子点可应用在 LED, 红外探测器等领域。

表面效应: 由于量子点尺寸极小, 表面原子比例较高, 比表面积大, 表面原子配位不足, 致使微粒的表面能及其表面张力发生改变, 导致量子点容易团聚为大颗粒, 从而将引起纳米材料性质发生变化甚至使得量子点失效。另一方面, 表面效应会使量子点产生许多缺陷能级, 改变量子点的光学性质, 引起非线性光学效应[3]。

此外, 量子点还具有宏观量子隧道效应, 库伦阻塞效应等许多不同于体材料的物理化学性质, 使得半导体量子点作为一种特殊的半导体纳米结构越来越受到人们的重视[4]。如图 2, 量子点在激光器、催化、显示照明、传感器、太阳能电池等众多领域中均有重要应用[5]。

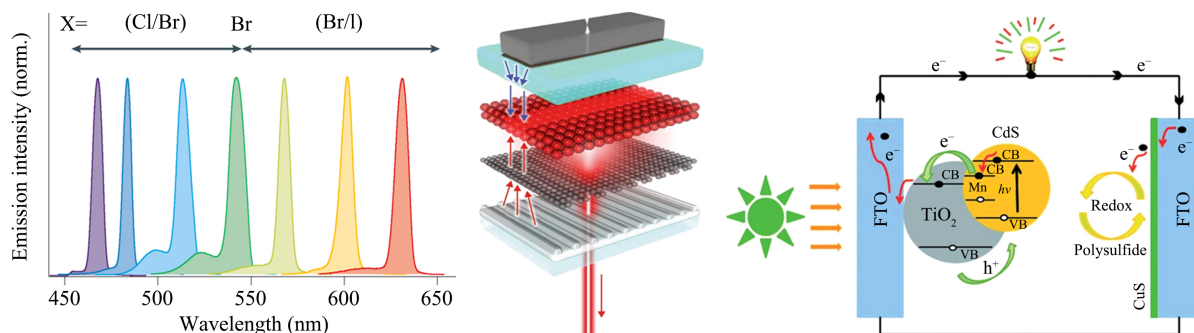


Figure 2. Application of quantum dots in LED, laser and solar cells
图 2. 量子点在 LED, 激光器, 太阳能电池中的应用

2. 量子点的合成与制备

随着相关研究的深入, 已经发展了多种量子点的制备方法, 总体来讲, 可分为物理法和化学法两大类。物理法主要有: 外延生长法、金属有机化学气相沉积法、电子束沉积法、机械球磨法等[6]。化学类方法可以统称为纳米化学法, 有化学气相法、化学液相法、化学溶胶-凝胶法等。主要的三种量子点制备方法的比较如表 1 所示。

Table 1. Comparison of preparation methods of quantum dots

表 1. 量子点制备方法的比较

制备方法	产物	方法优点	方法缺点
外延生长法	薄膜, 量子点阵列	产物纯度较高, 配合微纳加工可以更好的控制量子点的形状, 密度。	无法获得单分散的量子点, 对实验仪器要求较高
纳米化学法	十纳米以下的胶体体系	可以合成较小尺寸的量子点, 成本较低。	需要精细控制反应过程, 减少缺陷。另外, 有些试剂毒性较大, 对环境不友好。
机械球磨法	十几到几十纳米的粉末	方法简单, 经济实用, 适合研究人员用于实验室研究。	不易大规模制备, 得到的量子点团聚严重。

2.1. 自组装生长

外延生长是广泛应用的纳米结构生长方法, 指在单晶衬底上制备单晶薄膜的沉积方法。利用晶格失配产生的应力作为驱动力, 使外延材料在衬底表面自凝聚沉积。实验上可采用分子束外延(Molecular Beam Epitaxy, MBE)、金属有机化学气相沉积(Metal-Organic Chemical Vapor Deposition, MOCVD)、原子层外延(Atom Layer Deposition, ALE)、脉冲激光沉积等技术制备薄膜。外延法有三种生长模式: 岛状生长(Volmer-Weber, VW)模式、层状生长(Frankvan der Merwe, FM)模式、岛状-层状(Stranski Krastano, SK)模式, 具体要取决于薄膜材料和衬底材料的表面能差[7], 当被沉积的物质与衬底之间的浸润性较差, 这就导致了 VW 生长模式。当衬底的表面能大于沉积材料的表面能与它们间的界面能之和时, 被沉积物质与衬底之间的浸润性很好, 被沉积物质更倾向于 FM 生长模式[8]。图 3 为自组装生长三种模式的示意图。

Kwoen 等[9], 在 Si 衬底上利用 MBE 制备了 30~40 nm 的 InAs/GaAs 量子点并用于量子点激光器。Fominykh 等[10]通过化学处理的 Si 衬底, 产生缓冲层, 制备出粒径为 25 nm 的量子点阵列。Rossi 等[11], 利用 MBE 方法在 GaAs 衬底上生长了一层 $\text{In}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$ 量子点, 然后再次基础上, 利用(Metal-Organic Vapor Phase Epitaxy, MOVPE)方法在 550°C、600°C 的条件下生长了 Ge 量子点。利用原子力显微镜和高分辨率

透射电镜进行表征,并测试了材料的光致发光(Photoluminescence, PL)谱,响应范围在 1.2~1.3 eV 的近红外区间。Lim 等人[12]在 GaAs (001)衬底上利用 MOCVD 生长了 InGaP 材料, QD 的典型尺寸为直径 20~30 nm,并测量了光致发光谱(PL),室温 PL 显示在 1230 nm 左右的带间跃迁。Wang 等[13]利用等离子体辅助分子束外延(RF·MBE)技术在蓝宝石衬底上,外延生长了发光波长位于 407 nm 的 InGaN 量子点结构,研究了 InN 成核层技术对其结构和光学特性的影响。此外,随着微纳加工技术不断的发展,微纳加工可与外延法相结合,利用光刻、电子束曝光等刻蚀方法可以“自上而下”制备出尺寸、密度、形状可控的纳米结构二维点阵。

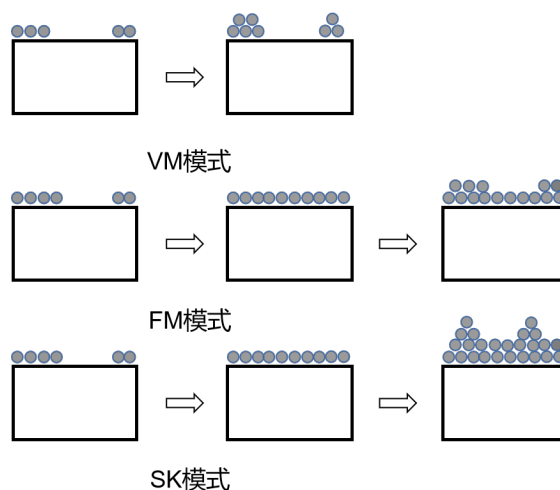


Figure 3. Three ways of film growth
图 3. 薄膜生长的三种方式

2.2. 纳米化学法

通过化学方法制备纳米材料,统称为纳米化学法,在合成量子点时最常用的是胶体化学法。利用化合物前驱物溶液,加热其到一定温度,此时量子点在溶液中形核长大,胶体的粒径大小可以通过控制生长时间或改变表面活性剂的种类来控制。此外,还有反胶团合成法,溶胶-凝胶法等方法。纳米化学法能制备出 1~10 nm 单分散的量子点,可准确控制量子点的成分、尺寸、形状,而且胶体化学法成本低廉,制备出的样品粒径分布窄,表面缺陷少,是一种应用广泛的量子点制备方法。

Joung [14]等利用三(2,4,6-三甲氧基苯基)磷作为磷源,醋酸铟作为铟源合成了不同粒径的 InP 发光量子点,发光波段覆盖整个可见光区。Xu [15]利用溶剂热法, CdCl₂ 和硫单质作为原料,正十二硫醇作为溶剂,合成了 CdS 量子点,粒径分布在 4~10 nm,荧光发射峰位置随量子点粒径增大向长波方向移动,并将其应用在量子点敏化太阳能电池中。Wang [16]采用油相热注入法,以氧化铅、油酸和十八烯为原料合成油酸铅,利用油酸铅和 N,N-六甲基二硫烷作为前驱体,经加热,合成了硫化铅量子点,样品吸收峰值在 1188 nm 附近。李[5]等利用胶体化学法制备了 CuInS₂ 三元量子点,平均粒径 5 nm,在 1.5 μm 的近红外波段有明显响应。

2.3. 机械球磨法

机械球磨法也是一种原理简单、“自上而下”的纳米微粒制备方法。在球磨过程中,利用底物粉末和磨球的相互作用,球磨介质、球磨罐与材料粉末之间反复挤压、碰撞、摩擦,原料不断被塑造变形,到一定程度之后再次破碎,如此反复,在经过一定时间,将原材料磨成小颗粒,图 4 为一般的球磨机。



Figure 4. Planetary ball mill
图 4. 行星球磨机

Li 等[17]利用简单的机械化学球铣削方法来合成单分散的硫化铜量子点。采用 X 射线衍射(XRD)、透射电子显微镜(TEM)、X 射线光电子能谱(XPS)和紫外 - 可见光光谱对该产品进行了表征。硫化铜量子点表现出优异的光催化活性和稳定性。TEM 显示制备的 CuS 量子点粒径 5 nm 左右,在 363 nm 有强烈的吸收峰,相较于大颗粒 CuS 的光谱有明显蓝移,见图 5。

Li [18]和他的团队,利用高温煅烧硝酸铝获得的微米级别氧化铝粉末作为前体物,放入行星球磨机进行高能球磨。通过优化球磨转速、球粉质量比、球磨时间等参数,获得 α -Al₂O₃ 粉末。然后在 3 mol/L 盐酸中进行酸洗,并通过离心获得窄粒径分布的 α -Al₂O₃ 纳米粒子。利用 SEM 表征得到了球磨时间和粒径的对应关系,随着球磨时间的增长, α -Al₂O₃ 粒径减小,在 80 h 以上,粒子粒径变化不明显。利用得到样品烧结得到纳米晶粒氧化铝陶瓷,性能良好。

Chen [19]以纤维素为碳源,镁粉为还原剂,通过球磨制得 Mg 掺杂的荧光碳量子点(Mg-CQDs),探索了球磨时间和原料比例对 Mg-CQDs 荧光性能的影响,并通过透射电子显微镜(TEM)对其形貌粒径进行表征。Kozma [20]等利用氯化锡和碳酸钠之间的机械化学反应,合成了平均直径为 9 nm 的氧化锡纳米颗粒。用 TEM、SEM、红外光谱对反应产物进行了表征。并测定了在干磨和湿磨两种条件下的反应速率,通过监测球磨罐内的温度和压力,分析动力学过程,给出了球磨时,温度、压力、球磨时间之间的关系。

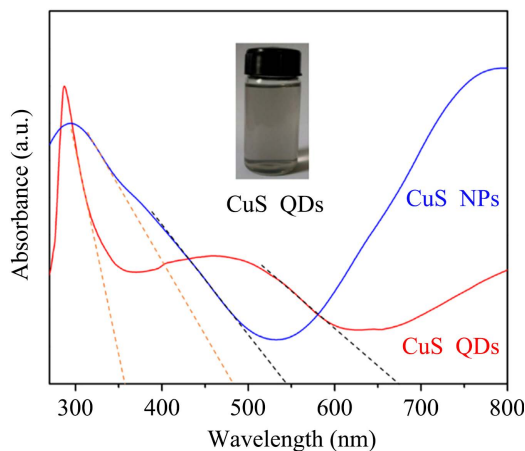


Figure 5. UV-Visible absorption spectra of copper sulfide quantum dots and NPs [17]

图 5. 硫化铜量子点和 NPs 的紫外 - 可见吸收光谱[17]

3. 量子点的分散

量子点只有在粒子分散情况良好时才能表现出它们的特殊性质，但纳米颗粒比表面能高，处于热力学不稳状态，极易团聚形成大颗粒而导致量子点失效。见图 6，纳米颗粒的团聚通常有两种形式[21]：软团聚和硬团聚，前者是由于范德瓦耳斯力和静电力的作用，作用力较弱，通常比较容易消除；而硬团聚通常发生在软团聚之后，主要的作用力是化学键，所以硬团聚较难消除。

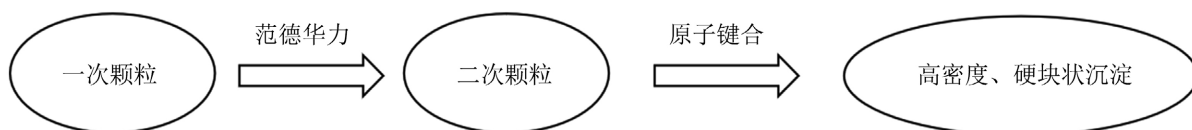


Figure 6. Schematic diagram of nanoparticle agglomeration process

图 6. 纳米粒子团聚过程示意图

3.1. 量子点分散机制

分散就是指纳米颗粒分离并均匀分布于介质当中，形成稳定的分散体系的过程。因为量子点的粒径小于 100 nm，所以量子点的分散体系属于胶体，根据胶体理论，可以将量子点的分散机制分为以下几种：

3.1.1. 静电稳定机制(DLVO 理论)

DLVO 理论，也可称为双电层理论，是经典的胶体稳定性理论，通过范德瓦耳斯力和电荷斥力的关系阐述了颗粒表面电荷和分散性的关系。图 7 为双电层理论示意图，静电稳定主要是通过调节 pH 值，外加电解质溶液等方法，使得纳米粒子表面带有一定数量的电荷，外层为等量的相反电荷，这样就形成了双电层，两层交界处滑动面的电位称为 Zeta 电位[22]。Zeta 电位的绝对值越大说明双电层斥力越大，粒子偏向于分散；反之粒子则偏向于聚集。

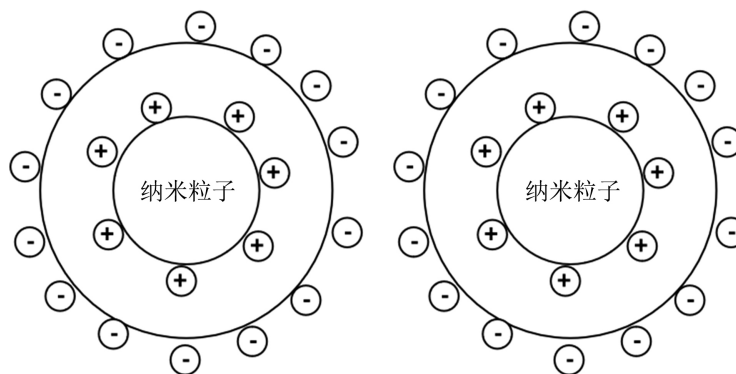


Figure 7. Schematic diagram of electrostatic stabilization mechanism

图 7. 静电稳定机制示意图

3.1.2. 空间位阻稳定机制

通过对纳米粒子分散性的研究发现，长链的高分子聚合物也有也有不错的分散效果，这些高分子不会影响粒子表面的带电情况，所以不能用 DLVO 理论来解释。于是就发展了空间位阻机制[23]：见图 8，由于粒子表面比较活性较高，高分子聚合物容易与纳米粒子产生吸附，聚合物长链在介质中充分展开，形成位阻层，以阻挡颗粒的靠近与碰撞。当两纳米颗粒靠近时，吸附层被压缩，高聚物分子链构型数目减少，构型熵降低，引起体系自由能增加，从而产生斥力势能[22]。



Figure 8. Schematic diagram of steric hindrance stabilization mechanism

图 8. 空间位阻稳定机制示意图

3.1.3. 静电位阻稳定机制

前两种机制分别通过双电层和空间位阻两种方式稳定纳米粒子分散系，而静电位阻稳定机制是前两种机制的组合，通过在溶液中加入聚电解质，一方面使纳米粒子表面吸附带电形成双电层，另一方面利用聚合物长链产生位阻层防止粒子靠近，产生复合稳定作用[24]。当纳米颗粒距离较远时，主要依靠双电层机制进行分散，而当纳米颗粒距离较近时，主要以空间位阻机制进行分散。

3.2. 量子点分散方法

纳米颗粒的分散大致分为：润湿、分离、稳定三个阶段，可以用沉降法、粒度观测法、Zeta 电位法等方法来评估分散的稳定性。根据分散机理不同，可将量子点分散方法分为机械分散法和表面修饰法。

3.2.1. 机械分散法

机械分散法利用机械力来克服粒子之间的吸引力，通过撞击、震动、搅拌等工序来减少团聚。超声处理是一种常用的分散方法，因为超声波振动频率高，局部会产生强冲击波，可以利用这种力的作用克服纳米粒子的团聚。Pan 等[25]制备了纳米 TiO_2 /环氧复合材料，利用多次超声获得小范围团聚的样品，搭配机械搅拌方法，获得粒子分布均匀、分散性良好的样品。Zhu 等[26]制备了纳米 FeCuNbSiB 永磁体，利用超声处理并加入不同种类的分散剂，随着分散时间的增加，水溶液体系中的磁粉体平均粒径显著下降。机械分散法是一种简单的物理方法，通常只对软团聚体有效。尽管通过机械力可以将互相粘结的颗粒打散，但是量子点间的作用力依然存在，经过一段时间的静置它们可能重新团聚。所以想要根本解决团聚问题，还需对量子点进行其他处理。

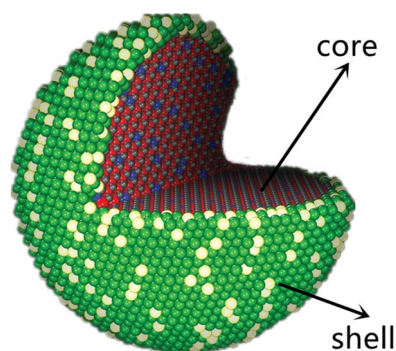


Figure 9. Schematic diagram of core-shell quantum dots

图 9. 核壳型量子点示意图

3.2.2. 表面修饰法

量子点团聚的根本原因是纳米颗粒表面能高, 想要解决团聚问题, 就要对纳米颗粒进行表面改性。表面改性的方法有很多, 主要有: 分散剂法、表面包覆法、偶联剂法、表面枝接法等。表面包覆法通过在量子点表面形成一层外壳, 来增大量子点的比表面积, 减少团聚, 如图 9。Lian 等[27]利用 LSS 三相体系合成了 CdSe/CdS 核壳型量子点, 利用 TEM 表征发现合成的样品粒径在 6 nm 左右, 大小均匀, 分散性好。对 CdSe/CdS 核壳型量子点和 CdSe 单量子点进行荧光光谱表征, 发现前者的发射波长发生蓝移, 表明前者粒径较小, 分散性好。分散剂法广泛用于纳米颗粒的分散, 分散剂的种类有很多种, 大致可分为: 1) 表面活性剂, 如高级脂肪酸及其盐类; 2) 有机酸类, 如丙烯酸、马来酸、甲基丙烯酸等; 3) 聚合物电解质类, 如聚丙烯酰胺、聚丙烯酸、聚乙烯吡咯烷酮、聚甲基丙烯酸钠、聚季胺盐、聚乙二醇等。Qu 等[28]研究了十二烷基苯磺酸钠、阿拉伯胶和聚丙烯酰胺对纳米 Al_2O_3 的分散性能, 这三种分散剂分别对应了三种分散机制, 研究表明采用 SDBS 和阿拉伯胶的混合分散剂效果更好。

4. 结语

经过多年的研究与探索, 研究人员已经探索出多种量子点制备方法, 这些方法的可以看作上述三种基本方法的延伸与组合, 表 1 对三种基本方法进行了比较, 可以看出, 纳米化学法适合大规模制备离散量子点, 外延生长更适合与微纳加工技术结合来制备半导体器件。而机械球磨法, 因其工艺简单, 比较适合在实验室内, 用于探究特定量子点材料的特性来使用。

经过研究者的不断尝试, 各种量子点材料不断涌现: III-V 族(InAs, InSb, InP), II-VI 族(CdS, CdSe, ZnS, HgTe), IV-VI 族(SnTe, PbS, PbSe)和三元 I-III-VI 族化合物以及近些年兴起的金属卤化物钙钛矿量子点等等。量子点独特的光学性能使其在: 激光器[29]、光电探测器[30]、太阳能电池[31]、LED 照明[32]、化学催化和生命科学等多个领域中均有应用。尽管如此, 量子点的应用仍存在很多挑战。由于量子点的禁带宽度与颗粒粒径有密切关系, 如何定制化地制备一定禁带宽度的量子点是量子点应用的一大关键。为解决这个问题, 我们必须不断对量子点的合成与分散加以改进, 以期得到粒径分布范围小且分散性良好的量子点。同时, 量子点在 LED 领域已得到广泛应用, CdSe/CdS/ZnS 体系已经较为成熟地应用在 QLED 当中, 多家厂商已量产 QLED 电视、显示屏等产品。如何制备出颜色纯、亮度高覆盖更大色域的量子点, 还需要做大量的研究工作。此外, 量子点红外探测器也经历了近三十年的发展, 由于量子点带隙的调节性, 使得利用单一材料覆盖近、中红外区成为可能, 有望打破 HgCdTe 在中红外波段的长期统治地位。不难预料, 随着技术的进一步成熟, 采用半导体量子点制备的器件将会广泛运用在各行各业, 并改变人们的生活。

基金项目

中央高校基本科研业务费专项。

参考文献

- [1] 夏媛, 费学宁, 贾国治, 等. CdTe/CdS 核/壳结构纳米晶量子点的结构及荧光性能[J]. 天津城市建设学院学报, 2011, 17(2): 123-126.
- [2] 张玉刚. II-VI 族量子点的控制合成及其 LEDs 器件应用[D]: [博士学位论文]. 合肥: 合肥工业大学, 2017.
- [3] 袁春云. 半导体量子点的合成及性质研究[D]: [硕士学位论文]. 长春: 长春理工大学, 2016.
- [4] 陈良, 饶海波, 占红明, 等. 单分散性硫族化合物半导体量子点的制备与表征[J]. 材料导报, 2005, 19(z2): 71-73.
- [5] 李志飞, 刘科魁, 关晓琳. CuInS_2 三元量子点纳米复合材料的制备与应用[J]. 广东化工, 2019, 46(18): 3-6.
- [6] 王忆锋. 量子点红外光子探测器的研究进展[J]. 光电技术应用, 2008(3): 1-8.

- [7] 卢金军, 童菊芳. 半导体量子点的制备、性质和应用[J]. 孝感学院学报, 2007(S1): 144-148.
- [8] 李心磊. 半导体量子点和量子环自组装的热力学及动力学理论研究[D]: [博士学位论文]. 广州: 中山大学, 2009.
- [9] Kwoen, J., Jang, B., Lee, J., *et al.* (2018) All MBE Grown InAs/GaAs Quantum Dot Lasers on On-Axis Si (001). *Optics Express*, **26**, Article No. 11568. <https://doi.org/10.1364/OE.26.011568>
- [10] Fominykh, N.A., Sobolev, M.S., Ilkiv, I.V., *et al.* (2020) Preparation of Si Substrates for Monolithic Integration of III-V Quantum Dots by Selective MBE Growth. *Journal of Physics: Conference Series*, **1695**, Article No. 12006. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1695/1/012006>
- [11] Rossi, F., Seravalli, L., Nasi, L., *et al.* (2014) Epitaxial Germanium Deposited by MOVPE on InGaAs Quantum Dot Stressors Grown by MBE. *Crystal Research and Technology*, **49**, 570-574. <https://doi.org/10.1002/crat.201300403>
- [12] Lim, H., Tsao, S., Taguchi, M., *et al.* (2006) Quantum Dots in GaInP/GaInAs/GaAs for Infrared Sensing. *Advances in Science and Technology*, **51**, 201-208. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AST.51.201>
- [13] 王保柱, 颜翠英, 王晓亮. 分子束外延生长 InGaN 量子点及其结构和光学特性[J]. 稀有金属材料与工程, 2011, 40(11): 2030-2032.
- [14] Joung, S.M., Yoon, S., Han, C.S., *et al.* (2012) Facile Synthesis of Uniform Large-Sized InP Nanocrystal Quantum Dots Using Tris(tert-butyl dimethylsilyl)phosphine. *Nanoscale Research Letters*, **7**, Article No. 93. <https://doi.org/10.1186/1556-276X-7-93>
- [15] 徐雅岚. CdS 量子点的合成及其在新型太阳能电池中的应用[D]: [硕士学位论文]. 厦门: 华侨大学, 2017.
- [16] 王瑞丽. 硫化铅量子点光电材料与器件研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院上海硅酸盐研究所), 2019.
- [17] Li, S., Ge, Z.H., Zhang, B.P., *et al.* (2016) Mechanochemically Synthesized Sub-5nm Sized CuS Quantum Dots with High Visible-Light-Driven Photocatalytic Activity. *Applied Surface Science*, **384**, 272-278. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2016.05.034>
- [18] Li, L., Pu, S., Liu, Y., *et al.* (2018) High-Purity Disperse α -Al₂O₃ Nanoparticles Synthesized by High-Energy Ball Milling. *Advanced Powder Technology*, **29**, 2194-2203. <https://doi.org/10.1016/j.apt.2018.06.003>
- [19] 陈岩. 机械球磨法制备碳量子点及其应用[D]: [硕士学位论文]. 郑州: 郑州大学, 2017.
- [20] Kozma, G., *et al.* (2015) Spectroscopic Studies on the Formation Kinetics of SnO₂ Nanoparticles Synthesized in a Planetary Ball Mill. *Journal of Molecular Structure*, **834**, 430-434. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2006.10.031>
- [21] 刘景富, 陈海洪, 夏正斌, 等. 纳米粒子的分散机理、方法及应用进展[J]. 合成材料老化与应用, 2010, 39(2): 36-40.
- [22] 周细应, 李卫红, 何亮. 纳米颗粒的分散稳定性及其评估方法[J]. 材料保护, 2006(6): 51-54.
- [23] 乔木, 李振荣, 初小葵, 等. 纳米陶瓷粉体的分散[J]. 中国陶瓷, 2010, 46(3): 13-16.
- [24] 王娟丽, 李奠础, 马建杰, 等. 纳米 ZnO 水悬浮液稳定性的研究[J]. 化工时刊, 2006(6): 20-22.
- [25] 潘蕾, 吴文明, 蔡雷, 等. 超声辅助分散制备纳米 TiO₂/环氧复合材料[J]. 热固性树脂, 2008(4): 33-36.
- [26] 朱正吼, 宋晖, 胡伟. 超细软磁粉体在介质中超声波分散工艺[J]. 兵器材料科学与工程, 2006(3): 41-45.
- [27] 连雪茹, 刘澄, 杜保安, 等. CdSe/CdS 核壳型量子点的合成及性质研究[J]. 化工时刊, 2012, 26(11): 14-16.
- [28] 曲彦平, 姚迪, 闫平. 分散剂对复合镀中氧化铝纳米粉分散性能的影响[J]. 表面技术, 2009, 38(5): 34-36.
- [29] 王亚东, 黄靖云, 叶志镇. 半导体量子点的器件应用[J]. 半导体光电, 2000(5): 310-313.
- [30] 雷亚贵, 于进, 张平雷, 等. 量子点红外探测器研究进展[J]. 激光与红外, 2010, 40(1): 3-8.
- [31] 吴荣方. IV-VI 半导体纳米晶低温液相合成及光伏应用研究[D]: [硕士学位论文]. 广州: 华南理工大学, 2018.
- [32] 徐彦乔, 陈婷, 王连军, 等. I-III-VI 族量子点的制备及其在照明显示领域的应用[J]. 化学进展, 2019, 31(9): 1238-1250.