科学通报 2023 年 第 68 卷 第 36 期: 4933 ~ 4938
解读“2023年度诺贝尔自然科学奖”专题 观 点
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS

2023年度诺贝尔化学奖与激子(光子)操控物质平台

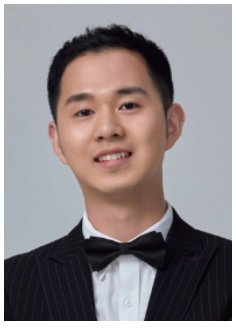
叶梓康[1,3], 秦海燕[2,3], 彭笑刚[2,3*]

1. 浙江大学光电科学与工程学院, 杭州 310058;
2. 浙江大学化学系, 杭州 310058;
3. 浙江省激发态材料重点实验室, 杭州 310058
* 联系人, E-mail: xpeng@zju.edu.cn

2023年度诺贝尔化学奖授予了Bawendi、Brus和Ekimov三位学者, 以表彰他们在“发现与合成量子点”方面的突出贡献. 化学合成量子点发端于20世纪70~80年代, 历经40多年的发展, 终于得到了科学界的认可. 预计这将给该潜力广泛的领域以有力推动, 使其进入发展快车道.

严格意义上的量子点是尺寸小于体相激子直径的半导体纳米单晶, 也就是半导体纳米晶中尺寸较小的一部分. 较小的几何尺寸意味着激子的强限域. 如果尺寸与体相激子直径相当, 或大于体相激子直径, 纳米晶内的激子处于弱限域状态, 相应的纳米晶严格意义上不被认定为量子点[1,2]. 此次诺贝尔化学奖所指的量子点大体在广义的范畴, 也就是把量子点等同于半导体纳米晶. 本文基于2023年度诺贝尔化学奖, 在不产生误解的情况下, 将遵守其所界定的量子点范畴.

自从瑞典皇家科学院宣布2023年度诺贝尔化学奖以来, 已经有大量文章正式或非正式地对本年度诺贝尔化学奖进行了解读. 本文试图不重复这些文章的内容, 而将更多地聚焦于量子点领域的发展历史与未来, 从化学, 特别是合成化学的视角来剖析量子点, 以揭示该类“非典型”化学合成目标物预示的化学学科发展机遇. 选择这样的视角, 也是因为此次诺贝尔化学奖授予的并不是“量子点”, 而是“量子点的发现与合成”.



叶梓康 浙江大学光电科学与工程学院博士后. 分别于2016和2021年在浙江大学化学系获得学士和博士学位. 主要研究方向为半导体纳米晶光谱学和基于半导体纳米晶的光电器件.



彭笑刚 浙江大学化学系教授, 国家级特聘专家. 主要研究胶体半导体纳米晶(包括量子点)合成化学、性质与应用. 发展了被学术界和产业界普遍采用的“量子点绿色合成化学路线”, 确立了“量子点激发态合成控制”概念.

1 激子与量子点

“激子”是量子点定义的核心要素, 也是量子点名称的实际源头. 由于半导体单晶的分子轨道都是离域的(或称为全晶体共轭), 光致或其他形式(如电致)激发下产生的电子和空穴并不束缚在一个原子核周围, 而是在整个晶体中离域, 因此处于导带的电子和价带的空穴也被称为自由载流子. 由于很强的离域作用, 半导体单晶中的自由电子和空穴表现得比真空中的自由电子要轻, 也就是半导体单晶中电子和空穴的有效质量可能都明显小于真空中电子的静止质量. 例如, II-VI和III-V族半导体中电子有效质量的典型值只有电子静止质量的20%左右. 由于电子和空穴所带电量相反, 彼此通过库仑静电作用而相互吸引. 如果电子-空穴库仑吸引能的绝对值明显大于给定温度下一个量子自由度的热能kT(k为玻耳兹曼常数, T为绝对温度), 电子-空穴会像氢原子一样结合在一起而形成稳定的Wannier激子. 半导体单晶的介电常数远大于真空介电常数、电子和空穴的有效质量小于电子的静止质量, 导致Wannier激子的波尔半径(或电子-空穴平衡间距)远大于氢原子, 在常见化合物半导体中大致在几个到几十个纳米水平.

虽然半导体单晶内的Wannier激子可以大到几十纳米水平, 但其电子结构与氢原子没有本质差别, 只是相邻能级的能量差成比例减小. 和氢原子相同, 其基态能级的能量就是一般意义上的激子结合能, 或激子解离能的负值. 对于真空中的氢原子, 其结合能是–13.6 eV. 由于常见半导体单晶要求

© 2023《中国科学》杂志社

其导电性较好, 其激子解离能不可能太大, 否则会导致两种载流子彼此束缚. 一般地, 常见体相半导体的激子结合能的绝对值(或解离能)小于室温kT(0.025 eV). 如此之小的激子解离能导致体相半导体单晶在光致或电致激发时很难在室温条件下维持激子态, 而是快速离解为自由载流子. 即使在III-V族半导体量子阱(如GaN发光二极管中的发光区)中, 也难以形成Wannier激子, 其电致发光机理在室温条件下也是自由载流子发光. 激子虽然不一定由光致激发产生, 但无论是吸收还是发射光子, 材料中都需要形成电子-空穴对. 在这个意义上, 激子可以看作光子在材料中的存在形式, 也是光子与自由载流子之间相互转化的媒介. 总体看来, 不稳定的Wannier激子利于电子(或空穴)传导, 但对于光子操控不利. 例如, III-V族量子阱发光二极管(也包括其他类型的半导体单晶光电器件)在显示和照明等较弱激发条件下的能量效率很低, 更适合于强激发条件下工作.

把半导体单晶尺寸减小到几个到几十纳米的尺度就得到了半导体纳米晶. 半导体纳米晶内受激产生电子-空穴对的结合能与相应体相半导体一样小, 不足以形成Wannier激子. 但是, 电子-空穴被晶界所束缚, 并不是完全自由的两种载流子, 会形成独特的不由库仑作用束缚、而是被晶界所束缚的激子. 受限的自由运动空间导致电子和空穴各自都表现为“势阱箱中的粒子”, 各自的动能都量子化, 这就是广义的激子量子限域效应[3~5]. 直到2022年, 广义的激子量子限域效应被认为只适用于尺寸小于体相激子直径的纳米晶, 而大于激子直径的纳米晶中应该是狭义的Wannier激子质心的量子限域效应[1]. 2022年, 晶面、尺寸、形貌单分散的立方体CdSe和CdS纳米晶被合成出来. 实验证明, 即使是尺寸比体相Wannier激子大~500%的立方体半导体纳米晶, 受激产生的电子-空穴依然是晶面束缚的、动态结合的激子(图1(a))[6]. 由此, 我们建议把半导体纳米晶中的这一类广义激子称为“动态激子”. 在室温条件下, 除非是激子结合能超大的非常规半导体, 常见II-VI、III-V和IV-VI族半导体及其合金半导体纳米晶中的电子-空穴都以动态激子形式存在.

动态激子的量子限域效应不但导致受激产生的电子和空穴的动能量子化, 而且使得电子和空穴各自的能级能量变得与尺寸强烈相关. 物质的绝大部分物理和化学性质都决定于其电子结构, 因此, 尺寸相关的电子能级必然导致量子点的各种性质变得与尺寸相关, 而不是简单地决定于其成分. 光激发条件下, 一系列尺寸不同的CdSe为核的核/壳量子点能够高效(荧光量子产率接近100%)、稳定地发射高色纯度(荧光半峰宽~20 nm)的单色光[7]. 如图1(b)所示, 其高质量的单色发光能覆盖可见光窗口的主要部分, 满足照明和显示的需求.

相对于动态激子动能的量子限域效应, 半导体纳米晶随尺寸减小还会出现能带的带边部分变成分立能级的现象. 在一些文章中, 后面这种现象被当作量子点的量子限域效应. 实际上, 虽然后一种现象也与尺寸相关, 但能级能量(包括动能和势能)的改变在基态就会发生, 不涉及受激产生的导带电子和价带空穴. 而实验和理论都证明, 图1所示的尺寸可调的发光波长取决于动态激子的两种载流子动能的量子限域效应. 针对量子点的其他测量, 所得性质也主要决定于动态激子的量子限域效应, 带边能级随尺寸分立效应一般只起辅助作用.

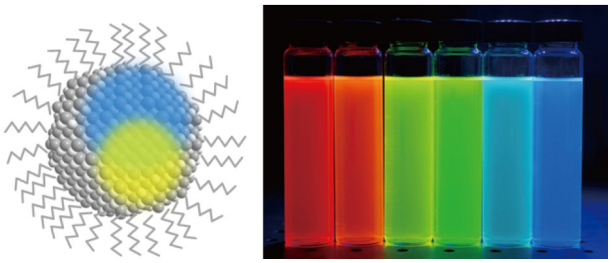


图 1 (网络版彩色)有机配体配位的半导体纳米晶中受激产生的电子-空穴波函数(a)和溶液中不同尺寸量子点荧光照片(b). 图(a)中, 电子有效质量小, 波函数(蓝色)大于空穴波函数(黄色). 图(b)中, 从左至右, 发光中心尺寸逐渐变小

Figure 1 (Color online) Electron-hole wave functions in a semiconductor nanocrystal capped with organic ligands (a) and a fluorescence photograph of quantum dots with different sizes in solution (b). In figure (a), the wave function of the electron (blue) is larger than that of the hole (yellow) due to the smaller effective mass. In figure (b), the particle size of the emitters gradually decreases from left to right

2 量子点的发现与合成

量子点实际上包括3种完全不同的材料体系: 溶液中合成与加工的溶液量子点[4]、固体介质(主要是玻璃)中合成的量子点[8]、单晶半导体上外延生长的自组织量子点[9]. 量子点这个名称与后者关系密切, 最初用来描述刻蚀量子阱而形成的全部3个维度都表现出量子限域效应的纳米岛状结构[10], 以区别一维限域的半导体量子阱(20世纪70年代初期发明, 2000年度诺贝尔物理学奖). 受限于晶格匹配的严格要求以及半导体基底不能提供足够高的势垒, 分子束外延生长的自组织量子点的尺寸难以控制、尺寸分布极宽, 且在室温条件下不能稳定发光, 目前化学家很少涉及.

20世纪70年代末, Ekimov(苏联凝聚态物理学家)开始研究传统彩色玻璃中无机化合物着色的问题, 确定玻璃介质中的半导体为纳米晶, 并观察到了氯化亚铜(一种不常用的半导体)中Wannier激子的量子限域效应, 进而开始了半导体纳米晶尺寸控制合成的研究[8]. 尽管这条路线合成的量子点控制困难且难以进一步加工应用到不同方向, Ekimov仍坚持了十多年的玻璃介质中合成控制研究, 最终于1993年报道了接近单分散CdSe纳米晶尺寸相关的吸收光谱(动态激子吸收), 与溶液合成的CdSe纳米晶已经比较接近, 与他们推导的激子的量子限域公式符合很好[11].

1980年前后, 西方数个实验室几乎同时开始探索在溶液中合成半导体, 主要目的是探索利用溶液中半导体实现廉

价、稳定、高效的光催化和光合成，以应对石油危机. 其中两个最有代表性人物分别是德国的Henglein和美国贝尔实验室的Brus. Henglein[12]和Brus[13]几乎同时于1982年发表了第一篇溶液中CdS纳米晶光催化文章. 在观察到尺寸相关的光学性质(尺寸不同颜色不同)后，以Henglein为代表的多个实验室继续沿着光催化与光合成的方向探索，包括在半导体纳米晶上沉积电荷转移物质和反应中心. 至1987年, Henglein[14]以“Photochemistry of colloidal semiconductors”为题的系列文章的编号就已经到了20. 与这些学者不同，Brus[4,5,15]在观察到溶液中CdS尺寸相关的颜色变化后，鉴于贝尔实验室大批学者在研究量子阱器件, 立刻意识到这应该是量子限域效应, 并对晶界限域的电子-空穴对的量子限域效应做了全面定量分析. 此后, Brus几乎停止了光催化和光化学的探索, 而聚焦于溶液中半导体纳米晶的控制合成，以实现理想的尺寸相关光学性质, 尤其是荧光性质. 原则上, 优异的带边发光性质标志着半导体纳米晶中产生了基本稳定的激子.

Henglein等一众化学家坚持把半导体纳米晶发展为溶液中的光催化剂，而Brus则独树一帜转而把半导体纳米晶发展成为独特的、拥有量子限域效应的光学材料.

在之后的十多年时间里，Brus不断改进半导体纳米晶的合成方法, 从普遍采用的水相共沉淀法, 到胶束模板法, 再到高温有机溶剂合成方法. 1990年左右，Brus[16]终于制备得到接近单分散的纳米尺寸CdSe单晶, 展示了纯净的带边激子发光. 不同于其他实验室普遍采用的合成方法，其镉前体为高反应活性(同时也是剧毒、易爆)的二甲基镉(MOCVD常用镉前体), 溶剂为高沸点但易燃、剧毒的有机膦化合物. 根据其特点，该新一代合成体系在领域中被称为“金属有机配位溶剂高温合成路线”. 1990年前后，贝尔实验室不再支持Brus的基础研究，Brus转而研究更接近电子半导体产业的单晶硅量子点的合成, 证明纳米尺度的硅单晶依然是间接带隙半导体, 虽然能够展示量子限域效应，但不适合于发展面向光学与光电应用的量子点[17].

Bawendi在Brus实验室完成了博士后工作后，于1990年离开贝尔实验室加入MIT建立自己的实验室. 认识到“金属有机配位溶剂高温合成路线”的重要性，Bawendi继续发展该路线. 虽然合成路线改变不大, 但Bawendi证明可采用尺寸选择性沉淀分离不同尺寸的量子点. 具体地，将尺寸分布不够均一的初产品(~1 g)溶解于良溶剂，然后慢慢加入不良溶剂至沉淀溶液中较大部分粒子，离心分离得到沉淀组分，多次重复“溶解-部分沉淀-离心分离”循环，大致能得到~0.01 g接近尺寸单分散的CdSe纳米晶. 由此，Bawendi[18]得到了一个完整系列的CdSe纳米晶，在人类历史上第一次实验证实：仅仅改变一种物质(CdSe半导体纳米晶)的尺寸，就可获得覆盖大部分可见光窗口的高色纯度半导体带边激子发光材料. 在1990~2001年间，Brus-Bawendi的“金属有机配位溶剂高温合成路线”得到的量子点光学质量是其他方法不能匹敌的.

Brus的另外一位博士后Alivisatos[19]在加州大学伯克利分校进一步证明，“金属有机配位溶剂高温合成路线”有一定的普适性，可以制备棒状CdSe纳米晶. 不过，“金属有机配位溶剂高温合成路线”的不足显而易见，其不但依赖易燃、易爆、剧毒的前体和溶剂，而且重复性不高，合成离不开手套箱等昂贵设备, 难以工业化规模生产.

Peng在阿肯色大学研究了“金属有机配位溶剂高温合成路线”的合成机理，发现易燃、易爆、剧毒的金属有机前体可用氧化物或羧酸盐取代[20]、有机膦类配位溶剂可用简单碳氢化合物非配位溶剂(如1-十八烯)取代[21]. 由此, Peng开发出了普适、廉价、易大规模量产的“量子点绿色合成路线”, 该路线在过去20多年里成为学术界和工业界尺寸可控量子点合成标准路线. 无需繁琐的尺寸选择性分离，该路线可高产量地直接生成尺寸单分散量子点(图2)[1]. Peng[22]在2009年归国后提出“量子点激发态合成控制”, 发展了“先内部单晶、后表面配体匹配”的策略，把代表性量子点体系的动态激子性质大幅提升到接近理想水平, 且可控、可重复.

最近几年，量子点合成化学的逐步完善使得量子点快速进入光学和光电领域. 特别地，认识到量子点动态激子的超高色纯度发光特别适合于发展新型显示技术，美国、日本、

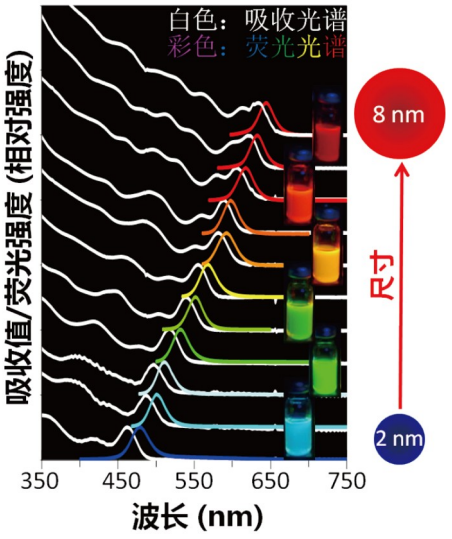


图 2 (网络版彩色)不需要任何尺寸分离，“量子点绿色合成路线”就可以高产量地生成不同尺寸的单分散CdSe纳米晶. 为清晰起见, 不同尺寸纳米晶的吸收和荧光光谱被人为设定了不同的基线，荧光光谱谱线颜色与发光颜色匹配. 插图中的荧光照片给出了几种典型尺寸量子点的荧光发射颜色

Figure 2 (Color online) Without any size-selective separation, the “quantum dot green synthesis route” can produce monodisperse CdSe nanocrystals of different sizes with high yields. For clarity, the absorption and fluorescence spectra of nanocrystals with different sizes were artificially set with different baselines, and the line colors of fluorescence spectra matched the fluorescence colors of the corresponding quantum dots. The photographs in the inset show fluorescence colors of quantum dots with several typical sizes

中国及韩国等国家把量子点背光源液晶显示终端推向市场, 已经达到年销售数百亿水平, 真正走进了千家万户, 初步展现了量子点独特性质的巨大价值.

3 量子点与合成化学

量子点领域被广泛认为是化学、物理和材料交叉的多学科领域, 但是, 合成化学在其中占据了独特的地位. 原则上, 没有高质量的量子点, 也就谈不上可靠的物理性质研究, 更谈不上材料领域的应用. Efros和Brus[1]在2021年指出, 由于人类对于光与物质相互作用的认识多有不足, 虽然可以肯定半导体纳米晶领域会蓬勃发展, 但其爆发的方向难以预料, 唯一可以预料的是, 潜在的大规模突破性进展依赖于合成化学更加精准的控制.

从合成化学角度看, 尺寸和形貌相关的性质对化学家并不陌生. 化学家早就知道, 元素组成一模一样的有机分子, 其尺寸和形貌的变化可以造成它们性质发生质的改变. 例如, 乙醇水溶液可以作为饮料, 但尺寸稍小的甲醇则不可以; 大小一模一样的两个有机分子, 仅仅因为其中一个碳中心手性的不同, 一个分子可以是高效药物, 另一个则是毒物.

在过去一个世纪里, 有机合成化学快速发展, 大大超过了无机合成化学, 人们制备了数以百万计元素组成相同但尺寸和原子排列方式不同的有机分子. 过去, 对于无机物, 化学家默认硫化铅就是PbS、硒化镉就是CdSe, 键合在一起组成基元多寡没有实际意义. 量子点研究揭示, 改变少数几个结构单元, 无机半导体纳米晶的化学与物理性质同样可以发生质的变化. 这意味着, 和有机合成化学一样, 用少数几种元素通过改变组成单元的数目和排列方式, 无机合成化学也可以制造出超大量的性质各有不同的半导体纳米晶, 服务于显示、照明、疾病诊断、太阳能电池、激光、量子光源、光催化与光合成等重大领域.

如上所述, 半导体纳米晶的性质核心在于受激产生的动态激子, 这意味着, 半导体纳米晶本质上是激发态材料. 更为重要的, 绝大多数时候, 半导体纳米晶激子性质与基态结构难以形成一一对应关系. 于是, 量子点合成化学的最终目标, 是通过发展各式各样的合成化学手段控制半导体纳米晶的激发态行为, 组成、形貌、尺寸等结构合成控制只是其起步. 显然, 这与传统合成化学存在本质不同, 后者的目标一般局限于基态性质的合成控制.

推荐阅读文献

1 Efros A L, Brus L E. Nanocrystal quantum dots: From discovery to modern development. ACS Nano, 2021, 15: 6192–6210
2 Kambhampati P. Nanoparticles, nanocrystals, and quantum dots: What are the implications of size in colloidal nanoscale materials? J Phys Chem Lett, 2021, 12: 4769–4779
3 Ekimov A I, Efros A L, Onushchenko A A. Quantum size effect in semiconductor microcrystals. Solid State Commun, 1985, 56: 921–924
4 Rossetti R, Nakahara S, Brus L E. Quantum size effects in the redox potentials, resonance Raman spectra, and electronic spectra of CdS crystallites in aqueous solution. J Chem Phys, 1983, 79: 1086–1088
5 Brus L E. Electron–electron and electron-hole interactions in small semiconductor crystallites: The size dependence of the lowest excited electronic state. J Chem Phys, 1984, 80: 4403–4409
6 Lv L, Liu S, Li J, et al. Synthesis of weakly confined, cube-shaped, and monodisperse cadmium chalcogenide nanocrystals with unexpected photophysical properties. J Am Chem Soc, 2022, 144: 16872–16882
7 Zhou J, Zhu M, Meng R, et al. Ideal CdSe/CdS core/shell nanocrystals enabled by entropic ligands and their core size-, shell thickness-, and ligand-dependent photoluminescence properties. J Am Chem Soc, 2017, 139: 16556–16567
8 Ekimov A I, Onushchenko A A, Tsekhomski V A. Exciton absorption by copper chloride crystal in glassy matrix. Fiz Khim Stekla, 1980, 16: 511–512
9 Leonard D, Krishnamurthy M, Reaves C M, et al. Direct formation of quantum-sized dots from uniform coherent islands of InGaAs on GaAs surfaces. Appl Phys Lett, 1993, 63: 3203–3205
10 Reed M A, Bate R T, Bradshaw K, et al. Spatial quantization in GaAs–AlGaAs multiple quantum dots. J Vacuum Sci Tech B-MicroElectron Processing Phenomena, 1986, 4: 358–360
11 Ekimov A I, Kudryavtsev I A, Efros A L, et al. Absorption and intensity-dependent photoluminescence measurements on CdSe quantum dots: assignment of the first electronic transitions. J Opt Soc Am B, 1993, 10: 100–107
12 Henglein A. Photochemistry of colloidal cadmium sulfide. 2. Effects of adsorbed methyl viologen and of colloidal platinum. J Phys Chem, 1982, 86: 2291–2293
13 Rossetti R, Brus L. Electron-hole recombination emission as a probe of surface chemistry in aqueous cadmium sulfide colloids. J Phys Chem, 1982, 86: 4470–4472
14 Spanhel L, Haase M, Weller H, et al. Photochemistry of colloidal semiconductors. 20. Surface modification and stability of strong luminescing CdS particles. J Am Chem Soc, 1987, 109: 5649–5655

15 Brus L E. A simple model for the ionization potential, electron affinity, and aqueous redox potentials of small semiconductor crystallites. J Chem Phys, 1983, 79: 5566–5571
16 Steigerwald M L, Brus L E. Semiconductor crystallites: A class of large molecules. Acc Chem Res, 1990, 23: 183–188
17 Wilson W L, Szajowski P F, Brus L E. Quantum confinement in size-selected, surface-oxidized silicon nanocrystals. Science, 1993, 262: 1242–1244
18 Murray C B, Norris D J, Bawendi M G. Synthesis and characterization of nearly monodisperse CdE (E = sulfur, selenium, tellurium) semiconductor nanocrystallites. J Am Chem Soc, 1993, 115: 8706–8715
19 Peng X, Manna L, Yang W, et al. Shape control of CdSe nanocrystals. Nature, 2000, 404: 59–61
20 Peng Z A, Peng X. Formation of high-quality CdTe, CdSe, and CdS nanocrystals using CdO as precursor. J Am Chem Soc, 2001, 123: 183–184
21 Yu W W, Peng X. Formation of high-quality CdS and other II-VI semiconductor nanocrystals in noncoordinating solvents: Tunable reactivity of monomers. Angew Chem Int Ed, 2002, 41: 2368–2371
22 Pu C, Qin H, Gao Y, et al. Synthetic control of exciton behavior in colloidal quantum dots. J Am Chem Soc, 2017, 139: 3302–3311

Summary for “2023年度诺贝尔化学奖与激子(光子)操控物质平台”

Nobel Prize in Chemistry 2023 and a material platform for exciton (photon) manipulation

Zikang Ye[1,3], Haiyan Qin[2,3] & Xiaogang Peng[2,3*]

[1] *College of Optical Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China;*
[2] *Department of Chemistry, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China;*
[3] *Key Laboratory of Excited-State Materials of Zhejiang Province, Hangzhou 310058, China*
* Corresponding author, E-mail: xpeng@zju.edu.cn

The Nobel Prize in Chemistry 2023 was awarded to Moungi G. Bawendi, Louis E. Brus, and Aleksey Ekimov for their pioneering work in the “discovery and synthesis of quantum dots”. In this paper, we explore the significance of this Nobel Prize to the discipline of chemistry from the perspective of the development history and the future of quantum dots. We also discuss the unique opportunities for the development of chemistry, especially synthetic chemistry, triggered by this type of “atypical” chemical synthesis targets. Exciton (electron-hole pair) is a key element in quantum dots, and the ability to control the behavior of excitons forms the basis for many applications of quantum dots. Unlike conventional synthetic chemistry goals, which focus on the ground state properties like composition, morphology and size, the ultimate goal of quantum dot synthetic chemistry is to control excitons generated by excitation in semiconductor nanocrystals. Meanwhile, it should be noted that the ground state properties of quantum dots do not always have one-to-one correspondences with the excited states (i.e. various types of excitonic states). Furthermore, unlike the Wannier excitons bounded by weak Coulomb interaction in bulk semiconductors, which can hardly exist stably, the excitons generated by excitation in semiconductor nanocrystals are dynamic excitons confined by the crystal boundaries. The electrons and holes of the confined dynamic excitons behave as “particle-in-a-box”, and the kinetic energy is quantized, resulting in a generalized quantum confinement effect. This effect makes the electronic energy levels show strong size dependence, causing various properties of quantum dots, such as photoluminescence peak position, redox potential and charge transfer dynamics to be determined not only by their composition but also by their size. Based on their unique properties, dynamic excitons in semiconductor nanocrystals can be utilized as an effective material platform for manipulating photon annihilation, generation, and transformation. With the continuous progress of synthetic chemistry, mono-dispersed high-quality quantum dots were synthesized and the synthesis route has been developed from being dangerous and expensive to environment-friendly and scalable. It promotes the vigorous development of quantum dots in both academy and industry, and proves the diversity of synthetic chemistry of inorganic materials can be as rich as that of organic chemistry: Relying on a limited number of elements, massive inorganic nanomaterials with various properties can be fabricated through the control of the number of primitives and the way they are assembled, serving energy, communication, medicine and many other fields.

Noble Prize in Chemistry, quantum dot, exciton, synthetic chemistry, quantum confinement effect

doi: 10.1360/TB-2023-1165