

半导体量子点在白光LED器件上的应用研究

高小钦 卓宁泽 王海波 崔一平 张家雨

Application of semiconductor quantum dots on white-light-emitting diodes

Gao Xiao-Qin Zhuo Ning-Ze Wang Hai-Bo Cui Yi-Ping Zhang Jia-Yu

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 137801 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.137801

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.137801>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I13>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

等离子体增强 InAs 单量子点荧光辐射的研究

Photoluminescence from plasmon-enhanced single InAs quantum dots

物理学报.2014, 63(2): 027801 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.027801>

基于 COMSOL Multiphysics 对 Cu₂S 量子点的表面等离激元共振模拟研究

Simulation study based on the COMSOL Multiphysics to the surface plasmon resonance of Cu₂S quantum dots

物理学报.2013, 62(19): 197803 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.197803>

计及激子-双激子相干下半导体单量子点中的空间光孤子对

Spatial optical soliton pairs in a quantum dot with exciton-biexciton coherence

物理学报.2013, 62(14): 147801 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.147801>

电场调谐 InAs 量子点荷电激子光学跃迁

Optical transition of the charged excitons in InAs single quantum dots

物理学报.2013, 62(4): 047801 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.047801>

分子束外延生长 InGaN/AlN 量子点的组分研究

Studies on the composition of InGaN/AlN quantum dots grown by molecular beam epitaxy

物理学报.2012, 61(23): 237804 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.237804>

半导体量子点在白光LED器件上的应用研究*

高小钦¹⁾ 卓宁泽²⁾ 王海波²⁾ 崔一平¹⁾ 张家雨^{1)†}

1)(东南大学电子科学与工程学院, 先进光子学中心, 南京 210096)

2)(南京工业大学电光源材料研究所, 南京 210015)

(2014年11月28日收到; 2015年3月1日收到修改稿)

以CdSe, CuInS₂和CdS:Mn量子点为例, 本文基于量子点白光LED器件的电光转换过程, 引入量子点的“类”光谱光效率函数, 给出了该器件的色坐标、光效和量子点配比等计算公式, 理论计算结果和实验结果基本一致. 研究结果表明量子点的荧光峰位和峰宽对白光器件的显色指数有显著影响.

关键词: 量子点, 固态照明, 白光LED

PACS: 78.55.-m, 78.67.Hc

DOI: 10.7498/aps.64.137801

1 引言

白光LED作为一种固态照明光源, 具有光效高、体积小和节能环保等优点, 近年来, 其应用领域和市场占有率不断扩大^[1,2]. 目前商用白光LED器件产生白光的方式通常是用蓝光LED芯片来激发黄色荧光粉YAG:Ce³⁺, 所制备的白光LED器件由于缺失红光光谱区, 显色指数一般在70左右^[3], 满足不了室内照明的要求(显色指数一般要求不低于80). 研究人员主要是通过混合多色荧光粉(如红粉和绿粉)来提高光谱的饱和度, 从而提高器件的显色指数, 当前常用的红粉主要是氮化物体系, 绿粉为铝酸盐体系, 但是此种方法存在成本高、荧光粉之间不同基质的自吸收和均匀度低的问题^[4]. 相对于上述传统的荧光粉, 半导体量子点作为一种新型发光材料, 其荧光性质可通过其尺寸、形状、结构和掺杂来进行调节, 具有光谱可调, 成本低, 用量少和发射光谱宽等优点, 可以弥补传统荧光粉的发光缺点, 因此可利用它来改善白光LED器件的显色指数, 许多学者也进行了相关的研究, 例如将红光CdSe/ZnSe核/壳量子点掺入到上述YAG:Ce³⁺基LED中, 可将显色指数提高到92^[3]. 目前

应用于白光LED器件上的半导体量子点包括II-VI族半导体纳米材料^[5,6]、以无毒CuInS₂为代表的I-III-VI族半导体纳米材料^[7,8]以及锰或铜掺杂的半导体纳米材料^[9-11].

有别于YAG:Ce³⁺荧光粉中光吸收和荧光辐射都发生在掺杂稀土离子Ce³⁺上, 量子点在光激发下激子形成于半导体纳米晶体中, 因此量子点具有光吸收截面大的特点, 其具体数值可由实验精确测得^[12]. 此外, 量子点的荧光量子产率可由实验测得, 其荧光峰的中心波长和半高宽也可进行人工调控, 这使得对量子点白光LED器件的光学性质进行数值模拟成为可能, 数值计算结果能对量子点的选择以及器件封装的配色、光效提供指导. 本文以CdSe, CuInS₂和CdS:Mn量子点为例, 基于量子点的白光LED器件的电光转换过程, 引入量子点的“类”光谱光效率函数, 来简便计算量子点白光LED器件中的量子点材料配比、器件光效和色坐标等, 并进行了实验验证.

2 结果和讨论

蓝光LED芯片的发射光谱($P_{LED}(\lambda)$)和量子点的荧光光谱($P_{QD}(\lambda)$)都可用高斯函数来近

* 国家重点基础研究发展计划(973计划)(批准号: 2012CB921801)和江苏省科技支撑计划(批准号: BE2012163)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: jy Zhang@seu.edu.cn

似^[13]. 商用蓝光LED的发光峰位(λ_{blue})可通过改变InGaN有源层的成分配比来调控, 发光峰强度半高全宽(FWHM)一般在25 nm左右^[1]. 量子点的荧光峰位(λ_{QD})可通过其尺寸和掺入杂质来改变. 量子点的荧光为1 W功率时的光通量为

$$\begin{aligned}\psi_{QD} &= K_m \cdot \int P_{QD}(\lambda) V(\lambda) d\lambda \\ &= K_m \cdot \Phi_{QD},\end{aligned}\quad (1)$$

其中 $V(\lambda)$ 为明视觉光谱光效率函数, K_m 为明视觉的最大光谱光效率函数(按国际实用温标ITS-68的理论计算值, $K_m = 683 \text{ lm/W}$). 图1给出了CdSe, CuInS₂和CdS:Mn这三种量子点的类光谱光效率函数(Φ_{QD})值. CdSe量子点是一种被广泛研究的半导体纳米材料, 不仅 λ_{QD} 值可在很宽的波长范围内调节, 而且尺寸分布具有很好的均一性, 使其荧光FWHM值可小于30 nm, 因此其 Φ_{QD} 值接近于 $V(\lambda)$, 类似地, 蓝光LED芯片具有很窄的发光峰, 其 Φ_{QD} 值与 $V(\lambda)$ 也很接近.

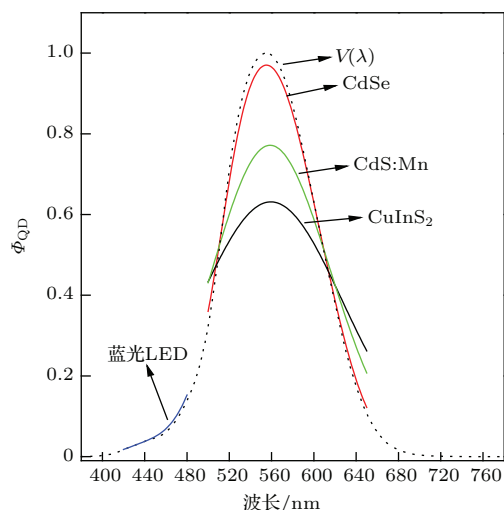


图1 (网刊彩色) CdSe, CuInS₂和CdS:Mn这三种量子点的类光谱光效率函数(Φ_{QD})值, 其中它们的FWHM值根据文献[5, 7, 14]分别选取为28 nm, 125 nm和85 nm. $V(\lambda)$ 和蓝光LED芯片的 Φ 值也给出以便比较

Fig. 1. (color online) The pseudo spectral luminous efficiency function (Φ_{QD}) of CdSe, CuInS₂ and CdS:Mn quantum dots whose full-width-at-half-maximum (FWHM) is set as 28, 125 and 85 nm, respectively [5, 7, 14]. The visual function ($V(\lambda)$) and that of blue-light-emitting LED chip are shown also.

CuInS₂荧光与其带间缺陷有关, 这些带间缺陷具有复杂的能级结构, 使得其荧光峰具有很大的FWHM值, 图1表明CuInS₂的 Φ_{QD} 值远低于 $V(\lambda)$. 在Mn掺杂II-VI族半导体纳米晶体中, 纳

米晶体吸收光, 然后把能量传递给杂质离子, 由杂质离子发光, 因此有大的Stokes位移, 其荧光峰位可通过调节杂质Mn所处的位置及晶体内应力来改变^[14,15]. CdS:Mn量子点的FWHM值小于CuInS₂, 因此其 Φ_{QD} 值大于CuInS₂. 图1表明量子点的 Φ_{QD} 值与其荧光FWHM值密切相关. 此外, 目前商用YAG:Ce³⁺的荧光峰一般在560 nm左右, FWHM值约为120 nm^[1], 其 Φ 值约等于0.65.

另一方面, 因为量子点的荧光具有一定的带宽, 其色坐标(x, y)将有别于单色光, 可由下列公式^[16]计算量子点荧光的色坐标:

$$X = \int X(\lambda) P(\lambda) d\lambda, \quad (2a)$$

$$Y = \int Y(\lambda) P(\lambda) d\lambda, \quad (2b)$$

$$Z = \int Z(\lambda) P(\lambda) d\lambda, \quad (2c)$$

其中 $X(\lambda)$, $Y(\lambda)$ 和 $Z(\lambda)$ 为CIE规定的三刺激值. 三种量子点CdSe, CuInS₂和CdS:Mn以及蓝光LED芯片的色坐标如图2所示. 由于CdSe具有很窄的荧光峰, 其色坐标接近于单色光的色坐标. 由蓝光LED和量子点所封装的白光照明器件的色坐标将位于两者色坐标的连线上, 其色坐标(x_{device} , y_{device})为

$$x_{device} = (1 - \beta) \cdot x_{LED} + \beta \cdot x_{QD}, \quad (3a)$$

$$y_{device} = (1 - \beta) \cdot y_{LED} + \beta \cdot y_{QD}, \quad (3b)$$

其中 β 为量子点荧光在白光器件功率光谱中所占的比例. 图2中正方形虚框为标准白光区域^[17]. 涂覆CdSe, CuInS₂和CdS:Mn这三种量子点的LED器件都可通过调节 β 值, 使其色坐标处于标准白光区域, 该白光器件的光效为

$$\begin{aligned}L(\beta) &= \frac{K_m \cdot \eta_{LED}}{1 - \beta + \frac{\lambda_{QD}}{\lambda_{LED}} \cdot \frac{\beta}{\eta_{QD}}} \\ &\times [(1 - \beta) \cdot \Phi_{LED} + \beta \cdot \Phi_{QD}],\end{aligned}\quad (4)$$

其中 η_{LED} 为蓝光LED芯片的电光转换效率, 即芯片的光辐射功率与输入电功率之比, η_{QD} 为量子点的量子产率(量子点发射的荧光光子数与被吸收的蓝光光子数之比). 显然 η_{LED} 和 η_{QD} 的值越高, 白光器件的光效就越高. 在 η_{LED} 和 η_{QD} 这两项数值确定的情况下, 器件的光效与量子点荧光在白光器件功率光谱中所占的比例 β 值密切相关.

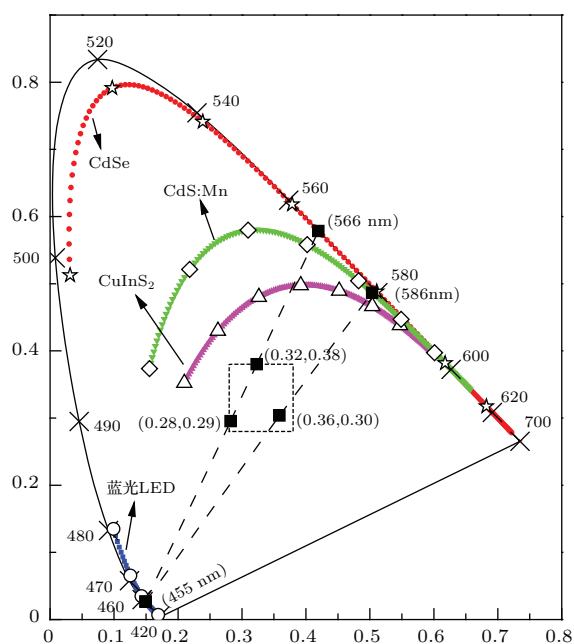


图2 (网刊彩色) CdSe, CuInS₂ 和 CdS : Mn 量子点荧光以及蓝光 LED 芯片的色度图(虚线正方形为标准白光区域, 两条虚线连接示意了 CdSe 和 CdS : Mn 量子点(其荧光如图3(a)所示)和 455 nm LED 芯片封装的白光器件色度)

Fig. 2. (color online) The chromaticity diagram of CdSe, CuInS₂ and CdS : Mn quantum dots as well as blue-light-emitting LED chip. The dotted square is the white-light area adopted in Ref 16, and the two dotted lines indicate the chromaticity of white-light-emitting devices with the maximal luminous efficiency.

不管是本征发光类型的量子点(CdSe), 还是缺陷态或杂质发光类型的量子点(CuInS₂ 或 CdS

: Mn), 其光吸收过程都是将电子从量子点的导带激发到价带上, 并且其线性吸收具有很宽的范围, 例如 CdSe 量子点激发光在小于 10^6 W/cm² 量级时(该量级远大于蓝光 LED 芯片的蓝光出射强度)都表现为线性吸收^[18], 因此利用量子点封装的白光 LED 器件的色坐标和色温等色度学参数将不会随蓝光 LED 芯片的蓝光出射功率的波动而改变. 对于一个出光面积为 A 的蓝光芯片, 封装所需量子点的质量为

$$M = \frac{A \cdot m_{\text{QD}}}{\sigma_{\text{QD}}} \left| \ln \left[\frac{1 - \beta}{1 - \beta + \frac{\lambda_{\text{QD}}}{\lambda_{\text{LED}}} \cdot \frac{\beta}{\eta_{\text{QD}}}} \right] \right|, \quad (5)$$

其中 σ_{QD} 和 m_{QD} 分别为单个量子点的光吸收截面和质量. 由于相比于 YAG : Ce³⁺ 的激发态波函数局域在 Ce 杂质离子上, 量子点的激子波函数扩展在整个量子点中, 因此量子点具有大的光吸收截面, 从而封装 LED 所需量子点较 YAG : Ce³⁺ 少很多, 如图3(b)所示.

实验中我们利用 CdSe 和 CdS : Mn 两种量子点来封装 1 W 蓝光 LED 芯片. CdSe 量子点制备的详细过程如文献所述^[19], CdS : Mn 量子点制备过程与文献^[20]中 ZnSe : Mn/ZnSe 的制备过程类似, 所不同的只是将其中的反应前驱物硬脂酸锌和硒分别等摩尔量地换成硬脂酸镉和硫. 实验所用蓝光 LED 芯片为美国大厂 CREE 公司生产的碳化硅衬底垂直芯片, 发光面积为 38 mil × 38 mil, 中心波长

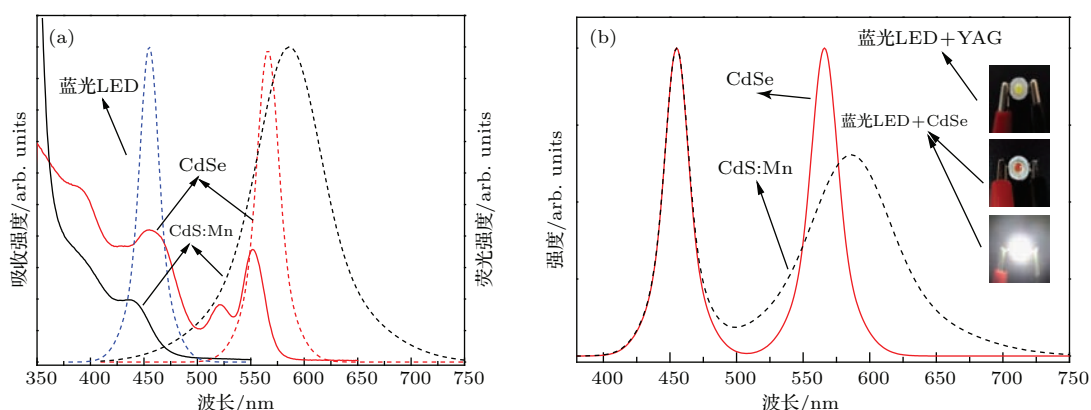


图3 (网刊彩色) (a) 图为 CdSe, CdS : Mn 的吸收和荧光谱以及蓝光 LED(455 nm) 的发射谱, 这两种量子点的 QY 值均为 50%; (b) 图将 CdSe, CdS : Mn 涂覆在蓝光 LED 上得到的白光光谱(上插图和中插图分别为 YAG : Ce³⁺ 和 CdSe 涂覆的白光 LED 实物图, 清晰地表明 CdSe 量子点的用量远小于 YAG : Ce³⁺ 荧光粉. 下插图量子点涂覆白光器件点亮的效果图)

Fig. 3. (color online) (a) The absorption and photoluminescent (PL) spectra of CdSe and CdS : Mn quantum dots whose quantum yield is the same 50%. The PL spectra of blue-light-emitting LED chip is shown also. (b) The luminescent spectra of the devices combined with the chip and CdSe or CdS : Mn quantum dots. The top and middle photos, inserted in the Fig. 3(b), are the white-light-emitting devices with YAG : Ce³⁺ and CdSe, respectively, indicating the mass of CdSe is much lower than that YAG : Ce³⁺. The bottom photo is about the lighting CdSe-based device.

为 455 nm, 其 $\eta_{\text{LED}} = 50\%$. 这两种量子点的吸收边波长均大于蓝光发射峰的中心波长, 如图 3(a) 所示, 因此能有效吸收激发光. CdSe 量子点的荧光峰和 FWHM 值分别为 566 nm 和 28 nm, 利用其与蓝光 LED(455 nm) 封装可得到白光器件, 如图 2 所示. 当通过调节 β 值使其色坐标位于标准白光的上虚框时 (此时色坐标为 (0.32, 0.38)), 其光效达到最大值 (~ 110 lm/W). 此外, 利用 YAG : Ce^{3+} 荧光粉 (假设其 QY = 90%) 与蓝光 LED 芯片封装所获得的白光器件最大光效为 ~ 141 lm/W. CdSe 量子点的尺寸为 3.4 nm, 其光吸收截面为 $5.7 \times 10^{-2} \text{ nm}^2$ [21], 根据 (5) 式计算所得的 CdSe 量子点使用质量约为 3 μg . 实验所获得的 CdSe 封装白光 LED 器件的发光光谱如图 3(b) 所示, 该器件的色坐标为 (0.28, 0.29), 根据 (4) 式计算的理论光效为 98 lm/W. 实验测得的光效为 89 lm/W, 与理论值有较大差距, 这是因为 CdSe 量子点的 Stokes 位移 (~ 14 nm) 比较小, 具有很大的自吸收效应, 而理论 (4) 式没有考虑量子点的自吸收效应. 另一方面, CdS : Mn 量子点的荧光峰和 FWHM 值分别为 586 nm 和 85 nm, 利用其与蓝光 LED(455 nm) 封装也能获得白光器件, 实验所获得 CdS : Mn 基白光器件的色坐标为 (0.36, 0.30), 光效为 73 lm/W, 而根据 (4) 式计算的光效为 76 lm/W. 由于 CdS : Mn 量子点具有大的 Stokes 位移 (~ 148 nm), 能有效抑制自吸收效应, 因此其光效的理论和实验值两者之间相差较小.

量子点的另一个应用方向是来改善 YAG : Ce^{3+} 基白光器件的显色指数. 利用蓝光 LED 芯片 (发射峰波长取 455 nm) 激发 YAG : Ce^{3+} 荧光粉 (荧光峰波长和 FWHM 值分别取 560 nm 和 120 nm) 制备的白光 LED 器件, 其显色指数只能达到 76. 图 4 表明, 将量子点掺入到 YAG : Ce^{3+} 基白光器件中, 能大大改善其显色指数, 并且显色指数极大值与量子点的荧光峰位和 FWHM 值密切相关. 通过掺入 CdSe, CuInS_2 和 CdS : Mn 量子点, 可分别将 YAG : Ce^{3+} 基白光器件的显色指数提高到 96, 92 和 98. 实验中我们将荧光峰波长为 616 nm 的 CdS : Mn 量子点掺入 YAG : Ce^{3+} 基白光 LED 器件中. 将硅胶与 YAG : Ce^{3+} 按质量比为 10 : 1 混合, 置于荧光光谱仪中, 在 455 nm 波长光激发下, 逐渐加入 CdS : Mn 量子点, 直到混合溶液的荧光光谱中 616 nm 和 560 nm 的光强之比达到 6 : 5

为止. 然后将此混合溶液涂覆在蓝光 LED 芯片上 (发射峰波长为 455 nm), 通过调节涂覆量, 使 560 nm 和 455 nm 的光强之比达到 9 : 25 为止. 理论计算表明, 可将器件的显色指数提高到 87. 图 5 所示

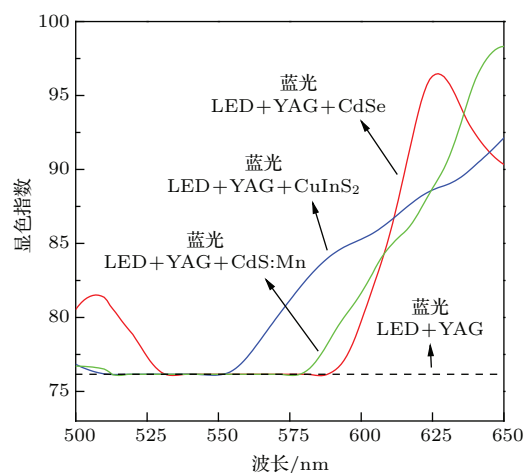


图 4 (网刊彩色) YAG : Ce^{3+} 荧光粉和量子点共封装器件的最大显色指数与量子点荧光峰位之间的依赖关系 (理论计算中 YAG : Ce^{3+} 荧光粉的荧光峰和 FWHM 值分别为 560 nm 和 120 nm, 而 CdSe, CuInS_2 和 CdS : Mn 的荧光 FWHM 值分别为 28 nm, 125 nm 和 85 nm)

Fig. 4. (color online) Dependence of the maximal color rendering index (CRI) on the wavelength of the QD's PL peak. For the YAG : Ce^{3+} -based LED device doped with CdSe, CuInS_2 and CdS : Mn quantum dots whose FWHM is set as 28, 125 and 85 nm, respectively. The position and FWHM of the YAG : Ce^{3+} 's PL peak are 560 nm and 120 nm, respectively.

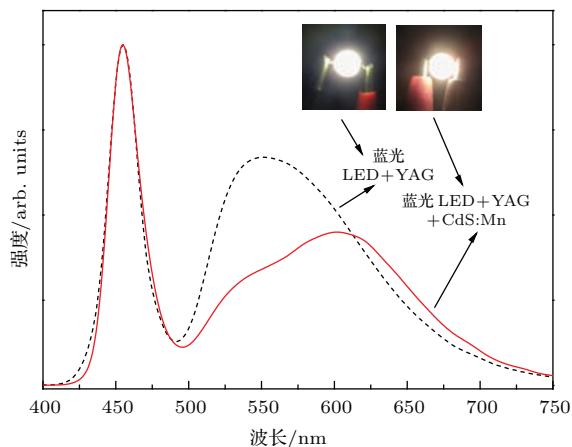


图 5 (网刊彩色) YAG : Ce^{3+} (560 nm) 和 CdS : Mn 量子点 (616 nm) 共封装的白光器件光谱 (实线) 及其点亮后的效果图, 为了比较, 也显示了 YAG : Ce^{3+} 单封装的白光器件光谱 (虚线) 及其点亮后的效果图

Fig. 5. (color online) The luminescent spectra of the YAG : Ce^{3+} -based device (dotted) and CdS : Mn-YAG : Ce^{3+} -based device (solid). The insert photos are for the two devices, indicating the combination with CdS : Mn quantum dots can improve significantly the CRI of the white-light-emitting device.

的实物图清晰表明了YAG : Ce³⁺ 基白光LED器件在掺入CdS : Mn量子点后, 其红光光谱区域得到了补充, 显色指数得到了改善, 实验测得其显色指数为87, 与理论值相符. 对于给定荧光波长的量子点, 只有合适掺入比例才能使得显色指数达到理论的最大值. 当量子点的掺入比例过低或过高时, 例如掺入量子点的荧光波长为616 nm, 光谱中616 nm和560 nm的强度之比分别为1 : 2和2 : 1, 显色指数的理论计算值分别为73和69, 都比最佳比例时低.

3 结 论

本文以CdSe, CuInS₂和CdS : Mn半导体量子点为例, 基于量子点白光LED器件的电光转换过程, 给出了这类器件的色坐标、光效和量子点配料质量等的数值计算公式, 理论计算结果和实验结果是一致的. 研究结果表明量子点的掺入能大大提高YAG : Ce³⁺ 基白光器件的显色指数.

参考文献

- [1] Liu M Q 2013 *LED and Its Application Technology* (Beijing: Chemical Industry Press) pp15–19, 95–97 (in Chinese) [刘木清 2013 LED 及其应用技术 (北京: 化学工业出版社) 第15—19, 95—97页]
- [2] Schubert E F, Kim J K 2005 *Science* **308** 1274
- [3] Chung W, Yu H J, Park S H, Chun B H, Kim S H 2011 *Materials Chemistry and Physics* **126** 162
- [4] Lin C C, Liu R S 2011 *J. Phys. Chem. Lett.* **2** 1268
- [5] Zhang H C, Ye Y H, Zhang J Y, Cui Y P, Yang B P, Shen L 2012 *J. Phys. Chem. C* **116** 15660
- [6] Lee J, Sundar V C, Heine J R, Bawendi M G, Jensen K F 2000 *Adv. Mater.* **12** 1102
- [7] Chen B K, Zhong H Z, Wang M X, Liu R B, Zou B S 2013 *Nanoscale* **5** 3514
- [8] Song W S, Yang H 2012 *Chem. Mater.* **24** 1961
- [9] Kim J U, Kim Y S, Yang H 2009 *Materials Letters* **63** 614
- [10] Wang X B, Yan X S, Li W W, Sun K 2012 *Adv. Mater.* **24** 2742
- [11] Fang D F, Ding X, Dai R C, Zhao Z, Wang Z P, Zhang Z M 2014 *Chin. Phys. B* **23** 127804
- [12] Xing G C, Chakraborty S, Chou K L, Mishra N, Huan C H A, Chan Y, Sum T C 2010 *Appl. Phys. Lett.* **97** 061112
- [13] Li M, Sheng Y 2008 *Spectroscopy and Spectral Analysis* **28** 2352 (in Chinese) [李敏, 盛毅 2008 光谱学与光谱分析 **28** 2352]
- [14] Hazarika A, Pandey A, Sarma D D 2014 *J. Phys. Chem. Lett.* **5** 2208
- [15] Nag A, Cherian R, Mahadevan P, Gopal A V, Hazarika A, Mohan A, Vengurlekar A S, Sarma D D 2010 *J. Phys. Chem. C* **114** 18323
- [16] Jing Q C, Jiao Q C, Yu B L, Hu W S 1979 *Colourometry* (Beijing: Science Press) pp91–93 (in Chinese) [荆其诚, 焦书兰, 喻柏林, 胡维生 1979 色度学 (北京: 科学出版社) 第91—93页]
- [17] Wu Q, Huang X, Liu L, Wang J, Chu M H, Zhang L G, Hou F Q, Liu X Y, Zhao C J, Fan Y, Luo J S, Jiang D P 2007 *Chinese Journal of Luminescence* **28** 736 (in Chinese) [吴庆, 黄先, 刘丽, 王健, 褚明辉, 张立功, 侯凤勤, 刘学彦, 赵成久, 范翊, 罗劲松, 蒋大鹏 2007 发光学报 **28** 736]
- [18] Stewart A F, Bass M 1980 *Appl. Phys. Lett.* **37** 1040
- [19] Zhang J M, Zhang X K, Zhang J Y 2009 *J. Phys. Chem. C* **114** 3904
- [20] Yang B P, Shen X C, Zhang H C, Cui Y P, Zhang J Y 2013 *J. Phys. Chem. C* **117** 15829
- [21] Leatherdale C A, Woo W K, Mikulec F V, Bawendi M G 2002 *J. Phys. Chem. B* **106** 7619

Application of semiconductor quantum dots no white-light-emitting diodes^{*}

Gao Xiao-Qin¹⁾ Zhuo Ning-Ze²⁾ Wang Hai-Bo²⁾ Cui Yi-Ping¹⁾ Zhang Jia-Yu^{1)†}

1) (School of Electronic Science and Engineering, Advanced Photonics Center, Southeast University, Nanjing 210096, China)

2) (Research Institute of Electric Light Source Materials, Nanjing University of Technology, Nanjing 210015, China)

(Received 28 November 2014; revised manuscript received 1 March 2015)

Abstract

Based on the electro-optical energy transfer process, the pseudo-spectral-luminous efficiency function (Φ_{QD}) of quantum dots (QDs) is introduced, the equations of chromaticity coordinates, luminous efficiency, and the QDs' mass of the white-light-emitting devices with CdSe, CuInS₂ or CdS : Mn QDs are obtained, and the calculated results are in agreement with the experimental data. For a certain luminescent peak wavelength, when the full width at half maximum of the QD's photoluminescence becomes larger, the Φ_{QD} value becomes smaller while the chromaticity coordinates become more different from those of the corresponding monochromatic light. It is indicated that the color rendering index (CRI) of the devices is strongly dependent on the photoluminescent position and width of the QDs, and the CRI value can be increased towards 98 when a certain kind of CdS : Mn QDs is added into the traditional white-light LEDs.

Keywords: quantum dot, solid-state light, white-light-emitting diodes

PACS: 78.55.-m, 78.67.Hc

DOI: 10.7498/aps.64.137801

^{*} Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant No. 2012CB921801) and the Science and Technology Department of JiangSu Province, China (Grant No. BE2012163).

[†] Corresponding author. E-mail: jyzhang@seu.edu.cn