



CuInS₂/ZnS量子点光纤发光性质的理论计算

李帅, 张蕾

引用本文:

李帅, 张蕾. CuInS₂/ZnS量子点光纤发光性质的理论计算[J]. *发光学报*, 2020, 41(11): 1403–1410.

LI Shuai, ZHANG Lei. Theoretical Calculation of Emission Properties of CuInS₂/ZnS Quantum Dot Fiber[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2020, 41(11): 1403–1410.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CJL.20200229>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

PbSe量子点液芯光纤的温度效应

Temperature Effect on PbSe Quantum Dot-doped Liquid Core Fiber

发光学报. 2017, 38(5): 623–629 <https://doi.org/10.3788/fgxb20173805.0623>

CdSe/CdS/ZnS量子点光纤的增益研究

Gain Study of CdSe/CdS/ZnS Quantum Dots Doped Fiber

发光学报. 2013, 34(7): 894–899 <https://doi.org/10.3788/fgxb20133407.0894>

Mn掺杂Zn-In-S量子点的制备及发光性质研究

Preparation and Photoluminescence Properties of Mn Doped Zn-In-S Quantum Dots

发光学报. 2015(10): 1113–1117 <https://doi.org/10.3788/fgxb20153610.1113>

抗析晶高增益Er³⁺, Yb³⁺共掺氟磷酸盐光纤材料性能研究

Performance of Anti-crystallized and High Gain Er³⁺, Yb³⁺ Co-doped Fluoride Phosphate Fiber Material

发光学报. 2013, 34(9): 1194–1198 <https://doi.org/10.3788/fgxb20133409.1194>

基于稀土上转换纳米荧光探针的肿瘤标志物体外检测

Lanthanide-doped Upconversion Nano-bioprobes for In-vitro Detection of Tumor Markers

发光学报. 2018, 39(1): 27–49 <https://doi.org/10.3788/fgxb20183901.0027>

文章编号: 1000-7032(2020)11-1403-08

CuInS₂/ZnS 量子点光纤发光性质的理论计算

李 帅, 张 蕾*

(牡丹江师范学院 物理与电子工程学院, 黑龙江省超硬材料重点实验室, 黑龙江 牡丹江 157011)

摘要: 在二能级系统近似下,对 CuInS₂/ZnS 量子点光纤的发光性质进行理论计算,得到在不同量子点荧光寿命、斯托克斯频移和吸收-发射截面时,量子点发光沿光纤的传输情况。结果表明,当3个参数一定时,量子点光纤的发光强度随着光纤长度的增加而增加,但最后都趋于饱和或有所下降。当光纤长度一定时,荧光寿命、斯托克斯频移和吸收-发射截面每变化原来数值的1倍,光纤发光的相对强度分别改变7.1、10.52和2.8,因此斯托克斯频移对光纤发光强度的影响最大,其次为荧光寿命,影响最小的是吸收-发射截面。但是对光谱峰值位置影响最大的是吸收-发射截面,在80 cm光纤中,截面每增加1倍,光谱红移5.36 nm。理论计算的发光强度随光纤长度的变化趋势符合文献中的实验数据。本文为量子点光纤中掺杂材料的选择提供了一种实用的方法。

关键词: 量子点光纤; 荧光寿命; 吸收-发射截面; 斯托克斯频移

中图分类号: O436 文献标识码: A DOI: 10.37188/CJL.20200229

Theoretical Calculation of Emission Properties of CuInS₂/ZnS Quantum Dot Fiber

LI Shuai, ZHANG Lei*

(Province Key Laboratory of Superhard Materials, College of Physics and Electronic Engineering, Mudanjiang Normal University, Mudanjiang 157011, China)

* Corresponding Author, E-mail: leizhang@mdjnu.edu.cn

Abstract: The emission properties of CuInS₂/ZnS quantum dot optical fibers (QD-OFs) were theoretically calculated under the two-level system approximation, and the transmission of QD emission along the optical fiber was obtained under different QD fluorescence lifetime, Stokes shift and absorption-emission cross section (AECS). The results showed that when the three parameters were fixed, the emission intensity of QD-OFs increased with the increasing fiber length, but all of them eventually tended to saturation or decreased. When the fiber length was fixed, the relative intensity of the fiber emission was changed by 7.1, 10.52 and 2.8 for each change of the fluorescence lifetime, Stokes shift and AECS by 1 time. Therefore, Stokes shift had the greatest influence on the OF emission intensity, followed by the fluorescence lifetime, and the least influence was the AECS. However, the AECS had the greatest influence on the spectral peak position. In the 80 cm OF, the spectral redshift was 5.36 nm when the AECS increased by 1 time. The variation trend of emission intensity with fiber length calculated by theory accorded with the experimental data in the literature. This paper provides a practical method for the selection of doped materials in QD-OFs.

收稿日期: 2020-08-02; 修订日期: 2020-08-31

基金项目: 国家自然科学基金(61604065); 黑龙江省青年科学基金(QC2016007); 黑龙江省高等学校青年创新人才培养计划(UNPYSCT-2017197); 牡丹江师范学院科学技术研究项目(YB2019009); 黑龙江省高校基本科研项目(1355MSYYB008)资助
Supported by National Natural Science Foundation of China (61604065); Youth Science Foundation of Heilongjiang Province (QC2016007); Program for Youth Innovative Talents in Heilongjiang Provincial University (UNPYSCT-2017197); Science and Technology Research Project of Mudanjiang Normal University (YB2019009); Project for Basic Research in Heilongjiang Provincial University (1355MSYYB008)

Key words: quantum dot fiber; fluorescence lifetime; absorption- emission cross-section; Stokes shift

1 引 言

光纤(Optical fibers, OFs)具有良好的光学性能、紧凑性和柔韧性,因而被广泛应用于光纤放大器、光纤激光器和光纤传感器等领域。量子点(Quantum dots, QDs)具有较窄的发射光谱、较宽的吸收光谱和较高的荧光量子产额^[1-2],通过对量子点材料的尺寸和成分的调控,可以实现其带隙在较宽的能量范围内精确调谐^[3-5]。量子点材料具有优异的性质,因而研究人员在很多领域开展了研究^[6-11]。将量子点材料掺杂于光纤,不仅可以解决光纤发光波长的调控问题,还可以作为增益介质,在光纤中产生光放大效应。PbSe 量子点掺杂光纤的发光特性是近年来备受关注的问题。Hreibi 等在 2011 年报道了在不同光纤长度和泵浦功率时的 PbSe 量子点液芯光纤的发光性质^[12]。Cheng 等从理论和实验上研究了 PbSe 量子点光纤激光器的性质^[13-14]。很多文献报道了 PbSe 量子点液芯光纤的温度效应^[15-17],以及 PbSe 量子点光纤的发光性质对光纤尺寸、掺杂浓度和泵浦功率的依赖关系^[18-19]。PbSe 量子点的斯托克斯频移为数十毫电子伏特,其吸收光谱与荧光光谱存在较大的重叠,量子点发光在光纤纤芯中传输时会发生再吸收,导致发光的损耗。最近有文献报道了 CuInS₂/ZnS 量子点(或包覆其他壳层材料)的合成和光学性质^[20-23]。对 CuInS₂/ZnS 量子点发光机理的研究表明其发光为导带上的电子与空穴之间的复合发光^[24-26]。Liu 等报道了 Zn-CuInS/ZnSe/ZnS 量子点的温度依赖的荧光性质^[27]。CuInS₂ 量子点具有几百毫电子伏特的斯托克斯频移,而且具有较长的荧光寿命、绿色且无毒。这些优异的光学性质使得其在生物成像^[28]、LED^[21-22]、太阳能电池^[29]等领域都具有广泛的应用,同时也用于光纤掺杂剂来改善光纤发光。Wu 等在 2016 年报道了不同光纤长度和量子点掺杂浓度的 ZnCuInS/ZnSe/ZnS 量子点液芯光纤的发光特性^[30],为理论计算提供了实验依据。然而,光纤中量子点发光的再吸收效应导致了光纤发光的损耗,限制了器件的性能。这不仅与光纤参数有关,还取决于量子点材料本身的一些特性,如荧光寿命、斯托克斯频移和吸收-发射截面(Absorp-

tion-emission cross-section, AECS)等。研究这些参数对光纤发光的不同影响程度,可以为光纤掺杂剂的选择提供重要依据。

本文在二能级系统近似下,通过求解速率方程和功率传输方程,数值模拟了在不同荧光寿命、斯托克斯频移和吸收-发射截面时, CuInS₂/ZnS 量子点发光在光纤中的传输情况,得到 3 个参数对量子点光纤发光强度和发光波长的不同影响。该研究为量子点光纤中掺杂材料的选择提供了一种实用的方法,从而可最大限度地提高光纤发光强度,对量子点光纤放大器、传感器和激光器的发展提供了理论指导。

2 理论模型

CuInS₂ 量子点(及其核壳结构)的能级结构、电子跃迁和激子复合过程最近已被报道^[24-26]。如图 1(插图)所示,当量子点被波长较短的泵浦光激发时,电子以 W_{12} 的概率从基态跃迁到上能级。价带产生的空穴迅速被定位在 Cu⁺ 离子能级上,导带上的电子通过自发辐射与空穴重新复合发光,概率为 A_{21} 。非辐射跃迁概率为 \tilde{A}_{21} 。此外,上能级的粒子也可以通过概率为 W_{21} 的受激辐射回到基态。本文使用一个简单的二能级系统作为近似模型,建立 CuInS₂/ZnS 量子点的电子跃迁过程。图 1^[31]为 CuInS₂/ZnS 量子点溶液的吸收(Absorption,

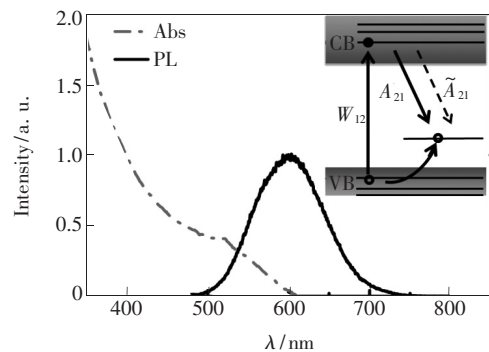


图 1 CuInS₂/ZnS 量子点的吸收光谱和光致发光光谱。插图:能级结构、电子跃迁和激子复合过程,实心黑点为导带电子,空心黑点为空穴。

Fig. 1 Absorption (Abs) and photoluminescence (PL) spectra of CuInS₂/ZnS QDs. Inset: energy level structure, electron transitions, and exciton recombination processes. Solid black point is conduction band electron, hollow black points are holes.

Abs) 光谱和光致发光 (Photoluminescence, PL) 光谱, 斯托克斯频移约为 90 nm。根据 Booth 等报道的公式^[32]:

$$D = 68.952 - 0.2136\lambda_{\text{PL}} + 1.717 \times 10^{-4}\lambda_{\text{PL}}^2, \quad (1)$$

其中, D 为量子点的直径, λ_{PL} 为量子点发光的峰值波长。可得 CuInS₂/ZnS 量子点的平均尺寸约为 3.8 nm。

将 CuInS₂/ZnS 量子点溶液灌装到空心的二氧化硅玻璃毛细管中, 进而制备出掺杂量子点的光纤。将连续激光通过透镜组耦合到光纤纤芯中, 光纤中的量子点被激发并辐射发光。由于光波导的限制作用, 量子点发光在光纤中传输, 传输过程中被其他量子点吸收再发光, 或者在光纤中产生受激辐射等, 使光纤末端出射光谱的性质发生变化。这些现象的产生与光纤长度、量子点荧光寿命、斯托克斯频移和吸收-发射截面等有关。理论计算是基于上述实验框架和一个理想的理论模型: 假设量子点光纤是直的, 量子点形状为球形, 量子点掺杂浓度是恒定的。采用一组速率方程对光纤中某一点两个能级上的粒子数分布情况进行分析:

$$n_1 = n_1 \frac{\left(1 + W_{21}\tau_R + \frac{\tau_R}{\tau_{\text{NR}}}C\right)}{1 + \tau_R \left(W_{21} + W_{12} + \frac{C}{\tau_{\text{NR}}}\right)}, \quad (2)$$

$$n_2 = n_1 \frac{W_{12}\tau_R}{1 + \tau_R \left(W_{21} + W_{12} + \frac{C}{\tau_{\text{NR}}}\right)}, \quad (3)$$

利用功率传播方程来描述泵浦光和量子点发光在整个光纤中的传输情况:

$$\frac{dP_{\nu_s}(z)}{dz} = \sigma_e(\nu_s) \int_0^R i_s(r) n_2(r, z) [P_{\nu_s}(z) + mh\nu_s \Delta\nu_s] \cdot 2\pi r dr - \sigma_a(\nu_s) \int_0^R i_s(r) n_1(r, z) P_{\nu_s}(z) 2\pi r dr - l_\nu P_{\nu_s}(z), \quad (4)$$

$$\frac{dP_p(z)}{dz} = -\sigma_a(\nu_p) \int_0^R i_p(r) n_1(r, z) \cdot P_p(z) 2\pi r dr - l_\nu P_p(z), \quad (5)$$

其中, n_1 、 n_2 和 n_1 分别代表能级 1 和能级 2 以及总的粒子数密度。 P_{ν_s} 和 P_p 分别为量子点发光和泵浦光的功率, $\sigma_a(\nu_s)$ 和 $\sigma_e(\nu_s)$ 代表量子点对不同频率的吸收截面和发射截面, $\sigma_a(\nu_p)$ 为量子点对泵浦光的吸收截面, l_ν 为光纤损耗, $\Delta\nu_s$ 为有效

噪声带宽, m 是在光纤中传输的模式数。公式 (4) 等号右侧第一项表示发光, 第二项表示吸收, 第三项表示额外的损耗。 $i_s(r)$ 和 $i_p(r)$ 为归一化的横模强度分布, 多模光纤情况下, 可以写为^[33]:

$$i(r) = \frac{P_s(r, \nu)}{P_s(\nu)} = \frac{[J_0(V)]^2}{\int [J_0(V)]^2 r dr d\theta} = \frac{[J_0(V)]^2}{2\pi \int_0^R [J_0(V)]^2 r dr}, \quad (6)$$

其中, r 代表光纤纤芯的径向坐标, θ 代表光纤纤芯的角向坐标, $J_0(V)$ 代表零阶贝塞尔函数。 W_{12} 和 W_{21} 是两个能级之间的跃迁概率, 与吸收和发射截面有关。以 W_{21} 为例, 可以表示为:

$$W_{21}(r, z) = \sum_{\nu_s=\nu_1}^{\nu_m} \frac{\sigma_e(\nu_s)}{h\nu_s} p_{\nu_s}(z) i_s(r), \quad (7)$$

ν_s 是量子点发光频率, ν_1 是最小频率, ν_m 代表最大频率。斯托克斯频移通过不同的频率影响光纤发光。量子点的吸收-发射截面 $\sigma_a(\nu_s)$ 和 $\sigma_e(\nu_s)$ 以及荧光寿命 τ_R 也将影响光纤发光特性, z 为光纤长度。不同的荧光寿命、斯托克斯频移和吸收-发射截面代入上述公式, 可以得到 3 个参数对光纤发光性质的不同影响。

3 结果与讨论

基于以上理论模型和理论计算过程, 得到了 CuInS₂/ZnS 量子点光纤的发光光谱及发光强度在不同荧光寿命、斯托克斯频移和吸收-发射截面时, 随着光纤长度的变化情况。所有计算都是在相同的量子点掺杂浓度 ($1 \times 10^{20}/\text{m}^3$)、光纤直径 (40 μm) 和泵浦功率 (100 mW) 下进行的。

图 2 研究了在不同荧光寿命 (150 ~ 500 ns) 时, CuInS₂/ZnS 量子点光纤的发光光谱和发光强度随光纤长度 (30 ~ 140 cm) 的变化, 同时保持另外两个参数不变, 即斯托克斯频移为 90 nm, 峰值吸收截面为 $1.27 \times 10^{-20} \text{m}^2$ 。从图 2(a) ~ (c) 可以看出, 在光纤长度一定时, 量子点光纤的发光强度随着荧光寿命的增加而增大。因为荧光寿命越长, 上能级的粒子越容易积累, 即公式 (3) 中的 n_2 越大, 从而使公式 (4) 中第一项增加, 所以量子点光纤发光增强。从图 2(d) 可以看出, 在荧光寿命一定时, 量子点光纤的发光强度随着光纤长度的增加而增大, 最终都趋于饱和。另外, 荧光寿命越长, 发光强度随光纤长度的增加越快。因为较长

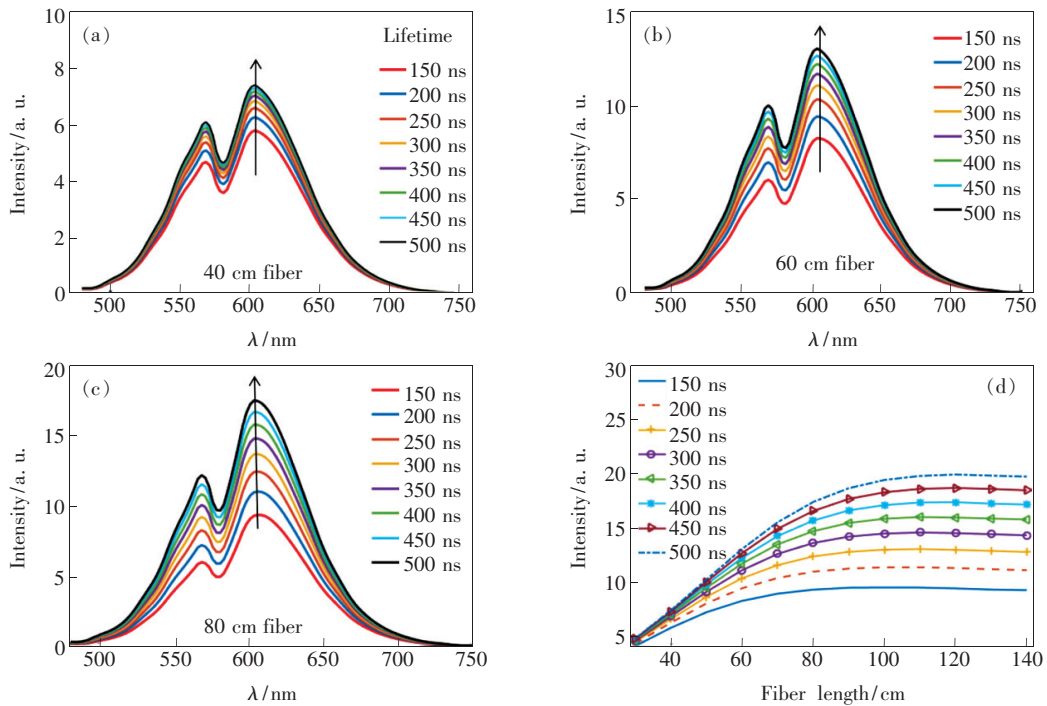


图 2 光纤长度分别为 40 cm (a)、60 cm (b) 和 80 cm (c) 时,在不同荧光寿命(150 ~ 500 ns)时的发光光谱,向上的箭头表示荧光寿命增加;(d)不同荧光寿命时,发光强度随光纤长度的演化。

Fig. 2 Emission spectra of 40 cm (a), 60 cm (b) and 80 cm (c) fibers for different fluorescence lifetime (150 – 500 ns). The upward arrow indicates an increase in fluorescence lifetime. (d) Evolution of the emission intensity with fiber lengths at different fluorescence lifetime.

的光纤使上能级粒子有足够的时间和空间进行积累,增加了与荧光寿命相关的量子点发光的概率。另一方面,当光纤长度继续增加时,由于泵浦光的功率是一定的,因而在泵浦光被完全吸收以后,量子点将很难继续被激发^[18]。因此,随着光纤长度的进一步增加,量子点光纤的发光强度将增加缓慢,达到饱和。

斯托克斯频移是影响光纤发光的最重要的参数之一,通过移动吸收光谱并保持荧光光谱的位置不变来得到不同的斯托克斯频移。图 3 研究了在不同斯托克斯频移(30 ~ 90 nm)时,CuInS₂/ZnS 量子点光纤的发光光谱和发光强度随光纤长度(30 ~ 140 cm)的变化,同时保持另外两个参数不变,即荧光寿命为 345 ns,峰值吸收-发射截面为 $1.27 \times 10^{-20} \text{ m}^2$ 。从图 3(a) ~ (c)可以看出,当光纤长度一定时,量子点光纤的发光强度随斯托克斯频移的增加而增大。从图 3(d)可以看出,当斯托克斯频移较大时,量子点光纤的发光强度随着光纤长度的增加而增大,并且逐渐趋于饱和;当斯托克斯频移较小时,发光强度随着光纤长度的增加而先增大后

减小,出现最佳光纤长度。因为斯托克斯频移减小,光纤中的再吸收越严重,随着光纤长度的增大,泵浦光被消耗,量子点不能再被激发,已经产生的量子点发光由于较大的再吸收而被损耗^[12]。因此,由于斯托克斯频移减小和传输距离增加,导致光纤发光强度显著减小。

将量子点的吸收截面 $\sigma_a(\nu_s)$ 和发射截面 $\sigma_e(\nu_s)$ 改变相同的倍数,通过计算得到量子点光纤的发光性质与吸收-发射截面之间的关系。图 4 研究了在不同吸收-发射截面(原截面的 0.6 ~ 2 倍)时,CuInS₂/ZnS 量子点光纤的发光光谱和发光强度随光纤长度(30 ~ 140 cm)的变化,同时保持其他两个参数不变,即荧光寿命为 345 ns,斯托克斯频移为 90 nm。从图 4(a) ~ (c)可以看出,当光纤长度一定时,量子点光纤的发光强度随吸收-发射截面的增加而增大。从图 4(d)可以看出,当吸收-发射截面较小时,量子点光纤的发光强度随着光纤长度的增加而增大,并逐渐趋于饱和;当吸收-发射截面较大时,发光强度随着光纤长度的增加先增大而后略有减小。较大的吸收-发射截面使量子点具有较强的吸收和发光能力,从而提高

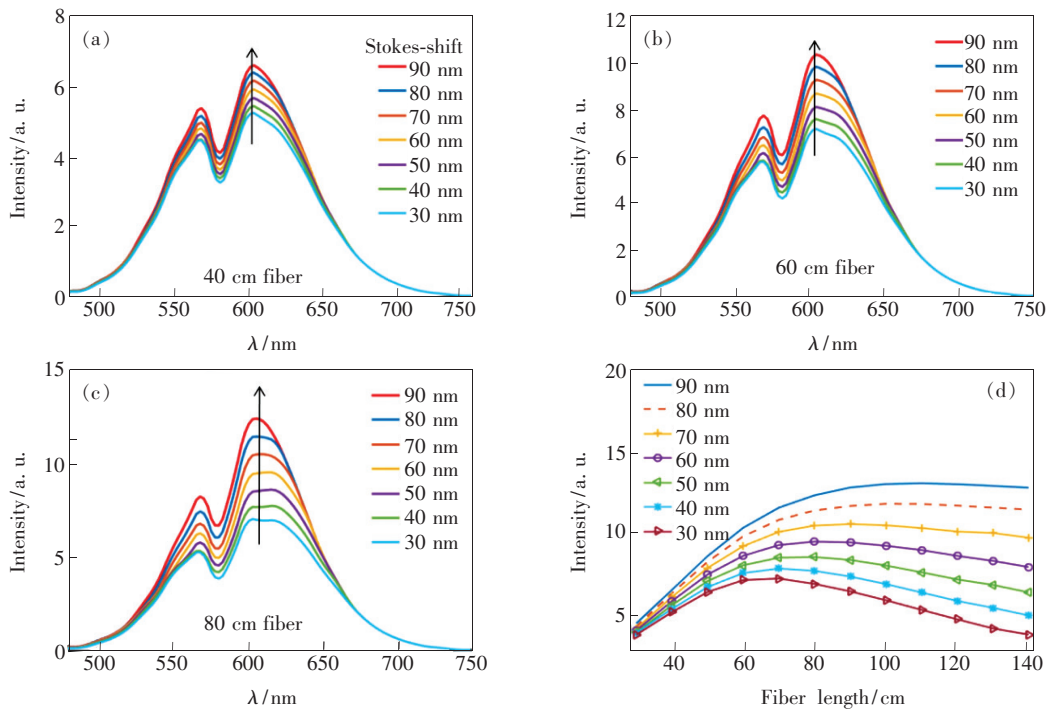


图 3 光纤长度分别为 40 cm(a)、60 cm(b)和 80 cm(c)时,在不同斯托克斯频移(30 ~ 90 nm)时的发光光谱,向上的箭头表示斯托克斯频移增加;(d)不同斯托克斯频移时,发光强度随光纤长度的演化。

Fig. 3 Emission spectra of 40 cm(a), 60 cm(b) and 80 cm(c) fibers for different Stokes shift (30 – 90 nm). The upward arrow indicates an increase in Stokes shift. (d) Evolution of the emission intensity with fiber lengths at different Stokes shift.

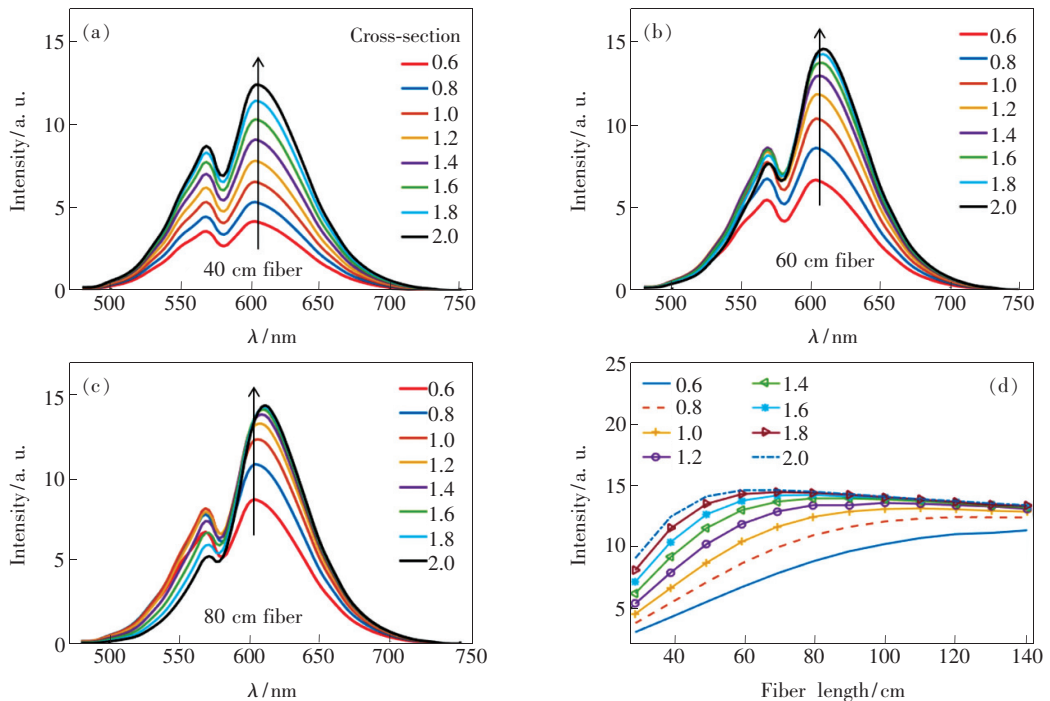


图 4 光纤长度分别为 40 cm(a)、60 cm(b)和 80 cm(c)时,在不同吸收-发射截面(原截面 $1.27 \times 10^{-20} \text{ m}^2$ 的 0.6 ~ 2 倍)时的发光光谱,向上的箭头表示吸收-发射截面增加;(d)不同吸收-发射截面时,发光强度随光纤长度的演化。

Fig. 4 Emission spectra of 40 cm(a), 60 cm(b) and 80 cm(c) fibers for different AECS(0.6 to 2 times of the original cross section $1.27 \times 10^{-20} \text{ m}^2$). The upward arrow indicates an increase in AECS. (d) Evolution of the emission intensity with fiber lengths at different AECS.

了光纤发光的强度。然而,量子点发光的长距离传输和吸收截面的增加使再吸收更为严重。即使发射截面很大,由于泵浦光的消耗,也不再产生量子点发光,导致发光强度出现饱和现象。另外,在 80 cm 光纤中,吸收-发射截面每增加原来数值的 1 倍,光谱峰值位置向长波方向移动 5.36 nm,发生了明显的红移,这也是由于较大的吸收截面和较长的传输距离导致了再吸收的增加。

在 100 cm 光纤长度下,比较了 3 个参数对 $\text{CuInS}_2/\text{ZnS}$ 量子点光纤发光强度的不同影响,如图 5(a)~(c)所示,为了便于比较,横坐标以原数值的倍数为单位。当荧光寿命、斯托克斯频移和吸收-发射截面每变化原来数值的 1 倍,光纤发光的相对强度分别变化 7.1, 10.52, 2.8。可见,斯

托克斯频移对光纤发光强度的影响最大,其次为荧光寿命,影响最小的是吸收-发射截面。另外,将理论计算与实验数据^[30]进行了对比,计算使用的 3 个参数:荧光寿命为 345 ns,吸收-发射截面为 $1.27 \times 10^{-20} \text{ m}^2$,斯托克斯频移为 90 nm。图 5(d)所示为量子点光纤的发光强度随着光纤长度的变化。随着光纤长度的增加,光纤发光强度先增大然后减小,都出现了最佳的光纤长度,理论计算结果大约为 100 cm,实验数据大约为 63 cm。这是由于实验中的量子点掺杂浓度和光纤直径都比较大,导致在相同的光纤长度下,其量子点粒子数更多,因此泵浦光更早地被消耗,所以光纤发光更早地发生衰减,最佳的光纤长度更小。但是理论计算与实验数据的变化趋势是一致的。

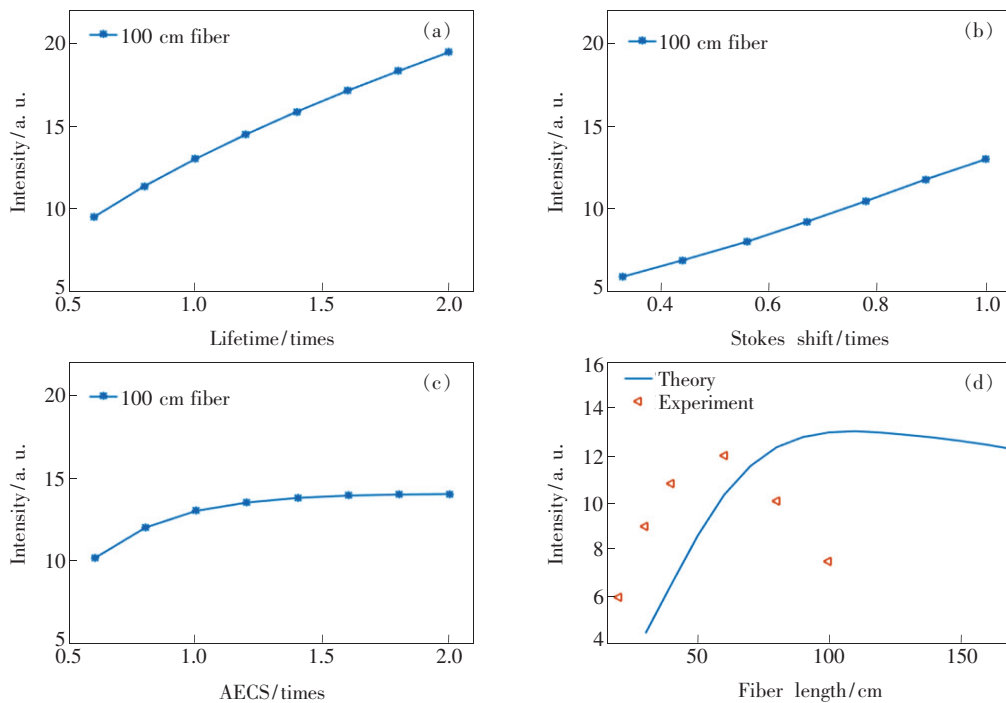


图 5 荧光寿命(a)、斯托克斯频移(b)、吸收-发射截面(c)对长度为 100 cm 的 $\text{CuInS}_2/\text{ZnS}$ 量子点光纤发光强度的不同影响,横坐标轴以倍数为单位;(d)理论计算与文献[30]中实验数据的对比。

Fig. 5 Different effects of fluorescence lifetime(a), Stokes shift(b), AECS(C) on the emission intensity of 100 cm $\text{CuInS}_2/\text{ZnS}$ QD-OFs. The horizontal axis is in units of multiples. (d) Comparison of theoretical calculation and experimental data in literature [30].

4 结 论

理论计算了在不同荧光寿命、斯托克斯频移和吸收-发射截面时, $\text{CuInS}_2/\text{ZnS}$ 量子点发光沿光纤的传输情况。结果表明,当量子点的荧光寿命、斯托克斯频移和吸收-发射截面一定时,量子点光纤发光强度随着光纤长度的增加而增大,但最后都趋

于饱和或有所下降。当光纤长度一定时,荧光寿命、吸收-发射截面和斯托克斯频移每增加原来数值的 1 倍,光纤发光的相对强度分别增加 7.1, 2.8, 10.52。因此,斯托克斯频移对光纤发光强度的影响最大,其次为荧光寿命,影响最小的是吸收-发射截面,但是其对光谱峰值位置的影响最大。在 80 cm 光纤中,吸收-发射截面每增加原来数值的 1 倍,

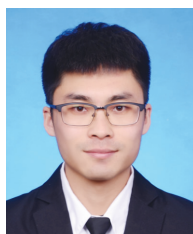
光谱峰值位置红移 5.36 nm。此外,将理论计算结果与实验数据进行了对比,发光强度随着光纤长度的变化都是先增加后减小,变化趋势一致。而理论计算的最佳光纤长度(100 cm)大于实验值,是由实验中较大的量子点掺杂浓度和光纤直径所导致,理

论与实验的对比说明 CuInS₂/ZnS 量子点光纤的理论模型是合理的。总之,选择具有较长的荧光寿命和较大的斯托克斯频移的掺杂材料对于提高光纤发光强度是至关重要的。本文为量子点光纤中掺杂材料的选择提供了实用的思路和方法。

参 考 文 献:

- [1] LAW M, LUTHER J M, SONG Q, *et al.*. Structural, optical, and electrical properties of PbSe nanocrystal solids treated thermally or with simple amines [J]. *J. Am. Chem. Soc.*, 2008, 130(18):5974-5985.
- [2] ZAIATS G, SHAPIRO A, YANOVER D, *et al.*. Optical and electronic properties of nonconcentric PbSe/CdSe colloidal quantum dots [J]. *J. Phys. Chem.*, 2015, 6(13):2444-2448.
- [3] MEZRAG F, BOUARISSA N, BOUCENNA M. The size-dependent electronic and optical properties of InAs quantum dots [J]. *Optik*, 2016, 127(3):1167-1170.
- [4] XIA C H, WU W W, YU T, *et al.*. Size-dependent band-gap and molar absorption coefficients of colloidal CuInS₂ quantum dots [J]. *ACS Nano*, 2018, 12(8):8350-8361.
- [5] DAI Q Q, WANG Y N, LI X B, *et al.*. Size-dependent composition and molar extinction coefficient of PbSe semiconductor nanocrystals [J]. *ACS Nano*, 2009, 3(6):1518-1524.
- [6] 季洪雷, 周青超, 潘俊, 等. 量子点液晶显示背光技术 [J]. *中国光学*, 2017, 10(5):666-680.
JI H L, ZHOU Q C, PAN J, *et al.*. Advances and prospects in quantum dots based backlights [J]. *Chin. Opt.*, 2017, 10(5):666-680. (in Chinese)
- [7] 张锋, 薛建设, 喻志农, 等. 量子点发光在显示器件中的应用 [J]. *液晶与显示*, 2012, 27(2):163-167.
ZHANG F, XUE J S, YU Z N, *et al.*. Quantum-dot light emitting device for displays [J]. *Chin. J. Liq. Cryst. Disp.*, 2012, 27(2):163-167. (in Chinese)
- [8] 袁曦, 郑金桔, 李海波, 等. Mn 掺杂 ZnSe 量子点变温发光性质研究 [J]. *中国光学*, 2015, 8(5):806-813.
YUAN X, ZHENG J J, LI H B, *et al.*. Temperature-dependent photoluminescence properties of Mn-doped ZnSe quantum dots [J]. *Chin. Opt.*, 2015, 8(5):806-813. (in Chinese)
- [9] KUMBHAKAR P. 半导体量子点材料在 Nd: YAG 激光辐照下的非线性光学效应 [J]. *光学精密工程*, 2011, 19(2):228-236.
KUMBHAKAR P. Observation of nonlinear optical effects in some semiconductor quantum dot materials using Nd: YAG laser radiation [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(2):228-236. (in Chinese)
- [10] 叶芸, 喻金辉, 林淑颜, 等. 量子点背光技术的研究进展 [J]. *中国光学*, 2020, 13(1):14-27.
YE Y, YU J H, LIN S Y, *et al.*. Progress of quantum dot backlight technology [J]. *Chin. Opt.*, 2020, 13(1):14-27. (in Chinese)
- [11] 邢笑雪, 王宪伟, 秦宏伍, 等. PbSe 量子点近红外光源的 CH₄ 气体检测 [J]. *中国光学*, 2018, 11(4):662-668.
XING X X, WANG X W, QIN H W, *et al.*. CH₄ detection based on near-infrared luminescence of PbSe quantum dots [J]. *Chin. Opt.*, 2018, 11(4):662-668. (in Chinese)
- [12] HREIBI A, GÉRÔME F, AUGUSTE J L, *et al.*. Semiconductor-doped liquid-core optical fiber [J]. *Opt. Lett.*, 2011, 36(9):1695-1697.
- [13] CHENG C, ZHANG H. Characteristics of bandwidth, gain and noise of a PbSe quantum dot-doped fiber amplifier [J]. *Opt. Commun.*, 2007, 277(2):372-378.
- [14] CHENG C, BO J F, YAN J H, *et al.*. Experimental realization of a PbSe-quantum-dot doped fiber laser [J]. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 2013, 25(6):572-575.
- [15] WU H, ZHANG Y, YAN L, *et al.*. Temperature effect on colloidal PbSe quantum dot-filled liquid-core optical fiber [J]. *Opt. Mater. Express*, 2014, 4(9):1856-1865.
- [16] 张冰, 张磊, 张蕾. PbSe 量子点液芯光纤的温度效应 [J]. *发光学报*, 2017, 38(5):623-629.

- ZHANG B, ZHANG L, ZHANG L. Temperature effect on PbSe quantum dot-doped liquid core fiber [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2017, 38(5):623-629. (in Chinese)
- [17] ZHANG Z Y, WANG Y, JIANG Y H, *et al.*. Colloidal PbSe quantum dot-filled liquid-core optical fiber for temperature sensing [J]. *Mater. Res. Express*, 2019, 6(7):075040-1-14.
- [18] ZHANG L, ZHANG B, NING L, *et al.*. Comprehensive size effect on PbSe quantum dot-doped liquid-core optical fiber [J]. *Opt. Commun.*, 2017, 383:371-377.
- [19] ZHANG L, ZHAO L P, ZHENG Y J. Enhanced emission from a PbSe/CdSe core/shell quantum dot-doped optical fiber [J]. *Opt. Mater. Express*, 2018, 8(11):3551-3560.
- [20] XIA C H, WINCKELMANS N, PRINS P T, *et al.*. Near-infrared-emitting CuInS₂/ZnS dot-in-rod colloidal heteronanorods by seeded growth [J]. *J. Am. Chem. Soc.*, 2018, 140(17):5755-5763.
- [21] HUANG X, YU R M, YANG X Q, *et al.*. Efficient CuInS₂/ZnS based quantum dot light emitting diodes by engineering the exciton formation interface [J]. *J. Lumin.*, 2018, 202:339-344.
- [22] DENG B, ZHU Y Q, LI J L, *et al.*. Low temperature synthesis of highly bright green emission CuInS₂/ZnS quantum dots and its application in light-emitting diodes [J]. *J. Alloys Compd.*, 2020, 845:155400.
- [23] JEONG S, KO M, JEONG S, *et al.*. Optical transitions of CuInS₂ nanoparticles: two types of absorption and two types of emission [J]. *J. Phys. Chem. C*, 2020, 124(26):14400-14408.
- [24] BERENDS A C, MANGNUS M J J, XIA C H, *et al.*. Optoelectronic properties of ternary I-III-VI₂ semiconductor nanocrystals: bright prospects with elusive origins [J]. *J. Phys. Chem. Lett.*, 2019, 10(7):1600-1616.
- [25] RICE W D, MCDANIEL H, KLIMOV V I, *et al.*. Magneto-optical properties of CuInS₂ nanocrystals [J]. *J. Phys. Chem. Lett.*, 2014, 5(23):4105-4109.
- [26] KNOWLES K E, HARTSTEIN K H, KILBURN T B, *et al.*. Luminescent colloidal semiconductor nanocrystals containing copper: synthesis, photophysics, and applications [J]. *Chem. Rev.*, 2016, 116(18):10820-10851.
- [27] LIU W Y, ZHANG Y, ZHAI W W, *et al.*. Temperature-dependent photoluminescence of ZnCuInS/ZnSe/ZnS quantum dots [J]. *J. Phys. Chem. C*, 2013, 117(38):19288-19294.
- [28] LI L, DAOU T J, TEXIER I, *et al.*. Highly luminescent CuInS₂/ZnS core/shell nanocrystals: cadmium-free quantum dots for *in vivo* imaging [J]. *Chem. Mater.*, 2009, 21(12):2422-2429.
- [29] JARA D H, YOON S J, STAMPLECOSKIE K G, *et al.*. Size-dependent photovoltaic performance of CuInS₂ quantum dot-sensitized solar cells [J]. *Chem. Mater.*, 2014, 26(24):7221-7228.
- [30] WU H, ZHANG Y, LU M, *et al.*. Reduced reabsorption and enhanced propagation induced by large Stokes shift in quantum dot-filled optical fiber [J]. *J. Nanopart. Res.*, 2016, 18(7):206.
- [31] ZHANG L, DU J H, ZHANG J, *et al.*. Enhanced emission, propagation, and spectral stability in CuInS₂/ZnS core/shell quantum dot-doped optical fiber [J]. *J. Nanophotonics*, 2019, 13(4):046003.
- [32] BOOTH M, BROWN A P, EVANS S D, *et al.*. Determining the concentration of CuInS₂ quantum dots from the size-dependent molar extinction coefficient [J]. *Chem. Mater.*, 2012, 24(11):2064-2070.
- [33] ZHANG L, ZHANG Y, WU H, *et al.*. Multiparameter-dependent spontaneous emission in PbSe quantum dot-doped liquid-core multi-mode fiber [J]. *J. Nanopart. Res.*, 2013, 15(10):2000.



李帅(1985-),男,吉林长春人,学士,实验员,2017年于牡丹江师范学院获得学士学位,主要从事量子点材料的研究。

E-mail: shuaili@mdjnu.edu.cn



张蕾(1985-),女,吉林长春人,博士,副教授,2014年于吉林大学获得博士学位,主要从事量子点材料及量子点光纤的研究。

E-mail: leizhang@mdjnu.edu.cn