

# CdSe/ZnS 量子点掺杂聚甲基丙烯酸甲酯材料的光致荧光光谱

程 成 吴兹起\*

(浙江工业大学激光与光电子技术研究所, 浙江 杭州 310023)

**摘要** 将 CdSe/ZnS(核/壳)量子点掺入聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA),形成(CdSe/ZnS)/PMMA 量子点掺杂光纤材料。测量了不同掺杂浓度下的(CdSe/ZnS)/PMMA 的吸收谱、发射谱和折射率。与正己烷溶剂中的 CdSe/ZnS 量子点比较,PMMA 基底不改变 CdSe/ZnS 量子点的吸收和发射峰值波长。在掺杂质量浓度范围  $0.013 \sim 0.130 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$  内,实验观测到了光致荧光(PL)峰值强度具有单峰并呈指数平方变化的规律。随掺杂浓度的增加,常温下折射率最大可提高 0.0013,PL 辐射峰波长出现红移并逐步增大,最大红移量受限于斯托克斯频移。红移产生的原因为量子点的二次吸收-发射和掺杂浓度效应。

**关键词** 光通信;CdSe/ZnS;聚甲基丙烯酸甲酯;峰值强度;峰值波长;红移

**中图分类号** TN304.2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0906003

## Photoluminescence Spectra of the CdSe/ZnS Quantum Dot Doped Polymethylmethacrylate Material

Cheng Cheng Wu Ziqi

(Institute of Laser and Optoelectronic Technology, Zhejiang University of Technology, Hangzhou, Zhejiang 310023, China)

**Abstract** By adding CdSe/ZnS (core/shell) quantum dots (QDs) into polymethylmethacrylate (PMMA), (CdSe/ZnS)/PMMA QDs doped fiber material is prepared. The absorption-emission spectra and the refractive index of (CdSe/ZnS)/PMMA are measured in respect of doping concentrations. Comparing with the case of the QDs dissolved in n-hexane, the absorption-emission peak wavelengths of the (CdSe/ZnS)/QDs are identical with PMMA substrate. In the doping concentration range  $0.013 \sim 0.130 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$ , the observed photoluminescence (PL) peak intensity shows a single peak and follows an exponential square law. As the doping concentration increases, the refractive index increases by 0.0013 at room temperature, and the PL peak wavelength appears a red shift. The maximum red shift is limited by Stokes shift, likely to be related with re-absorption/excitation effect and concentration effect of QDs.

**Key words** optical communication; CdSe/ZnS; polymethylmethacrylate; peak intensity; peak wavelength; red shift

**OCIS codes** 060.2290; 060.3510; 140.3380; 140.3510

## 1 引 言

传统的石英光纤在全光网通信等领域已有极大的应用。相对于石英光纤,另一种材料——塑料光纤由于其价格低廉、柔韧性好、易连接等优点,近年来受到了人们的极大关注<sup>[1-2]</sup>。

常规的塑料[例如聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)]可以直接拉制成任意长度和直径的光纤,拉制工艺成

熟,质量稳定可靠,价格低廉。这种 PMMA 光纤的光学特点是透射率高,光信号传输稳定,缺点是损耗大。因而,人们希望有损耗更低、带宽更宽,在通信波带内有更高平坦增益的塑料光纤出现。

近年来,II-VI族(CdSe、CdS、ZnS等)纳米晶体量子点的光学性质备受关注。CdSe量子点具有荧光强烈、波长位于可见区、合成方法简单、发光稳定等优

收稿日期: 2013-03-11; 收到修改稿日期: 2013-04-22

基金项目: 国家自然科学基金(61274124)

作者简介: 程 成(1953—),男,博士,教授,主要从事纳米晶体量子点、量子点光纤放大器及量子点光纤激光器等方面的研究。E-mail: chengch@zjut.edu.cn(中国光学学会会员号: S042011270S)

\* 通信联系人。E-mail: wuziqikeai@163.com

点。因此,以 CdSe 量子点作为增益介质来构成 CdSe 量子点光纤放大器成为人们感兴趣的一个课题<sup>[3-4]</sup>。之前人们将 CdSe/ZnS 量子点掺入甲苯等有机溶剂,灌入空芯玻璃光纤,形成以甲苯为本底的掺杂玻璃光纤,发现这种量子点光纤具有光增益<sup>[5-6]</sup>。然而,由于液态纤芯在实际应用中的缺陷,进一步研究了以紫外固化胶(UV)为本底的 CdSe/ZnS 量子点掺杂光纤。在紫外灯照射下,UV 胶被固化,形成固态纤芯本底,克服了液态纤芯中量子点可能发生团聚的缺点。实验发现,这种 UV 胶 CdSe 量子点掺杂光纤具有明显的荧光增益,并且其稳定性也较好<sup>[7]</sup>。

为了对更多的光纤基底材料进行比较,本文将 CdSe/ZnS(核/壳)量子点掺入 PMMA,制备成 (CdSe/ZnS)/PMMA 光纤材料,测量对比了 CdSe/ZnS 量子点在正己烷和 PMMA 基底中的吸收谱和发射谱。在  $0.013\sim 0.130\text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$  的掺杂质量浓度范围中,测量了不同掺杂浓度的 (CdSe/ZnS)/PMMA 的光致荧光(PL)光谱。结合 PL 峰值强度的数据拟合,得到 PL 光强最大时所对应的掺杂浓度。测量了随掺杂浓度变化的辐射峰值波长的红移,得到了红移的速率系数,并与其他几种介质(UV 胶、甲苯)的红移进行了比较。

关于掺量子点的塑料光纤材料光谱研究的报道很少,本文的实验结果为制备 PMMA 基底的 CdSe/ZnS 量子点塑料光纤提供了依据。

## 2 实 验

实验样品为核壳结构 CdSe/ZnS 量子点,外壳 ZnS 不影响内核 CdSe 的发光。量子点由武汉珈源量子点技术开发有限公司提供。CdSe/ZnS 量子点本底溶液为正己烷,原溶液质量浓度为  $5\text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ ,粒子直径为  $5.5\text{ nm}$ 。实验在室温( $26\text{ }^{\circ}\text{C}$ )下进行。吸收光谱采用 UV-2550 型紫外可见分光光度计(日本岛津)测量,测量范围为  $200.0\sim 900.0\text{ nm}$ ,扫描精度为  $1\text{ nm}$ 。PL 发射光谱采用 RF-5301 型荧光光谱仪(日本岛津)进行测量,测量范围为  $278.0\sim 800.0\text{ nm}$ ,扫描精度为  $1\text{ nm}$ 。折射率采用 2WJ 型阿贝折射仪测量(上海光学仪器厂),测量使用的光源为 DH-2000-

BAL 型白光光源。

在室温下,将 CdSe/ZnS 量子点溶液稀释后待用。根据文献[8]中熔融合成法制备 PMMA,将甲基丙烯酸甲酯(MMA)和偶氮二异丁腈(AIBN)混合,置于烧杯中。将烧杯放在油锅中,在  $90\text{ }^{\circ}\text{C}$  环境下搅拌约  $15\text{ min}$ 。观察到烧杯中混合溶液达到一定粘度时停止搅拌。取少量混合溶液移至三口烧瓶内,并注入 CdSe/ZnS 量子点溶液,将其进行超声振荡  $10\text{ min}$ 。将三口烧瓶移至磁力搅拌器(上海久世环保科技有限公司,型号为 SZCL-2)上,通入氩气后进行隔氧加热,搅拌蒸发。直到三口烧瓶中混合溶液不再有气泡出现,即三口烧瓶中混合溶液的正己烷完全蒸发掉,并使 CdSe/ZnS 量子点在 PMMA 中分布均匀。通过此方法制备 CdSe/ZnS 量子点不同掺杂浓度的 (CdSe/ZnS)/PMMA 样品。将制备的 PMMA 以及 (CdSe/ZnS)/PMMA 样品注入到模具,置于恒温炉固化成薄片。

测量掺杂后 (CdSe/ZnS)/PMMA 样品和正己烷本底中 CdSe/ZnS 量子点的吸收谱和发射谱,分析 PMMA 本底对 CdSe/ZnS 量子点吸收谱和发射谱的影响。测量掺杂 CdSe/ZnS 量子点前后 PMMA 的折射率,比较 CdSe/ZnS 量子点对 PMMA 基底折射率的变化。

对于量子点掺杂浓度范围,尤其是可产生反转的粒子数浓度阈值,Klimov 等<sup>[9]</sup>在 Science 上的发文对此有过一个估算,其掺杂体积分数应大于  $0.2\%$ 。根据原溶液的实际情况,选择实验的掺杂质量浓度范围为  $0.013\sim 0.130\text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ 。实验采用了两种规格的石英比色皿: $10\text{ mm}\times 10\text{ mm}$  和  $1\text{ mm}\times 10\text{ mm}$ ,光路长度分别为  $10\text{ mm}$  和  $1\text{ mm}$ 。两种光路长度分别测量了 10 个不同掺杂浓度的 (CdSe/ZnS)/PMMA 样品的 PL 光谱。光路长度为  $10\text{ mm}$  的样品记为样品 1,讨论量子点掺杂浓度与 (CdSe/ZnS)/PMMA 的 PL 峰值强度的关系。此外,在  $10\text{ mm}$  和  $1\text{ mm}$  光路长度的样品中选取了相同的 5 个掺杂浓度的 (CdSe/ZnS)/PMMA 样品,记为样品 2 和样品 3,结合其 PL 光谱,讨论红移现象。所选取的 CdSe/ZnS 量子点掺杂浓度如表 1 所示。

表 1 实验选取的 (CdSe/ZnS)/PMMA 的掺杂质量浓度

Table 1 Doping mass concentration of (CdSe/ZnS)/PMMA used in the experiment

No.	Doping concentration / ( $\text{mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ )					Optical path / mm
Sample 1	0.013	0.026	0.039	0.052	0.065	10
	0.078	0.078	0.091	0.117	0.130	
Sample 2	0.013	0.026	0.039	0.052	0.065	10
	0.013	0.026	0.039	0.052	0.065	
Sample 3	0.013	0.026	0.039	0.052	0.065	1

### 3 结果和讨论

在波长为 479 nm 的半导体激光器(LD)激励作用下,实测的 PMMA 基底中的 CdSe/ZnS 量子点的吸收谱和发射谱如图 1 所示。图中量子点的掺杂质量浓度为  $0.039 \text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ 。为了方便观察,图中已将量子点的第一吸收峰值和发射峰值强度归一化。

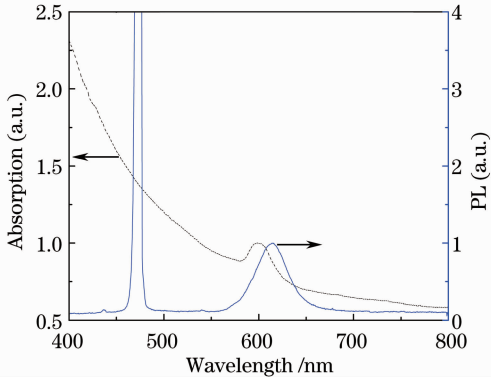


图 1 PMMA 基底中 CdSe/ZnS 量子点的吸收谱和发射谱

Fig. 1 Absorption-emission spectra of CdSe/ZnS QDs deposited in PMMA substrate

表 2 PMMA 和 (CdSe/ZnS)/PMMA 的折射率比较

Table 2 Comparison of the refractive index between PMMA and (CdSe/ZnS)/PMMA

Material	Refractive index $n$					Average index $\bar{n}$
PMMA	1.4904	1.4906	1.4908	1.4906	1.4906	1.4907
	1.4908	1.4908	1.4908	1.4908	1.4908	
(CdSe/ZnS)/PMMA	1.4922	1.4920	1.4918	1.4922	1.4920	1.4920
	1.4918	1.4920	1.4920	1.4920	1.4920	

根据表 2, PMMA 的平均折射率  $\bar{n}_1 = 1.4907$ , (CdSe/ZnS)/PMMA 的平均折射率为  $\bar{n}_2 = 1.4920$ 。掺入量子点之后,平均折射率增加  $\Delta\bar{n} = 0.0013$ 。对于其他掺杂浓度,折射率的增加几乎相同,不再罗列。

CdSe 的折射率较大(在 600 nm 处为  $2.703^{[10]}$ ),由于掺入量子点的浓度较低,实际对 PMMA 基底材料的折射率改变的影响不大。这种 (CdSe/ZnS)/PMMA 材料的折射率与常规的石英光纤纤芯的折射率相近,这有利于将来与石英光纤的连接。

图 2 为样品 1 中 (CdSe/ZnS)/PMMA 的 PL 峰值强度随量子点掺杂浓度的变化,曲线是离散点的数据拟合。拟合曲线可表达为

$$I = I_0 \exp\left[-\left(\frac{c - 0.06342}{0.06106}\right)^2\right] \exp\left[-\left(\frac{c - c_0}{0.06106}\right)^2\right], \quad (1)$$

式中  $I_0 = 5424$ ,  $c$  为量子点掺杂质量浓度,  $c_0 =$

由图 1 可见, PMMA 基底中 CdSe/ZnS 量子点(直径为 5.5 nm)的第一吸收峰位于 600 nm, 荧光峰位于 615 nm, 斯托克斯频移为 15 nm, 与先前测量的在正己烷中的吸收峰和发射峰波长一致。因此, 可认为 PMMA 基底没有改变 CdSe/ZnS 量子点吸收谱和发射谱波长。对于其他掺杂浓度, 情况类似, 不再赘述。

为了进一步观测 (CdSe/ZnS)/PMMA 材料 PL 谱的时间稳定性, 对样品 1 系列的发射谱, 在样品制备完成之后的 1、2、4、6 h 分别进行了测量。实验没有发现样品的荧光发射峰波长和强度的变化, 这说明 (CdSe/ZnS)/PMMA 材料的荧光的时间稳定性较好。

折射率是光纤的一个重要性能指标。为了制备成光纤以及将来可与普通的石英光纤相联接, 量子点 PMMA 光纤的折射率应当尽量接近普通石英光纤纤芯。用阿贝折射仪 (2WJ) 在室温下测量了 PMMA 以及 (CdSe/ZnS)/PMMA 两种材料薄片的折射率。以中等掺杂质量浓度  $0.039 \text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$  为例, 经 10 次测量, 结果如表 2 所示。

$0.06342 \text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ 。

由图 2 可见, 在实验浓度范围内, PL 峰值强度随掺杂质量浓度的变化呈单峰形状, 这表明存在一个可使荧光强度最大的掺杂质量浓度  $c_0$ 。在机理

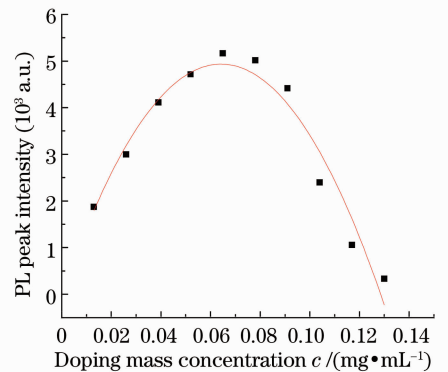


图 2 (CdSe/ZnS)/PMMA 的 PL 峰值强度随掺杂质量浓度的变化

Fig. 2 PL peak intensity of (CdSe/ZnS)/PMMA as a function of doping mass concentration

上,可理解为在激励光源激励下,当量子点的掺杂浓度质量为  $c_0$  时,所产生跃迁的复合载流子数密度最大,从而使得复合辐射的荧光最强。

下面作进一步分析。(1)式表示在 479 nm 激励光的作用下,量子点中处于价带的电子被激励到导带向下自发跃迁(返回到价带)产生的一种辐射,这种辐射与粒子如何被激励布居到上能级的激励源无关,因此,可以将它与自发辐射相联系。对于从能级 2 至 1 的自发辐射跃迁,其单位立体角跃迁辐射光强为

$$I \propto \frac{1}{4\pi} A_{21} N_2 h\nu_{21}, \quad (2)$$

式中  $A_{21}$  为上能级跃迁几率,  $N_2$  为上能级粒子数密度,  $h\nu_{21}$  为跃迁能。对于给定的激励源和给定的量子点,  $A_{21}$ 、 $h\nu_{21}$  为常数,于是,由(1)、(2)式,有

$$N_2 \propto \exp\left[-\left(\frac{c - c_0}{0.06106}\right)^2\right]. \quad (3)$$

这是一个重要的关系式,它表示在给定激励光的作用下, CdSe/ZnS 量子点上能级粒子数密度( $N_2$ )并不线性地随掺杂质量浓度  $c$  的增加而增加,两者之间是一个指数平方的关系。当掺杂质量浓度较低时,  $N_2$  较少。随着掺杂质量浓度增加,  $N_2$  按指数平方律增加。当掺杂质量浓度增大到  $c_0$  之后,  $N_2$  反而下降(此时正比于掺杂浓度的下能级粒子数密度是增加的)。当质量浓度大于  $0.13 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$  之后,  $N_2$  降到很低, 荧光熄灭。随着掺杂浓度的增加,粒子与粒子之间的库仑作用增强,使得粒子之间的非辐射弛豫跃迁(例如热振动、声子辐射等)几率增加,从而抑制了上能级的辐射跃迁几率,导致 PL 荧光强度降低或熄灭。

由(3)式进一步结合抽运源沿光纤的功率变化方程等,就可以给出光纤放大器的最佳设计。

实测的样品 2 中 5 个掺杂浓度的(CdSe/ZnS)/PMMA 的 PL 光谱如图 3 所示。随着量子点掺杂

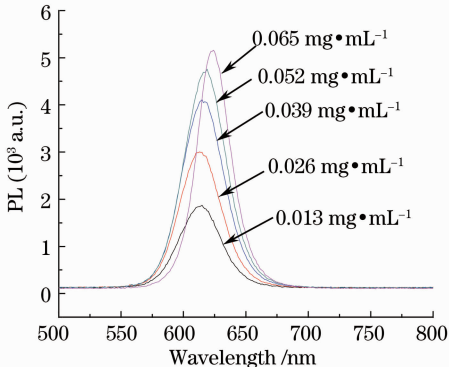


图 3 样品 2(CdSe/ZnS)/PMMA 的 PL 光谱

Fig. 3 PL spectra of (CdSe/ZnS)/PMMA of sample 2

浓度的增加, PL 峰值波长有比较明显的红移,红移量在 0~10 nm 之间。红移量与掺杂浓度之间的关系如图 4 所示。

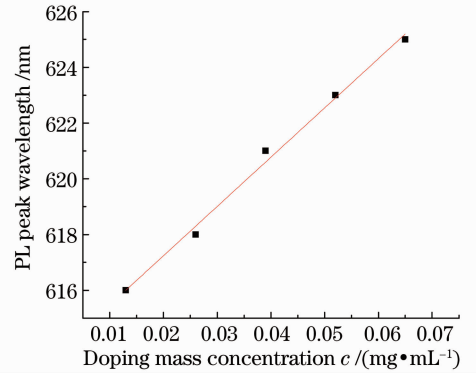


图 4 PL 峰值波长随量子点掺杂质量浓度的变化  
Fig. 4 PL peak wavelength as a function of doping mass concentration

图 4 中红移量与掺杂浓度呈线性关系。其线性关系拟合表达为

$$\lambda = 613.7 + 176.9231c, \quad (4)$$

式中  $\lambda$  表示 PL 峰值波长斜率,  $k = \frac{\Delta\lambda}{\Delta c} = 176.9231 \text{ nm}/(\text{mg} \cdot \text{mL}^{-1})$ , 即量子点掺杂质量浓度每增加  $0.01 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$ , 峰值波长红移量约为 1.77 nm。

作为对照,图 5 给出样品 3(浓度与样品 2 相同,光路 1 mm)的 PL 谱。由图可见, PL 峰值波长几乎没有可观测的红移,即红移不仅与掺杂质量浓度有关,还与其经历的光路有关。分析图 3 和图 5 中的数据,可以推算出红移量  $\Delta\lambda \propto cL = k_0 cL$  (系数  $k_0 = (1.15 \sim 1.54) \times 10^{-5} \text{ mL} \cdot \text{mg}^{-1}$ ,  $L$  单位为 mm)。  $k_0$  描述了红移随掺杂质量浓度增加的斜率速率,这里称之为红移速率。对于同为 PMMA 基底但掺杂质量浓度不同,  $k_0$  略有差异(主要是实验误差)。另一方面,对于不同的基底材料(PMMA、UV

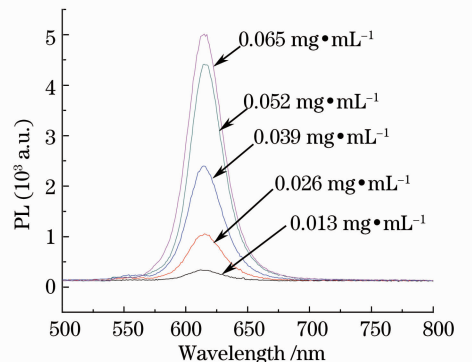


图 5 样品 3(CdSe/ZnS)/PMMA 的 PL 光谱

Fig. 5 PL spectra of (CdSe/ZnS)/PMMA of sample 3

胶、甲苯等),根据文献[7,11-12]的测量,可知红移速率不同,分别为: $k_0 \approx 3.57 \times 10^{-5} \text{ mL} \cdot \text{mg}^{-1}$  (甲苯), $k_0 \approx 1.13 \times 10^{-5} \text{ mL} \cdot \text{mg}^{-1}$  (UV 胶),即  $k_0$  (甲苯)  $> k_0$  (PMMA)  $> k_0$  (UV 胶)。

红移速率与基底材料有关,其原因来自于基材的化学键与量子点表面界面的相互作用。对于不同的基底材料,这种相互作用不同,使得量子点有效吸收截面谱和发射截面谱发生变化,峰值波长产生移动,从而使红移速率发生变化。

产生红移的原因分析:

从图 1 可知,由于斯托克斯频移的存在,使得量子点的吸收谱与发射谱在 575~650 nm 波长范围内有较大的重叠。这样,在该波长重叠区中,某量子点所发射的荧光就会被与之相邻的量子点吸收。由于激发的载流子不能自由向高能级跃迁,只能向低能级跃迁,从而产生波长更长的二次辐射。二次辐射与原波长辐射叠加,使得出射光谱出现红移。当红移量达到斯托克斯频移大小时,由于在此波长上已没有辐射(辐射截面大大减小),因此,红移不再发生,即红移对量子点浓度的增加有一个极限,其极限的大小为斯托克斯频移的大小。在本实验中,量子点的斯托克斯频移为 15 nm,实验观测到的最大红移约为 10 nm,其中 5 nm 的差别估计是由于实验没有完全覆盖整个浓度范围所致。

此外,也可由有效质量近似理论来理解。对于直径为 5.5 nm 的 CdSe/ZnS 量子点(外壳 ZnS 仅作表面修饰以降低表面活性,对光谱的作用可忽略或可当作微扰来处理),其尺寸与块材料的激子玻尔半径(4.9 nm)相当,属中等偏弱约束的量子点。随着掺杂质量浓度的增加,量子点之间的间距被不断缩短,相邻量子点的电子和空穴之间的库仑作用增强,或者说尺寸约束相对减弱,从而使得由尺寸约束产生的辐射能降低,产生红移。该效应可称为红移的浓度效应。

## 4 结 论

对于(CdSe/ZnS)/PMMA 材料,基底 PMMA 不改变 CdSe/ZnS 量子点的吸收和发射峰值波长。在掺杂质量浓度为 0.013~0.130 mg·mL<sup>-1</sup> 范围内,PL 峰值强度随掺杂浓度的增加先增大后变小,室温下折射率增加 0.0013。当掺杂质量浓度为

0.06342 mg·mL<sup>-1</sup>时,PL 峰值强度最大。当掺杂质量浓度从 0.013 mg·mL<sup>-1</sup>增加到 0.065 mg·mL<sup>-1</sup>时,PL 辐射峰波长出现 0~10 nm 随掺杂质量浓度增大的红移,最大红移量依赖于斯托克斯频移。红移产生的原因为量子点的二次吸收-发射以及浓度效应。

本实验结果可为今后将(CdSe/ZnS)/PMMA 进一步制备成量子点光纤提供依据。

## 参 考 文 献

- 1 M Asai, Y Inuzuka, K Koike, *et al.*. High-bandwidth graded-index plastic optical fiber with low-attenuation, high-bending ability, and high-thermal stability for home-networks [J]. *J Lightwave Tech*, 2011, 29(11): 1620-1626.
- 2 T Ishigure, H Endo, K Ohdoko, *et al.*. Modal bandwidth enhancement in a plastic optical fiber by W-refractive index profile [J]. *J Lightwave Tech*, 2005, 23(4): 1754-1762.
- 3 C Cheng, X F Peng. Spectral characteristics of a quantum-dot (CdSe/ZnS)-doped fiber in low concentrations [J]. *J Lightwave Tech*, 2009, 27(10): 1362-1368.
- 4 K J Chen, H C Chen, M H Shih, *et al.*. The influence of the thermal effect on CdSe/ZnS quantum dots in light-emitting diodes [J]. *IEEE J Lightwave Tech*, 2012, 30(14): 2256-2261.
- 5 H Song, S Lee. Photoluminescent (CdSe) ZnS quantum dot-polymethylmethacrylate polymer composite thin films in the visible spectral range [J]. *Nanotech*, 2007, 18(5): 055402.
- 6 K Kyhm, S M Kim, J H Kim, *et al.*. Optical gain in CdSe nanocrystals [J]. *J Luminescence*, 2007, 122: 808-811.
- 7 Cheng Cheng, Lin Yanguo, Yan Jinhua. Propagation characteristic of photoluminescence spectra of CdSe/ZnS-quantum-dot doped fiber in an ultraviolet curable adhesive background [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, 40(6): 888-893.  
程 成, 林彦国, 严金华. 以 UV 胶为纤芯本底的 CdSe/ZnS 量子点光纤光致荧光光谱的传光特性[J]. *光子学报*, 2011, 40(6): 888-893.
- 8 Cheng Cheng, Wang Sunde, Ma Dewei. Preparation and spectra of CdSe-quantum-dot-doped PMMA fiber materials [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(3): 0316002.  
程 成, 王孙德, 马德伟. PMMA 基底 CdSe 量子点光纤材料的制备及其光谱[J]. *光学学报*, 2011, 31(3): 0316002.
- 9 V I Klimov, A A Mikhailovskiy, S Xu, *et al.*. Optical gain and stimulated emission in nanocrystal quantum dots [J]. *Science*, 2000, 290(5490): 314-317.
- 10 E D Palink. *Handbook of Optical Constants of Solids: Index* [M]. London: Academic Press, 1998. 177-199.
- 11 Cheng Cheng, Zeng Feng, Cheng Xiaoyu. Photoluminescence spectra of CdSe/ZnS-quantum dot doped fiber with high doping concentrations [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(10): 2698-2704.  
程 成, 曾 风, 程潇羽. 较高掺杂浓度下 CdSe/ZnS 量子点光纤光致荧光光谱[J]. *光学学报*, 2009, 29(10): 2698-2704.
- 12 Cheng Cheng, Lin Yanguo, Yan Jinhua. Red shift of photoluminescence spectrum of CdSe/ZnS-quantum-dot doped fiber [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(4): 0406002.  
程 成, 林彦国, 严金华. CdSe/ZnS 量子点光纤光致荧光光谱的红移[J]. *光学学报*, 2011, 31(4): 0406002.