

近红外 S-C-L 超宽波带低噪声 PbS 量子点 掺杂光纤放大器

程成^{**}, 吴昌斌^{*}

浙江工业大学光电子智能化技术研究所, 浙江 杭州 310023

摘要 实现了基于 PbS 量子点掺杂的近红外 S-C-L 超宽波带低噪声光纤放大器(QDFA)。以紫外(UV)固化胶为光纤纤芯本底,以 PbS 量子点作为增益介质,由 973 nm 单模激光器、隔离器、波分复用器、量子点掺杂光纤等构成全光路结构,在 1470~1620 nm 的宽波带区间实现了对信号光的放大。结果表明:在 1550 nm 波长附近,QDFA 的带宽为 75 nm。当输入信号光功率为 -23 dBm 时,开关增益为 16 dB~19 dB(净增益为 12.26 dB~15.26 dB),噪声系数约为 3 dB。实验观测到了较明显的激励阈值和增益饱和现象,确定了适用的量子点掺杂浓度与光纤长度之间的线性关系。所实现的 QDFA 的带宽、C 波带增益平坦度、噪声系数等指标优于常规的掺铒光纤放大器(EDFAs),L 波带增益平坦度略低于经优化的多光纤 EDFAs。

关键词 光纤光学; 放大器; PbS 量子点; 量子点掺杂光纤; 增益带宽; 最佳掺杂浓度; 激励阈值

中图分类号 TN253

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.1006006

PbS Quantum-Dot-Doped Fiber Amplifier in NIR S-C-L Ultra-Broad Waveband with Low Noise

Cheng Cheng^{**}, Wu Changbin^{*}

Institute of Intelligent Optoelectronic Technology, Zhejiang University of Technology, Hangzhou, Zhejiang 310023, China

Abstract A PbS quantum-dot-doped fiber amplifier (QDFA) is realized experimentally in NIR S-C-L ultra-broad waveband and with low noise. Taking UV-gel as the optical fiber background and PbS quantum dots (QDs) as the gain medium in the fiber, we setup a full-light path structure composed of a 973 nm pumping single mode laser, an isolator, a wavelength division multiplexing and a quantum-dot-doped fiber. The broadband signal light with the range of 1470-1620 nm is amplified in an all-optical structure. There is evidence to show that the QDFA has 75 nm bandwidth around the wavelength region of 1550 nm with the switch gain of 16 dB-19 dB (the net gain of 12.26 dB-15.26 dB) for the input signal power of -23 dBm and the noise figure of about 3 dB. An obvious excitation threshold and gain saturation phenomenon are observed by the experiment. A linear relationship is determined between QD doping concentrations and fiber length. The obtained performances in the bandwidth, C-waveband gain flatness and noise figure of QDFA in this paper are better than those of the conventional erbium-doped fiber amplifiers (EDFAs), while the L-waveband gain flatness is a little lower than that of the optimized EDFAs.

Key words fiber optics; amplifier; PbS quantum dot; quantum-dot-doped fiber; gain bandwidth; optimal doping concentration; excitation threshold

OCIS codes 060.2290; 060.2300; 060.2330; 060.2400; 160.2290

1 引 言

半导体纳米晶体量子点(QDs)由于量子产率高、吸收-辐射光峰值波长可调等特点,近几年来受到极大关注^[1-2]。在光纤通信的透明窗口区域,研究比较多的是 IV-VI 族的 PbSe、PbS 量子点。近年

来,HgTe 量子点的光学增益也得到了深入研究^[3]。PbSe 和 PbS 量子点的玻尔半径较大,量子约束效应明显,禁带宽度较窄,电子能带覆盖了相当宽的红外光谱区域(1200~2340 nm^[4]),这使得 PbSe 和 PbS 量子点在红外通信等领域展现出广阔的应用前景。与 PbS 量子点相比,PbSe 量子点的玻尔半径

收稿日期: 2018-03-20; 修回日期: 2018-05-02; 录用日期: 2018-05-15

基金项目: 国家自然科学基金(61274124,61474100)

* E-mail: 2277546729@qq.com; ** E-mail: chengch@zjut.edu.cn

(46 nm^[4])较大,带隙(0.28 eV^[4])较小,量子产率较高。但 PbSe 量子点在大气中容易氧化,导致量子效率降低、荧光波长峰发生偏移。而 PbS 量子点不易被氧化,光谱比较稳定,制备技术较成熟,这给实际器件的制备带来很大的便利。本文采用 PbS 量子点作为增益介质进行研究。

有关 PbS 量子点的光学增益特性的研究已有诸多报道^[5-6]。以 PbS 量子点作为增益介质掺杂的光纤(即量子点光纤, QDF)也有一些报道^[7-8]。Shang 等^[7]用化学气相沉积等技术将 PbS 量子点沉积在玻璃管内壁,经高温熔融后形成 PbS 量子点掺杂的玻璃棒,再经拉丝,制得玻璃基质的 QDF,在 586, 738, 1048 nm 波长处观测到了较明显的吸收峰,其光致荧光(PL)的半峰全宽(FWHM)约为 130 nm,覆盖了 1100~1300 nm 波长区。Huang 等^[8]用玻璃管内熔融拉丝和热处理技术,制得 PbS 量子点掺杂的玻璃基 QDF,避开了量子点在传统棒状纤芯拉丝过程中存在大量析晶的难点,降低了 QDF 的传输损耗,其 PL 谱覆盖 1000~1700 nm, FWHM 为 297~316 nm。Shen 等^[9]利用紫外光刻等技术,将 PbS 量子点分散于紫外(UV)固化聚合物,制作了单波导结构的 QDF,在 410 nm 抽运下,测得该 QDF 的 PL 中心峰波长为 1080 nm,带宽约为 200 nm。此外,对于由 PbS 量子点构成的光纤放大器(QDFA),近年来,相关研究主要沿着两条途径发展:1) 基于熔锥型光纤耦合式结构的 QDFA,其主要是用瞬逝波激励量子点产生 PL,从而实现对信号光的放大,如 Sun 等^[10]提出利用大分子聚合物修饰 PbS 量子点的表面基团,将修饰后的 PbS 量子点涂敷在双单模光纤熔锥耦合结构的外表面上,用瞬逝波激励,在中心峰波长为 1550 nm 及 1440~1640 nm 带宽范围内, -63 dBm 的入射信号光功率获得了 17 dB 的稳定增益输出; 2) Lan 等^[11]提出的微波导结构的 QDFA,以 10 mm 长的微波导 QDFA 对 1310 nm 波段的信号光实现了放大,实测增益为 3 dB。

迄今为止,尚未有用 PbS 量子点掺杂单/多模光纤并结合常规波分复用抽运结构来实现 QDFA 的研究报道。鉴于目前广泛商用的掺铒光纤放大器(EDFAs)均采用单/多模光纤和波分复用抽运结构,本文实现的 QDFA 与现有的 EDFAs 技术兼容,能够方便地代替传统的 EDFAs 接入光纤通信网络而无须做大的改动。另外,由于石英玻璃包层的保护作用,纤芯掺杂的 QDFA 可避免环境因素(如水

气、空气等)对性能的影响,因此,本文实现的常规单/多模光纤结构的 QDFA 具有积极意义。

本文以 PbS 量子点为光纤的增益介质,以 UV 胶为光纤纤芯本底,对由 973 nm 单模激光器、隔离器(ISO)、波分复用器(WDM)、量子点掺杂光纤等构成全光路结构的 QDFA 进行了尝试。采用离散的 PbS 量子点掺杂介质,可根据需要调整掺杂浓度,避开用其他掺杂方式(例如高温熔融法制备量子点玻璃光纤)对量子点掺杂粒度、浓度等较难进行准确控制的困难,给研究带来了很大便利。

本文实验观测了量子点的透射电镜(TEM)图、量子点和 QDF 的吸收谱和发射谱,得到了不同掺杂浓度的 QDF 的 PL 辐射强度随光纤长度的变化规律。实验发现,达到最大 PL 光强所需的量子点掺杂浓度与光纤长度呈线性相关。进一步选用具有最大 PL 光强的量子点掺杂浓度和 QDF,接入光纤放大器光路。采用中心波长为 1560 nm 的宽带信号光源,经不同功率的中心波长为 973 nm 的抽运光抽运时,在 S-C-L 波带(1470~1620 nm)获得了信号光的放大。实验结果表明:所实现的 QDFA 的带宽、C 波带增益平坦度、噪声系数(NF)等性能优于常规的 EDFAs, L 波带增益平坦度低于经优化的多光纤 EDFAs。与用瞬逝波激励的双单模光纤熔锥耦合结构的 QDFA 相比,所提 QDFA 的结构简单,抽运激励阈值或功率面密度很低,容易形成激射并形成光放大,达到增益饱和的抽运功率较低。

2 实 验

2.1 PbS 量子点

PbS 量子点由苏州星烁纳米科技有限公司提供。采用高分辨 TEM(Tecnai G2 F30 S-Twin 型,荷兰 Philips-FEI 公司)观测了量子点的粒径和形貌,如图 1(a)所示。通过对量子点 TEM 图的统计分析,用 Nano Measurer 软件得到量子点的粒度分布,如图 1(b)所示。由数值拟合可得其归一化分布函数为

$$y(a) = \exp[-6.944(a - 5.79)^2], \quad (1)$$

式中: y 为粒径为 a 的量子点所占的比例。由(1)式可知,量子点中心粒径 $d = 5.79$ nm。粒度分布的 FWHM 约为 0.63 nm,即在偏离中心粒径 ± 0.315 nm 处,其占比已降至 50%。下面为了方便,在不发生误解的情况下,将中心粒径简称为粒径。

2.2 PbS-QDFA 的构成

PbS 量子点的能级跃迁示意如图 2 所示。量子

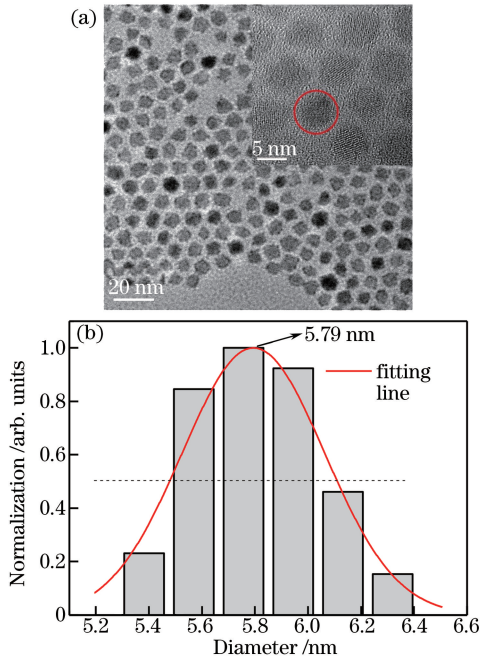


图 1 PbS 量子点的 (a) TEM 图和 (b) 粒度分布

Fig. 1 (a) TEM images and (b) size distribution of PbS QDs
 点由三能级系统组成,各能级是简并能级,这些简并能级构成了量子点的多重态。由于多重态内能级间隔非常窄,多重态内粒子数分布很容易达到热平衡。在短波长抽运光的激励下,量子点吸收抽运光的能量,迅速从价带的顶部附近(基态,能级 1)跃迁到高能态(能级 3),如图 2 虚线所示,跃迁过程包括 $^1S_e \rightarrow ^1P_h$ 、 $^1P_e \rightarrow ^1S_h$ 和 $^1P_e \rightarrow ^1P_h$,其中 1S_e 、 1P_h 、 1P_e 、 1S_h 代表基态、第一激发态和第二激发态, E_g 为块材料的带隙能, σ_a 、 σ'_a 代表吸收截面, σ_e 代表发射截面, A_{32} 、 A_{21} 代表能级 3 \rightarrow 2、2 \rightarrow 1 的跃迁几率。激发态寿命很短,激发态粒子以无辐射跃迁的方式快速布居到能级 2。此时,在波长约为 1550 nm 信号光的诱导下,位于能级 2 的粒子以受激辐射和自发辐射两种途径跃迁回基态,释放出与信号光频率一致的光子,从而增强了信号光的强度,即实现了对信号光的放大。自发辐射(ASE)噪声沿光纤传输不断放大,形成放大的自发辐射,这应尽可能地避免。实际上,能级 3 的

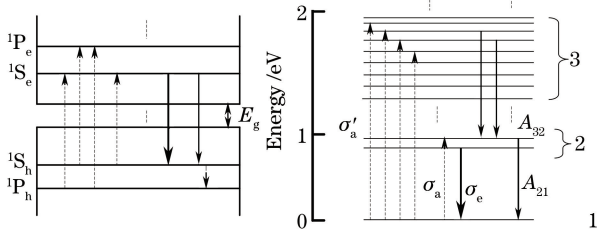


图 2 PbS 量子点的能级示意图

Fig. 2 Energy level diagram of PbS QDs

寿命非常短,约为 0.5 ps^[12],因此,可将 PbS 的三能级系统简化为二能级系统进行研究。

实验装置如图 3 所示。光纤放大器由宽带光源(SLED)、光隔离器、WDM、抽运源(LD)、PbS-QDF 等构成。其中 SLED 为超辐射发光二极管(型号:HY-SLED-1550-9-90-B-FA-T,深圳市浩源光电技术有限公司),光谱范围为 1450~1650 nm,中心波长为 1560 nm,3 dB 带宽为 80 nm (1518~1598 nm),最大输出功率为 9 mW。ISO 是中心波长为 1550 nm 的两级隔离器,单模尾纤输出,单向隔离度大于 55 dB。WDM 为 980/1550 nm 单模带尾纤(9 μm/125 μm,纤芯/包层)输出。抽运源为 980 nm 半导体激光器,单模尾纤输出,中心波长位于 973 nm(±0.2 nm),最大输出功率 500 mW。

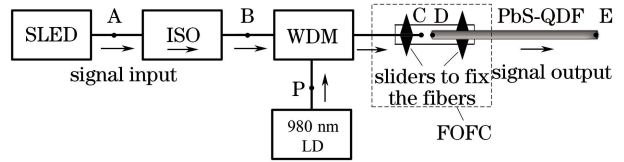


图 3 QDFA 的实验装置图

Fig. 3 Experimental setup of QDFA

SLED 宽带信号光经 A 点穿过 ISO,与 980 nm 抽运光在 WDM 中进行复合。WDM 输出经光纤快速连接器(FOFC)进入增益光纤 QDF。QDF 中的量子点在抽运光的激励作用下,受信号光的诱导产生受激辐射,实现对信号光的放大并由 E 点输出。图 3 中 A、B、P 各点均采用 FC-APC 跳线以法兰盘相连。QDF 在 D 点插入 FOFC,与 WDM 的输出端(C 点)通过法兰盘连接在一起(C 点处的法兰盘未画出,其功能简化到 FOFC)。在实验中,为了确定光路中各个连接点的损耗,先用一段普通光纤代替 QDF 接入光路,测得 C、D 点之间的连接损耗为 1.53 dB,A、C 点之间的损耗为 2.21 dB,P、C 点之间的损耗为 2.22 dB。由于 FOFC 存在连接损耗,抽运光源的输出功率不等于进入 QDF 的激励功率,后面所提到的抽运功率除了特别指出之外,均指进入 QDF 的抽运功率。

2.3 PbS-QDF 的制备

光纤纤芯本底为 UV 胶(Norland NOA-61),其固化收缩率极小,折射率略高于石英玻璃光纤包层,在紫外灯照射下可以固化形成固态本底纤芯,是一种比较理想的实验室光纤纤芯本底材料^[4]。

用微量移液器(法国 Gilson)取 2 mL 的正己烷加到装有 25 mg PbS 量子点粉末的试剂瓶中,手动摇匀

后放置于超声波振荡器中进行振荡,促使 PbS 量子点充分溶解并均匀分散在正己烷中,获得质量浓度为 12.5 mg/mL 的 PbS 量子点正己烷原溶液。接着对原溶液进行加热挥发处理。加热之前先调节氮气的流速,在混合试剂瓶中放入磁石,通过进气软管往瓶内通几分钟氮气,排出瓶内的氧气。然后取一定量的 PbS 量子点正己烷原溶液和 UV 胶,一同置于混合试剂瓶中,盖好瓶盖继续通几分钟氮气,再置于旋转蒸发仪(R-1020)内,对其进行隔氧蒸发。根据沸点差异,至正己烷完全挥发掉。随后,将试剂瓶转移到超声波振荡器中振荡使其充分均匀,最终可制备得到不同质量浓度(0.4, 0.8, 1.4, 2.0, 2.6 mg/mL)的量子点 UV 胶体。取适量不同质量浓度的量子点 UV 胶体,用紫外-可见-近红外分光光度计(日本岛津,UV-3600 型,测量范围 200~2600 nm,扫描精度 1 nm)测量其近红外吸收光谱,用荧光光谱仪(英国 Edinburgh Instruments, FLS980 型,测量范围 200~5000 nm,扫描精度 1 nm)测量其荧光发射谱,从而可确定达到最大荧光强度所需的量子点掺杂浓度与光纤长度。最后,用压力差将量子点胶体灌入空心石英玻璃光纤(50 $\mu\text{m}/125 \mu\text{m}$),制得不同长度、不同掺杂浓度的 QDF。在紫外灯照射下,最后可得固态纤芯的 QDF。将 QDF 放置一段时间(例如 2 d)后再次测量其光谱,结果表明其光谱较稳定。

在实验中,将已经制备好的 QDF 的两端面用台式切割机切平,将其中一端(图 3 中 D 点)插入 FOFC,再通过法兰盘与 WDM 连接。另一端(图 3 中 E 点)固定并做好标记。之后,每次截断后 QDF 的端面始终位于该标记处并固定不动,这可使测得的 PL 谱稳定可靠。

3 实验结果与分析

3.1 PbS-QDF 对抽运光的吸收

图 4 为实测的质量浓度为 2.0 mg/mL 的 PbS 量子点的吸收光谱和 PL 谱以及 UV 胶归一化的吸收光谱。PbS 量子点的第一吸收峰位于 1538 nm, PL 峰位于 1550 nm, PL 谱的 FWHM 为 133 nm。本实验采用的 PbS 量子点的斯托克斯频移偏小(12 nm)。由于斯托克斯频移与量子点制备过程中的缺陷以及缺陷能态有关,斯托克斯频移小,意味着吸收带隙蓝移小,从而使得在 1550 nm 波带附近沿光纤传输的辐射光子被重新吸收的几率增大,这不利于增益的提高。如果实验采用宽斯托克斯频移的量子点,则增益可得到提高^[4]。由于 PbS 量子点的

玻尔半径较大,属于强约束量子点,因此量子点的粒径也可结合修正的 Brus 公式^[13],用测量的量子点第一吸收峰波长估算其粒径,估算的粒径与 TEM 测得的粒径基本相符。

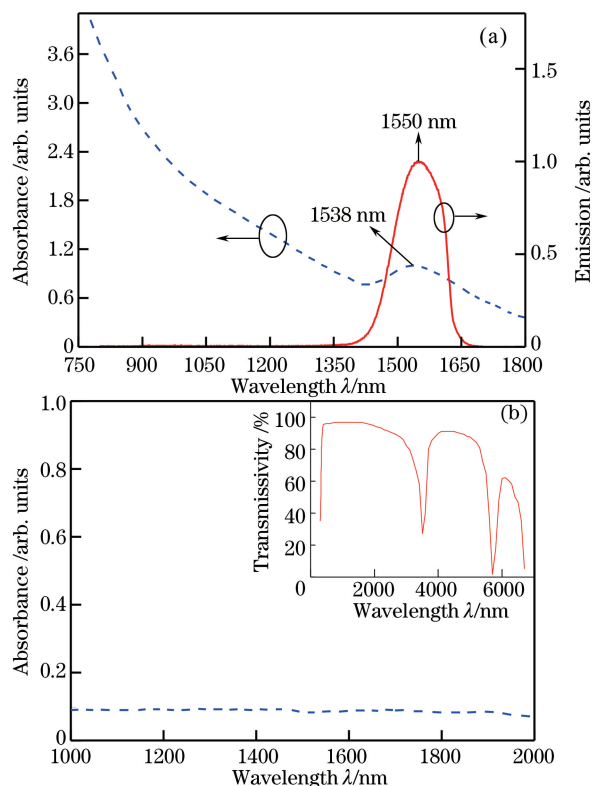


图 4 (a) UV 胶本底的吸收谱和透射率; (b) 实测 PbS 量子点的 PL 辐射谱和吸收谱

Fig. 4 (a) Measured absorption spectrum and transmissivity of UV-gel background; (b) measured PL-emission and absorption spectra of PbS QDs

如图 4(a)所示,本底 UV 胶在近红外区域的吸收很小,进入 QDF 的抽运光能量几乎全部被 PbS 量子点吸收,即本底 UV 胶的吸收很小,可以忽略。本研究采用的 PbS 量子点的粒径较小(5.79 nm),量子限域效应明显,激子吸收强烈,这导致了如图 4(b)所示的连续吸收现象。得益于这种在短波长区域的连续强吸收,实验中抽运光波长的选择比较自由,例如,既可采用常用的 973 nm 抽运光作为激励源,也可采用其他波长的抽运光源。

QDF 中的光传输损耗主要源自吸收和散射。由于量子点的粒径远小于入射波长,故其散射属于瑞利散射。由瑞利散射公式^[4]可知量子点的散射截面远小于其吸收截面,因此, QDF 中光传输衰减主要源自量子点的吸收。实测 QDF 中 973 nm 抽运光的吸收情况如图 5(a)所示,其中量子点掺杂质量浓度为 0.4~2.6 mg/mL,光纤长度为 1~12 cm。

由图 5(a)可见, QDF 中的抽运光随着光纤长度的增加呈指数式衰减, 其衰减速率与掺杂浓度有关, 掺杂浓度越高, 衰减越快。由 Lambert-Beer 定律^[4]可知, 对于 973 nm 波长, 有掺杂时的衰减系数 $\alpha = 0.73 \sim 2.15 \text{ cm}^{-1}$, 无掺杂时的 $\alpha = 0.03 \text{ cm}^{-1}$, 很小, 可忽略。于是, 结合吸收谱分布, 如图 4(b)所示, 由实测的 973 nm 的衰减系数, 就可以确定 QDF 在整个测量波带范围(750~1800 nm)内的衰减系数或损耗系数, 如图 5(b)所示。作为对比, CdSSe/ZnS 掺杂的 QDF 的衰减系数 $\alpha = 0.42 \sim 1.84 \text{ cm}^{-1}$ ^[14] (对应的掺杂质量浓度 $c = 0.1 \sim 3.0 \text{ mg/mL}$), 与本研究中 PbS 的衰减系数值相近, 其差异可能与量子点的种类不同有关。

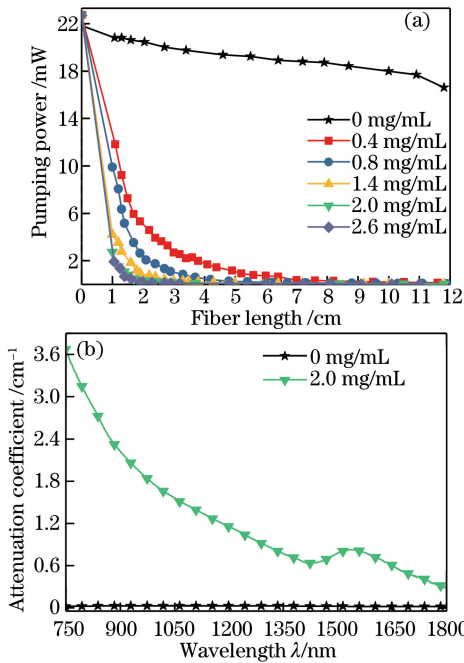


图 5 (a) QDF 中抽运功率随光纤长度的变化; (b) QDF 的损耗谱

Fig. 5 (a) Measured pumping power in QDF as a function of fiber length; (b) attenuation of QDF varying with wavelength

3.2 PbS-QDF PL 光强随光纤长度和掺杂浓度的变化

测量得到的不同掺杂浓度下 QDF 的 PL 光强随光纤长度的变化如图 6 所示, 其中掺杂质量浓度 $c = 0.4 \sim 2.6 \text{ mg/mL}$, 光纤长度 $L = 1 \sim 12 \text{ cm}$ 。结果表明: 掺杂浓度越大, 达到最大荧光强度所需的光纤长度(这里称为最佳光纤长度 L_{opt})越短。另外, 在 L_{opt} 附近, 仅数毫米的光纤长度变化便会导致输出 PL 光强快速变化, 这可定性解释如下: 当抽运光强较大时(大于阈值抽运功率), 量子点吸收抽运能量

并被激励发生反转, 产生 PL。随之, 抽运光和 QDF 前段所产生的 PL 在 QDF 中继续传输, 其能量被量子点不断吸收, 使得 PL 光强不断衰减, 光强增加变缓, 出现饱和。当抽运光强很低时(低于阈值抽运功率), 由于光纤后段的量子点得不到抽运能量, 输出的 PL 光强迅速降低。在 L_{opt} 处, QDF 中量子点的吸收和辐射刚好处于一个平衡位置, 因此, 在 L_{opt} 附近输出 PL 光强出现快速变化的现象。光强沿光纤长度变化的定量分析和计算, 需由二能级速率方程及抽运光在光纤中的传输方程来解释, 这已超出本文的研究范围, 具体可参考文献[4]。

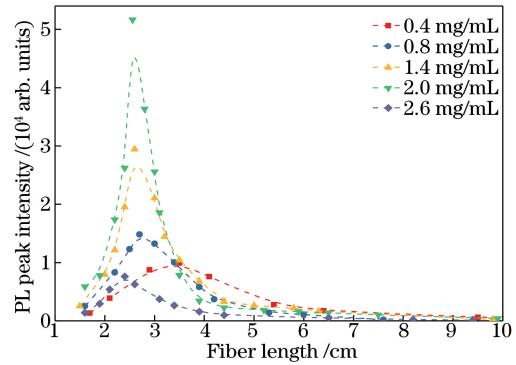


图 6 不同掺杂浓度下 QDF 的 PL 峰值光强随光纤长度的变化

Fig. 6 PL peak intensity of QDF as a function of fiber length under different doping concentrations

实验发现, 最佳光纤长度 L_{opt} 与掺杂浓度 c 满足如下关系(其中 L_{opt} 的单位为 cm, c 的单位为 mg/mL):

$$\{\sqrt{L_{\text{opt}}} c\}_{\text{cm}^{-1/2} \cdot \text{mg} \cdot \text{mL}^{-1}} = 1.513\{c\}_{\text{mg} \cdot \text{mL}^{-1}} + 0.136. \quad (2)$$

图 7 给出了所提 PbS 量子点以及其他种类的量子点(CdSSe/Zn^[14]、PbSe^[4])掺杂的最佳光纤长度 L_{opt} 与掺杂浓度 c 之间的关系。由图 7 可见, 尽管量子点的种类不同, 但其在光纤中的传光特性相似, 即光纤长度与掺杂浓度的关系均呈近似线性变化。对此可解释如下: 对于给定的抽运功率, QDF 中能吸收抽运光能量而被激励到高能级并能产生荧光辐射的粒子数是恒定的, 而高能级粒子数直接与 QDF 的掺杂浓度有关, 浓度越大, 对应的达到荧光最强的光纤长度越小。利用这一规律可以指导实验, 根据浓度可确定 PL 光强最强的最佳光纤长度, 从而有助于减少实验摸索的范围。同样, 可以利用最佳光纤长度来估算适合的掺杂浓度, 进而计算出对应的量子点数密度。

实验结果表明: 当掺杂浓度为 2 mg/mL、光纤长度为 2.56 cm 时, QDF 的 PL 光强最大。当掺杂

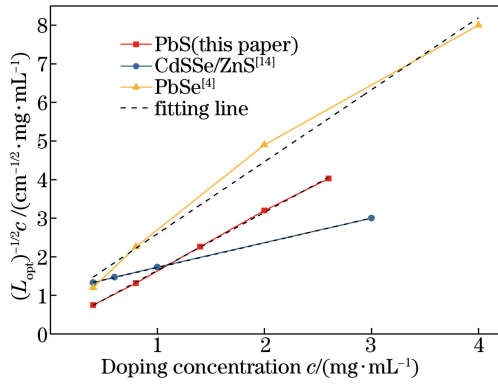


图 7 L_{opt} 与掺杂浓度之间的关系

Fig. 7 Relationship between L_{opt} and doping concentration

浓度继续增大时,荧光强度出现下降的趋势,这主要是因为浓度过高而产生了“荧光猝灭”效应^[15]。

3.3 QDFA 放大特性分析

为了研究 QDFA 的光放大特性,将质量浓度为 2 mg/mL、光纤长度为 2.56 cm 的 QDF 接入 QDFA 光路中,测量输出信号光谱并分析 QDFA 的增益特性及噪声系数。

为了实验方便,采用开关增益来评价 QDFA 的光放大特性。开关增益是指在一定的信号功率下,无抽运光时输出的信号光强与有抽运光时输出的信号光强的比值。在实验过程中,除了抽运光的功率发生改变外,其他参数都保持一致。因此,来自光路自身的损耗并不会影响最终测量得到的增益值。开关增益减去 SLED 信号光经 A 点到 D 点的传输损耗(1.53 dB+2.21 dB),即为该 QDFA 的净增益。如果没有特别说明,下面的增益均指开关增益。

实验中,先固定信号光的功率不变,在不加抽运光时,通过光谱仪测得输出的信号光谱如图 8 右上角插图所示(中心波长位于 1560 nm,FWHM 为 80 nm)。之后,逐步增加抽运光的功率,测量得到的输出信号光的光谱分布如图 8 所示。可见信号光在抽运光的激励下得到了放大,抽运光功率越大,输出信号光越强。当抽运光功率达到一定大小(例如 107.8 mW)后,输出的信号光强度的增加变缓并逐渐趋于饱和。

由图 8 可得到 QDFA 的增益系数随抽运光功率的变化(见图 9)。可见 QDFA 的增益比较平坦,在 1518~1593 nm 波长区,带宽达 75 nm,接近信号光源的带宽(80 nm)。当抽运功率达到 181 mW 时,输出信号光增益为 16 dB~19 dB(净增益为 12.26 dB~15.26 dB)。如果实验中增大信号光源的带宽,可以预计 QDFA 的带宽将进一步增宽。图 9 中 QDFA 的增

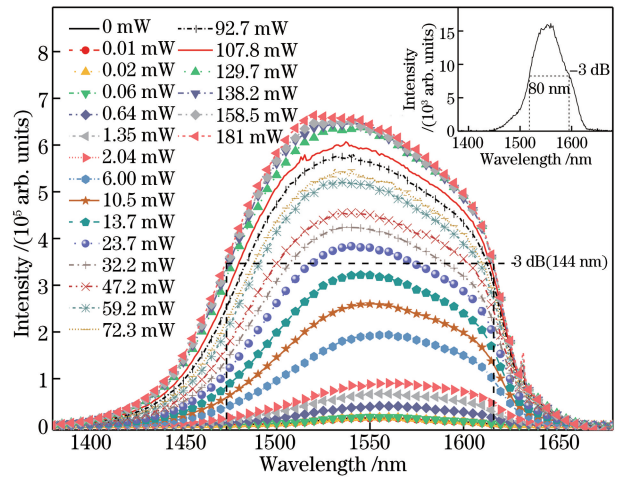


图 8 不同抽运功率下 QDFA 的输出信号光强分布(插图为零抽运时信号光的输出光谱)

Fig. 8 Output signal spectra of QDFA under different pumping powers, where the illustration is output spectrum for zero pump

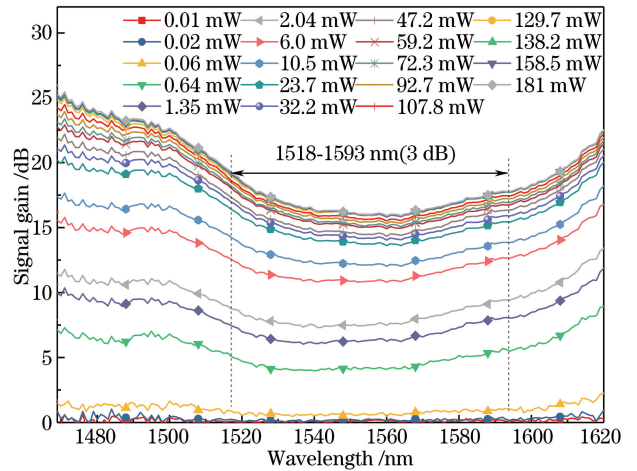


图 9 不同抽运光功率下 QDFA 的增益特性随波长的变化
Fig. 9 Signal gain of QDFA as a function of wavelength under different pumping powers

益曲线呈凹型而非完全平坦,其 1550 nm 附近波长处的增益小于两端波长处的增益,这个现象可能与量子点的 PL 单辐射峰位于 1550 nm 附近有关。

QDFA 带宽增宽的原因分析如下。由 Brus 公式^[13]以及文献^[16]可知,量子点带隙能可表示为

$$E(a) = E_g + \frac{\pi^2 \hbar^2}{2\mu a^2} - 1.786 \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0\epsilon_1 a} - 1.1144 \times \frac{\epsilon_2 - \epsilon_1}{\epsilon_2 + \epsilon_1} \times \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0\epsilon_1 a}, \quad (3)$$

式中: a 为量子点直径; μ 为激子折合质量($1/\mu = 1/m_e^* + 1/m_h^*$,其中 $m_{e,h}^*$ 为电子和空穴的有效质量); \hbar 为约化普朗克常量; e 为电子电荷; $\epsilon_0, \epsilon_1, \epsilon_2$ 分别为真空介电常数、量子点介电常数和基底材料

介电常数。(3)式等号右边的第1项 E_g 为块材料带隙能,第2项为量子点尺寸约束能,第3项是激子库仑势,第4项为文献[16]最近扩展的与介质表面极化效应有关的修正势。由(3)式可知,单尺寸量子点的带隙能是粒径的单值函数。然而,由大量量子点构成的粒子体系,由于量子点有一定的粒径分布,如图1(b)所示,不可避免地导致量子点的能谱变宽。以本研究测量得到的量子点粒径分布(FWHM为0.63 nm)为边界代入(3)式,计算可得量子点能谱的FWHM为153.2 nm(其中含量子点固有热振动导致的能谱变宽),与图8所示的光纤放大输出的信号光强的FWHM(144 nm)相近。综上所述,对于QDFA,要获得较宽的带宽,应当采用宽粒度分布的量子点。

图10给出了输入信号光功率 $P_i = -23$ dBm时,1518,1550,1570,1593 nm 4个不同波长信号光的增益随抽运功率的变化,可见增益曲线呈典型的增益放大-饱和的形态。当入纤抽运功率低于0.64 mW时,几乎没有光增益;当入纤抽运功率等于0.64 mW时,增益突然增大,0.64 mW可以看作抽运激励阈值。根据本研究中的纤芯直径可知,激励阈值功率面密度为 $p_{th} = 32.6$ W/cm²。之后,随着抽运功率的增加,增益近似线性增长。当抽运功率达到23.7 mW后,增益开始出现饱和,此时价带顶部的电子几乎全被激励到了导带,受激吸收和辐射趋近或达到了饱和。

作为比较,图10还给出了文献[10]用瞬逝波激励的双单模光纤熔锥耦合结构QDFA在1550 nm

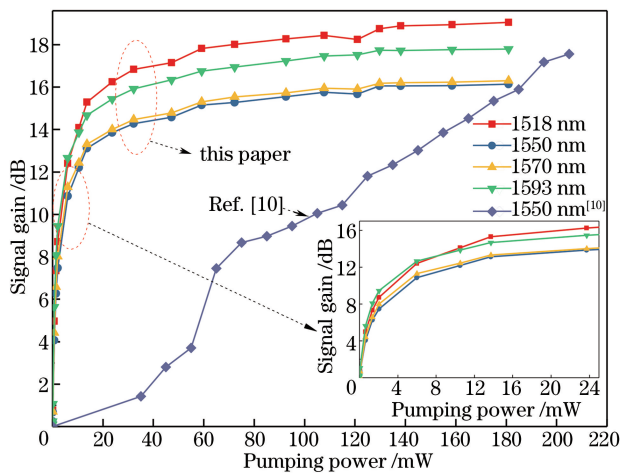


图10 不同波长下信号光增益随抽运功率的变化(插图为局部放大图)

Fig. 10 Signal gain as a function of pumping power under different wavelengths, the insert shows the partial enlargement

处增益随抽运功率的变化,其中信号光输入功率 $P_i \approx -63$ dBm。由图10可知,瞬逝波激励方式的增益增长行为与本研究结果相似,均随抽运功率增大而增大。其受激辐射的阈值功率约为35 mW,其锥形区域腰径(约15 μm ^[17])处的阈值功率面密度约为 1.98×10^4 W/cm²,远大于本研究中的激励阈值面密度(32.6 W/cm²)。此外,瞬逝波激励的饱和抽运功率(约195 mW)及阈值功率面密度较高。这种差别应当与两种光纤放大器的结构不同、量子点掺杂和激励方式不同有关。

实验中,笔者多次将抽运功率从零逐渐调高到181 mW,并在不同的抽运功率下维持一段时间(约3 min),对该QDFA的增益特性进行反复测量,以及将该QDFA放置一段时间(约3 d)后,再对其增益特性进行反复测量。实验结果表明,随着抽运时间和放置时间的延长,该QDFA的增益性能变化较小,性能较稳定。

激励阈值功率是光纤放大器一个重要技术指标。由PbS量子点的单峰PL谱的特征[图4(b)]可知量子点能级为二能级系统。对于二能级系统,抽运阈值为^[18]

$$P_{th} = \frac{\sigma_{a,s} h \nu_p A}{\Gamma_p \tau (\sigma_{a,p} \sigma_{e,s} - \sigma_{e,p} \sigma_{a,s})}, \quad (4)$$

式中: σ 为截面; h 为普朗克常量; ν_p 为抽运光频率; A 为纤芯截面积; Γ_p 为抽运光的重叠因子(由实验确定); τ 为上能级寿命;下角标a表示吸收、e表示辐射、p表示抽运光、s表示信号光。这里QDF的纤芯直径为50 μm ,抽运峰值波长为973 nm。取中间波长1550 nm,PbS量子点的吸收截面和辐射截面分别为 $\sigma_{a,s} = 6.4645 \times 10^{-17}$ cm², $\sigma_{e,s} = 7.1458 \times 10^{-17}$ cm²^[4],以及PbS量子点上能级寿命 $\tau \approx 5$ μs ^[8],可以得到抽运阈值功率 $P_{th} = 0.509 \sim 5.09$ mW(取 $\Gamma_p = 1.0 \sim 0.1$),对应的功率面密度为 $p_{th} = 25.9 \sim 259$ W/cm²。由实验测得的抽运阈值功率约为0.64 mW,在(4)式所计算得到的阈值功率范围内。

信号光增益随光纤长度的变化见图11,图11给出了1518,1550,1570,1593 nm 4个不同波长信号光的情况,其中QDF的量子点掺杂质量浓度为2 mg/mL,抽运功率为181 mW。由图11可见,QDF的PL光强达到最强时光纤长度约为2.56 cm,该数据与图6中的最佳光纤长度基本一致。

噪声系数是光纤放大器性能的一个重要参数。由于PbS量子点导带上能级的寿命非常短(约0.5 ps^[12]),在导带内粒子通过非辐射碰撞向下跃迁

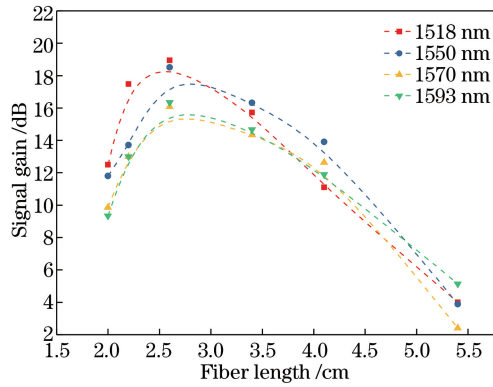


图 11 不同波长下信号光增益随光纤长度的变化
Fig. 11 Signal gain as a function of fiber length under different wavelengths

很快达到热平衡,因而量子点的三能级系统可用二能级系统来近似。对于二能级系统,其噪声系数为^[18]

$$F_N(\lambda) = 10 \lg \left\{ \frac{2n_{sp}(\lambda)[G_s(\lambda) - 1] + 1}{G_s(\lambda)} \right\}, \quad (5)$$

式中: G 为 QDFA 的增益系数; n_{sp} 为自发辐射因子^[4]。对于二能级系统,有:

$$n_{sp}(\lambda) = \frac{1}{1 - \left[\frac{\sigma_{a,s}(\lambda)\sigma_{e,p}(\lambda)}{\sigma_{e,s}(\lambda)\sigma_{a,p}(\lambda)} \right] - \left[\frac{\sigma_{a,s}(\lambda)P_{th}}{\sigma_{e,s}(\lambda)P_p} \right]}. \quad (6)$$

本研究中抽运光波长(973 nm)位于短波长区的远端,抽运光的辐射截面 $\sigma_{e,p} \approx 0$,从而(6)式等号右边的分母只剩下第 1、3 项。第 3 项代表抽运光功率不足时产生的噪声,当抽运功率较小时,该项会使自发辐射增大,进而使噪声系数变大。反之,若抽运功率较大时,QDF 内沿着抽运光传播方向上的粒子可发生反转,此时,第 3 项可以忽略,即 n_{sp} 的最小值为 1。

对于稳态的光纤放大器,量子点上能级多重态子能级处于热平衡之中,因此,发射截面和吸收截面之间的关系可由 Mc Cumber 关系来表达^[4]:

$$\sigma_e(\nu) = \frac{g_1}{g_2} \sigma_a(\nu) \exp\left(\frac{E_{21} - h\nu}{kT}\right) \approx \sigma_a(\nu) \exp\left(\frac{E_{21} - h\nu}{kT}\right), \quad (7)$$

表 1 所提 QDFA 与 EDFAs 以及瞬逝波抽运的 QDFA 主要性能指标对比

Table 1 Comparison of performance among the proposed QDFA, EDFAs, and QDFA excited by evanescent wave

| Amplifier | Working waveband | Bandwidth /nm | Gain flatness /dB | Gain /dB (at 1550 nm) | NF /dB | P_{th} /mW | P_p /mW (gain saturation) |
|--|------------------|---------------|-------------------|--|---------|--------------|-----------------------------|
| EDFAs | | | | | | | |
| (conventional single fiber) ^[4] | C(1535-1560 nm) | About 25 | <3 | About 30 ($P_i = -30$ dBm) ^① | 3.8-4.2 | About 1 | About 100 |

式中: $\sigma_e(\nu)$ 为发射截面; $\sigma_a(\nu)$ 为吸收截面; g_1 、 g_2 为能级的统计权重;上下能级平均能量差 $E_{21} = 0.805$ eV^[4];室温下 $kT = 0.026$ eV。由实验的阈值功率 0.64 mW 可知,当抽运功率分别为 23.7 mW(增益出现饱和时)、107.8 mW(PL 谱光强出现饱和时)、181 mW(抽运功率最大时),QDFA 的增益和噪声系数如图 12 所示。由图 12 可知,噪声系数 $F_N(\lambda) = 2.88$ dB ~ 3.47 dB(在 1472 ~ 1616 nm 区间)。在 1550 nm 波长处,噪声系数 $F_N = 2.88$ dB ~ 2.95 dB。

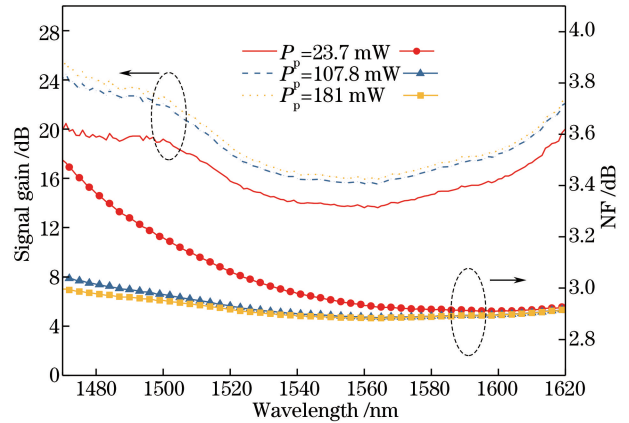


图 12 QDFA 的增益系数和噪声系数
Fig. 12 Signal gain and NF of QDFA

QDFA 的噪声主要源自放大的自发辐射。如果 QDFA 的抽运功率远高于其激励阈值功率,则受激辐射占主导地位,自发辐射受到限制,增益变大,使得噪声系数变小。另外,由(6)式可知,自发辐射因子由发射截面与吸收截面之比以及激励阈值功率与抽运光功率之比共同决定。当抽运光波长较短时,发射截面与吸收截面的比值较大,且抽运光功率也远大于激励阈值功率,导致自发辐射因子很小,其值非常接近 1,从而造成噪声系数减小。

表 1 给出了所提 QDFA 与目前广泛应用的 EDFAs 以及瞬逝波抽运的 QDFA 的主要性能指标对比。

续表

| Amplifier | Working waveband | Bandwidth /nm | Gain flatness /dB | Gain /dB (at 1550 nm) | NF /dB | P_{th}/mW | P_p/mW (gain saturation) |
|--|------------------------------------|------------------|-------------------|--|--------------------|-------------|----------------------------|
| EDFAs (optimized multiple fiber) ^[19] | C(1530-1560 nm) L(1570-1600 nm) | 30 30 | <4.1 <1.2 | 31 32 ($P_i = -30$ dBm) ^① | 3.4-3.5 5.0-5.3 | About 1 | |
| QDFA(excited by evanescent wave) ^[10] | 1440-1640 nm | About 80 | <3 | <about 17($P_i = -63$ dBm) ^② | | About 35 | About 195 |
| QDFA(this paper) | S-C-L(1470-1620 nm) | 75(1518-1593 nm) | <3 | 12.26-15.26 ($P_i = -23$ dBm) ^③ | 2.88-3.47 | About 0.64 | About 23.7 |

① P_i is input signal power at 1550 nm; ② estimated by the data in Ref. [10]; ③ estimated net-gain is 52.26 dB (for $P_i = -63$ dBm), and 19.26 dB (for $P_i = -30$ dBm), respectively.

由表 1 可见,所提 QDFA 比 EDFAs 的工作波段更宽,甚至可以扩展至 S-C-L 波带。在整个波带内,所提 QDFA 的 C 波带的增益平坦度优于经优化的多光纤 EDFAs,噪声也较低。与瞬逝波抽运的双单模光纤熔锥耦合结构的 QDFA 相比,所提 QDFA 的特点在于激励阈值低(容易形成激射并形成光放大),达到增益饱和的抽运功率较低。注意到瞬逝波激励的 QDFA 以及 EDFAs 的输入信号光功率远低于所提 QDFA,而输入信号光功率越低,其输出增益就越高,因此,在不同的输入信号光功率的情况下,表 1 中的增益大小不具可比性。笔者在实验中没有对输入信号功率为 -63 dBm 和 -30 dBm 的情况进行对比测量。根据本实验数据的推算,可知如果输入信号光功率为 -63 dBm 和 -30 dBm,所提 QDFA 在 1550 nm 波长处的净增益分别为 52.26 dB 和 19.26 dB。

4 结 论

采用中心粒径为 5.79 nm、粒径分布的 FWHM 为 0.63 nm 的 PbS 量子点作为光纤增益介质,以 UV 胶为光纤本底,用 973 nm 激光抽运,对 PbS 量子点掺杂的 QDFA 进行了尝试。实验结果表明:QDFA 在 1470~1620 nm 波带范围内实现了信号光的放大。在 1550 nm 中心波长附近,带宽为 75 nm。当输入信号光功率为 -23 dBm 时,开关增益为 16 dB~19 dB(净增益为 12.26 dB~15.26 dB),噪声系数约为 3 dB。QDFA 带宽增宽的原因与所采用的量子点的宽粒径分布密切相关。所提 QDFA 的带宽、C 波带增益平坦度、噪声系数等性能优于常规的 EDFAs,L 波带增益平坦度低于经优化的多光纤

EDFAs。与用瞬逝波激励的双单模光纤熔锥耦合结构的 QDFA 相比,所提 QDFA 的结构简单,抽运激励阈值或功率面密度很低,容易形成激射并形成光放大,达到增益饱和的抽运功率较低。

参 考 文 献

- [1] Xie X J, Kang J H, Cao W, *et al.* Designing artificial 2D crystals with site and size controlled quantum dots[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 9965.
- [2] Mongin C, Moroz P, Zamkov M, *et al.* Thermally activated delayed photoluminescence from pyrenyl-functionalized CdSe quantum dots[J]. *Nature Chemistry*, 2017, 10(2): 225-230.
- [3] Geiregat P, Houtepen A J, Sagar L K, *et al.* Continuous-wave infrared optical gain and amplified spontaneous emission at ultralow threshold by colloidal HgTe quantum dots[J]. *Nature Materials*, 2017, 17(1): 35-42.
- [4] Cheng C, Cheng X Y. Nanophotonics and applications of quantum dots[M]. Beijing: Science Press, 2017: 53-134.
程成,程潇羽.量子点纳米光子学及应用[M].北京:科学出版社,2017:53-134.
- [5] Roy Choudhury K, Sahoo Y, Jang S, *et al.* Efficient photosensitization and high optical gain in a novel quantum-dot-sensitized hybrid photorefractive nanocomposite at a telecommunications wavelength [J]. *Advanced Functional Materials*, 2005, 15(5): 751-756.
- [6] Dong G P, Wu B T, Zhang F T, *et al.* Broadband near-infrared luminescence and tunable optical amplification around 1.55 μm and 1.33 μm of PbS quantum dots in glasses [J]. *Journal of Alloys and*

- Compounds, 2011, 509(38): 9335-9339.
- [7] Shang Y N, Wen J X, Dong Y H, *et al.* Luminescence properties of PbS quantum-dot-doped silica optical fibre produced via atomic layer deposition[J]. Journal of Luminescence, 2017, 187: 201-204.
- [8] Huang X J, Fang Z J, Kang S L, *et al.* Controllable fabrication of novel all solid-state PbS quantum dot-doped glass fibers with tunable broadband near-infrared emission[J]. Journal of Materials Chemistry C, 2017, 5(31): 7927-7934.
- [9] Shen K, Baig S, Jiang G M, *et al.* Improved light emitting UV curable PbS quantum dots-polymer composite optical waveguides[J]. Optics Communications, 2017, 402: 606-611.
- [10] Sun X L, Zhao W, Liu L Y, *et al.* Enhancing environmental stability of a PbS quantum dot optical fiber amplifier via rational interface design[J]. Optical and Quantum Electronics, 2018, 50(4): 173.
- [11] Lan L, Pang F, Sun X, *et al.* A PbS quantum dot polymer optical waveguide amplifier[C]//2011 Asia Communications and Photonics Conference and Exhibition (ACP), November 13-16, 2011, Shanghai, China. New York: IEEE, 2011: 12784425.
- [12] Omari A, Moreels I, Masia F, *et al.* Role of interband and photoinduced absorption in the nonlinear refraction and absorption of resonantly excited PbS quantum dots around 1550 nm[J]. Physical Review B, 2012, 85(11): 115318.
- [13] Brus L. Electronic wave functions in semiconductor clusters: experiment and theory[J]. The Journal of Physical Chemistry, 1986, 90(12): 2555-2560.
- [14] Cheng C, Huang Y, Yao J H. Spectra cross-sections of CdS_xSe_{1-x}/ZnS (core/shell) quantum dots and photoluminescent transmission of the doped fiber[J]. Acta Photonica Sinica, 2017, 46(9): 0916001.
程成, 黄媛, 姚建华. CdS_xSe_{1-x}/ZnS(核/壳)量子点的光谱截面及其掺杂光纤的传光特性[J]. 光子学报, 2017, 46(9): 0916001.
- [15] Noh M, Kim T, Lee H, *et al.* Fluorescence quenching caused by aggregation of water-soluble CdSe quantum dots[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2010, 359(1/2/3): 39-44.
- [16] Cheng C, Wang G D, Cheng X Y. Effects of surface polarization on the bandgap and the absorption-peak wavelength of quantum dot at room temperature[J]. Acta Physica Sinica, 2017, 66(13): 137802.
程成, 王国栋, 程潇羽. 室温下表面极化效应对量子点带隙和吸收峰波长的影响[J]. 物理学报, 2017, 66(13): 137802.
- [17] Pang F F, Sun X L, Guo H R, *et al.* A PbS quantum dots fiber amplifier excited by evanescent wave[J]. Optics Express, 2010, 18(13): 14024-14030.
- [18] Becker P M, Olsson A A, Simpson J R. Erbium-doped fiber amplifiers: fundamentals and technology [M]. Amsterdam: Academic Press, 1999.
- [19] Mahdi M A, Adikan F R M, Poopalan P, *et al.* High-gain bidirectional Er³⁺-doped fiber amplifier for conventional- and long-wavelength bands[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2000, 12(11): 1468-1470.