

# 基于钠铝硼硅酸盐玻璃的近红外宽带 PbSe 量子点 光纤放大器的实验实现

程成\*\*, 汪方杰\*

浙江工业大学光电智能化技术研究所, 浙江 杭州 310023

**摘要** 实验实现了基于钠铝硼硅酸盐玻璃的近红外 PbSe 量子点光纤放大器(QDFA),并在钠铝硼硅酸盐玻璃基底中,通过优化熔融-退火法的热处理条件,制备中心粒径为 4.08~5.88 nm 的 PbSe 量子点光纤。该 QDFA 由量子点光纤、波分复用器、隔离器、抽运源等构成。实验表明:QDFA 在 1260~1380 nm 区间实现了信号光的放大,增益波长区间与量子点的粒径大小有关。当输入信号光功率为 -17 dBm 时,输出信号光增益为 16.4 dB, -3 dB 带宽达 80 nm。实验观测到明显的激励阈值和增益饱和现象。与常规的掺铒光纤放大器以及少模掺铒光纤放大器相比,本研究的 QDFA 的激励阈值低、带宽大、噪声小。本研究设计的 PbSe-QDFA 为扩展光纤通信波段和工业化应用提供了一种新的途径。

**关键词** 光纤光学; PbSe 量子点; 量子点玻璃光纤; 增益带宽; 噪声; 激励阈值

中图分类号 TN253

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.1106002

## Experimental Realization of PbSe Quantum-Dot Fiber Amplifier in NIR Broad-Waveband Based on Sodium-Aluminum-Borosilicate Silicate Glass

Cheng Cheng\*\*, Wang Fangjie\*

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

**Abstract** A PbSe quantum-dot-doped fiber amplifier (QDFA) in NIR region is realized in the experiment. We fabricate the PbSe quantum dot fiber (QDF) with the central diameter of 4.08-5.88 nm by optimizing the heat treatment conditions of the melt-annealing method in the sodium-aluminum-borosilicate silicate glass. The QDFA is composed of the QDF, the wavelength division multiplexer, the isolator, and the pump laser. The experimental results show that the signal light is amplified in the gain wavelength range of 1260-1380 nm depending on the particle size of quantum dots, where signal gain is 16.4 dB and -3 dB bandwidth reaches to 80 nm for the input signal of -17 dBm. An obvious excitation threshold and gain saturation phenomenon are observed in the experiment. Compared with conventional erbium-doped fiber amplifiers and few-mode erbium-doped fiber amplifiers, the proposed QDFA has a lower excitation threshold, wider bandwidth, and lower noise. It provides a novel approach to extend the current optical-fiber-communication waveband and industrial applications.

**Key words** fiber optics; PbSe quantum dot; quantum-dot glass fiber; gain bandwidth; noise; excitation threshold

**OCIS codes** 060.2290; 060.2300; 060.2330; 060.2400

## 1 引 言

近年来,纳米晶体量子点(QDs)由于其独特的量子尺寸效应引起人们的广泛关注<sup>[1-2]</sup>。在近红外波段,目前已经实现的 IV-VI 族量子点主要有

PbSe、PbS 和 PbTe 等。研究表明:PbSe 量子点的发光效率在 IV-VI 族中最高,其量子产率甚至可达 300%<sup>[3]</sup>。此外,PbSe 量子点粒子尺寸远小于其玻尔半径(46 nm<sup>[4]</sup>),量子限域效应明显,很难发生团聚。因此,PbSe 量子点受到更多关注。

收稿日期: 2018-06-11; 修回日期: 2018-06-18; 录用日期: 2018-06-25

基金项目: 国家自然科学基金(61274124,61474100)

\* E-mail: 517440867@qq.com; \*\* E-mail: chengch@zjut.edu.cn

在量子点掺杂的光电子器件中,光纤放大器是其中一类重要器件。量子点的吸收-辐射峰波长以及辐射谱的半峰全宽(FWHM,  $\omega_{1/2}$ )依赖于量子点的粒径,因此,量子点光纤放大器(QDFA)有可能在S、C、L波段实现全波带光放大,从而形成一种全新的近红外光纤放大器。目前,量子点光纤(QDF)的制备方法主要有三种。第一种是将量子点掺入光纤的基底材料(例如紫外胶、正己烷),将量子点溶胶灌入空心光纤制备成QDF。该方法的优点是成品量子点的荧光性能好、量子点分布均匀,缺点是光纤的稳定性较差<sup>[4]</sup>。第二种是先将普通光纤拉锥,然后将量子点胶体涂覆在光纤外面的锥形区域得到QDF,用倏逝波抽运的方式进行激励<sup>[5]</sup>。该方法易于实验室内操作、易与普通光纤耦合,但增益较低、量子点涂覆层裸露,故易受外界的影响。第三种是先通过高温熔融法和拉丝制得玻璃光纤,再对光纤进行退火热处理,得到含量子点的玻璃光纤<sup>[6]</sup>。该方法的优点是量子点在玻璃基质中相当稳定,缺点是所制备的量子点的粒径及密度分布等不易达到要求。从长远来看,玻璃基质的QDF相当稳定,与现有的光纤技术相兼容,因此量子点玻璃光纤应当是QDF的发展方向。迄今为止,鲜有关于常规玻璃光纤纤芯结构的近红外QDFA的报道。

对于PbSe、PbS量子点光纤及光纤放大器,Bahrampour等<sup>[7]</sup>给出了PbSe量子点的非均匀理论模型,认为这种非均匀性来自量子点的不同尺寸,数值模拟计算结果表明:当输入信号光功率为-30 dBm时,1620 nm中心波长处的增益可达25 dB。Pang等<sup>[8]</sup>将PbSe量子点掺杂溶胶浸涂到光纤耦合器的锥形区,构建锥形玻璃光纤的QDFA,在980 nm抽运激励下,在1550 nm波长处观测到了2 dB的光学增益。程成等<sup>[4]</sup>采用紫外胶作为光纤纤芯本底材料,构建了紫外胶基底的PbSe量子点光纤及光纤放大器,实验观测到放大器的增益为12 dB,宽带达120 nm。Huang等<sup>[9]</sup>采用玻璃管内熔融拉丝再热处理技术,制备出PbS量子点掺杂玻璃光纤,光纤工作波段为1000~1700 nm,FWHM为297~316 nm。程成等<sup>[6]</sup>用高温熔融-退火法,在钠铝硼硅酸盐玻璃基底中制备出了PbSe量子点玻璃光纤,观测到光纤在1100~1800 nm波段有强荧光辐射。Sun等<sup>[10]</sup>使用多功能聚合物(multifunctional polymer)修饰PbS量子点表面基团,增强了量子点的稳定性,从而提高了锥形光纤放

大器的稳定性,以倏逝波为激励,实测1550 nm波长处的增益最高为17 dB。

本文在已有实验的基础上,进一步优化高温熔融法制备钠铝硼硅酸盐玻璃及PbSe-QDF。通过测量光纤中PbSe量子点的吸收谱和辐射谱,得到具有最大荧光强度的QDF。由QDF、973 nm激光抽运源(LD)、973/1310 nm波分复用器(WDM)、隔离器(ISO)等组成QDFA。实验结果表明:增益波长与量子点的粒径大小有关,带宽与量子点粒径分布有关。当输入信号光功率为-17 dBm时,输出信号光增益为16.4 dB,-3 dB带宽达80 nm。QDFA的带宽、噪声等关键技术指标均优于常规的掺铒光纤放大器(EDFAs)以及目前人们关注的少模掺铒光纤放大器(FMEDFAs)。与用倏逝波激励的锥形光纤外涂覆量子点的光纤放大器<sup>[10]</sup>(QDFA<sub>evan</sub>)相比,本文设计的QDFA具有结构简单、抽运激励阈值及功率面密度很低、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等优点。本文实现的近红外PbSe-QDFA,实验证实了基于玻璃基底的QDFA的可行性,为扩展通信波段以及工业应用提供了一种新的途径。

## 2 实 验

### 2.1 配合料

选用的玻璃基质配合料为SiO<sub>2</sub>、Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、ZnO、AlF<sub>3</sub>·3H<sub>2</sub>O、PbO和ZnSe,对应的质量分数分别为50.4%、23.04%、3.44%、3.86%、7.65%、3.11%、5.16%和3.34%。AlF<sub>3</sub>·3H<sub>2</sub>O为化学纯,ZnSe为优级纯,其余配合料都为分析纯试剂。Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>用来调节玻璃的形成能力;ZnO有助于量子点合成,减少硫族元素的挥发,使玻璃中的量子点尺寸分布均一化;Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>为助溶剂;AlF<sub>3</sub>·3H<sub>2</sub>O可加速玻璃形成的反应,降低玻璃液的黏度和表面张力,促进玻璃液的澄清和均化,并且可作为一种有效促进量子点生长的晶核剂;PbO和ZnSe是量子点的引入物<sup>[4]</sup>。

曾有文献报道采用Se粉来作为量子点的引入物<sup>[6]</sup>,本研究采用ZnSe作为量子点的引入物。这主要是因为单质Se的熔点较低,在高温下易挥发。而ZnSe的熔点可达到1520℃,在高温熔融条件下(1400℃),大多数ZnSe可存留在玻璃基质中,且残余Zn形成的ZnO是玻璃基质体系的中间氧化物,能促进PbSe量子点的形成,从而可以得到较高浓度的量子点玻璃及光纤。

## 2.2 光纤制备

将 50 g 配合料放入陶瓷研钵中充分研磨,然后放入搅拌机(750T,永康铂欧五金厂,中国)连续搅拌若干次,每次搅拌的时间约 5 min,使混合料充分搅拌均匀。将混合料倒入刚玉坩埚中并加盖,放入箱式高温烧结炉(KSL1700X,合肥科晶材料技术有限公司,中国),在 1400 °C 的高温条件下进行熔融,1 h 后取出<sup>[4]</sup>。将铁丝伸入熔体中并竖直拉伸,拉制出直径约为 80~120  $\mu\text{m}$  的玻璃光纤。这样拉丝得到的光纤具有圆度均匀、直径可控等优点。挑选质量较好的玻璃光纤放入石英舟中,置于真空管式高温烧结炉(OTF-1200X,合肥科晶材料技术有限公司,中国)中进行退火,温度分别为 530、540、550、560、600 °C,时间分别为 7.5、15、30 h。为了进行对比,同时制备没有经过退火的光纤,此光纤中没有量子点出现。

采用高倍显微镜(E200, Nikon 公司,日本)观测 QDF 的形貌,如图 1 所示。QDF 为裸光纤(空气包层),颜色呈棕褐色,色度均匀,说明光纤内的 PbSe 量子点晶体分布均匀。PbSe-QDF 的圆度、均匀性、表面粗糙度等都与常规 SiO<sub>2</sub> 单模光纤(图 1 上部,9/125  $\mu\text{m}$ ,纤芯/包层,涂覆层剥除)比较接近。



图 1 PbSe-QDF 与普通 SiO<sub>2</sub> 单模光纤的对比  
Fig. 1 Comparison between PbSe-QDF and conventional SiO<sub>2</sub> single mode fiber

## 2.3 透射电子显微镜分析

将 QDF 样品用玛瑙研钵研磨成粉末,均匀敷于薄膜上,并将薄膜置于铜网制成待测样品,用高分辨透射电子显微镜(TEM, Tecnai G2 F30 S-Twin, Philips-FEI 公司,荷兰)分析样品中的量子点形貌、尺寸和分布。结果表明:量子点的粒径与退火温度和退火时间有关。如表 1 所示,其中 G<sub>1</sub>~G<sub>5</sub> 样品是温度变化(530、540、550、560、600 °C)、时间不变(7.5 h);G<sub>6</sub>~G<sub>8</sub> 样品是时间变化(7.5、15、30 h),温度不变(550 °C),表 1 的数据是经多次实验和观测得出的平均值。由表 1 可知:退火温度越高,量子点的粒径越大,峰值波长越长;退火时间越长,量子点的粒径越大,峰值波长越长。

表 1 PbSe 量子点粒径和光致发光(PL)峰值波长随退火温度和时间变化

Table 1 Diameter of PbSe QDs and photoluminescence (PL)-peak wavelength versus annealing temperature and time

Sample	Heat treatment temperature /°C	Heat treatment time /h	Central diameter of QDs /nm	PL-peak wavelength /nm
G <sub>1</sub>	530	7.5	4.08	1180±40
G <sub>2</sub>	540	7.5	4.36	1234±40
G <sub>3</sub>	550	7.5	4.76	1310±40
G <sub>4</sub>	560	7.5	5.17	1450±40
G <sub>5</sub>	600	7.5	5.72	1550±40
G <sub>6</sub>	550	7.5	4.76	1310±40
G <sub>7</sub>	550	15	5.61	1540±40
G <sub>8</sub>	550	30	5.88	1600±40

样品 G<sub>3</sub> 量子点 PL 谱峰值波长位于 1341 nm 处,其辐射谱的 FWHM 约为 213 nm,数密度较高,有利于在 S 波段形成增益较高的光放大,从而可形成对常规 EDFAs 的 C 波段的扩展或对接。以下主要对 G<sub>3</sub>-QDF 进行研究。

图 2 为 G<sub>3</sub>-QDF 样品的 TEM 图,其中灰黑色颗粒为 PbSe 量子点。图 2(c)为高分辨率 TEM 图,从图中可以看到明显的、周期性的超精细结构。采用 Nano Measurer 软件对 TEM 图中量子点进行统

计分析,可得到如图 3 所示的粒径分布。量子点粒径呈高斯分布,通过数值拟合可得其分布函数为

$$f(d) = \exp\left[-0.5 \times \left(\frac{d - 4.76}{0.40}\right)^2\right], \quad (1)$$

式中  $d$  为量子点粒径(单位: nm),其中心粒径为 4.76 nm,粒径分布的 FWHM 约为 0.90 nm(图 3)。光纤样品中量子点的中心粒径为 4.76 nm、掺杂数密度为  $3.22 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 、掺杂体积分数为 2%。

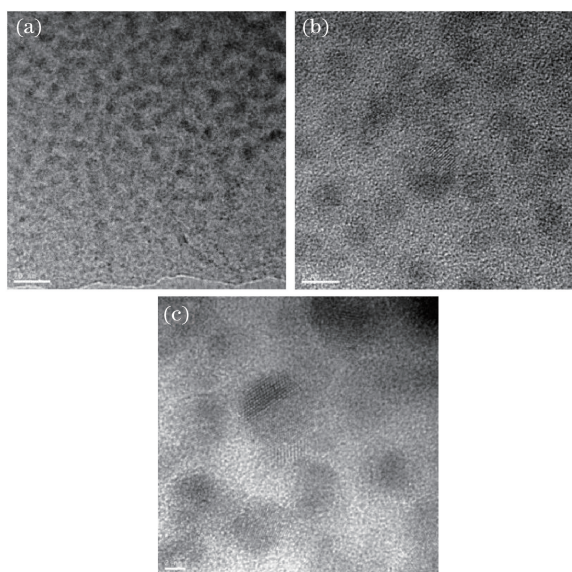


图 2 不同标尺下 PbSe 量子点掺杂玻璃光纤的 TEM 图。

(a) 20 nm; (b) 5 nm; (c) 2 nm

Fig. 2 TEM images of PbSe quantum dot doped glass fiber under different scales. (a) 20 nm; (b) 5 nm; (c) 2 nm

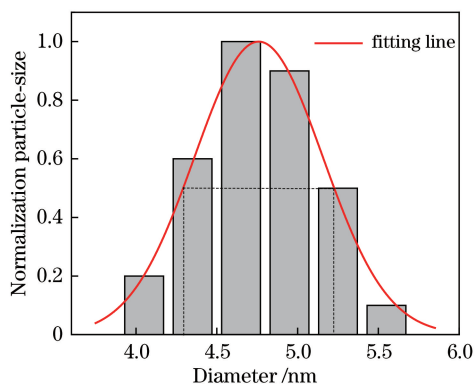


图 3 光纤样品中 PbSe 量子点粒径分布图

Fig. 3 Particle-size distribution of PbSe QDs in fiber samples

## 2.4 PbSe 量子点能级跃迁

根据对 PbSe 量子点吸收-辐射光谱的实验观测,量子点能级跃迁可由三能级系统描述(图 4),其中价带为基态能级 1,导带为上能级 2 和 3。在 QDFA 中,短波长抽运光(973 nm)激励量子点,位于基态的量子点吸收抽运光能量后跃迁至上能级 3,对应于 $^1S_h \rightarrow ^1P_e$ 、 $^1P_h \rightarrow ^1S_e$ 、 $^1P_h \rightarrow ^1P_e$ 等过程(图 4 虚线箭头)。上能级 3 电子在导带内通过非辐射跃迁以极快的速率碰撞布居到能级 2,在波长为 1292~1361 nm 信号光的诱导下,能级 2 的粒子跃迁返回基态并辐射出同频信号光光子,从而实现对信号光的放大。能级 3 的弛豫速率极快,因此,量子点的三能级系统可以近似为二能级系统。

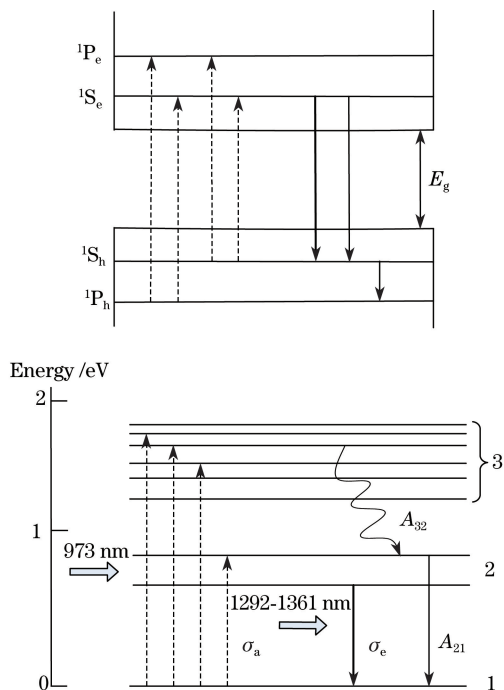


图 4 PbSe 量子点的能级跃迁图

Fig. 4 Level-transition diagram of PbSe QDs

## 3 实验结果和分析

### 3.1 PbSe-QDF 对抽运光的吸收

图 5 为实测的 PbSe-QDF 样品近红外吸收谱和 PL 谱。由图 5 可知,量子点的第一吸收峰波长位于 1235 nm,发射峰波长位于 1341 nm,斯托克斯频移为 106 nm,辐射谱的 FWHM 为 213 nm。PbSe 量子点尺寸很小,远小于其激子的玻尔半径,属于强约束量子点,因此可用 Brus 公式来估算粒径<sup>[11]</sup>:

$$E_g(d) = E_g + \frac{1}{0.0105d^2 + 0.2655d + 0.0667}, \quad (2)$$

式中  $E_g(d)$  为 PbSe 量子点的带隙能,  $E_g$  为 PbSe 体材料的带隙能。常温下  $E_g = 0.28 \text{ eV}$ <sup>[4]</sup>。(2)式右边分母的第一项是量子尺寸受限项( $\propto d^{-2}$ ),第二项是电子-空穴的库仑作用项( $\propto d^{-1}$ ),第三项是常数项(有效 Rydberg 能量)。由实测的辐射峰值波长,可估算量子点的中心粒径为 4.70 nm,它与 TEM 图测量的中心粒径(4.76 nm)相当接近。此外,实测的辐射谱分布范围很宽,这也可由 Brus 公式解释。由(2)式可知,量子点的带隙能是粒径的单值函数,而光纤中的量子点数密度很高,其粒径的宽分布使得量子点的能谱变宽。根据本研究实测量子点粒径  $w_{1/2} = \pm 0.45 \text{ nm}$ (图 3),以此为边界代入

(2)式,可得量子点能谱  $\omega_{1/2}=198\text{ nm}$ ,接近于实测发射谱的 FWHM(213 nm,图 5)。

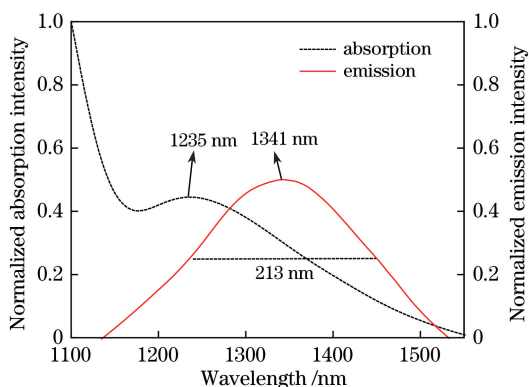


图 5 PbSe-QDF 样品的吸收和发射谱

Fig. 5 Absorption-emission spectra of PbSe-QDF

QDF 中的光传输损耗主要来自量子点的吸收、散射以及玻璃基质的吸收等。量子点的粒径相对于入射波长很小,其散射是瑞利散射,由瑞利散射公式<sup>[4]</sup>可知,量子点的散射截面远小于其吸收截面,因此 QDF 中光的传输损耗主要是玻璃基底和量子点的吸收,瑞利散射可以忽略。在不同的退火条件下,实测 QDF 对 973 nm 抽运光的吸收如图 6 所示。作为对比,图 6 中给出了没有经过退火的玻璃本底光纤(没有量子点)的吸收情况。

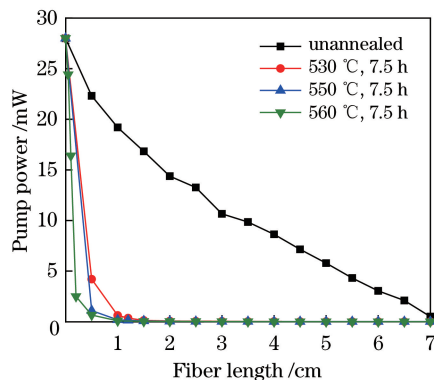


图 6 抽运功率随光纤长度的变化

Fig. 6 Measured pump power versus fiber length

由图 6 可知,QDF 对 973 nm 抽运光吸收很强,吸收随光纤长度的增加呈指数下降。由 Lambert-Beer 定律<sup>[4]</sup>: $I=I_0\exp(-\alpha L)$ ( $\alpha$  为衰减系数, $L$  为光纤长度),可得吸收系数  $\alpha=3.03\text{ cm}^{-1}$ ,该吸收系数在已有的实验数据( $1\sim 5\text{ cm}^{-1}$ <sup>[12]</sup>)的范围内。未经退火处理的玻璃本底光纤对抽运光的吸收较小( $\alpha=0.31\text{ cm}^{-1}$ ),即光纤中的量子点是抽运光被吸收的主要因素。光纤中量子点吸收强烈而玻璃本底的吸收较小,意味着抽运光能量大部分被量子点吸收(而玻璃本底的热吸收效应不明显),使基态电子

很容易被激发到上能级,有助于形成强粒子数反转并产生激光。

### 3.2 PbSe-QDF 的 PL 光强及稳定性

实验测量了不同退火条件下 QDF 的 PL 光强随光纤长度的变化[图 7(a)],及不同光纤长度下 PL 光强的谱分布[图 7(b)]。由图 7 可知,在退火温度为 550 °C、退火时间为 7.5 h 条件下,当光纤长度为 5 cm 时,QDF 的 PL 光强最强,因此选择该条件光纤来构建 QDFA。

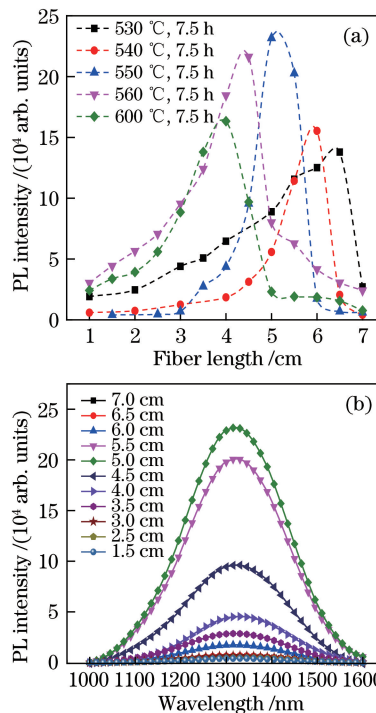


图 7 QDF 的 PL 谱。(a)不同退火条件下 QDF 的 PL 光强随光纤长度的变化;(b)不同光纤长度下 PL 光强的谱分布

Fig. 7 PL spectra of QDF. (a) PL intensity of QDF versus fiber length under different annealing conditions; (b) PL intensity spectral distribution under different fiber lengths

为了检验光纤的稳定性,对同一根光纤的 PL 谱进行对比测量(图 8),时间间隔为一个月。由图 8 可见,PL 谱的轮廓、峰值和强度几乎没有发生变化,这表明铝硼硅酸盐玻璃基底的 PbSe-QDF 相当稳定。

### 3.3 PbSe-QDFA 构成

QDFA 的实验装置如图 9 所示。信号源 SLED 采用中心波长为 1332 nm 的宽带光源(HY-SLED-1310-10-90-B-FA-T,深圳市浩源光电技术有限公司,中国),3 dB 带宽为 69 nm(1292~1361 nm),最大输出功率为 10 mW。ISO 是中心波长为 1310 nm

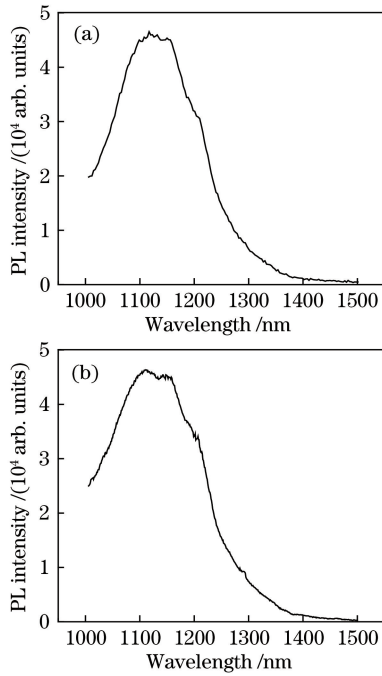


图 8 同一根 QDF 的 PL 谱的对比。  
(a) 初始时间; (b) 一个月后

Fig. 8 Comparison of PL spectra of the identical QDF.  
(a) Initial time; (b) one month later

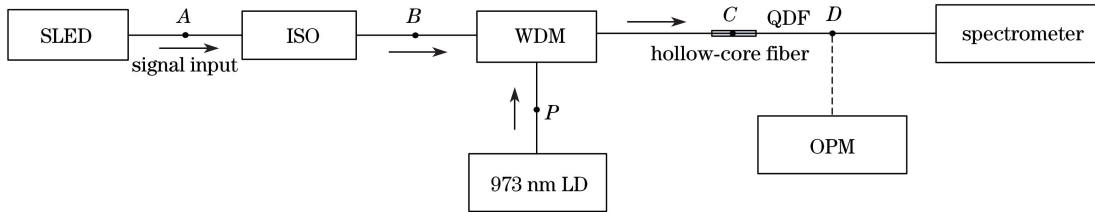


图 9 QDFA 实验示意图

Fig. 9 Experimental setup of QDFA

### 3.4 QDFA 放大性能分析

为了方便,选用开关增益来描述 QDFA 的放大特性。开关增益是指有抽运光激励时输出信号光强与无抽运时输出信号光强的比值。实验过程中整个光路没有变化,因此各个连接点的损耗不会影响测量得到的 QDFA 的增益值。净增益只需将开关增益减去 3.62 dB 即可。

首先,关闭抽运源,测量得到  $D$  点输出信号光功率为  $-17$  dBm(图 10 底部的黑色曲线)。随后,逐步增加抽运功率,测量随抽运功率逐步增大的输出信号光功率。图 10 中的插图为零抽运时在  $D$  点测量的信号光强谱分布,其中心波长为 1332 nm, FWHM 为 69 nm。为了评估 QDFA 增益的均匀性,定义信号光增益均匀度为

$$\eta = \frac{I(\lambda) - I_0(\lambda)}{I(\lambda)} \times 100\%, \quad (3)$$

的双级光隔离器,隔离度大于 55 dB,带单模输出尾纤(9/125  $\mu\text{m}$ )。WDM 是 973/1310 nm 波分复用器,带单模尾纤输出(9/125  $\mu\text{m}$ )。QDF 是 PbSe 量子点玻璃裸光纤(空气包层),直径为 90  $\mu\text{m}$ 。在图 9 的  $C$  点, QDF 通过空芯光纤套管与 WDM 连接,连接前可先将 QDF 拉锥,将光纤端面和 WDM 的尾纤切割平整并涂覆少量的光纤匹配液,以便消除两光纤端面之间因空气隙产生的菲涅耳反射。抽运源采用深圳市铭创光电有限公司出产的半导体激光器,中心波长为 973 nm,最大输出功率为 500 mW,功率稳定度  $\leq 0.05$  dB。OPM 是光功率计(PM320E, Thorlabs, 美国)。

SLED 输出宽带信号光进入 ISO, ISO 的作用是避免信号光反向传输产生干扰。信号光进入 WDM 与 973 nm 抽运光进行耦合,经  $C$  点与 QDF 相连,通过  $D$  点输出到功率计或光谱仪等。实测信号光经过  $A \rightarrow B \rightarrow C$  后的光路传输损耗为 3.62 dB,经过  $P \rightarrow C$  后的传输损耗为 3.10 dB。后面提到的抽运功率和信号光功率都是指在经过  $C$  点之后测得的实际进入 QDF 的功率。

式中  $I(\lambda)$ 、 $I_0(\lambda)$  分别为有抽运、零抽运时的输出信号光强,结果如图 11 所示。

由图 11 可知,当抽运功率高于 2.2 mW 时,各个波长输出信号光相对于输入信号光放大的均匀度相当高,即 QDFA 输出波长的失真度很小。

图 12 为实测的 QDFA 增益随抽运功率的变化图,其中输入信号光功率为  $-17$  dBm。由图 12 可知, QDFA 在中心波带区间增益较为平坦,其  $-3$  dB 带宽为 80 nm(1284~1364 nm),增益分布于 12.7~15.7 dB。 $-1$  dB 平坦带宽为 42 nm。在整个区间内,最高增益大于 20 dB。增益谱分布与信号光的谱分布有关,信号光源光谱呈单峰非均匀分布(图 10),输出增益分布呈现凹形。此外,增益曲线与抽运功率有关。当抽运功率较小时(例如小于 2.2 mW),增益随抽运功率的增大呈线性增加。当抽运功率大于 73.6 mW 时,增益出现饱和。

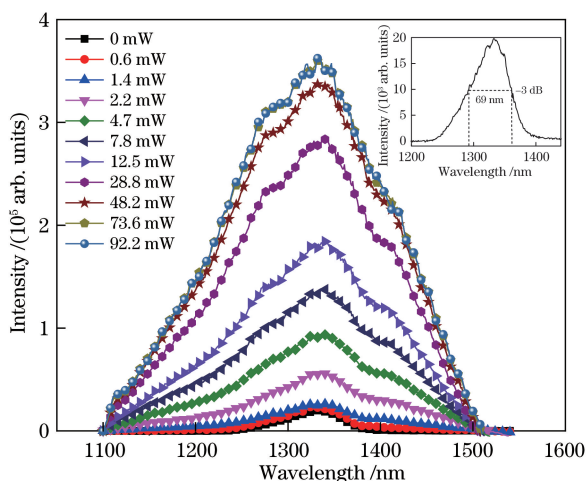


图 10 不同抽运功率下 QDFA 输出信号光的谱分布 (插图为零抽运时信号光的输出光谱)

Fig. 10 Spectral distribution of QDFA output signal under different pump powers. The illustration is output spectrum for zero pump

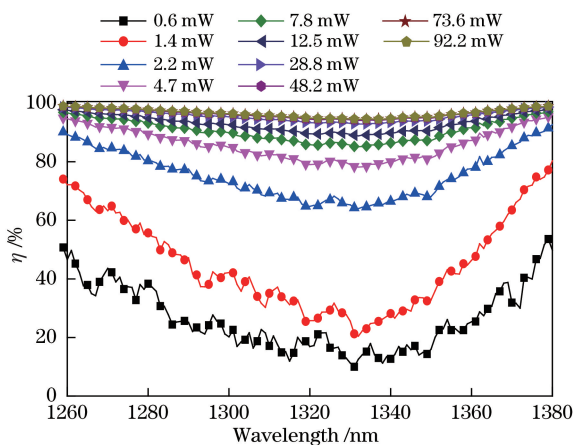


图 11 QDFA 输出信号增益的均匀度

Fig. 11 Homogeneity of the output signal gain of QDFA

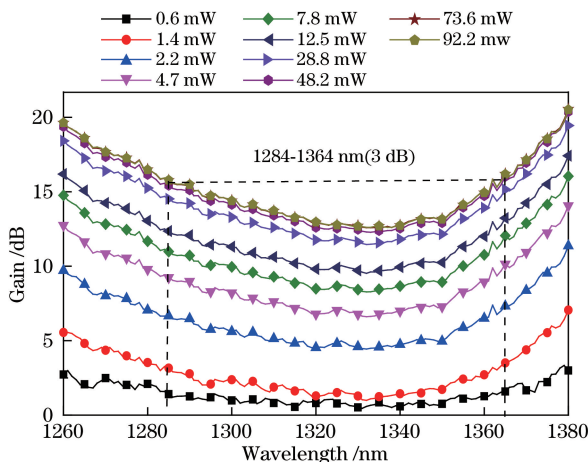


图 12 不同抽运功率下 QDFA 开关增益的变化曲线  
Fig. 12 Variation curves of switching gain of QDFA under different pump powers

图 13 为几个不同波长信号光增益随抽运功率变化的曲线图。由图 13(a)可知:当抽运功率小于 1.4 mW 时,几乎没有输出信号;当抽运光增加到 1.4 mW 时(功率面密度为  $22.0 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-2}$ ),出现明显的信号光;当抽运功率继续增大时,信号光急剧线性增大,于是可以将 1.4 mW 看成是抽运激励阈值;当抽运功率增加到 73.6 mW 时,增益开始出现饱和,这是因为 QDF 中的量子点价带顶部附近的电子几乎全部被激发到导带上,受激吸收到达饱和,从而使辐射跃迁出现饱和。作为比较,图 13(b)给出了以 QDFA<sub>evan</sub><sup>[10]</sup>(信号光输入功率  $P_i \approx -63 \text{ dBm}$ )和近年来发展起来的 FMEDFA<sup>[13]</sup>( $P_i \approx -10 \text{ dBm}$ )在中心波长 1550 nm 处增益随抽运功率的变化。由图 13 可知,本研究 QDFA 的增益行为和 QDFA<sub>evan</sub> 以及 FMEDFA 基本一致。

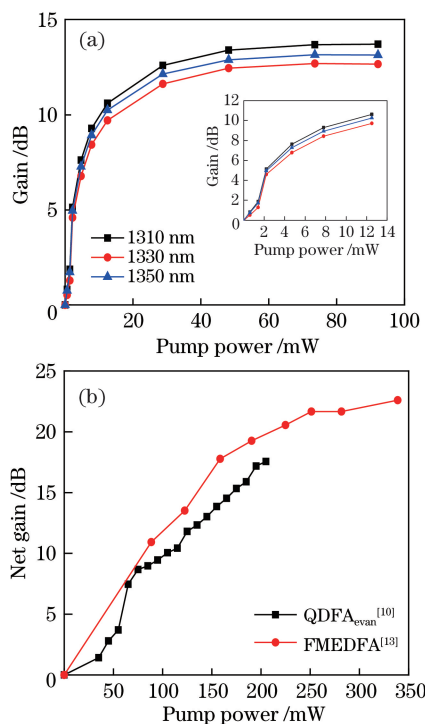


图 13 信号光增益随抽运功率的变化(插图为局部放大)。(a)本研究 QDFA(开关增益,信号光输入功率  $P_i \approx -17 \text{ dBm}$ );(b) QDFA<sub>evan</sub>( $P_i \approx -63 \text{ dBm}$ )<sup>[10]</sup>和 FMEDFA( $P_i \approx -10 \text{ dBm}$ )<sup>[13]</sup>

Fig. 13 Signal gain versus pump power, where the illustration is partial magnification. (a) QDFA in this paper (switching gain for  $P_i \approx -17 \text{ dBm}$ ); (b) QDFA<sub>evan</sub>( $P_i \approx -63 \text{ dBm}$ )<sup>[10]</sup> and FMEDFA( $P_i \approx -10 \text{ dBm}$ )<sup>[13]</sup>

噪声是光纤放大器的一个重要指标。QDFA 的噪声系数  $N_f(\lambda)$  为 2.87~3.26 dB(1260~1380 nm 区间),如图 14 所示。

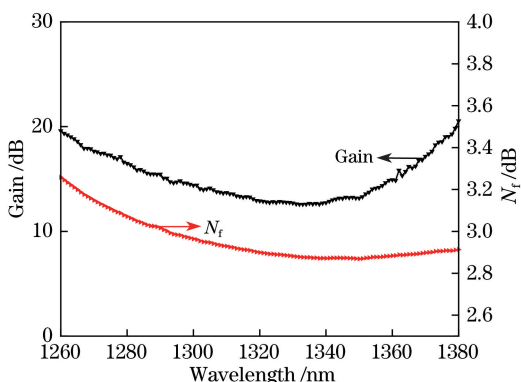


图 14 QDFA 的增益和噪声谱

Fig. 14 Gain and noise spectra of QDFA

图 15 为噪声系数随抽运功率的变化曲线图。由图 15 可知,当抽运功率较小时,噪声很大,这是抽运不充分使自发辐射增加所致。随着抽运功率的提高,自发辐射受到抑制,而受激辐射增大,噪声明显降低,并逐渐趋于一极小值。作为对比,图 15 还给出

了典型的、经优化的 EDFA<sup>[14]</sup> (具有双级 WDM 结构)的噪声系数,由此可见,尽管本研究的 QDFA 没有优化,但噪声系数仍然比经优化的 EDFAs 低。

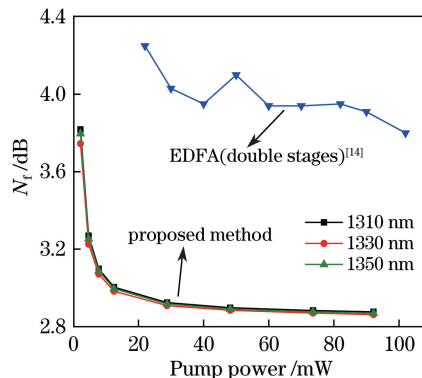


图 15 噪声系数随抽运功率变化曲线图

Fig. 15 Curves of noise figure versus pump power

表 2 给出了本研究 QDFA 与常规 EDFAs、EDFA、FMEDFAs 及 QDFA<sub>evan</sub> 的主要性能指标对比。

表 2 本研究 QDFA 和 EDFAs、EDFA、FMEDFAs、QDFA<sub>evan</sub> 主要性能指标对比

Table 2 Comparison of performance among the QDFA in this paper and EDFAs, EDFA, FMEDFAs, QDFA<sub>evan</sub>

Parameter	Working waveband /nm	Bandwidth /nm	$N_f$ /dB	$P_{th}$ /mW	$P_p$ /mW (saturated pump power)
EDFAs(conventional single fiber) <sup>[4]</sup>	C(1535-1560)	~25	3.8-4.2	~1	~100
EDFA(double-pass) <sup>[15]</sup>	C(1528-1568)	~40	~7.5	-	~120
FMEDFA <sup>[13]</sup>	C(1535-1560)	25(1535-1560)	>6	-	>338.8
QDFA <sub>evan</sub> <sup>[10]</sup>	1440-1640	~80	-	~35	~195
QDFA(this paper)	S(1260-1380)	80(1284-1364)	2.89-3.04	1.4	~73.6

从表 2 可知, QDFA 的带宽和噪声指标均优于各类 EDFAs。与 QDFA<sub>evan</sub> 相比, 本研究 QDFA 的结构简单, 抽运激励阈值低, 容易形成粒子数反转激励并形成光放大, 达到增益饱和的抽运功率较低。此外, 本研究 QDFA 的工作波段为 S 波段, 各类 EDFAs 工作波段为常规 C 波段。由(2)式可知, 量子点的吸收/辐射波长取决于量子点粒径, 而量子点的粒径密切依赖于玻璃的退火条件(温度、时间)。如果选用 G<sub>5</sub> 光纤(表 1, 退火温度为 600 °C, 退火时间为 7.5 h), 量子点的 PL 谱峰值将移动到 1550 nm, 会与常规 EDFAs 的 C 波段区重叠。在 G<sub>3</sub> 光纤的实验中保持温度不变并适当延长退火时间, 也可达到相同的效果。

图 16 给出了本研究 QDFA 以及近年来 EDFA、FMEDFA、QDFA<sub>evan</sub> 在中心波长处的增益对比, 其中 QDFA 的中心波长为 1332 nm, EDFA、FMEDFA、QDFA<sub>evan</sub> 的中心波长为 1550 nm, 阴影小方块为本研究根据增益线性反比于输入信号光功

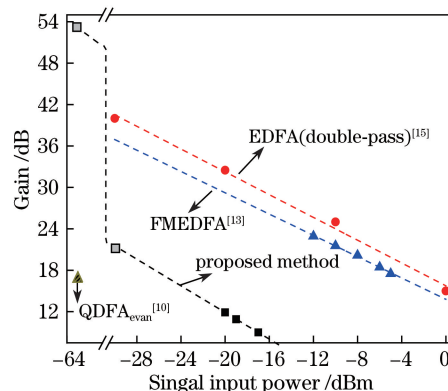


图 16 信号光增益(净增益)随信号功率变化曲线

Fig. 16 Curves of signal gain (net gain) versus signal power 外推得到的。由图 16 可知, 当输入信号光功率同为 -63 dBm 时, QDFA 的增益(53.35 dB)远高于 QDFA<sub>evan</sub> 的增益(<17 dB)。与各类 EDFAs 相比, QDFA 的增益低于 EDFAs、带宽大于 EDFAs, 其原因跟增益粒子的粒径分布有关。天然铒离子不存在粒径分布, 而人工量子点有较宽的粒径分布, 使得



QDFA 的增益被“摊平”而带宽增加。定量分析已超出本研究的范围,具体可参见文献[16]。

## 4 结 论

实验制备钠铝硼硅酸盐玻璃基底的 PbSe-QDF,实现由 973 nm 抽运激光、WDM 等构成的 PbSe-QDFA。实测表明:QDFA 在 1260~1380 nm 区间实现了信号光的放大,3 dB 带宽达 80 nm (1284~1364 nm),开关增益为 12.7~15.7 dB(净增益为 9.12~12.08 dB),噪声系数为 2.89~3.04 dB。实验观测到明显的激励阈值现象,实测抽运阈值功率为 1.4 mW(功率面密度为  $22.0 \text{ mW}\cdot\text{cm}^{-2}$ ),饱和抽运功率为 73.6 mW。与各类常规 EDFAs 相比较,本研究 QDFA 的带宽更宽、噪声更小。与倏逝波激励的锥形光纤放大器相比,本研究的 QDFA 增益更大,抽运阈值功率和饱和功率大幅降低,容易形成激射并形成光放大。本研究实现的基于钠铝硼硅酸盐玻璃的 PbSe-QDFA 为扩展光纤通信波段和工业化应用提供了一种新的途径。

## 参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] Cheng X Y, Lowe S B, Reece P J, *et al.* Colloidal silicon quantum dots: from preparation to the modification of self-assembled monolayers (SAMs) for bio-applications[J]. *Chemical Society Reviews*, 2014, 43(8): 2680-2700.
- [3] Nozik A J. Nanoscience and nanostructures for photovoltaics and solarfuels[J]. *Nano Letters*, 2010, 10(8): 2735-2741.
- [4] Cheng C, Cheng X Y. Nanophotonics and applications of quantum dots[M]. Beijing: Science Press, 2017: 53-255.  
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: 53-255.
- [5] 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.
- [6] Cheng C, Xi Z Y, Yao J H. Preparation of PbSe-quantum-dot-doped-silicate glass fiber and the fiber photoluminescence spectrum[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, 46(6): 0616001.  
程成, 席子扬, 姚建华. PbSe 量子点硅酸盐玻璃光纤的制备及光纤光致荧光光谱特性[J]. *光子学报*, 2017, 46(6): 0616001.
- [7] Bahrapour A R, Rooholamini H, Rahimi L, *et al.* An inhomogeneous theoretical model for analysis of PbSe quantum-dot-doped fiber amplifier[J]. *Optics Communications*, 2009, 282(22): 4449-4454.
- [8] Pang F F, Wang J, Zeng X L, *et al.* PbSe quantum dots for an evanescent wave excited fiber amplifier[J]. *Journal of Shanghai University (English Edition)*, 2011, 15(2): 119-122.
- [9] 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.
- [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] Allan G, Delerue C. Confinement effects in PbSe quantum wells and nanocrystals[J]. *Physical Review B*, 2004, 70(24): 245321.
- [12] Jacob J M, Raj Mohan B, Akshay Gowda K M. Insights into the optical and anti-bacterial properties of biogenic PbSe quantum rods[J]. *Journal of Saudi Chemical Society*, 2016, 20(4): 480-485.
- [13] Alam S U, Jung Y, Kang Q Y, *et al.* Current status of few mode fiber amplifiers for spatial division multiplexed transmission[J]. *Journal of Optics*, 2016, 45(3): 275-284.
- [14] Zhang K W, Zhao W, Xie X P, *et al.* Experimental research of high gain and low noise figure optical amplifier based on erbium-doped fiber[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(5): 0506003.  
张珂卫, 赵卫, 谢小平, 等. 基于掺铒光纤的高增益低噪声光放大器实验研究[J]. *光学学报*, 2013, 33(5): 0506003.
- [15] Harun S W, Abd Rahman F, Dimyati K, *et al.* An efficient gain-flattened C-band Erbium-doped fiber amplifier[J]. *Laser Physics Letters*, 2006, 3(11): 536-538.
- [16] Cheng C, Yuan F, Cheng X Y. Study of an unsaturated PbSe QD-doped fiber laser by numerical simulation and experiment[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2014, 50(11): 882-889.