

1250~1370 nm 波带 PbSe 量子点宽带光纤放大器

程 成 胡能树*

浙江工业大学光电子智能化技术研究所, 浙江 杭州 310023

摘要 实现了一种硒化铅(PbSe)量子点掺杂的光纤放大器(QDFA)。以直径为4 nm的PbSe量子点作为光纤增益介质,由量子点掺杂光纤、980 nm单模激光器、波分复用器、隔离器等组成全光传输结构,在1250~1370 nm的宽带区间实现了信号光的放大。实验表明:对于纤芯直径为50 μm 的多模量子点掺杂光纤,激励阈值为62 mW, -3 dB宽带达120 nm, -1 dB平坦带宽为90 nm,增益可达12 dB。与传统的掺铒光纤放大器相比,QDFA的带宽更宽,增益更平坦,噪声也较低。该QDFA为解决目前密集型光波复用(DWDM)系统对光纤通信放大器日益增长的带宽需求提供了一种新的途径。

关键词 光纤光学; 硒化铅量子点; 量子点掺杂光纤; 增益带宽; 激励阈值; 噪声系数

中图分类号 TN253 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201636.0406002

Broadband PbSe Quantum-Dot-Doped Fiber Amplifiers from 1250 nm to 1370 nm

Cheng Cheng Hu Nengshu

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

Abstract A PbSe quantum-dot-doped fiber amplifier (QDFA) is realized. Using PbSe quantum dots as the gain media doped in the fiber, the broadband signal light ranging from 1250 nm to 1370 nm is amplified in an all-optical framework, which consists of the quantum-dot-doped fiber, 980 nm pumping laser, wavelength division multiplexing, and isolator. For the diameter of 50 μm quantum-dot-doped fiber, there is evidence to show that the excitation threshold is 62 mW, the bandwidth is 120 nm at -3 dB, the flattened bandwidth is 90 nm at -1 dB, and the signal gain is up to 12 dB. The wide bandwidth, flattened gain, and low noise of QDFA are advantageous over the traditional erbium doped fiber amplifiers. The QDFA presented in this paper provides a new solving way of the growing demand for the bandwidth of fiber amplifiers in the current dense wavelength division multiplexing(DWDM) system.

Key words fiber optics; PbSe quantum dot; quantum-dot-doped fiber; gain bandwidth; excitation threshold; noise figure

OCIS codes 060.2290; 060.2300; 060.2330; 060.2400; 160.2290

1 引 言

在光纤通信系统中,光纤放大器是一个重要器件。目前,研究和应用最多的是掺稀土元素的光纤放大器,例如掺铒光纤放大器(EDFA)^[1]、掺铒-镱光纤放大器及增益移动的掺铒光纤放大器。但是,随着长距离、高速率和大容量的密集波分复用系统(DWDM)的商用化以及光纤到户、有线电视的大规模普及,目前,传统的EDFA等已很难满足人们对带宽日益增长的需求。

近年来半导体纳米晶体-量子点(QD)的研究发展迅速。有些量子点具备了良好的、甚至是理想的吸收

收稿日期: 2015-10-08; 收到修改稿日期: 2015-11-27

项目基金: 国家自然科学基金(61274124, 61474100)

作者简介: 程 成(1953—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事量子点光纤放大器以及激光器等方面的研究。

E-mail: chengch@zjut.edu.cn(中国光学学会会员:S042011270S)

*通信联系人。E-mail: 792770441@qq.com

谱和辐射谱,例如 IV-VI 族的 PbSe 和 PbS 量子点覆盖了 1200~2340 nm 极宽的近红外区域、II-VI 族的 CdS、CdSe 和 CdTe 量子点覆盖了 490~650 nm 可见区域^[2]。此外,在制备量子点时,可通过调控量子点的粒径来调控带隙的宽度,从而调控吸收峰和辐射峰的波长以及辐射谱的半峰全宽(FWHM)。通过不同类型的掺杂或不同量子点粒径的掺杂,还可整体移动吸收谱和辐射谱等。这些独特的特性是天然稀土元素无法达到的,因此,实现采用量子点掺杂的光纤放大器(QDFA),是一个很有前景的课题。

目前,在红外波带,人们的兴趣主要集中在以 IV-VI 族元素 PbSe、PbS 量子点(极高的量子产率^[3])作为增益介质构成的 QDFA。例如,Wise^[4]提出用 PbSe 和 PbS 量子点掺杂光纤作成光纤放大器的构想,初步描述了 QDFA 的理论模型。Qasaimeh^[5]提出了 QDFA 的理论分析模型,并做了详细的推导和计算。Jiang^[6]建立了量子点光纤放大器的二能级模型,其计算结果表明,放大器具有超宽带特点。Cheng 等^[7]提出了基于 PbSe 量子点的 QDFA 的理论预期,认为有可能实现带宽达 100~200 nm 的超宽带红外通信光纤放大器。Watekar 等^[8]观测到了 PbSe 掺杂光纤在 1021、1093、1354 nm 3 个波长处的吸收峰,在 1064 nm 抽运激励下,观测到辐射峰位于 1540 nm。Bahrapour 等^[9]建立了非均匀掺杂的 PbSe 量子点光纤放大器的计算机数值模型,并进行了数值计算。Dong 等^[10]研究了 PbS 量子点掺杂玻璃在 1.55 μm 和 1.33 μm 波长附近的宽带近红外发光及可调光放大,认为其强光放大特性可作为宽带光纤放大器和可调谐光纤激光器的增益介质。Pang 等^[11]利用熔锥型光纤耦合器作为增益光纤,在熔锥耦合区外面涂覆量子点有机溶剂,通过倏逝波传播来实现信号光的放大。

如上所述,对 PbSe、PbS 量子点掺杂的光纤放大器,目前人们主要集中在理论研究和数值模拟上,也有少量的量子点掺杂玻璃光放大的实验观测,但对光纤形态 QDFA 的实验报道很少。主要原因估计是玻璃基质的量子点光纤的可控制备较困难,尤其是产生光放大或激励,量子点的数密度必须位于合适的密度区(激励阈值以上、荧光淬灭密度以下^[12,13]),否则,其上能级短寿命的辐射跃迁将很快被俄歇弛豫、表面捕获等损耗抵消。

本文避开量子点玻璃光纤可制备的困难,采用空芯光纤灌装的方法来实现 QDFA。将 PbSe 量子点掺入到紫外固化(UV)胶中,将量子点 UV 胶灌入空芯光纤并固化。这样可以避开量子点玻璃光纤制备的困难,还有可控制所需的掺杂浓度、固化的纤芯使之性能稳定及实验容易实现等优点。需要指出:UV 胶纤芯形态的量子点光纤并不代表着今后量子点光纤的发展方向。量子点光纤的最终发展方向应当是与普通玻璃光纤技术相兼容的量子点玻璃光纤。

制备了不同长度、不同掺杂浓度的 PbSe 量子点光纤,测量了量子点以及光纤的吸收谱和辐射谱,并由此确定了合适的光纤长度和掺杂浓度。搭建了全光纤量子点光纤放大器结构。以 980 nm 激光器作抽运,在中心波长为 1310 nm、1250~1370 nm 宽带区实现了信号光的放大。实测表明:QDFA 的平坦增益、平坦带宽以及噪声等关键技术指标均优于传统的 EDFA。

2 实 验

2.1 PbSe 量子点光纤放大器的构成

PbSe 量子点的能级跃迁如图 1 所示^[2]。在抽运光的激励下,PbSe 量子点吸收抽运光能量后(吸收截面为 $\sigma_{a,3}$),从价带的顶部附近(基态)被激励到导带中较高的能级 3,如图 1 虚线所示,对应于 $^1S_c-^1P_b$ 、 $^1P_c-^1S_b$ 和 $^1P_c-^1P_b$ 吸收跃迁等。能级 3 的寿命 $\tau=1/A_{32} \approx 4 \text{ ps}$ ^[13],位于能级 3 的粒子通过带内无辐射跃迁快速布居到能级 2。在信号光的诱导下,导带中的激发态电子通过受激辐射和自发辐射跃迁,从高能级跃迁回价带,同时产生与信号光频率相同的光子,增加了信号光中的光子数,实现了对信号光的放大。由于能级 3 的寿命很短,因此,PbSe 量子点的三能级系统可用二能级来近似描述。

实验装置如图 2 所示。QDFA 由 980/1310 nm 波分复用器(WDM)、PbSe 量子点光纤(QDF)及 1310 nm 双级光隔离器(ISO)组成。其中 WDM 为单模(9 μm /125 μm ,即纤芯直径/包层直径,下同)尾纤输出,并与 QDF 在 A 点连接。QDF 为多模光纤(50 μm /125 μm ,在图 2 中以粗实线表示),纤芯本底为掺 PbSe 量子点的 UV 胶。中心波长为 1310 nm 的双级 ISO 采用单模(9 μm /125 μm)尾纤输出,隔离度大于 55 dB,使光沿正方向传播,避免反向传输产生干扰。抽运源采用带单模(9 μm /125 μm)尾纤输出的 980 nm 半导体激光器(LD),其中心波长约为 976 nm,最大输出功率为 500 mW。信号源采用 1310 nm 宽带光源(超辐射发光二极管,SLED),中心波长为

1316 nm, 3 dB 带宽为 91 nm, 最大输出功率为 10 mW。

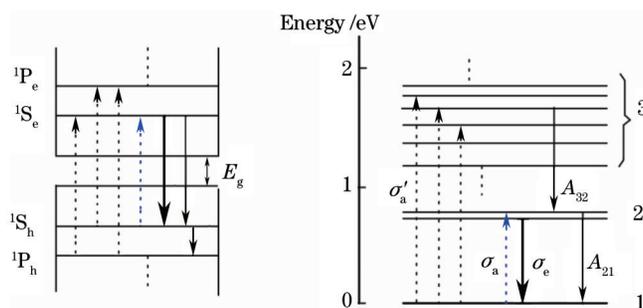


图 1 PbSe 量子点的能级示意图

Fig.1 Level diagram of PbSe QD

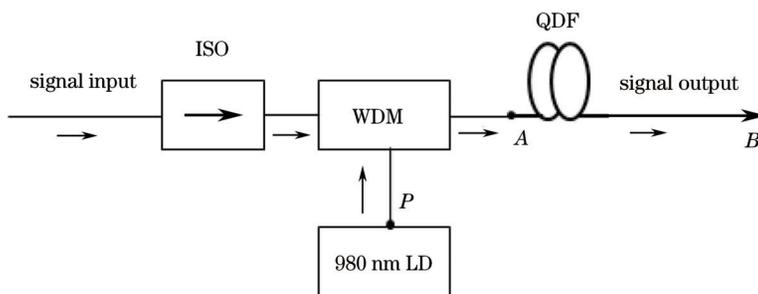


图 2 QDFA 实验装置图

Fig.2 Experimental setup of QDFA

信号光通过 ISO 后, 和 980 nm 抽运光在 WDM 中耦合, 经过光纤适配器(在点 A 处)进入 QDF 中。QDF 为增益光纤, 信号光经过 QDF 之后得到了放大, 经过 B 点输出信号光。980 nm 抽运光从 P 点传到 A 点后进入 QDF, 其测量的总损耗为 2.04 dB。后面提到的抽运功率都是指在经过 A 点之后测得的实际入纤抽运功率。

2.2 量子点光纤的制备

实验采用的 QDF 为自行设计制备。采用的 PbSe 量子点分散于正己烷中, 初始质量浓度为 25 mg/mL, 由青岛星汉纳米科技有限公司提供。采用的 UV 胶为 Norland NOA-61 型, 其固化收缩率极低, 折射率略高于光纤包层。

实验中, 先用微量移液器(法国 Gilson)取出不同体积的原 PbSe 量子正己烷溶液, 与一定量的 UV 胶同时置于 R-1020 型旋转蒸发仪中。根据沸点差异, 对其进行隔氧(持续通入氩气)蒸发。将正己烷蒸发掉的同时, 使量子点溶于 UV 胶中。接着, 在超声振荡器中振荡使其混合均匀, 配制成不同浓度的 PbSe 量子点 UV 胶溶体。为了找到量子点光纤光致荧光(PL)辐射谱的峰值强度与光纤长度和掺杂质量浓度的关系, 实验制备了 5 种不同掺杂质量浓度 $c_1, c_2, c_3 = 0.4, 0.8, 2.0, 4.0, 6.0$ mg/mL 的量子点 UV 胶体。然后, 取一定量的量子点 UV 胶体测量其近红外吸收谱和荧光发射谱。吸收谱的测量采用紫外-可见-近红外分光光度计(日本岛津, UV-3600 型, 可测范围 200~2600 nm, 扫描精度 1 nm), 荧光谱的测量采用荧光光谱仪(英国 Edinburgh Instruments, FLS980 型, 测量范围 200~5000 nm, 扫描精度 1 nm)。

采用压力差方式, 将量子点胶体灌入空心光纤(50 μm /125 μm)。然后, 用紫外灯对光纤照射处理 5~10 min, 使 UV 胶固化, 制备成不同长度、不同掺杂质量浓度的固态纤芯量子点光纤。实验表明, 这种固态纤芯的量子点光纤的光谱性能稳定, 搁置一段时间后光谱没有变化, 可适用在较宽的温度范围内, 是一种较为理想的实验室光纤。

QDF 制备好后, 对其进行荧光光谱和传光特性测量。QDF 一端作成跳线接头, 另一端用光纤切割机切平。QDF 的跳线接头端与 WDM 通过适配器连接, 信号光和抽运光经 WDM 耦合, 在图 2 中的 A 点测量入纤抽运功率, 经 QDF 后在 B 点进行光谱测量。

3 实验结果和分析

3.1 PbSe量子点光纤对抽运光的吸收

图3为实测的PbSe量子点的近红外吸收谱和PL辐射谱以及UV胶本底近红外吸收谱。如图3(a)所示,量子点的吸收峰波长 $\lambda_a = 1258$ nm,发射峰波长 $\lambda_e = 1316$ nm,两波峰间隔(斯托克斯频移)为58 nm。荧光谱的FWHM为200 nm。由于PbSe量子点是强约束量子点,因此可用修正的Brus公式^[14-15],通过吸收峰波长来估算量子点的直径。结合透射电镜(TEM)图的测量,估计的直径 $d \approx 4$ nm。

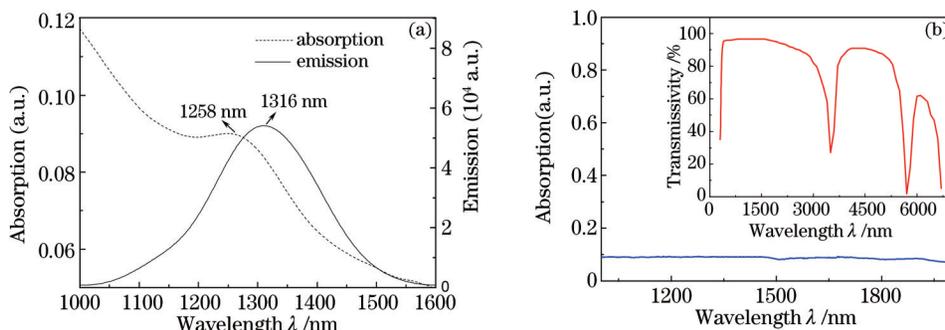


图3 (a) PbSe量子点的吸收和PL辐射谱; (b) UV胶本底的透射率及吸收谱

Fig.3 (a) Measured PL-emission and absorption spectra of PbSe QD; (b) measured transmissivity and absorption spectrum of UV-gel background

如图3(b)所示,UV胶在近红外的吸收很小,即近红外抽运光的能量几乎可全部被光纤中的PbSe量子点吸收。此外,由于UV胶的折射率略大于普通光纤包层SiO₂的折射率,透射率很高(大于95%),易于固化,操作方便,使实验容易成功。

由于PbSe量子点的尺寸极小(约为4 nm),远小于其玻尔半径^[16](46 nm),量子限域效应明显,激子出现强吸收现象,从而导致如图3所示的近红外波带的强吸收现象。正是这种在短波长区的连续强吸收,实验上给激励量子点的抽运波长的选择带来了很大的便利,例如最常用的980 nm抽运波长,这是用量子点来构成放大器的优点之一。

QDF中的光衰减主要来自于吸收和散射。由于量子点的粒径远小于入射波长,因此,量子点的散射是瑞利散射。根据瑞利散射公式^[2]可知,散射截面远小于吸收截面,因而,QDF中光强的损耗主要来自于吸收。

QDF对抽运光的吸收情况,如图4所示。在量子点掺杂质量浓度为0.4~6 mg/mL、光纤长度为1~20 cm的实验范围内,发现抽运光随光纤长度的增加呈指数衰减趋势。浓度越高,吸收越强,抽运光衰减越快。

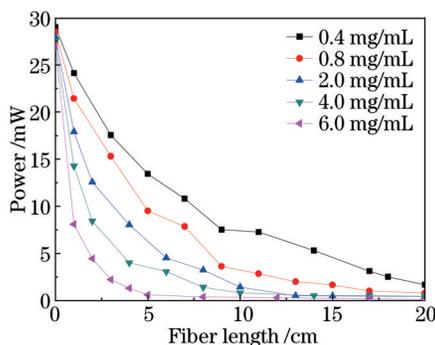


图4 抽运功率随光纤长度的变化

Fig.4 Measured pumping power as a function of fiber length

3.2 PbSe量子点光纤荧光辐射光强随光纤长度和掺杂浓度的变化

测量了不同掺杂浓度下QDF荧光辐射光强随光纤长度的变化,如图5所示。在掺杂质量浓度 $c = 0.4 \sim 6$ mg/mL、光纤长度 $L_f = 1 \sim 15$ cm的实验范围内,浓度越大,达到最大PL峰所需的光纤长度越短,两者之间存在关联。根据实验数据,发现 $\sqrt{L_f}c$ 恒等于常量。对于该规律可以这样理解:在给定的抽运光作用下,光纤中能够被激励到荧光上能级的粒子数是恒定的,而上能级粒子数直接关联于掺杂浓度,即应有

$\pi r^2 L_i c \equiv C$ (r 为纤芯半径, C 为常数)。其中 L_i 上的指数与实验规律有差别, 估计跟实验误差或其他因素有关。

当掺杂质量浓度为 4 mg/mL、光纤长度为 4 cm 时, QDF 荧光辐射光强最大。当掺杂浓度继续增大时, 荧光光强反而降低, 这主要是由“荧光猝灭”效应引起的。

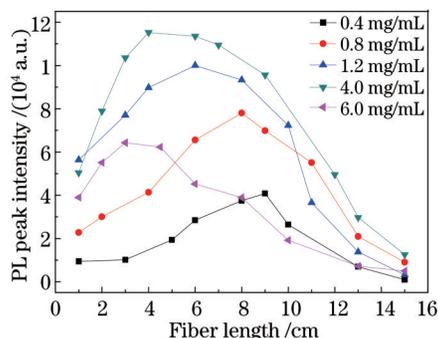


图5 不同掺杂浓度下 QDF 光致荧光 PL 辐射强度随光纤长度的变化

Fig.5 PL emission intensity of QDF as a function of the fiber length for the different doping concentrations

3.3 QDFA 放大特性分析

选量子点质量浓度为 4 mg/mL、光纤长度为 4 cm 的 QDF 接入 QDFA 中, 测量输出信号光谱和分析 QDFA 的增益特性。

以“开关增益”的方式来衡量 QDFA 的放大特性。开关增益为有抽运时的输出信号光强与无抽运时的输出信号光强的比值。由于整个光路没有发生变化, 因此, 无论光纤背景损耗和光纤连接点损耗的大小, 都不会影响测量得到的增益值。首先, 固定信号光不变, 不加抽运, 此时经过放大器后输出的信号光为图 6 中黑色曲线所示(最底下)。随后逐渐增加抽运功率, 用光谱仪测试输出信号光的强度分布, 如图 6 所示, 容易看出, 信号光在抽运激励作用下获得了放大, 且趋势是随着抽运功率的增加, 输出光强增强。

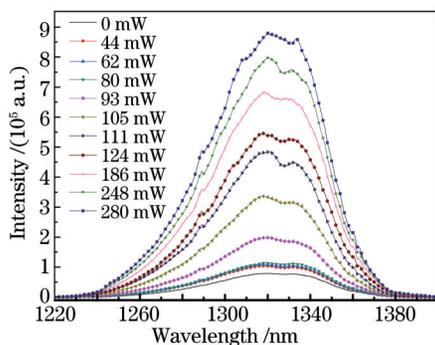


图6 不同抽运功率下 QDFA 输出信号光谱分布

Fig.6 Spectral distributions of the QDFA output signals for the different pumping powers

根据测得的输出信号光强的谱分布, 可得到 QDFA 增益随抽运功率的变化。如图 7 所示, QDFA 在 1250~1370 nm 波带区间获得了相当平坦的增益, -1 dB 平坦带宽达 90 nm。当抽运功率为 280 mW 时, 信号光

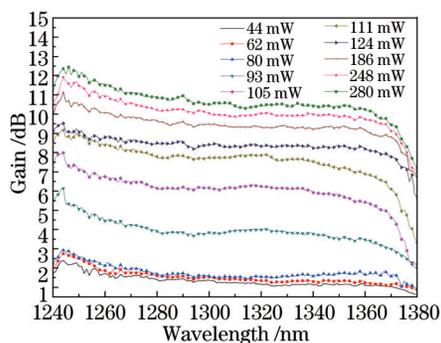


图7 QDFA 增益随抽运功率的变化曲线

Fig.7 Signal gain of QDFA as a function of pumping power

增益超过了 12 dB。

图 8 给出了 3 个不同波长 1280、1310、1340 nm 信号光增益随抽运功率的变化。当入纤抽运功率小于 44 mW 时,几乎没有增益;当抽运功率增大到 62 mW 时,增益突然变大并随抽运功率线性增加,该抽运功率可看成是阈值功率。但当抽运功率增大到 248 mW 后,增益出现饱和。这主要是由于 QDF 中的量子点含量一定,当抽运功率足够大时,价带顶部附近的电子几乎全部被激励到导带上去,受激吸收到达饱和,从而当价带中的电子返回到导带中时,能被信号光诱发的光子数也达到了饱和,即放大器趋于饱和状态。

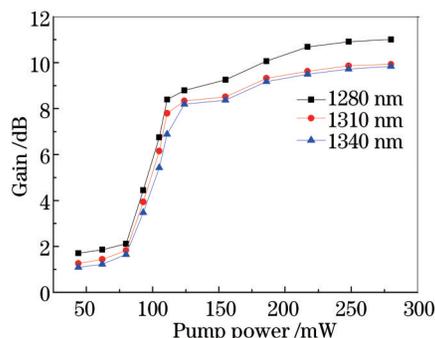


图 8 不同波长信号光增益随抽运功率的变化

Fig.8 Signal gain as a function of pumping power for different wavelengths

对于激励阈值功率,由于观测到的辐射峰为单峰,因此可采用二能级近似来估计。在二能级系统中,抽运阈值功率为^[17]

$$P_{th} = \frac{\sigma_{a,s} h \nu_p A}{\Gamma_p \tau (\sigma_{a,p} \sigma_{e,s} - \sigma_{e,p} \sigma_{a,s})}, \quad (1)$$

式中 σ 为截面面积,下角标 a 表示吸收、e 为辐射、p 为抽运、s 为信号, ν_p 为抽运频率, Γ_p 为抽运光重叠因子, τ 为上能级寿命, A 为纤芯面积, h 为普朗克常数。对于 50 μm 直径的 QDF、980 nm 抽运,由已知的 PbSe 量子点的吸收截面和辐射截面^[18]、上能级寿命^[19],抽运光的光纤重叠因子 $\Gamma_p=1.0\sim 0.1$,可得抽运阈值功率 $P_{th}\approx 7.8\sim 78$ mW,功率面密度 $p_{th}=3.9\times 10^2\sim 3.9\times 10^3$ W/cm²。实验测量的阈值功率为 62 mW,在(1)式算得的阈值范围内。

此外,还进一步测量了当量子点掺杂质量浓度为 4 mg/mL,抽运功率为 280 mW 时,信号光增益随光纤长度的变化,图 9 给出了 1280、1310、1340 nm 3 个不同波长的情形。如图 9 所示,最佳光纤长度是 4 cm,该结果与图 4 中 QDF 荧光辐射光强最大所对应的量子点浓度及光纤长度相符。

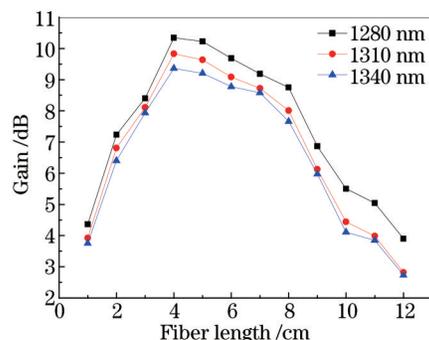


图 9 不同波长处信号光增益随光纤长度的变化

Fig.9 Signal gain as a function of fiber length for different wavelengths

噪声系数(NF)是衡量光纤放大器放大性能的一个重要指标。对于二能级系统,噪声系数可表示为^[17]

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

式中 $G_s(\lambda)$ 表示增益, $n_{sp}(\lambda)$ 为自发辐射因子,其表达式如下

$$n_{sp}(\lambda) = \frac{1}{1 - \left[\frac{\sigma_s^a(\lambda)\sigma_p^c(\lambda)}{\sigma_s^c(\lambda)\sigma_p^a(\lambda)} \right] - \left[\frac{\sigma_s^a(\lambda)P_{th}}{\sigma_s^c(\lambda)P_p} \right]} \quad (3)$$

实验中, 980 nm 抽运波长位于短波长区的远端。如图 3 所示, 抽运波长的辐射截面 $\sigma_p^c(\lambda) \approx 0$, 即(3)式分母中的第二项可略, 于是分母中只剩下第 1 和第 3 项。第 3 项代表抽运不充分时的噪声, 当抽运功率很小 ($P_p \approx P_{th}$) 时, 第 3 项使得自发辐射增大, 或者使噪声系数 NF 增大。相反, 对于强抽运, 沿光纤长度上所有的粒子都被反转, 这时第 3 项可以忽略, n_{sp} 的最小极限值为 1。

发射截面和吸收截面之间满足 Mc Cumber 关系^[2]

$$\sigma_c(v) = \frac{g_1}{g_2} \sigma_a(v) \exp\left(\frac{E_{21} - hv}{kT}\right) \approx \sigma_a(v) \exp\left(\frac{E_{21} - hv}{kT}\right), \quad (4)$$

式中 $\sigma_c(v)$ 为发射截面, $\sigma_a(v)$ 为吸收截面, g_1, g_2 为能级的统计权重, 2 个多重态之间的平均能量差 $E_{21} = hv_p = 1.266$ eV, 室温下 $kT = 0.026$ eV, 又知 $P_{th} = 62$ mW, 当 P_p 取 300 mW 时, 由(2)式得到噪声系数 $f_{NF}(\lambda) = 3.62 \sim 3.78$ dB (1240~1380 nm 波长区间), 其增益和噪声谱如图 10 所示。

典型的单光纤 EDFA 的带宽约为 25 nm, 噪声系数为 3.8~4.5 dB^[7]。显然, 与 EDFA 比较, QDFA 的带宽有明显提高, 噪声系数也比较低。

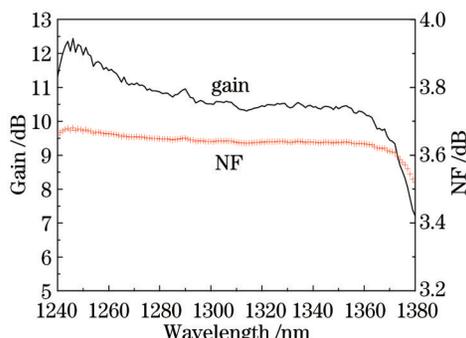


图 10 QDFA 的增益和噪声谱

Fig.10 Signal gain and noise figure of QDFA

噪声主要来自放大的自发辐射, 噪声系数跟自发辐射因子和增益有关。当 QDFA 的抽运功率远高于激励阈值时, 受激辐射明显而自发辐射受到抑制, 增益很大, 从而使得噪声下降。另一方面, 自发辐射因子 $n_{sp}(\lambda)$ 取决于辐射截面和吸收截面之比以及抽运功率阈值和抽运功率之比。对于短波长抽运, 辐射截面和吸收截面的比值比较大, 同时抽运功率也明显大于抽运功率阈值, 这样自发辐射因子 $n_{sp}(\lambda)$ 极小趋近于 1, 导致噪声系数降低。

QDFA 带宽很宽, 在 1250~1370 nm 区间达 120 nm 的原因分析: 由于量子限域效应, 电子能级由连续态分裂成分立能级。然而, 由于掺杂的量子点有不同的尺寸和一定宽度的粒径分布, 使得量子点所辐射的荧光波长分布较宽。例如, 实验中所采用的 PbSe 量子点的荧光谱的 FWHM 为 200 nm, 是传统的铟离子的荧光谱 FWHM 的 6 倍, 从而使得 QDFA 的带宽是 EDFA 的 5 倍。

由于量子点的辐射波长依赖于粒径, 因此, 如果改变 PbSe 量子点的直径, 就可以在不同的波长区获得增益, 与 EDFA 或增益位移掺铥光纤放大器的工作波长区相连接, 从而构成带宽极宽的光纤放大器, 有助于突破目前 DWDM 系统中光纤放大器对带宽的制约瓶颈。

4 结 论

以直径为 4 nm 的 PbSe 量子点作为增益介质, 制备了以 UV 胶为本底的量子点光纤。由量子点光纤、波分复用器、隔离器、980 nm 的 LD 等构建了全光纤量子点光纤放大器, 在 1250~1370 nm 的带宽区间实现了信号光放大。对于纤芯直径 50 μm 的光纤, 实验发现抽运功率阈值为 62 mW。当抽运功率超过阈值 62 mW 后, 信号光增益线性急剧增大。当抽运功率超过 248 mW 后, 增益出现饱和。当量子点掺杂质量浓度为 4 mg/mL、掺杂

光纤长度为4 cm时,可获得最大增益12 dB,-1 dB平坦带宽达90 nm(1270~1360 nm),-3 dB带宽为120 nm(1250~1370 nm)。QDFA的增益、带宽和噪声特性等与量子点掺杂浓度、光纤长度以及抽运功率有关,实验并没有对这些参量进行优化。参量优化的工作有待于今后进一步开展。实验实现的QDFA为DWDM系统中的光纤放大器提供了一种与增益移动掺铊光纤放大器在通信波段短波长区相接的、可行的、新的技术方案。

参 考 文 献

- 1 O Mahran. Performance study of macro-bending EDFA/Raman hybrid optical fiber amplifiers[J]. *Opt Commun*, 2015, 353: 158-164.
- 2 Cheng Cheng, Cheng Xiaoyu. *Nanophotonics and devices*[M]. Beijing: Science Press, 2013: 9-267.
程 成,程潇羽. 纳米光子学及器件[M]. 北京: 科学出版社, 2013: 9-267.
- 3 R D Schaller, M Sykora, J M, Pietryga, *et al.*. Seven excitons at a cost of one: Redefining the limits for conversion efficiency of photons into charge carriers[J]. *Nano Lett*, 2006, 6(3): 424-429.
- 4 F Wise. Quantum dots call the shots[C]. *SPIE*, 2002: 24-27.
- 5 O Qasaimeh. An analytical model for quantum dot semiconductor optical amplifiers[J]. *Opt Commun*, 2003, 222(1-6): 277-287.
- 6 C Jiang. Ultrabroadband gain characteristics of a quantum-dot-doped fiber amplifier[J]. *IEEE J Sel Top Quantum*, 2009, 15(1): 140-144.
- 7 Cheng Cheng, Zhang Hang. A semiconductor nanocrystal PbSe quantum dot fiber amplifier[J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, 55(8): 4139-4144.
程 成,张 航. 半导体纳米晶体PbSe量子点光纤放大器[J]. *物理学报*, 2006, 55(8): 4139-4144.
- 8 P R Watekar, S Ju, A Lin, *et al.*. Linear and nonlinear optical properties of the PbSe quantum dots doped germano-silica glass optical fiber[J]. *J Non-Crystalline Solids*, 2010, 356(44-49): 2384-2388.
- 9 A R Bahrapour, H Rooholamini, L Rahimi, *et al.*. An inhomogeneous theoretical model for analysis of PbSe quantum-dot-doped fiber amplifier[J]. *Opt Commun*, 2009, 282(22): 4449-4454.
- 10 G P Dong, B T Wu, F T Zhang, *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]. *J Alloys Compd*, 2011, 509(38): 9335-9339.
- 11 F F Pang, X L Sun, H R Guo, *et al.*. A PbS quantum dots fiber amplifier excited by evanescent wave[J]. *Opt Express*, 2010, 18(13): 14024-14030.
- 12 V I Klimov, A A Mikhailovsky, S Xu, *et al.*. Optical gain and stimulated emission in nanocrystal quantum dots[J]. *Science*, 2000, 290(5490): 314-317.
- 13 B L Wehrenberg, C Wang, P G Sionnest. Interband and intraband optical studies of PbSe colloidal quantum dots[J]. *J Phys Chem B*, 2002, 106(41): 10634-10640.
- 14 L E Brus. Electronic wave-functions in semiconductor clusters: Experiment and theory[J]. *J Phys Chem*, 1986, 90(12): 2555-2560.
- 15 G Allan, C Delerue. Confinement effects in PbSe quantum wells and nanocrystals[J]. *Phys Rev B*, 2004, 70(24): 245321.
- 16 C Cheng. A multi-quantum-dot-doped fiber amplifier with characteristics of broadband, flat gain and low noise[J]. *IEEE J of Lightwave Technol*, 2008, 26(11): 1404-1410.
- 17 P C Becker, N A Olsson, J R Simpson. *Erbium-doped fiber amplifiers: Fundamentals and technology*[M]. San Diego, CA: Academic Press, 1999: 147.
- 18 Cheng Cheng, Xu Yinhui. Near IR absorption-emission cross-sections of IV-VI group PbSe quantum dots doped in UV gel[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(9): 0916002.
程 成,徐银辉. UV胶基底中IV-VI族PbSe纳晶量子点近红外光谱的吸收截面和辐射截面[J]. *光学学报*, 2014, 34(9): 0916002.
- 19 H Du, C Chen, R Krishnan, *et al.*. Optical properties of colloidal PbSe nanocrystals[J]. *Nano Lett*, 2002, 2(11): 1321-1324.

栏目编辑: 王晓琰