

文章编号: 0258-7025(2007)03-0398-04

渐逝波耦合半导体量子点光纤放大器

王克新, 庞拂飞, 王廷云

(上海大学通信与信息工程学院, 上海 200072)

摘要 基于半导体量子点的特性, 结合光纤渐逝波耦合器, 提出了一种新型的光纤放大器, 它将以溶液形式的硫化铅(PbS)半导体量子点材料沉积于耦合器熔锥区, 信号光和抽运光通过渐逝波共同与半导体量子点材料相互作用, 实现光的放大作用。PbS 量子点材料是采用工艺容易控制的反胶束法制备的, 通过透射电镜(TEM)测量得到其粒子尺寸小于 10 nm。利用工作波长为 980 nm, 功率为 30 mW 的半导体激光器抽运光源对该光纤放大器抽运, 在 1310 nm 波段得到了大于 4 dB 的增益, 这是半导体量子点尺寸效应引起的光谱蓝移现象的体现。因此, 这种有源区短、器件结构紧凑的光纤放大器在高速、宽带光纤接入等领域具有重要的实际意义和应用价值。

关键词 光纤放大器; 半导体量子点; 光纤耦合器; 量子尺寸效应; 渐逝波

中图分类号 TN 248.1 **文献标识码** A

Evanescent Wave Coupled Semiconductor Quantum Dots Fiber Amplifier

WANG Ke-xin, PANG Fu-fei, WANG Ting-yun

(School of Communication and Information Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract Based on the characteristic of semiconductor quantum dots and evanescent wave fiber coupler, a novel fiber amplifier was proposed. This semiconductor quantum dots fiber amplifier (SQDFA) was fabricated by depositing PbS quantum dots prepared by solution route on the fused taper region. Optical amplification was realized by interaction between the signal evanescent field and pump's in the quantum dots. PbS quantum dots were synthesized by simply reverse micelle method. The size of PbS quantum dot was less than 10 nm measured by transmission electron microscope (TEM). The optical gain more than 4 dB was obtained at 1310 nm pumped by semiconductor-laser at 980 nm with 30 mW. The optical gain at 1310 nm shows the spectral blue shift resulted from quantum size effect. This compact quantum dots fiber amplifier has potential applications in high-speed broadband access network.

Key words fiber amplifier; semiconductor quantum dots; fiber coupler; quantum size effect; evanescent wave

1 引言

光纤放大器是光纤通信发展史上的一个重要里程碑, 它能够高效补偿光功率在传输中的损耗, 延长通信系统距离, 扩大用户分配网的覆盖范围, 是新一代长距离、大容量、高速率光通信系统和光纤 CATV 网、光纤到户(FTTH)、军用领域等光纤传输系统的关键部件。目前使用的放大光纤都是掺杂稀土放大光纤^[1,2], 为了更好地提高放大效率, 出现了双包层掺杂稀土光纤^[3], 而为了提高纤芯吸收抽

运光的效率就必须优化内包层的截面形状, 这样就又出现了非圆内包层掺杂稀土光纤^[4]。但是, 掺杂稀土放大光纤较长, 占空间大, 易受外界干扰、不能实现光纤的集成化, 且每种掺杂光纤的带宽有限, 非圆内包层掺杂稀土光纤, 制造工艺复杂, 不易实现。另外, 它的制造尺寸与普通光纤不一致, 不易与其他器件连接, 连接损耗大。

纳米技术是以现代科学和现代技术相结合的产物, 对电子信息技术和光通信技术有重要影响^[5], 其

收稿日期: 2006-09-06; 收到修改稿日期: 2006-11-20

基金项目: 国家自然科学基金(60477032, 60544002)和上海市重点学科建设项目(T0102)资助课题。

作者简介: 王克新(1981—), 男, 浙江人, 硕士研究生, 主要从事光纤放大器方面的研究。E-mail: cauchywang@163.com

导师简介: 王廷云(1963—), 男, 河北人, 教授, 博士生导师, 主要从事特种光纤及光电测试技术方面的研究。

E-mail: tywang@mail.shu.edu.cn

中半导体纳米材料光谱放大特性是各国相关机构的研究热点^[6~8]。半导体量子点应用于光放大具有光谱放大范围宽、带内增益高、放大波段方便可调、抽运条件低等优点。制备半导体纳米材料的方法有很多,总体上可分为物理方法和化学方法两大类。物理方法制得粒径易控的纳米粒子,但因所需设备昂贵而限制了它的广泛使用;化学方法主要有溶胶凝胶法、反胶束法、水热法和 LB 膜法等^[9,10],这些化学制备方法成本低、条件简单、易于成形,适合大量合成。

本文提出了一种新颖的基于渐逝波耦合的半导体量子点光纤放大器(SQDFA),它将 PbS 半导体纳米材料的光谱放大特性同熔锥光纤渐逝波耦合器件结合,信号光、抽运光通过渐逝波共同与半导体量子点材料相互作用,实现光的放大作用。

2 耦合式放大光纤原理

耦合式放大光纤结构如图 1 所示,它是在裸 2×2 熔锥光纤耦合器的耦合区上包覆 PbS 半导体量子点材料构成的。普通单模光纤熔融拉锥后同外界介质构成波导结构,在熔锥光纤外面有较强的渐逝波场,因此,这种结构使得波导中的传输光同外界介质具有较强的相互作用,本文就是基于这种渐逝波场同半导体量子点材料相互作用实现放大功能的,这种结构的一个重要优点就是可以将信号光和抽运光同时接入,而无需额外的波分复用耦合器件。熔锥光纤渐逝波光场在外界介质的渗入深度可以表示为^[11]

$$d = \frac{\lambda}{2\pi n_1} \frac{n_r}{|n_2|} \left[\sin^2 \theta_1 - \left(\frac{n_2}{n_1} \right)^2 \right]^{1/2},$$

式中 λ 为波长, n_1, n_2 为复折射率, n_r 为折射率。从中可以看出,对于光纤来说,光源的波长越长或包层的折射率越大(接近纤芯值),渐逝波的透入深度也就越大。

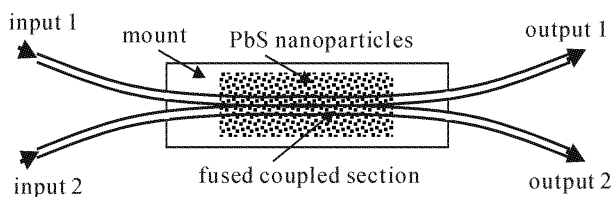


图 1 半导体量子点光纤放大器示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the SQDFA structure

半导体量子点光纤放大器的基本工作原理是,抽运光通过输入端 1 进入耦合区,通过渐逝波理论

知道一部分光能量被传到半导体放大区,当抽运光子能量大于直接带隙能量时,会发生强烈的本征吸收,入射光子使价带中的电子受激发而垂直跃迁进入导带,这样当信号光从输入端 2 进去,通过处于该状态的半导体层时获得放大效果。当半导体颗粒处于纳米级别时具有显著的量子尺寸效应,使费米能级附近的电子能级由准连续态分裂为分立能级,电子和空穴被限制在几何尺寸不大的位能阱中,使分裂的电子态量子化,自由电子在单位面积上的浓度大于非纳米级尺寸的自由电子浓度,提高受激辐射光子的概率,这将有利于改善光纤的放大性能。由于量子尺寸效应,还会增大半导体的有效禁带宽度,通过改变制备的条件,控制 PbS 颗粒的尺寸,从而控制半导体量子点光纤放大器的工作波长。

3 硫化铅半导体材料的制备

硫化铅半导体纳米材料采用反胶束的方法制备,反应物为 $\text{Na}_2\text{S} \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ 和 $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$,气溶胶 AOT($\text{C}_{20}\text{H}_{37}\text{NaO}_7\text{S}$)作为表面活性剂,正庚烷作为溶剂。实验中首先利用去离子水分别配制相同物质的量浓度(0.25 mol/L)的 Na_2S 和 $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ 溶液,并将表面活性剂和正庚烷混合,其物质的量浓度为 0.2 mol/L,然后将上述三种溶液混合,并用磁力搅拌机充分搅拌,即得到透明的红棕色反胶束微乳液。利用透射电镜(型号 JEM-200CX)对 PbS 颗粒进行了观测,如图 2 所示,可见粒子形状近似球形,大小分布较均匀,粒径小于 10 nm。

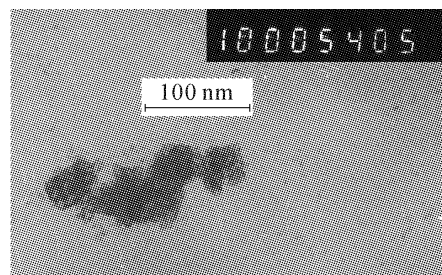


图 2 PbS 纳米粒子的透射电镜照片

Fig. 2 TEM picture of the PbS particles

4 放大特性测试

首先以 2×2 光纤耦合器为原型制作了半导体量子点光纤放大器,将裸熔锥耦合器固定在半圆形石英槽中,熔锥耦合区的长度约为 5cm,然后利用合成的 PbS 纳米材料反复涂于锥形耦合区,在锥区表面形成一定密度的半导体 PbS 纳米粒子薄膜,以增

加其同信号光和抽运光渐逝波的相互作用。利用阿贝折射仪测量得到半导体纳米材料的折射率为 1.45, 略小于熔锥石英的折射率, 形成波导结构, 符合渐逝波的传播特性。放大效果的测试采用 1310 nm 光源作为信号光, 抽运光采用 980 nm 的半导体激光器, 其功率为 30 mW, 利用光谱分析仪 (OSA, MS9701B) 观测信号光的放大光谱。测试实验装置示意图如图 3 所示。

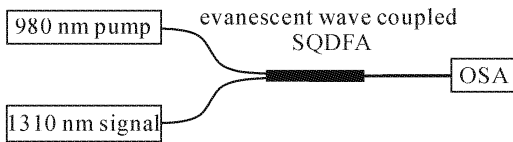


图 3 增益测试实验示意图

Fig. 3 Gain measurement setup of SQDFA

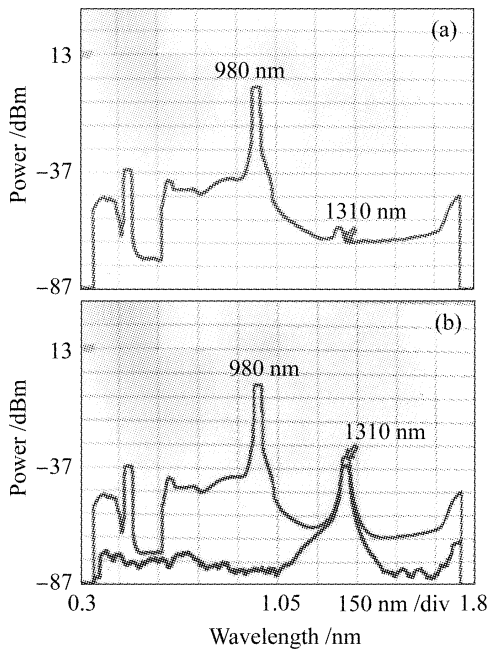


图 4 增益测试光谱图

(a) 980 nm 抽运光光谱; (b) 上曲线为 980 nm 抽运光+1310 nm 信号光的光谱, 下曲线为单独 1310 nm 信号光光谱

Fig. 4 Measured spectrum

(a) spectrum of 980 nm pump light; (b) up line is the spectrum of 980 nm pump light and 1310 nm signal light, the lower line is the spectrum of 1310 nm signal light

为了消除抽运光源在 1310 nm 波段的影响, 先断开 1310 nm 信号光, 只接上 980 nm 抽运光源, 测量得到光谱如图 4(a) 所示, 在 1310 nm 附近抽运光功率约 -67 dBm, 可以忽略其对 1310 nm 信号光放大测试结果的影响, 图中在 1290 nm 附近有个小峰, 这是 980 nm 半导体激光器本身的光谱。

在输入 980 nm 抽运光前后分别对 1310 nm 的信号光进行测量, 相减即可得到增益, 即以下两组数

据: A 为断开 (B 为接上) 980 nm 抽运光源, 接上 1310 nm 信号光源, 从光谱分析仪上获得 1310 nm 处的光功率。

图 4(b) 所示为 1310 nm 光信号在有无抽运光注入情况下的光谱, 可以看出其增益约 4 dB, 为了测量半导体纳米材料光纤耦合式放大器重复性, 对不同功率的 1310 nm 信号的增益进行了测量, 输入的抽运光功率为 30 mW, 测试数据列于表 1 中, 可以看出增益均大于 4 dB。

表 1 信号光、信号光+抽运光的输出功率

Table 1 Output power of signal light and signal light+pump light

A /dBm	B /dBm	A /dBm	B /dBm	A /dBm	B /dBm
-31.6	-26.8	-35.6	-31.6	-40.4	-35.6
-31.6	-26.8	-36.0	-31.6	-40.0	-35.2
-32.8	-26.8	-36.4	-31.6	-40.4	-35.6
-32.8	-27.2	-36.4	-31.6	-40.4	-35.6
-32.4	-27.2	-36.4	-32.0	-40.4	-35.6
-32.0	-26.8	-36.8	-32.0	-40.0	-35.2
-32.8	-26.8	-36.8	-32.0	-40.0	-35.6
-32.0	-26.8	-36.4	-32.0	-40.4	-35.6
-32.4	-27.2	-36.4	-32.0	-40.4	-35.2
-32.0	-27.2	-36.8	-32.0	-40.4	-35.6

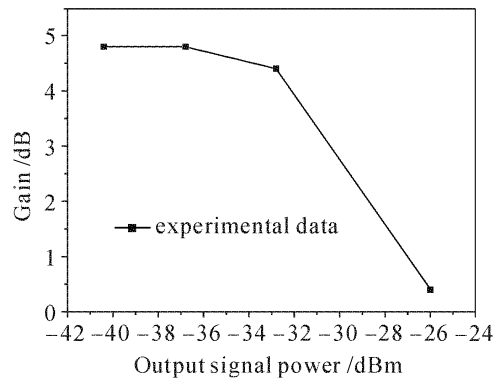


图 5 增益随输出信号功率变化

Fig. 5 Gain of SQDFA versus signal power

对半导体纳米材料耦合式放大器的饱和特性进行了测量, 如图 5 所示, 给出了在抽运功率为 30 mW 的情况下, 增益随 1310 nm 信号光输出功率的变化。由图可知, 在输出功率小于 -32 dBm 时, 增益在 4.5 dB 左右, 随着信号光输出功率增加到 -31 dBm 后增益开始下降。影响 PbS 量子点材料构成的半导体量子点光纤放大器增益和增益饱和特性的因素较多, 如量子点材料的浓度、量子点的表面修饰、熔锥波导结构以及抽运光功率等, 通过量子点的表面修饰, 以增强带边发射的效率^[12]。通过对熔

锥耦合区结构参数的控制,以提高抽运效率等,这些对于提高此放大器的增益都是至关重要的。

直接带隙半导体材料 PbS 的能带宽度为 0.39 eV,它的工作波长在 3000 nm,而上述实验数据表明其在 1310 nm 处具有光放大现象,这说明硫化铅的发光光谱发生了明显的蓝移^[13],这进一步验证了利用反胶束制备 PbS 半导体粒子在纳米量级,并表现出较强的量子尺寸效应。用同样的方法用 980 nm 的抽运光对 1550 nm 的信号光进行增益测试时没有发现放大现象,这也可以从图 4(b)的光谱输出看出,在 1550 nm 波段同图 4(a)相比基本上没有变化,这说明半导体量子点的放大波段是具有选择性的,它同样是由粒子的量子尺寸效应决定的,通过控制合成工艺中的水和表面活性剂的比例以及反应物的浓度,可以精确控制半导体量子点的尺寸,以获得 1550 nm 等其他波段的放大效果,这是今后需要进一步研究的课题。

5 结 论

利用操作简便的反胶束工艺合成了 PbS 半导体量子点材料,并同简单的 2×2 光纤熔锥耦合器相结合制备了渐逝波耦合半导体量子点光纤放大器,对其放大特性进行了测试。通过透射电镜对 PbS 粒子进行观测,其尺寸小于 10 nm,利用输出功率为 30 mW 的 980 nm 半导体激光器对半导体量子点光纤放大器进行抽运,观测到 1310 nm 波段的光放大现象,5 cm 的有源区即可实现大于 4 dB 的光增益。基于半导体量子点材料优良的放大特性和制备光纤熔锥耦合器的成熟工艺、低廉成本、紧凑的结构等优点,半导体量子点光纤放大器在今后光纤通信系统的发展中具有广阔的应用前景。

参 考 文 献

1 B. J. Ainslie. A review of the fabrication and properties of erbium-doped fibers for optical amplifiers [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1991, **9**(2):220~227

2 Xu Huabin, Chen Lin. Studies on the output characteristics of erbium-doped fiber laser [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(7):777~781
徐华斌,陈林. 掺铒光纤激光器输出特性的研究[J]. *光子学报*, 2004, **33**(7):777~781

3 Xiang Yang, Xu Zhaowen, Ning Ding *et al.*. Yb³⁺-doped multi-wavelength double clad fiber laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(4):403~406
项阳,许兆文,宁鼎等. 掺 Yb³⁺ 双包层光纤激光器的多波长输出[J]. *中国激光*, 2004, **31**(4):403~406

4 A. Liu, J. Song, K. Kamatani *et al.*. Rectangular double-clad fibre laser with two-end-bundled pump [J]. *Electron. Lett.*, 1996, **32**(18):1673~1674

5 Cheng Kaifu. The core of nano-optical communication technology: nano-optoelectronic devices [J]. *OME Information*, 2004, (1):39~47
程开富. 纳米通信技术的核心纳米光电器件[J]. *光机电信息*, 2004, (1):39~47

6 A. Martucci, J. Fick, S. LeBlanc *et al.*. Optical properties of PbS quantum dot doped sol-gel films [J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2004, **345&346**:639~642

7 B. Capoen, A. Martucci, S. Turrell *et al.*. Effects of the sol-gel solution host on the chemical and optical properties of PbS quantum dots [J]. *Journal of Molecular Structure*, 2003, **651-653**:467~473

8 V. Sukhovatkin, S. Musikhin, I. Gorelikov *et al.*. Room-temperature amplified spontaneous emission at 1300 nm in solution-processed PbS quantum-dot films [J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(2):171~173

9 Yu Jianqun, Jia Dianzeng, Zheng Yufeng. A novel preparation route to nano crystal in nickel oxide and zinc oxide [J]. *Journal of Norganic Chemistry*, 1999, **15**(1):95~98
俞建群,贾殿赠,郑毓峰. 纳米氧化镍、氧化锌的合成方法[J]. *无机化学学报*, 1999, **15**(1):95~98

10 He Yongning, Shen Xiaoliang, Ma Lidun. Synthesis and characterization of nanometer size zinc oxide [J]. *Chinese Journal of Applied Chemistry*, 1996, **13**(4):92~94
何勇宁,沈孝良,马礼敦. 纳米氧化锌的合成与表征[J]. *应用化学*, 1996, **13**(4):92~94

11 Wang Tingyun, Chen Zhenyi, Shen Yuqing. Analysis of evanescent wave transmission on single-mode optical fibers [J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2003, **14**(2):136~139
王廷云,陈振宜,沈育青. 单模光纤渐逝波传输分析[J]. *光电子·激光*, 2003, **14**(2):136~139

12 Zhang Jinzhong, Wang Zhonglin, Liu Jun *et al.*. Self-Assembled Nanostructures [M]. 1st edition. Beijing: Chemical Industry Press, 2005. 184~192
张金中,王中林,刘俊等. 自组装纳米结构[M]. 第一版. 北京:化学工业出版社,2005. 184~192

13 Zhang Lide, Mu Jimei. Nanophase Materials and Nanostructure [M]. 1st edition. Beijing: Science Press, 2001. 80~82
张立德,牟季美. 纳米材料和纳米结构[M]. 第一版. 北京:科学出版社,2001. 80~82