

熔锥光纤渐逝波光场吸附半导体量子点技术研究

商娅娜^{1,2} 石庆鹏^{1,2} 庞拂飞^{1,2*} 倪晴燕^{1,2} 陈振宜^{1,2} 王廷云^{1,2}

¹上海大学特种光纤与光接入网省部共建重点实验室,上海 200072

²上海大学通信与信息工程学院,上海 200072

摘要 基于渐逝波光场对微纳粒子具有光吸附力的效应,提出了利用熔融拉锥光纤吸附沉积半导体量子点的实验研究。以波长为980 nm的激光作为光源,在熔融拉锥光纤表面成功吸附沉积了高密度硫化铅(PbS)量子点薄膜。通过光抽运,在吸附沉积PbS量子点的熔锥光纤中观测到PbS量子点光致发光光谱,并实现了在1550 nm波段的光放大,增益达6.8 dB。

关键词 量子光学;量子点薄膜;光学吸附;锥形光纤;渐逝波光场

中图分类号 TN253 **文献标识码** A

doi: 10.3788/CJL201542.0205006

Research on the Technique of Optical Trapping Semiconductor Quantum-Dots Based on the Evanescent Field of Tapered Optical Fiber

Shang Yana^{1,2} Shi Qingpeng^{1,2} Pang Fufei^{1,2} Ni Qingyan^{1,2} Chen Zhenyi^{1,2}
Wang Tingyun^{1,2}

¹Key Lab of Specialty fiber Optics and Optical Access Networks, Shanghai University, Shanghai 200072, China

²School of Communication and Information Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China

Abstract Based on the optical trapping micro- and nano-particles effect of the evanescent field, we propose to investigate the optical trapping technique for semiconductor quantum dots by using tapered optical fiber. With the laser at 980 nm wavelength as light source, the PbS quantum dots (QDs) are absorbed and deposited on the surface of the tapered fiber successfully. By optical pumping, the photoluminescence from the tapered fiber after trapping PbS QDs is observed, and a gain of 6.8 dB is obtained at 1550 nm wavelength band.

Key words quantum optics; quantum dots thin film; optical trapping; tapered optical fiber; evanescent field

OCIS codes 060.2340; 230.2285; 060.2310

1 引言

近年来,半导体量子点在光纤技术领域的应用得到了广泛关注^[1-2],量子点由于具有量子尺寸效应、表面效应、宏观量子隧道效应,在光辐射、光学非线性等方面表现出与同种体材料不同的特性,因此,在光纤通信、光纤传感等应用领域实现了很多新型有源器件。化学合成技术是当前较为成熟的半导体量子点制备方法,然而如何将半导体量子点直接与光纤相结合,把半导体量子点的光辐射、光学非线性、光传感等优异性能移植到现有光纤系统中,一直是国内外研究人员关注的热点。尤其在量子点光纤发光及放大器件方面,利用量子点的量子尺寸效应,通过量子点合成尺寸的调控,可实现覆盖从可见光到近红外多个光通信波段(如1310 nm、1550 nm等)的宽带光源或宽带光纤放大器^[3-5]。

目前,人们主要通过两种技术路线实现半导体量子点与光纤的融合,以在光纤中实现量子点的发光及

收稿日期:2014-07-21;收到修改稿日期:2014-09-22

基金项目:国家自然科学基金(61205172,61275090,61227012)

作者简介:商娅娜(1982—),女,博士,讲师,主要从事量子点掺杂光纤放大技术方面的研究。E-mail: ynshang@shu.edu.cn

*通信联系人。E-mail: ffpang@shu.edu.cn

光放大功能,一种是通过灌注技术将半导体量子点溶液注入到空芯光纤中,如 Kawanishi 等^[6]基于光子晶体光纤的周期多孔结构,将 CdSe 量子点溶液注入其中,利用波长为 532 nm、功率为 10 mW 的 Ar 离子激光作为抽运,观测到光致发光光谱;Cheng 等^[3-4]直接将 PbSe 量子点溶液注入到空心光纤中,得到了含有量子点的液芯光纤,他们从理论上分析得出 PbSe 量子点光放大器的最大增益可达到 40 dB,最大带宽为 60 nm,并进行了量子点光纤激光特性研究;另一种是通过涂覆技术将半导体量子点涂于熔锥光纤或微结构光纤的纤芯表面,通过渐逝波激发的原理实现光与量子点的相互作用。王克新等^[7-8]分别采用单锥和耦合器两种熔融拉锥光纤器件,将 PbS 量子点掺杂溶胶凝胶涂覆于熔锥光纤表面,通过渐逝波场激发 PbS 量子点,在 1310 nm 和 1550 nm 波段均获得了超宽带光放大特性。Chillce 等^[9]采用高压喷涂技术,将量子点喷涂于微结构光纤纤芯表面,并观测到 1000~1650 nm 的辐射光谱。从这两种技术路线来看,都存在一定的不足或有待改进的方面,对于量子点液体灌注方案,存在长期使用稳定性差的问题,以及与现有光纤系统存在熔接难的问题;对于量子点涂覆技术,则需要具有低折射率的量子点涂层材料,通常半导体量子点材料的折射率都远高于石英光纤,因此,涂层中半导体量子点的掺杂浓度就受到了较大的限制,从而影响量子点性能的发 挥。

本文提出一种新颖的基于熔锥光纤渐逝波场吸附 PbS 量子点技术,用于制备半导体量子点光纤放大器。由于光对微纳粒子具有光吸附力的作用,可以利用熔锥光纤渐逝波场吸附 PbS 量子点,在熔锥光纤锥区表面形成高密度的 PbS 量子点薄膜,虽然 PbS 量子点折射率远高于石英光纤,但由于涂层厚度很薄,从光纤波导原理上来看,不会对熔锥光纤的导波结构产生较大影响,但是却增强了熔锥光纤锥区量子点密度,从而大大增强光与量子点之间的相互作用,为探索实现新型半导体量子点光纤器件提供了一个新的技术途径。

2 熔锥光纤渐逝波场吸附半导体量子点原理

基于光波与微纳粒子存在相互作用力的效应,人们已经实现了对碳纳米管、金属纳米粒子以及介质微球等微纳粒子的吸附过程^[10-12],可利用光波与粒子动量传递的力学效应形成的三维梯度势阱来吸附 PbS 量子点。

假设一束携带能量为 E 和动量为 P 的光波,当光波与量子点相互作用时,会伴随着动量的交换,即表现为光波与物质之间的相互作用力。若在作用过程中动量变化为 Δp , 历经的时间为 t ,则作用在量子点上的力 $F = \Delta p/t$ 。由于量子点 PbS 的尺寸远远小于入射波长,光散射力可以忽略,光梯度力起主要作用^[10]。可以用电场极化的模型来解释量子点受到的力。光在熔锥光纤中传输,在熔锥区将有渐逝波场渗透到光纤表面,将与周围材料发生相互作用。此时,可以将量子点看成是被极化的偶极子^[13],由于渐逝波场沿熔锥区径向存在不均匀场强,偶极子在场强强 的地方受到的力大于场强弱 的地方受到的力,即偶极子受到的合力指向场强强 的地方。因此,处于渐逝波场中的量子点所受到的力指向熔锥径向中心方向,在光场力的作用下粒子向锥区运动,最终,量子点被吸附在锥区表面,当去除熔锥光纤周围溶液后,将在熔锥光纤表面形成高密度量子点沉积薄膜。

3 熔锥光纤渐逝波场吸附量子点工艺

光场吸附半导体量子点工艺研究是基于熔融拉锥光纤渐逝波场来实现的,所吸附的量子点为具有在红外波段发光特性的 PbS 量子点。

首先,利用熔融拉锥方法制备熔锥光纤。拉锥平台示意图如图 1 所示。所拉锥的光纤为标准单模光纤(SMF-28),采用真空吸附方式将剥掉一段涂覆层的光纤固定在平台上,利用氢气燃烧作为热源,通过控制拉锥机的拉伸速度和行程,可拉制得到不同结构参数的熔锥光纤。在拉锥过程中,通过光谱仪在线实时监测光纤传输损耗变化,拉锥后光纤的插入损耗约 1.2 dB。利用光学显微镜对熔锥光纤形貌进行了观测,熔锥光纤锥区约为 2 cm,锥区直径约 10 μm 。之后,利用长为 3 cm,内径为 2 mm 的玻璃管套于熔锥区并进行固定。



图 1 熔融拉锥光纤制备工艺示意图

Fig.1 Experimental setup for fabricating tapered optical fiber

其次,利用所拉制的熔锥光纤,以 980 nm 激光器(LD)作为光源,对 PbS 量子点进行光吸附实验研究。光路如图 2 所示。吸附过程可通过熔锥光纤的光透射率参量进行监测,所用的量子点(QDs)是由美国 Evident 公司提供的 PbS 量子点,其透射电子显微镜图(TEM)如图 3 所示,PbS 量子点的尺寸在 3~7 nm 之间。PbS 量子点分散于甲苯溶液中,浓度为 0.004 g/mL,荧光峰位于 1480 nm。

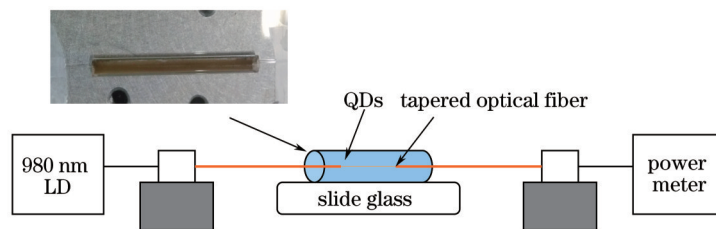


图 2 PbS 量子点吸附作用光路示意图

Fig.2 Experimental setup for trapping PbS QDs onto the tapered optical fiber

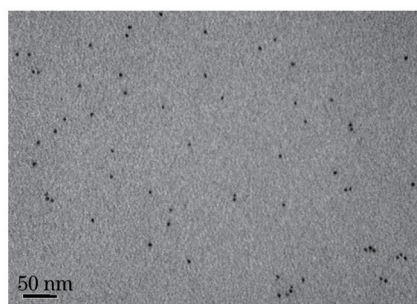


图 3 PbS 量子点 TEM 图

Fig.3 TEM picture of PbS QDs

通过两组对比实验来分析熔锥光纤渐逝波场对 PbS 量子点的吸附效应。第一组实验中,在玻璃管中注入 PbS 量子点溶液,如图 2 插图所示,接入 980 nm 激光,观测输出端光功率计示数变化。第二组实验中,注入 PbS 量子点溶液,但未接入 980 nm 激光,同样观测光功率计示数变化。在有激光接入实验中,熔锥光纤的输出光功率逐渐降低,直至一个稳定值,如图 4 所示;而在没有激光接入的测试中,经过相同的时间,输出光功率未发生变化。随后,测试了熔锥光纤吸附前后在 1550 nm 波段的传输谱,如图 5 所示,光学吸附后熔锥光纤的传输谱会降低,插入损耗增大了 2 dB 左右,而无渐逝波场作用的熔锥光纤传输谱未发生变化。上述实验结果对比表明,由于激光的注入,在熔锥光纤周围将激发出较强的渐逝波场,形成梯度光场,对周边甲苯中分散的 PbS 量子点产生吸附作用,随着吸附时间的加长,锥区表面形成了一层高密度的 PbS 量子点薄膜,由于 PbS 量子点的折射率高于熔锥光纤包层的折射率,量子点薄膜与熔锥光纤形成了新的波导结构,会有部分光从量子点薄膜泄漏,从而导致锥形光纤的损耗变大,进而导致传输光谱下降。而对于无抽运光作用的熔锥光纤,由于锥区没有吸附量子点,波导结构没有变化,所以锥形光纤的损耗不会变化,传输光谱不变。

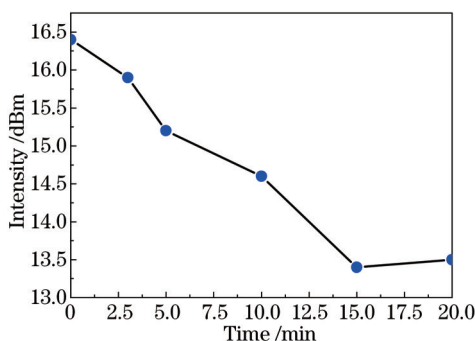


图 4 激光作用下熔锥光纤透射率的变化情况

Fig.4 Transmission change of tapered optical fiber with laser trapping

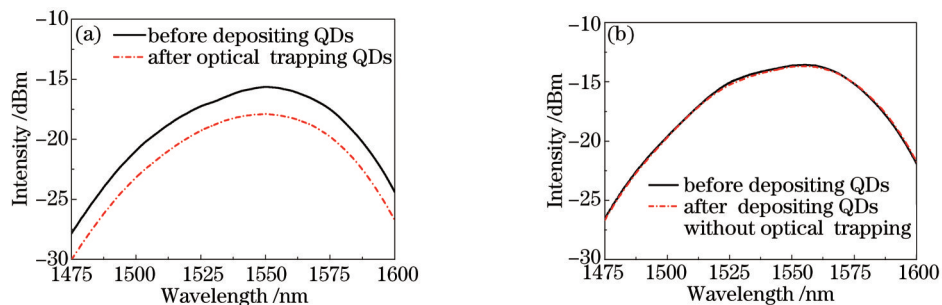


图 5 (a) 光学吸附前后锥形光纤的传输光谱; (b) 自然沉积前后锥形光纤的传输光谱

Fig.5 (a) Transmission spectrum of tapered fiber before and after optical trapping QDs; (b) transmission spectrum of tapered fiber before and after depositing QDs without optical trapping

最后,为了进一步证实熔锥光纤消逝波场对半导体量子点的吸附特性,测试了吸附PbS量子点后熔锥光纤的荧光特性。将吸附PbS量子点的熔锥光纤置于空气之中,即从PbS量子点甲苯溶液中取出,待熔锥光纤表面残留的甲苯全部挥发后,在熔锥光纤表面沉积一层PbS量子点,以980 nm激光对熔锥光纤进行抽运,利用荧光光谱仪测试了熔锥光纤的荧光光谱,如图6所示,在1480 nm处观测得到荧光峰。此外,还利用扫描电子显微镜(SEM),对熔锥区表面进行了外貌观测,如图7所示,可以看出在光纤的锥区吸附沉积了一层量子点薄膜。而对于自然沉积的熔锥光纤样品,则没有测到荧光发光和薄膜结构。

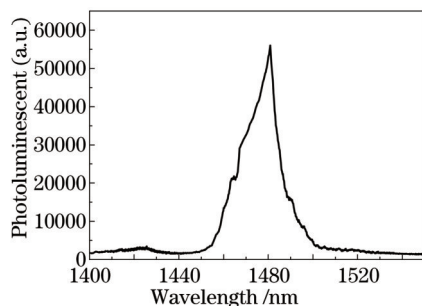


图 6 光吸附沉积PbS量子点后熔锥光纤的荧光光谱

Fig.6 Photoluminescence spectrum of tapered fiber after trapping PbS QDs

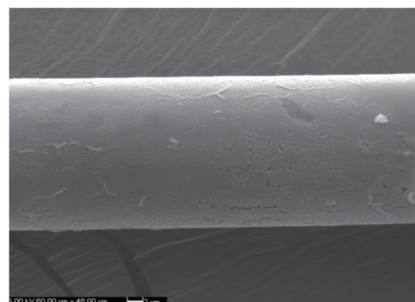


图 7 光吸附沉积PbS量子点后熔锥光纤锥区SEM形貌

Fig.7 SEM picture of tapered fiber after trapping PbS QDs

4 吸附沉积PbS量子点熔锥光纤的光放大特性

为了分析吸附沉积PbS量子点熔锥光纤的光放大功能,以波长为980 nm的激光作为抽运源,1550 nm波段的超辐射二极管作为信号源,两个光源通过980 nm/1550 nm波分复用器(WDM)进行合波并注入到吸附沉积PbS量子点熔锥光纤中,如图8插图所示。随着抽运光功率的增大,信号光得到了放大,当抽运光注入功率达90 mW时,得到了6.8 dB的信号光增益,并呈现出饱和现象,如图8所示。根据熔锥光纤消逝波激发

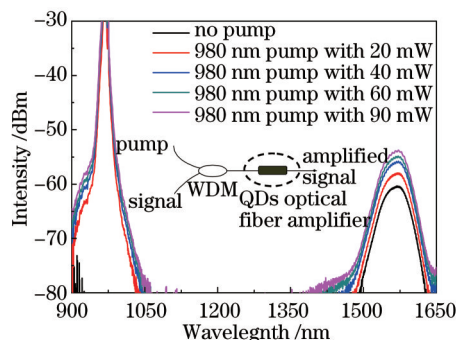


图 8 信号光随抽运光变化情况

Fig.8 Spectrum of output signal with different pump powers

半导体量子点放大器理论^[14-15],光放大特性是由渐逝波激发PbS量子点涂层,通过载流子跃迁而实现,信号光放大饱和特性,主要受PbS量子点沉积浓度、渐逝波场光强和渐逝波作用区长度所限制,可以通过制备锥腰更细、锥区更长的熔锥光纤,提升光与量子点的作用强度,进一步提升光增益效果。

5 结 论

本文基于熔融拉锥光纤渐逝波光场,实现了对PbS量子点的吸附作用,在熔锥光纤锥区获得了高密度PbS量子点薄膜涂层,虽然量子点材料对渐逝波光波存在散射及吸收作用,使得熔锥光纤的插入损耗增大,但是在锥区仍然保持导波结构。利用980 nm激光作为抽运源,在光纤中观测到PbS量子点荧光光谱,并观测到1550 nm波段的光放大特性,增益达6.8 dB。光学吸附半导体量子点实验操作简单,结构紧凑,易于控制,为量子点与光纤器件结合提供了新思路,在量子点在光纤器件应用方面具有广阔的前景。

参 考 文 献

- 1 P Jorge, M A Martins, T Trindade, *et al.*. Optical fiber sensing using quantum dots[J]. *Sensors*, 2007, 7(12): 3489-3534.
- 2 Pramod R Watekar, Seongmin Ju, Aoxiang Lin, *et al.*. Linear and nonlinear optical properties of the PbSe quantum dots doped germano-silica glass optical fiber[J]. *J Non-Crys Solids*, 2010, 356(44-49): 2384-2388.
- 3 C Cheng. A Multi quantum-dot-doped fiber amplifier with characteristics of broadband, flat gain, and low noise [J]. *J Lightwave Technol*, 2008, 26(11): 1404-1410.
- 4 Cheng Cheng, Bo Jianfeng, Yan Jinhua. Experimental observation of a PbSe nanocrystal quantum dot doped fiber laser with single/multiple modes[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(9): 0914001.
程 成, 薄建凤, 严金华. PbSe纳米晶体量子点单/多模光纤激光的实验实现[J]. *光学学报*, 2013, 33(8): 0914001.
- 5 Fufei Pang, Xiaolan Sun, Hairun Guo, *et al.*. A PbS quantum dots fiber amplifier excited by evanescent wave[J]. *Opt Express*, 2010, 18(13): 14024-14030.
- 6 S Kawanishi, M Ohmori, M Tanaka, *et al.*. Observation of photoluminescence of semiconductor nanocrystal quantum dots in the core of photonic bandgap fiber[C]. *IEEE LEOS Annual Meeting*, 2006. 831-832.
- 7 Wang Kexin, Pang Fufei, Wang Tingyun. Evanescent wave coupled semiconductor quantum dots fiber amplifier[J]. *Chinese J Lasers*, 2007, 34(3): 398-401.
王克新, 庞拂飞, 王廷云. 渐逝波耦合半导体量子点光纤放大器[J]. *中国激光*, 2007, 34(3): 398-401.
- 8 Xiaolan Sun, Libin Xie, Wei Zhou, *et al.*. Optical fiber amplifiers based on PbS/CdS QDs modified by polymers[J]. *Opt Express*, 2013, 21(7): 14024-14030.
- 9 E F Chillcce, R E Ramos-Gonzales, C M B Cordeiro, *et al.*. Luminescence of PbS quantum dots spread on the core surface of a silica microstructured optical fiber [J]. *J Non-Crys Solids*, 2010, 356(44-49): 2397-2401.
- 10 Ken Kashiwagi, Shinji Yamashita. Deposition of carbon nanotubes around microfiber via evanescent light[J]. *Opt Express*, 2009, 17(20): 18364-18370.
- 11 S E Skelton, M Sergides, R Patel, *et al.*. Evanescent wave optical trapping and transport of micro- and nanoparticles on tapered optical fibers[J]. *J Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2012, 113(18): 2512-2520.
- 12 Wang Xiaolong, Sang Mei, Zhu Pan, *et al.*. Passively Q-switched pulse fiber laser based on graphene saturable absorber[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(6): 0602015.
王晓龙, 桑 梅, 朱 攀, 等. 基于石墨烯可饱和吸收体的被动调Q光纤激光器[J]. *中国激光*, 2013, 40(6): 0602015.
- 13 G Brambilla, F Xu, P Horak, *et al.*. Optical fiber nanowires and microwires: fabrication and applications[J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2009, 1(1): 107-161.
- 14 Hairun Guo, Fufei Pang, Xianglong Zeng, *et al.*. PbS quantum dot fiber amplifier based on a tapered SMF fiber[J]. *Opt Commun*, 2012, 285(13-14): 3222-3227.
- 15 Hairun Guo, Fufei Pang, Xianglong Zeng, *et al.*. Gain characteristics of quantum dot fiber amplifier based on asymmetric tapered fiber coupler[J]. *Opt Fiber Technol*, 2013, 19(12): 143-147.

栏目编辑: 何卓铭