

文章编号: 1000-7032(2023)10-1824-09

PbS量子点掺杂聚合物宽带光纤放大器

陈道远^{1†}, 崔俊杰^{1†}, 许贝贝^{1*}, 满涛¹, 张多多²,
涂佑宇¹, 刘小峰^{2*}, 邱建荣^{1*}

(1. 浙江大学光电科学与工程学院, 极端光学技术与仪器全国重点实验室, 浙江杭州 310058;

2. 浙江大学材料科学与工程学院, 浙江杭州 310058)

摘要: 随着人工智能、大数据、云计算、物联网、移动电子等的发展, 传统的稀土离子掺杂单芯单模光纤放大器承载的光纤通信系统的传输容量已经逐渐接近香农极限, 需要发展新型材料体系, 以拓宽光纤通信系统的传输容量。相比于稀土离子, 量子点具有较宽的发光带宽、可调波长的发光特性, 且量子点的发光性质可以通过多种化学手段调控, 在量子点光放大器上显示出了宽带光放大特性, 受到学术界和产业界的广泛关注。在该背景下, 本文提出将化学合成的PbS/CdS核壳量子点与低损耗聚合物集成, 获得量子点掺杂光纤放大器, 实现近红外通信波段可调波长、宽带光放大特性。文章研究并揭示了影响固化后的聚合物纤芯连续性的因素和影响机制, 提出了降低固化胶前驱体液面附加压力、固化收缩力、聚合物前驱体与光纤内壁的摩擦力, 并提高抽真空产生的牵引力以获得连续光纤, 在此基础上获得了基于热固化聚二甲基硅氧烷(PDMS)和光固化NOA61、NOA85固化胶的纤芯连续光纤, 量子点光纤在1530~1630 nm获得了增益带宽达到100 nm以上的开关增益, 最高增益达到6.5 dB。本文的研究结果将促进量子点光纤器件和宽带光通信技术的发展。

关键词: 量子点; 聚合物光纤; 宽带光纤放大器

中图分类号: TN253

文献标识码:

DOI: 10.37188/CJL.20230140

PbS Quantum Dot Doped Polymer Broadband Optical Fiber Amplifier

CHEN Daoyuan^{1†}, CUI Junjie^{1†}, XU Beibei^{1*}, MAN Tao¹, ZHANG Duoduo²,
TU Youyu¹, LIU Xiaofeng^{2*}, QIU Jianrong^{1*}

(1. State Key Laboratory of Extreme Photonics and Instrumentation, College of Optical Science and Engineering,

Zhejiang University, Hangzhou 310058, China;

2. School of Materials Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

* Corresponding Authors, E-mail: bbxu2019@zju.edu.cn; xfliu@zju.edu.cn; qjr@zju.edu.cn

Abstract: With the development of artificial intelligence, big data, cloud computing, Internet of Things, mobile electronics, and so on, the transmission capacity of the traditional optical fiber communication system carried by the rare earth ion-doped single-core single-mode fiber amplifier has gradually approached the limit of Shannon's law. It is necessary to develop a new material system to broaden the transmission capacity of the optical fiber communication system. Compared with rare earth ions, quantum dots (QDs) have a wide luminescence bandwidth and tunable wavelength, and the luminescence properties of QDs can be modulated by a variety of chemical means. QDs-doped optical amplifier shows broadband optical gain properties, which has attracted wide attention from academia and industry. In this context, this paper proposes to integrate chemically synthesized PbS/CdS core-shell QDs with low-loss polymer to obtain QDs-doped fiber amplifier (QDFA), realize tunable wavelength and broadband optical amplification in the near-infrared (NIR) communication band. This paper studies and reveals the factors and mechanisms affecting the continuity of polymer fiber. It proposes to reduce the additional pressure related to surface tension,

收稿日期: 2023-05-30; 修订日期: 2023-06-18

基金项目: 国家重点研发计划(2020YFB1805900, 2020YFB1805902)

Supported by National Key R&D Program of China(2020YFB1805900, 2020YFB1805902)

†: 共同贡献作者

contraction force during solidifying, the friction force by the inner wall of fiber core, and improve the traction force from the pumping by vacuum pump to obtain continuous optical fiber. By optimizing these factors, we obtained continuous fiber core based on heat curing PDMS and light curing NOA61 and NOA85 UV glue. Consequently, the QD-FAs realize the highest gain of 6.5 dB, and gain bandwidth of more than 100 nm. The results of this paper will facilitate the development of quantum dot fiber optic devices and broadband optical communication technologies.

Key words: quantum dots; polymer optical fiber; broadband optical fiber amplifier

1 引 言

长距离光纤通信和数据中心的光互连对数据传输容量、密度和速率的需求与日俱增,在过去 40 年里,全球数据传输容量每隔 4 年约增长 10 倍^[1],预计到 2037 年光纤传输速率将达到 50~100 Pb/s^[2],这对现有的通信材料和技术都提出了严峻的挑战。长距离通信材料主要是光纤,长距离的光纤数据传输会给信号带来损耗,因此需要中继器把信号放大,这就用到了光纤放大器。目前的光纤放大器以稀土离子掺杂的光纤为主要材料,尤其是商用的 C+L 波段具有光放大功能的三价铒离子掺杂的光纤放大器。然而,稀土离子的发光来自内壳层 4f 电子跃迁,受到禁戒跃迁的限制,发光带宽很窄,这就限制了光纤放大器带宽的提高。目前困扰光纤放大器的重要科学和产业问题主要包括:(1)能否突破 C 波段限制,实现超宽带光纤放大?(2)能否实现 1 000 Tbit/s 超高速光通信?(3)能否突破量子噪声极限,使得噪声系数无限逼近或小于 3 dB? 因此,需要发展近红外通信波段宽带光增益材料,实现宽带光纤放大。

在所有近红外波段宽带光增益材料中,量子点具有大的吸收截面^[3]、近红外通讯波段可调波长且宽带发光、低噪声^[4]、大的斯托克斯位移以降低吸收损耗等特性^[5]。目前发展的量子点掺杂光纤包括多组分玻璃光纤^[6-7]、聚合物光纤^[8]、基于倏逝波耦合的量子点微纳光纤^[9-10]等,其中,量子点掺杂玻璃光纤的制备方法包括基于熔融法制备玻璃预制棒并拉制光纤、改进的化学气相沉积法(Modified chemical vapor deposition, MCVD)与原子层沉积法(Atomic layer deposition, ALD)制备光纤^[11]等。熔融法制备玻璃预制棒温度高,量子点原料挥发严重,光纤中量子点尺寸、空间分布非常不均匀,光纤制备重复性差^[12];而基于 MCVD 与 ALD 法的光纤制备温度高,量子点几乎完全分解,发光非常弱;基于倏逝波耦合的量子点微纳光

纤,其量子点涂覆在光纤表面,稳定性较差。

通过选择近红外波段损耗较低的聚合物,利用化学法合成核壳结构量子点,可以有效控制量子点的发光特性,获得高量子产率的量子点,跳出传统玻璃热处理析出量子点方法对量子点发光性能的限制,有望获得宽带光放大的光纤材料。在所有近红外发光的量子点中,PbS 量子点具有大的激子波尔半径、稳定性较好,且目前已经实现片上放大自发辐射^[13],最有希望实现光纤光放大。另一方面,目前使用的量子点掺杂聚合物以光固化胶为主,其价格昂贵,且大多数近红外波段损耗较低的光固化胶都是美国和日本等国家生产,特殊时期会对我国卡脖子,因此,也需要发展新型聚合物用于量子点光纤。

本文合成了波长可调的核壳结构 PbS/CdS 量子点,选用聚二甲基硅氧烷聚合物,发展了量子点掺杂聚合物光纤制备方法,提出了影响光纤纤芯连续性的机制和解决办法。所制备的光纤在 1 530~1 630 nm 获得了增益带宽达到 100 nm 以上的宽带高增益光放大性能,最高增益 6.5 dB。同时,本文也讨论了限制量子点光纤放大器光增益的因素和提高光增益的有效方案。本文的研究促进了量子点掺杂光纤激光器、放大器等光纤器件的发展,有望推动全波段宽带光放大技术的发展和宽带光通信产业发展。

2 实 验

2.1 材料

量子点制备所需材料:氯化铅(PbCl₂),硫粉(S),油酸(OA),油胺(OAm),1-十八胺(ODE),氧化镉(CdO),正己烷,甲醇,丁醇,丙酮,乙醇,四氯乙烯(TCE)。

2.2 PbS/CdS 核壳量子点制备

制备硫储备溶液:将硫粉(0.08 g)与 OAm(15 mL)混合脱气,并在氩气气氛中加热 20~40 min,直至溶解。将 PbCl₂(2.5 g, 9 mmol)溶于

OAm(7.5 mL)中,氩气气氛下加热至 110 °C,且 100 °C 以上时,开始脱气 20 min。脱气完成后,温度升至 120 °C。加入硫储备溶液(2.25 mL)并反应 2 h,反应期间取等分试样以监测生长。用正己烷淬灭反应,在得到的 PbS 量子点溶液中加入甲醇和丁醇的混合物,并进行离心;然后倒掉离心后得到的液体,将剩余的量子点溶解在正己烷中。重复上述操作两次,最后离心得到的固体量子点分散于 TCE 中保存。此外,加入适量油酸,混合并离心,将部分油胺配体置换成油酸,可以有效提升 PbS 量子点胶体溶液的稳定性。将 CdO(0.3 g, 2.3 mmol)溶于 OA(2 mL)和 ODE(10 mL)中,氩气气氛下升温至 90 °C,并持续搅拌 90 min;之后将温度升高至 260 °C,得到油酸镉储备溶液,并储存在 100 °C 的环境中。取约 2 mg 的 PbS 量子点固体溶解在干燥的 ODE(1 mL)中,升温至 100 °C,并迅速注入油酸镉溶液,反应 60~90 min,反应期间取等分试样以监测生长。随着反应进行,光谱会出

现蓝移的现象。此外,升高温度至 240 °C 或者继续加入油酸镉溶液都会促进进一步反应。上述离子交换反应得到的 PbS/CdS 核壳量子点利用丙酮和乙醇纯化三次,最终分散在 TCE 中保存。

2.3 光纤制备

将 1 mL 0.5~5 mg/mL PbS/CdS 核壳量子点的四氯乙烯溶液与 4 mL 二甲基硅氧烷室温混合,在超声波清洗机中混合,一边超声使溶液混合均匀,一边用真空泵维持三口瓶内真空环境,超声 60 min 将溶液中的四氯乙烯挥发掉;然后加入 0.4 mL 的甲基三乙氧基硅烷作为固化剂,通过超声波细胞粉碎机超声 15 min,达到分散固化剂并且预固化的效果,得到量子点掺杂的前驱体混合物。将量子点均匀掺杂的前驱体混合物通过 Rotary vane 机械泵(R-4SN, 120 W, 50 L/min, 2.5 Pa)抽到空心石英光纤中,将预固化的光纤放入真空干燥箱内,经过热固化或者光固化后即可得到均匀无气泡的量子点掺杂聚合物芯层-石英包层多模光纤。

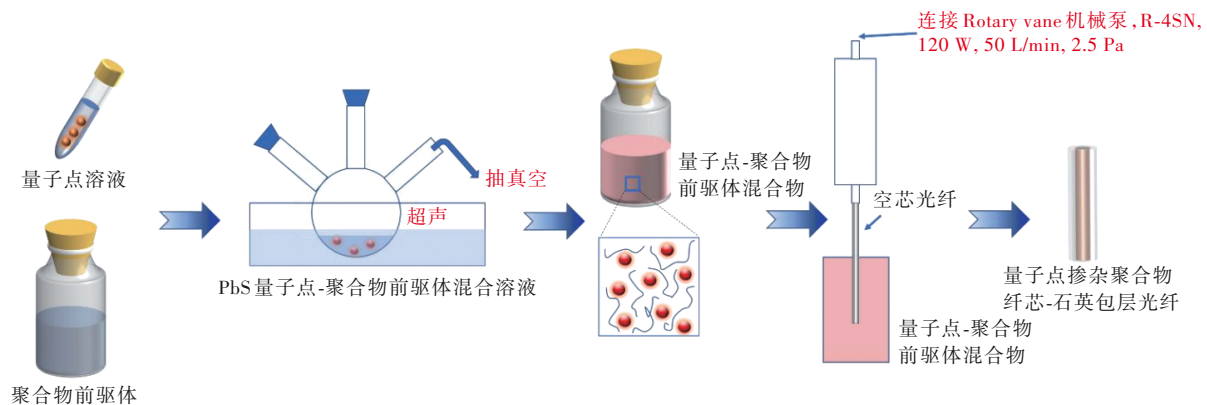


图1 PbS量子点掺杂聚合物光纤制备流程

Fig.1 Preparation of PbS QDs-doped polymer fibers

2.4 光谱和光放大特性测试

为了测试量子点掺杂聚合物光纤的发光特性,搭建了如图2所示的测试系统。信号源是一台 C+L 波段可调谐激光器(Santec TSL-550),光谱可调谐范围为 1 500 ~1 630 nm,最大输出功率为 17 dBm。种子光经过衰减器(用于稳定输入信号)后与波分复用器连接,波分复用器输入端的另一个接口与泵浦源(铭创光电,半导体光纤激光器,中心波长 976 nm,最大输出功率 500 mW)连接。种子光和泵浦光经过波分复用器后从单模石英光纤(纤芯/包层 9/125 μm)出射进入量子点光纤,为了提高量子点光纤出射端的信号收集效率,在出射端用多模石英光纤(纤芯/包层 50/125 μm)

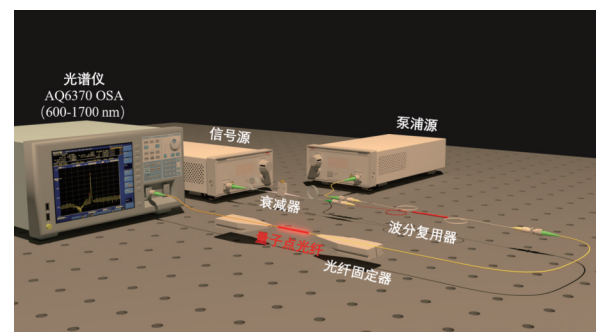


图2 量子点光纤发光光谱和光放大测试示意图

Fig.2 Schematic figure for the measurement of luminescence spectra and optical gain of QDFA

接收信号。量子点光纤和石英光纤采用裸纤耦合的方式进行连接,通过耦合平台进行端面对准。

输出光经多模光纤后进入光谱仪(Yokogawa AQ6370),光谱仪的测量范围为 600~1 700 nm。

3 结果与讨论

3.1 量子点掺杂光纤带宽及放大原理

如图 3, PbS 量子点的激子波尔半径为 20

nm, 在通讯波段的 PbS 量子点尺寸在 5 nm 左右, 因此 PbS 量子点的发光波长有很大的可调谐空间, 可以实现可见到 2 μm 以上的发光^[14]。因此, 多种不同尺寸 PbS 量子点的结合可以实现全波段可调谐发光, 有望获得超宽带光放大特性。

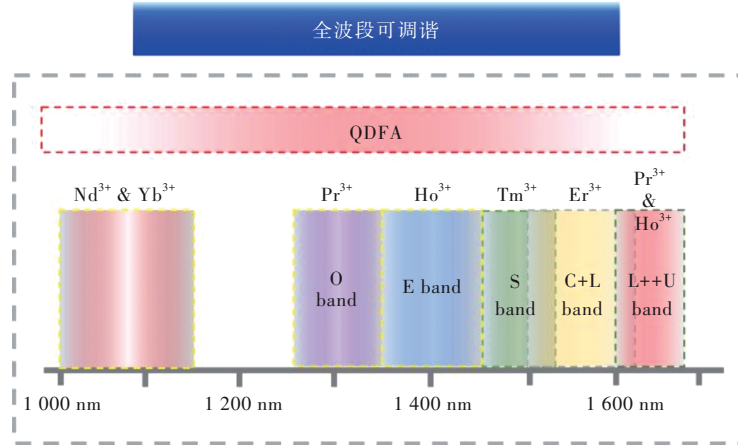


图 3 QDFA 与稀土掺杂光纤放大带宽对比

Fig.3 Comparison of gain bandwidth of QDFA and rare earth ions-doped optical fibers

图 4 说明了量子点光放大的原理^[15], 量子点是一种零维半导体材料, 除了具有块体半导体材料所具有的价带和导带, 量子局域效应还导致其能级发生分离, 产生了来自激子的 G1 和 E1 能级, 类似稀土离子的四能级结构, 有利于实现粒子数反转, 促进光增益的产生。因此量子点是一类有效的光增益材料, 在过去的量子点半导体放大器中得到了广泛关注。

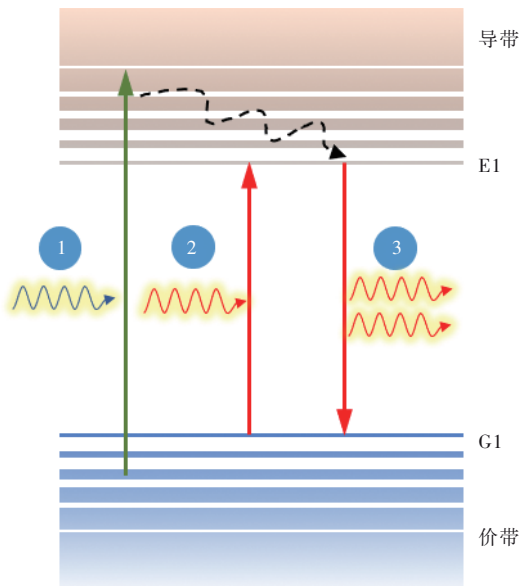


图 4 量子点光致光放大原理

Fig.4 Mechanism of optical gain of QDs

3.2 量子点掺杂光纤制备的若干问题探讨

图 5 讨论了影响聚合物光纤纤芯连续性的问题和产生机制。如图 5(a) 所示, 使用 Norland NOA61 光固化胶(UV 胶)作为纤芯聚合物, 纤芯直径 10 μm, 光纤纤芯不连续。对于未完全固化的聚合物前驱体, 其曲面半径是 r(图 5(b)), 聚合物在纤芯中主要受到的力包括液面附加压力 ΔP、固化收缩力 F_s、聚合物前驱体与光纤内壁的摩擦力 F_c, 另外, 还会受到与这三个作用力方向相反的真空泵抽真空产生的牵引力 F。当将量子点掺杂聚合物抽到光纤纤芯中固化时, 只有当牵引力 F 大于或等于反方向的作用力才能保证纤芯固化后的连续性, 否则, 聚合物前驱体就容易脱节, 导致固化后不连续。其中, ΔP = 2σ/r, σ 是聚合物前驱体弯曲液面的表面张力。因此, r 越大, ΔP 就会越小, 所以增加纤芯直径、选用表面张力小的聚合物以降低 ΔP, 降低固化速率以降低 F_s, 使用硅烷降低光纤内壁摩擦力 F_c 等方法都有望获得连续的纤芯结构。

为了防止固化时纤芯产生气泡, 进行了如下设计: (1) 采用大芯径多模光纤(纤芯/包层 18/125 μm 和 50/125 μm) 提高内径 r, 降低弯曲液面压力 ΔP; (2) 调节紫外灯的位置控制固化速率, 缓慢固化, 或者采用热固化胶缓慢固化, 从而降低聚

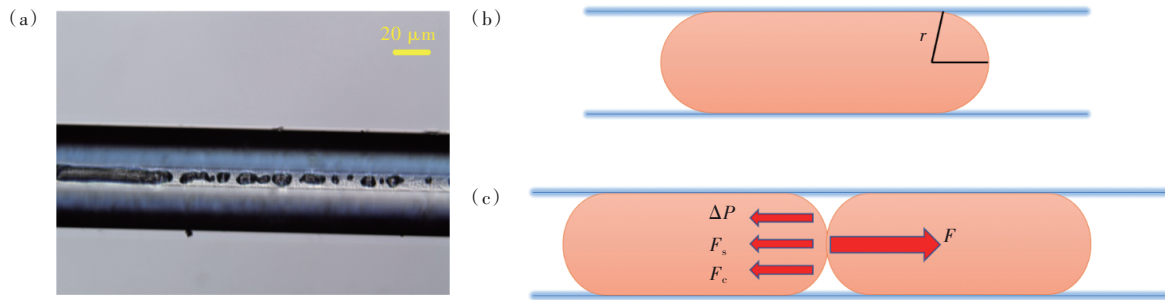


图5 影响光纤纤芯连续性的问题和产生机制。(a)Norland NOA 61光固化胶作为纤芯的聚合物光纤光学显微镜照片,纤芯直径 $9\ \mu\text{m}$,光纤纤芯不连续;(b)固化前聚合物前驱体在光纤纤芯的示意图, r 是聚合物前驱体曲面半径;(c)聚合物前驱体在纤芯中受到的作用力,液面附加压力 ΔP ,固化收缩力 F_s ,聚合物前驱体与光纤内壁的摩擦力 F_c ,真空泵抽真空产生的牵引力 F 。

Fig.5 Factors influencing the continuity of fiber core and their mechanism. (a)Optical microscope images of optical fibers with QDs-doped Norland NOA61 light curing glue as the core. (b)Schematic figure of the glue in the fiber core before solidifying, r is the surface radius of the glue liquid. (c)Force interacted on the glue liquid in fiber core before solidifying. ΔP is the force related to surface tension, F_s is the contraction force during solidifying, F_c is the friction force by the inner wall of fiber core, F is the traction from the pumping by vacuum pump.

合物固化收缩力 F_s ; (3)真空泵抽运和固化同时进行,形成反向拉伸力 F ,使得固化过程受力达到平衡。为了证实该方法的可行性,首先采用热固化的PDMS(聚二甲基硅氧烷)做纤芯,按照图1的方法制备得到如图6(a)所示未热固化的光纤,纤芯连续无气泡。将光纤分别放在空气中和真空箱中 $85\ ^\circ\text{C}$ 热固化30 min,如图6(b)、(c)所示。空气中

固化有气体进入,纤芯不连续;而真空干燥箱中缓慢加热固化,以降低固化收缩力 F_s ,并提高抽真空产生的牵引力 F ,获得了纤芯连续的多模光纤(纤芯/包层 $50/125\ \mu\text{m}$)。PDMS虽然在C波段有较高的透过率,但实验所用PDMS经过测量其折射率在 $1\ 550\ \text{nm}$ 波段约为1.41,小于石英的折射率1.44,不符合纤芯折射率的要求。



图6 热固化PDMS纤芯光纤光学显微镜照片。(a)热固化前,光纤纤芯连续无气泡;(b)空气中 $85\ ^\circ\text{C}$ 固化30 min,光纤纤芯不连续;(c)真空干燥箱中 $85\ ^\circ\text{C}$ 固化30 min。

Fig.6 Optical microscope images of thermal curing PDMS fiber core. (a)Before thermal curing, no bubbles in the fiber core. Thermal curing at $85\ ^\circ\text{C}$ for 30 min in air(b) and in vacuum oven(c).

最终采用的是紫外光固化胶(UV胶)的方法,选用的是Norland公司的NOA61和NOA85两种UV胶,具体参数见表1。采用质量分数比1%的

浓度将量子点与两种UV胶混合作为纤芯材料,如图7(a)所示,最终获得了如图7(b)所示的纤芯连续的大芯径(纤芯/包层 $50/125$)量子点掺杂聚

表1 紫外光固化胶NOA61和NOA85参数

Tab. 1 Parameters of UV curing glue NOA61 and NOA85

UV胶类型	粘度($25\ ^\circ\text{C}$)/ cps	固化后 折射率	拉伸极限/ %	弹性模量 (PSI)	抗拉强度 (PSI)	固化后耐受温度/ $^\circ\text{C}$	硬度 SHORE D
NOA 61	300	1.56	38	150 000	3 000	-150~125	85
NOA 85	200	1.46	111	9 340	1 500	-15~90	40

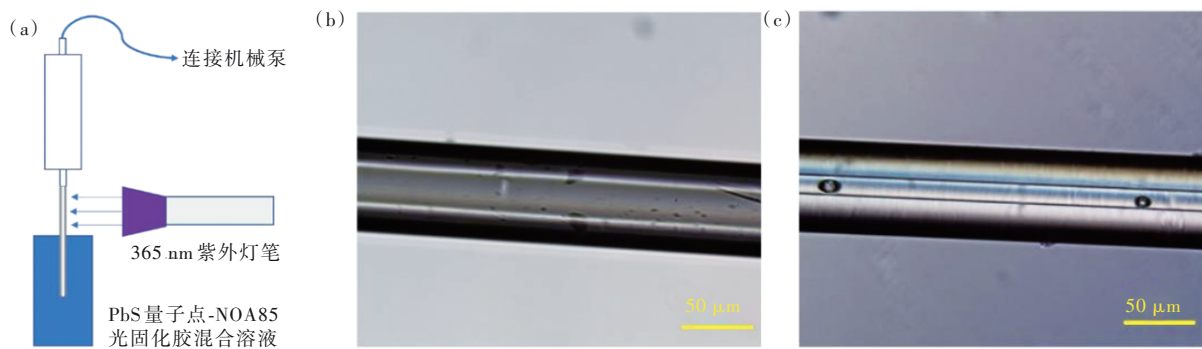


图 7 光固化 UV 胶纤芯。(a)光固化装置示意图;(b)50/125-PbS(NoA85)光纤光固化后显微照片,光纤纤芯连续无气泡;(c)18/125-PbS(NoA85)光纤光固化后显微照片,纤芯存在少量气泡;NOA61 光固化结果与此相同。

Fig.7 UV light curing of fiber core. (a)Schematic figure of the light curing instrument. (b)Optical microscope images of NOA85 light curing glue for 50/125 and 18/125 optical fiber, 50/125 fiber has no bubble, while few bubbles can be observed for 18/125 fiber(c).

合物多模光纤。当降低纤芯直径到 18 μm , 如图 7(c)所示,对于 18/125 的光纤,固化后纤芯仍然会存在少量气泡。

3.3 发光光谱和光放大特性分析

制备得到的 PbS 量子点掺杂 UV 胶光纤的发光特性如图 8 所示。PbS 量子点-正己烷混合溶液的发光中心波长为 1 500 nm,混合 NOA61 UV 胶,发光峰位没有明显变化(图 8(a));但是混合

NOA85 UV 胶时,发光峰发生红移(图 8(b)),且发光强度显著低于混合 NOA61 UV 胶的情况。这一结果是因为 NOA85 UV 胶的黏度要低于 NOA61 UV 胶,在未固化时,NOA85 UV 胶不能对量子点起到很好的限域作用,导致量子点发生团聚,引起发光峰红移,发光峰对称性下降。此外,对于同一组分的纤芯材料,大芯径光纤中量子点掺杂数量更多,发光显著强于小芯径光纤。

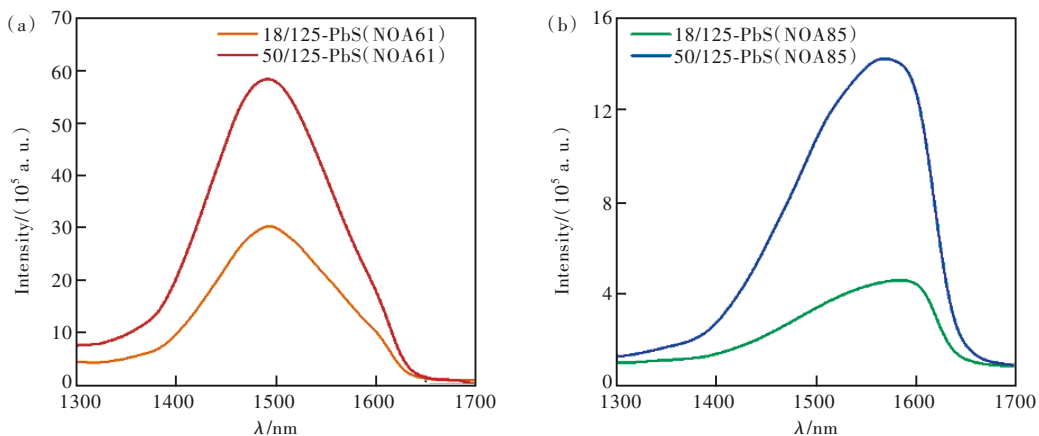


图 8 QDs 掺杂 UV 胶聚合物光纤发光光谱。(a)NOA61 UV 胶作为纤芯;(b)NOA85 UV 胶作为纤芯。

Fig.8 PL spectra of polymer fiber with QDs-doped UV curing glue. The fiber core is NOA61(a) and NOA85(b), respectively.

以上结果说明 PbS 量子点的发光特性在 NOA61 UV 胶中得到了很好的保持,这为聚合物光纤能够实现宽带光放大提供了可能。此外,从表 1 可知,NOA61 UV 胶完全固化后可承受-150~+125 $^{\circ}\text{C}$ 的温度范围,温度耐受范围比 NOA85 UV 胶宽。综上所述,我们截取一段长度为 2.5 cm 的 NOA61 UV 胶作为纤芯的聚合物光纤进行光放大特性测试。利用图 2 所示的光放大特性测试系统,测得该段光纤的插入损耗为 1.79 dB。较大的

插入损耗主要来自于 PbS 量子点较强的吸收(吸收截面是 Er^{3+} 的约 100 倍),采用裸纤耦合的方式导致光纤端面的菲涅尔反射和光纤模场不完全匹配引起的耦合损耗,以及信号在光纤中传播时光纤本身的传输损耗。后续通过改善量子点表面质量、优化耦合方式、采用损耗更低的纤芯聚合物等可进一步降低光纤的插入损耗。在可调谐信号光源和 976 nm 泵浦激光器激发下,实现了 1 530~1 630 nm 达到 100 nm 以上的宽带增益(图 9 和图

10), 开关增益随着泵浦功率增加, 在 0 dBm 信号光下, 400 mW 泵浦功率下 1 620 nm 处最高增益达到了 6.5 dB(图 9(b)和图 10(b))。

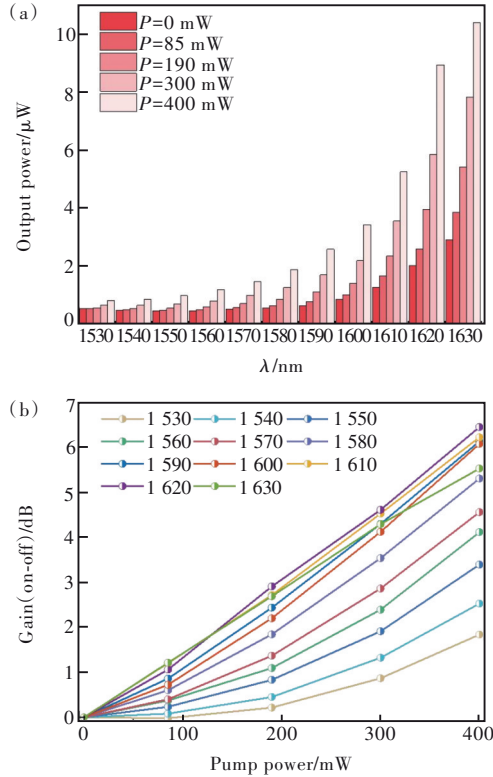


图 9 NOA61 UV 胶作为纤芯的聚合物光纤光放大特性。(a) 宽带光谱放大结果; (b) 开关增益随泵浦功率变化曲线。

Fig.9 Optical amplification spectra of polymer fiber with NOA61 as the core. (a) Broadband optical gain spectra. (b) Pump gain dependent ON/OFF gain.

虽然本文实现了量子点光纤的宽带开关增益, 但是仍然难以实现净增益。制约量子点光纤实现净增益的原因包括: (1) 量子点的价带和导带高度简并, 如 PbS 量子点的价带和导带简并度是 8^[16], 为了实现粒子数反转, 需要多于一个激子参与, 才能实现量子点光放大; (2) 多激子过程涉及到俄歇无辐射复合, 寿命在 10~250 ps^[13], 为了实现粒子数反转, 需要在低于俄歇复合时间内实现, 这就需要用飞秒或皮秒激光泵浦, 目前的光放大测试都是在连续激光泵浦条件下进行的, 为了实现净增益, 需要较高功率的超快激光泵浦, 但高功率超快激光会对量子点产生不可逆的损坏; (3) 量子点表面的缺陷态会降低量子点的荧光量子点产率, 通过制备核壳结构可以减少表面缺陷态, 但这仍然是制约着量子点光放大器增益进一步提高的关键问题; (4) 量子点长期暴露在空气中容易被氧

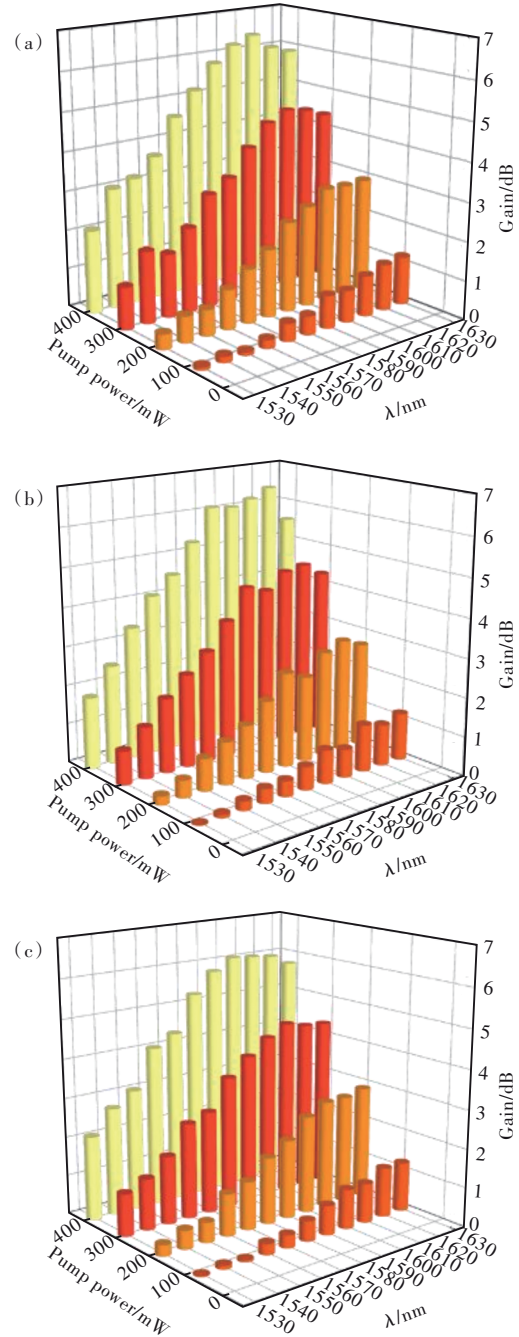


图 10 开关增益随泵浦功率变化。信号光功率分别为 -11 dBm(a), 0 dBm(b), 11 dBm(c)。

Fig.10 Pump gain dependent ON/OFF gain. The signal light power is -11 dBm(a), 0 dBm(b), and 11 dBm(c).

化, 聚合物作为基质可以对量子点形成稳定包裹, 隔绝水氧, 但聚合物本身的背景损耗仍远大于石英光纤。未来的研究将集中于提高量子点荧光量子产率, 通过对量子点掺杂引入带电激子降低其增益产生的阈值^[17]; 通过更精细的核壳结构设计减少表面缺陷态, 抑制量子点俄歇复合^[18], 以实现在较低的超快激光泵浦条件下获得大的光增益,

并优化玻璃和聚合物组分以降低光纤背景损耗。

4 结 论

本文探讨了量子点掺杂光纤获得全波段宽带光放大的可行性和产生机制,提出通过热注入法合成核壳结构 PbS/CdS 量子点,将其与聚合物混合,通过抽真空法注入空心光纤纤芯,获得量子点掺杂光纤和光纤放大器的策略。研究了影响聚合物光纤纤芯连续性的因素,提出通过提高纤芯内径以降低聚合物前驱体液面附加压力、缓慢固化以降低固化收缩力、纤芯内壁涂覆硅烷以降低聚合物前驱体与光纤内壁的摩擦力、边固化边用真

空泵抽真空提高牵引力的方法,获得了基于热固化的 PDMS 和光固化的 NOA61、NOA85 紫外光固化胶的纤芯连续的量子点掺杂光纤,并实现了 1 530~1 630 nm 带宽达到 100 nm 以上的宽带开关增益,最高增益达到 6.5 dB。本文的研究为获得基于胶体量子点的可调波长光纤激光器和宽带光纤放大器提供了可能,将推动光通信技术和产业的发展。

本文专家审稿意见及作者回复内容的下载地址:
<http://cjl.lightpublishing.cn/thesisDetails#10.37188/CJL.20230140>.

参 考 文 献:

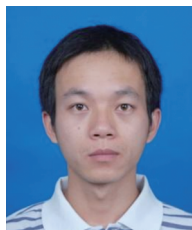
- [1] RICHARDSON D J, FINI J M, NELSON L E. Space-division multiplexing in optical fibres [J]. *Nat. Photonics*, 2013, 7(5): 354-362.
- [2] PUTTNAM B J, RADEMACHER G, LUÍS R S. Space-division multiplexing for optical fiber communications [J]. *Optica*, 2021, 8(9): 1186-1203.
- [3] CHENG C, HU N S, CHENG X Y. Experimental realization of a PbSe quantum dot doped fiber amplifier with ultra-bandwidth characteristic [J]. *Opt. Commun.*, 2017, 382: 470-476.
- [4] CHENG C, WANG F J, CHENG X Y. PbSe quantum-dot-doped broadband fiber amplifier based on sodium-aluminum-borosilicate-silicate glass [J]. *Opt. Laser Technol.*, 2020, 122: 105812-1-8.
- [5] LIU Y, KIM D, MORRIS O P, *et al.* Origins of the stokes shift in PbS quantum dots: impact of polydispersity, ligands, and defects [J]. *ACS Nano*, 2018, 12(3): 2838-2845.
- [6] HUANG X J, PENG Z X, GUO Q Y, *et al.* Energy transfer process and temperature-dependent photoluminescence of PbS quantum dot-doped glasses [J]. *J. Am. Ceram. Soc.*, 2019, 102(6): 3391-3401.
- [7] CHEN D Y, XU B B, FANG Z J, *et al.* Broadband optical amplification of PbS quantum-dot-doped glass fibers [J]. *Adv. Photonics Res.*, 2022, 3(9): 2200097-1-9.
- [8] WHITTAKER C A, PERRET A, FORTIER C W, *et al.* Light-generating CdSe/CdS colloidal quantum dot-doped plastic optical fibers [J]. *ACS Appl. Nano Mater.*, 2020, 3(7): 6478-6488.
- [9] 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]. *Opt. Quant. Electron.*, 2018, 50(4): 173-1-8.
- [10] HUANG X J, FANG Z J, PENG Z X, *et al.* Formation, element-migration and broadband luminescence in quantum dot-doped glass fibers [J]. *Opt. Express*, 2017, 25(17): 19691-19700.
- [11] ZHENG J J, DONG Y H, PAN X P, *et al.* Ultra-wideband and flat-gain optical properties of the PbS quantum dots-doped silica fiber [J]. *Opt. Express*, 2019, 27(26): 37900-37909.
- [12] FAN M D, YAN Y Y, ZHOU S, *et al.* Mesoporous silica enriched PbS quantum dots for optical fiber amplifiers [J]. *Opt. Commun.*, 2021, 499: 127310-1-6.
- [13] WHITWORTH G L, DALMASES M, TAGHIPOUR N, *et al.* Solution-processed PbS quantum dot infrared laser with room-temperature tunable emission in the optical telecommunications window [J]. *Nat. Photonics*, 2021, 15(10): 738-742.
- [14] PARK Y S, ROH J, DIROLL B T, *et al.* Colloidal quantum dot lasers [J]. *Nat. Rev. Mater.*, 2021, 6(5): 382-401.
- [15] VASILOPOULOU M, FAKHARUDDIN A, GARCÍA DE ARQUER F P, *et al.* Advances in solution-processed near-infrared light-emitting diodes [J]. *Nat. Photonics*, 2021, 15(9): 656-669.
- [16] HOU X Q, KANG J, QIN H Y, *et al.* Engineering auger recombination in colloidal quantum dots *via* dielectric screening [J]. *Nat. Commun.*, 2019, 10(1): 1750-1-11.

- [17] AVDEEV I D, NESTOKLON M O, GOUPALOV S V. Exciton fine structure in lead chalcogenide quantum dots: valley mixing and crucial role of intervalley electron-hole exchange [J]. *Nano Lett.*, 2020, 20(12): 8897-8902.
- [18] CHRISTODOULOU S, RAMIRO I, OTHONOS A, *et al.* Single-exciton gain and stimulated emission across the infrared telecom band from robust heavily doped PbS colloidal quantum dots [J]. *Nano Lett.*, 2020, 20(8): 5909-5915.



陈道远(1998-),男,贵州黔南人,博士研究生,2020年于南开大学获得学士学位,主要从事新型光放大器件的研究。

E-mail: 12230097@zju.edu.cn



刘小峰(1983-),男,江苏丹阳人,博士,副教授,博士生导师,2010年于中国科学院上海光学精密机械研究所获得博士学位,主要从事非线性光学材料与器件和光功能玻璃材料与器件的研究。

E-mail: xfliu@zju.edu.cn



崔俊杰(2000-),男,湖北武汉人,硕士研究生,2021年于北京理工大学获得学士学位,主要从事量子点光放大方向的研究。

E-mail: 22130031@zju.edu.cn



邱建荣(1964-),男,浙江宁波人,博士,教授,博士生导师,世界陶瓷科学院院士,1983年于日本冈山大学获得博士学位,主要从事新型光电功能材料与器件(特别是玻璃与微晶玻璃光纤)、强场(飞秒激光等)与材料的相互作用、纳米发光材料与器件和非线性光学材料(二维材料与拓扑绝缘体)等的研究。

E-mail: qjr@zju.edu.cn



许贝贝(1988-),男,安徽合肥人,博士,浙江大学百人计划研究员,博士生导师,2014年于浙江大学获得博士学位,主要从事光电材料基础与器件应用诸多领域(包括材料光学行为、光子电子作用、界面激子作用,在低维柔性多功能材料和器件,光通讯和量子通讯用发光材料与器件,自驱动红外辐射超材料和产品研发等)的研究。

E-mail: bbxu2019@zju.edu.cn