

引用本文: 杨南, 王德恩, 万思宇, 等. 2 μm 超宽带 PbS 量子点光纤放大器[J]. 光通信技术, 2024, 48(4): 68–72.

2 μm 超宽带 PbS 量子点光纤放大器

杨 南, 王德恩, 万思宇, 汪宸希, 孙晓岚*

(上海大学 特种光纤与光接入网重点实验室, 上海 200444)

摘要: 为了解决目前光纤放大器增益带宽较窄且结构复杂的问题, 制备了一种 2 μm 超宽带 PbS 量子点光纤放大器。首先, 通过有机金属法制备出平均直径约为 9.2 nm 的 PbS 量子点, 并采用光沉积法将其沉积在光纤锥区表面。然后, 采用泵浦光源激发涂覆在光纤锥形区域的 PbS 量子点, 使其在 2 μm 波段释放出与信号光波长一样的光子, 从而实现光信号的放大。测试结果表明, 光纤放大器在 1 900~2 100 nm 波段可获得 10.1 dB 增益, 增益带宽约为 200 nm。

关键词: 2 μm ; 有机金属法; 光沉积法; PbS 量子点; 光纤放大器

中图分类号: TN383 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2024)04-0068-05

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2024.04.013

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



2 μm ultra-broadband PbS quantum dots fiber amplifier

YANG Nan, WANG Deen, WAN Siyu, WANG Chenxi, SUN Xiaolan*

(Key Laboratory of Specialty Fiber Optics and Optical Access Networks, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

Abstract: To address the issues of narrow gain bandwidth and complex structure in current fiber amplifiers, a 2 μm ultra-wideband PbS quantum dot fiber amplifier is fabricated. Firstly, PbS quantum dots with an average diameter of approximately 9.2 nm are synthesized through the organometallic approach and deposited on the surface of the optical fiber cone region by the optical deposition method. Subsequently, the PbS quantum dots coated in the conical region of the fiber are excited by a pumping light source to emit photons with the same wavelength as the signal light in the 2 μm band, thereby achieving the amplification of the optical signal. The test results indicate that the optical fiber amplifier can attain a gain of 10.1 dB within the band of 1 900~2 100 nm, and the gain bandwidth is approximately 200 nm.

Key words: 2 μm , organometallic process, light deposition method, PbS quantum dots, fiber amplifier

0 引言

近年来,随着大数据业务的迅猛增长,带宽需求日益显著,进一步凸显了宽带量子点光纤放大器的重要性。研究人员对量子点的独特量子限域效应及其卓越的光学特性产生了浓厚的兴趣。在近红外波段,已成功合成出众多高发光性能的 IV-VI 量子点,其中包括 PbS、PbSe 和 PbTe 等体系。特别是 PbS 量子点,其激子玻尔半径约为 18 nm,带隙约为 0.41 eV,已在光电

收稿日期: 2024-04-20。

基金项目: 上海市政府国际间国际合作项目(项目编号: 19530714000)资助。

作者简介: 杨南(1996—),男,硕士研究生,本科就读于上海工程技术大学自动化(汽车电子工程中美合作)专业,现就读于上海大学信息与通信工程学院通信与信息系统专业,主要研究方向为量子点光纤放大器和二维光电材料。

* **通信作者:** 孙晓岚(1977—),女,博士,副教授,主要研究方向为光纤器件、半导体量子点。



子学^[1]、成像技术^[2]、太阳能电池^[3]及激光^[4-6]等领域得到广泛应用。

在光纤放大器领域, PbS 量子点的实用性已得到充分验证。2010 年, PANG F 等人^[7]首次提出了一种创新方法, 即将 PbS 量子点与 SiO₂ 溶胶凝胶混合制成薄膜, 并将其涂覆于光纤耦合器的锥区, 成功制备出 PbS 量子点光纤放大器, 实现了 8 dB 的增益。随后, GUO H 等人^[8]于 2012 年对该放大器进行了深入的理论分析, 预测其能在以 1 530 nm 为中心、宽度为 240 nm 的范围内实现高达 10.5 dB 的峰值增益。随着研究的深入, 研究者们不断探索新的量子点光纤放大器结构。2013 年, SUN X 等人^[9-10]提出了 PbS/CdS 核壳量子点光纤放大器, 通过在 PbS 量子点表面涂覆一层 CdS, 不仅提高了稳定性, 还改善了其性能。此外, 他们还探索了采用油酸包裹的 PbS 量子点以增强热稳定性的方法, 该放大器在常温环境下展现出了优异的稳定性。2019 年,

ZHENG J 等人^[11]通过掺杂多尺寸 PbS 量子点, 成功制备出工作波段在 1 050~1 350 nm 内、增益达到 7.1~15.0 dB 的光纤放大器。2020 年, 徐灵敏等人^[12]提出了一种基于 PbS 掺杂环形芯光纤的光放大器, 其在 C 波段的开关增益达到了 8 dB。2021 年, 范美端等人^[13]提出了一种新型光纤放大器, 该放大器将介孔 SiO_2 与 PbS 量子点相结合, 通过将 PbS 量子点封装在介孔 SiO_2 纳米粒子中, 有效提升了放大器的增益性能。2022 年, WANG W 等人^[14]将 PbS 量子点和 BaF_2 纳米晶体沉淀在同一玻璃中, 形成 2 个独立的发射中心, 近红外发射带宽超过 430 nm。2023 年, DONG Y 等人^[15]通过制备 PbS/PbSe 纳米半导体共掺石英光纤, 放大器在波长为 1 100~1 350 nm 时获得了 10.7~14.5 dB 的增益。

尽管采用上述方法制备的 PbS 量子点光纤放大器已在传统的光纤通信窗口内实现了显著的增益带宽, 但随着通信技术的快速发展, 传统窗口已难以满足不断增长的带宽需求。因此, 探索新波段量子点光纤放大器成为了光通信领域亟待解决的关键问题。波长接近 2 μm 的激光具有人眼安全性高、大气通信窗口广阔等优点, 广泛应用于激光雷达、遥感及医学等领域。相较于传统的 1 310 nm 和 1 550 nm 通信波段, 2 μm 波段具备更宽的传输带宽和低大气传输损耗的优势, 有望成为下一代光纤通信和空间激光通信的理想窗口。目前, 2 μm 稀土离子掺杂光纤放大器的研究相对成熟, 但由于稀土离子的激发峰较窄且位置固定, 导致其增益带宽受限, 并且制备过程较为复杂。因此, 本文制备了一种 2 μm 超宽带 PbS 量子点光纤放大器, 旨在应对未来通信技术的需求与挑战。

1 PbS 量子点光纤放大器的制备

本文采用改进的有机金属方法, 成功合成了大尺寸量子点, 其荧光峰位于 2 μm 波段, 半峰全宽为 200 nm。随后, 将这些量子点沉积在光纤锥区表面(锥区长 2 cm, 锥区直径为 5 μm), 进而制备出了 2 μm 超宽带 PbS 量子点光纤放大器, 其结构如图 1 所示。该

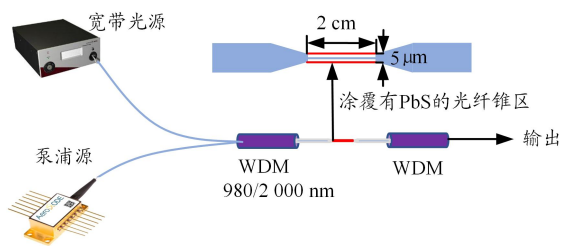


图 1 2 μm 超宽带 PbS 量子点的光纤放大器结构图

放大器分别采用宽带光源和 976 nm 激光二极管(LD)作为信号源和泵浦光源, 通过 975/2 000 nm 波分复用器(WDM), 将信号光和泵浦光同时注入锥形光纤。泵浦光源激发光纤锥形区域涂覆的 PbS 量子点, 这些量子点在 2 μm 波段释放出与信号光波长相符的光子, 实现光信号的高效放大。

1.1 PbS 量子点的制备与表征

有机金属法是合成 PbS 量子点最常用的方法。一旦热金属前体中注入了硫化物前体, 前体单体的浓度会迅速升高, 触发成核的爆发式增长, 最终形成纳米晶核。前体浓度将在这一过程中迅速下降, 直至达到成核所需的最低阈值。随后, 生长阶段开始, 此时不再有新的纳米晶核形成; 但是, 溶液中仍有大量前体存在, 这些前体会继续促使现有的纳米晶体尺寸增大。当前体浓度最终耗尽时, 纳米晶体的生长虽未停止, 但其生长方式会导致分散性增加, 这种现象被称为奥斯特瓦尔德熟化^[16]。为了确保量子点尺寸的一致性, 本文将反应时间严格控制在 100 min 以内(与生长阶段的时长相等)。量子点吸收峰随生长时间的变化如图 2 所示。可以看出, 在 30~100 min 的生长时间内, 所培养的量子点几乎呈现出相同的吸收峰。实验结果表明, 通过该方法合成的量子点的最大直径可达 7.2 nm, 且具备在 1 631 nm 处的特征吸收峰。

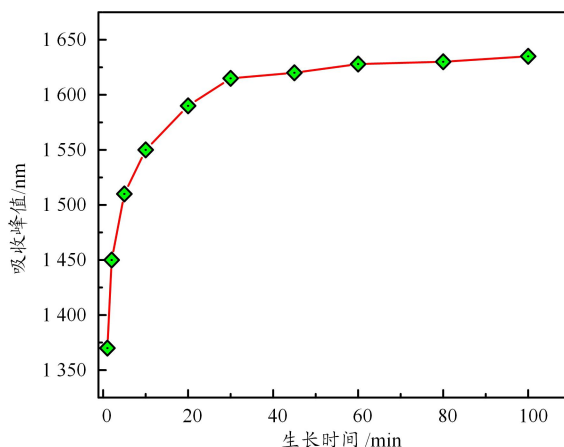


图 2 量子点吸收峰随生长时间的变化

为了获得所需的大尺寸量子点, 本文将有机金属法与多次注射方法^[17]相结合, 并对额外注射硫前驱体的次数进行调控。首先, 本文通过第一次注射硫前驱体来控制初始成核的数量。随后, 通过多次注射硫前驱体来促进量子点的生长, 具体操作过程如下: 将初始铅硫前驱体按照摩尔比 24:1 充分混合于油胺之中, 并在氮气恒定保护条件下, 将其置于 120 $^{\circ}\text{C}$ 的油浴温度中剧烈搅拌 30 min, 进而得到荧光峰位于 1 614 nm

杨南, 王德恩, 万思宇, 等: 2 μm 超宽带 PbS 量子点光纤放大器

的初始晶种。然后, 严格控制后续添加的硫前驱体浓度, 确保其始终低于成核阈值, 从而仅对 PbS 量子点的生长起促进作用, 同时避免触发新的成核过程。最终, 通过这种精细调控的方法, 成功合成了吸收峰位于 1 614~1 980 nm 内的 PbS 量子点, 得到 PbS 量子点的吸收峰与硫前体注入次数的关系如图 3 所示。然而, 当额外添加的硫前驱体次数超过 8 次时, 反应会引发奥斯特沃尔德成熟现象, 导致量子点尺寸分布变宽且吸收峰变得不明显。因此, 本文根据需求通过额外注入 6 次硫前驱体, 成功地在 1 960 nm 波长处获得了吸收峰, 并制备出了荧光峰位于 2 000 nm 波长附近 (半峰全宽为 200 nm) 且单分散性良好的 PbS 量子点, 量子点的荧光谱如图 4(a) 所示。为了进一步研究 PbS 量子点的尺寸、形貌和分散情况, 本文采用透射电子显微镜 (TEM, JEM-2010F) 对 PbS 量子点进行观测, 观测结果如图 4(b)、图 4(c) 所示。从图 4(b) 可以看出, PbS 量子点几乎呈现出单分散状态, 且粒径分布均匀, 这表明 PbS 量子点的稳定性较好。从图 4(c) 可以看出, PbS 量子点平均直径约为 9.2 nm。

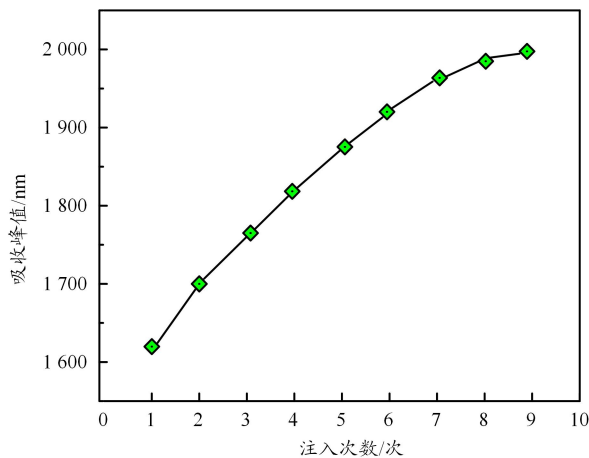


图 3 PbS 量子点的吸收峰与硫前体注入次数的关系

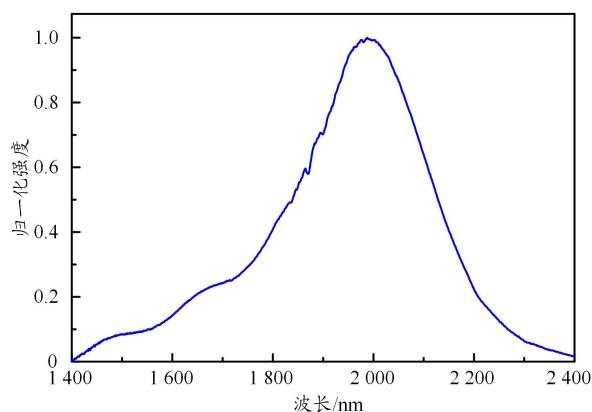
量子点的理论直径计算^[18]公式如式(1)所示。

$$E_g = 0.41 + \frac{1}{0.0392d^2 + 0.114d} = \frac{hc}{\lambda} \quad (1)$$

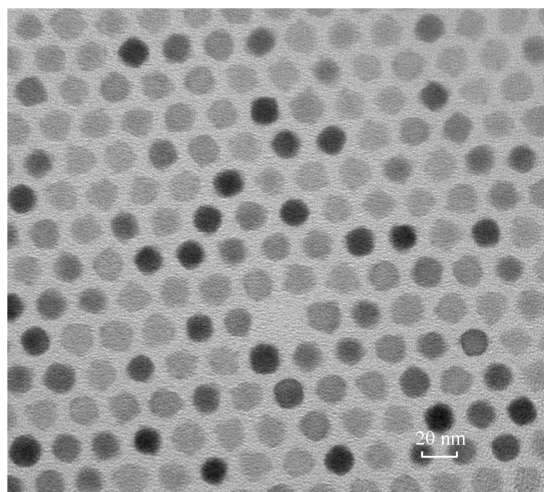
其中, E_g 为第一个吸收峰的能级, d 是量子点的直径, λ 是第一吸收峰位置的波长, c 为光速; h 为普朗克常数, $h=4.13566 \times 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s}$ 。根据吸收峰的位置, 可以粗略估计 PbS 量子点的直径大小约为 9.3 nm, 这与观测结果相近。

1.2 搭建 PbS 量子点光纤放大器

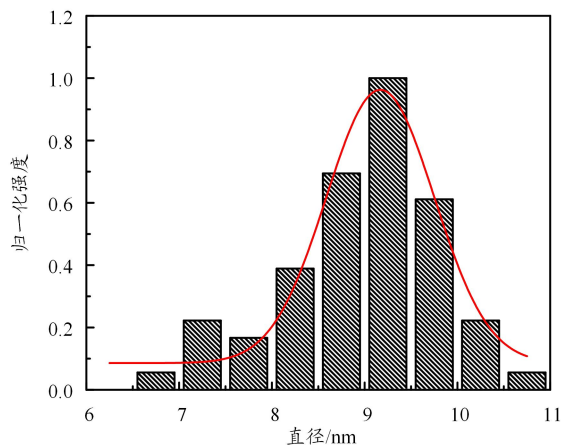
本文采用光沉积法成功将量子点沉积至光纤锥区表面。其原理为: 当激光穿过光纤锥区时, 所产生的



(a) 荧光谱



(b) TEM 图像



(c) 粒径分布直方图

图 4 PbS 量子点的特性

倏逝波光场会施加力量, 使 PbS 量子点朝光纤锥区方向移动。随后, 在范德华力的作用下, PbS 量子点牢固粘附于光纤锥形表面^[19-21]。光沉积法具体操作步骤如下: 首先, 将锥形光纤插入一个密封管中, 该管内含含有体积为 1 mL 的 PbS 量子点溶液 (浓度为 2 mg/mL)。接着, 将光纤的一端与 976 nm LD 耦合, 另一端则与光

功率计相连。随后,开启 LD 并启动光学沉积过程,设置沉积功率为 50 mW,沉积时长为 10 min。最后,为去除表面残留液体,将沉积完成的样品置于真空环境中进行干燥处理,测量结果如图 5 所示。可以看出,沉积后的样品平均损耗约为 11 dB。

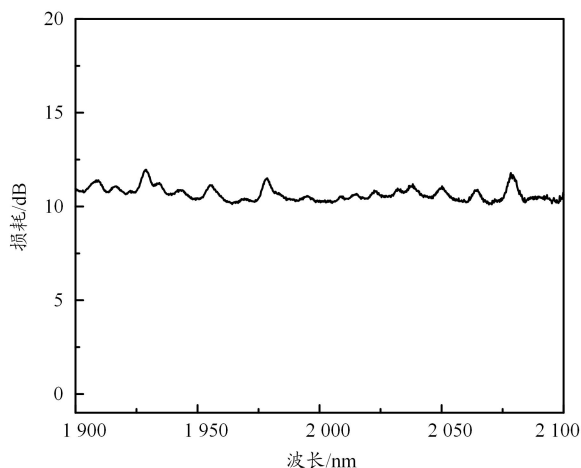


图 5 光沉积后的光纤损耗

为了验证 PbS 量子点成功沉积在光纤锥区表面,本文采用扫描电子显微镜(SEM, Hitachi Regulus8100)和能量色散光谱仪(EDS, Bruker XFlash 6)来检查和分析光纤锥形区域的表面,得到沉积 PbS 量子点后锥形光纤的 SEM 图如图 6 所示。可以看出,光纤的锥形区域被一层 PbS 量子点覆盖。

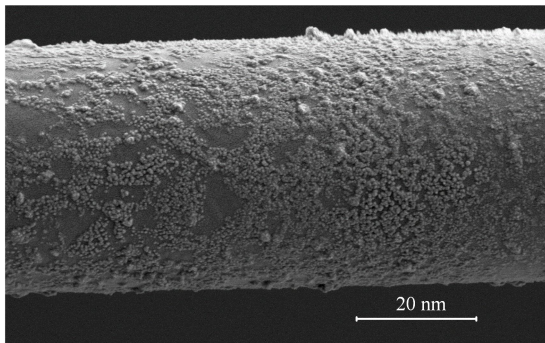
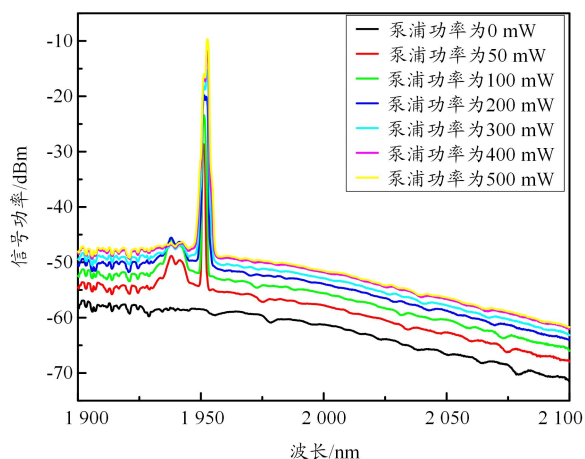


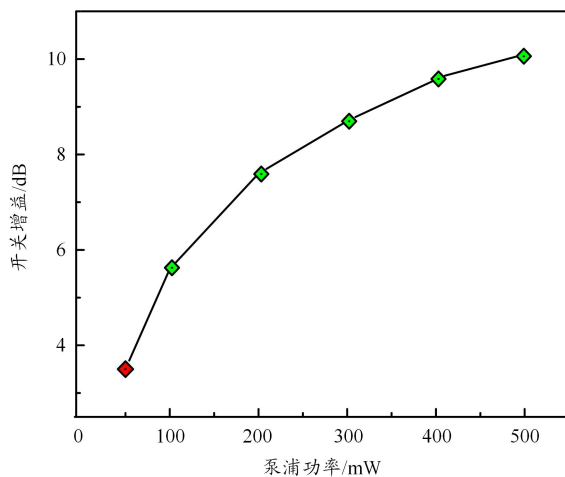
图 6 沉积 PbS 量子点后锥形光纤的 SEM 图

2 PbS 量子点光纤放大器增益特性

本文采用光谱分析仪 (OSA, Yokogawa AQ6375) 对 2 μm 超宽带 PbS 量子点光纤放大器测试装置进行检测。首先,开启并预热泵浦光源和宽带光源 10 min,待光源稳定后开始测试。接着,仅开启宽带光源,在输出端的 OSA 上记录光谱作为初始参考谱。随后,逐步增加泵浦光源的功率,并同步记录输出光谱。通过对比输出光谱与初始参考谱,本文获得了量子点光纤放大器的输出光谱和开关增益图,如图 7 所示。



(a) 输出增益谱图



(b) 开关增益图

图 7 不同泵浦功率下放大器输出增益图和开关增益图

从图 7(a)可以看出,在波长为 1900~2100 nm 内,由于泵浦光源的倍波效应,增益谱在 1952 nm 波长处呈现峰值,因此增益带宽为 200 nm。然而,在实际应用中,该效应对增益幅度和带宽的影响可以忽略不计。从图 7(b)可以看出,当泵浦功率从 50 mW 逐渐增加至 500 mW 时,量子点光纤放大器的开关增益由 3.5 dB 提升至 10.1 dB。当泵浦功率达到 500 mW 时,增益几乎达到饱和状态。

3 结束语

本文采用有机金属方法,制备出直径约为 9.2 nm 的 PbS 量子点。这些量子点在波长为 1960 nm 时展现出强烈的吸收特性,而在波长为 1900~2100 nm 内则呈现出宽频发射的特性。随后,本文利用光沉积技术巧妙地构建了基于锥形光纤的 2 μm 超宽带 PbS 量子点光纤放大器,并对其光学增益特性进行了深入研究。测试结果表明,在波长为 1900~2100 nm 时,且泵浦

杨南, 王德恩, 万思宇, 等: 2 μm 超宽带 PbS 量子点光纤放大器

功率达到 500 mW 的条件下, 该光纤放大器的最大开关增益可达 10.1 dB, 增益带宽为 200 nm。由于量子点光纤放大器具备可调谐的增益波长范围及易于制造的全光纤结构优势, 它在宽带和高速光纤通信领域展现出了广阔的潜在应用前景。

参考文献:

- [1] YIN X, ZHANG C, GUO Y, et al. PbS QD-based photodetectors: future-oriented near-infrared detection technology[J]. Journal of Materials Chemistry, 2021, 9(2): 417–438.
- [2] SHI X, CHEN S, LUO M, et al. Zn-doping enhances the photoluminescence and stability of PbS quantum dots for in vivo high-resolution imaging in the NIR-II window[J]. Nano Research, 2020, 13(8): 2239–2245.
- [3] VINOTH PANDI D, SARASWATHI, VENKATRAMAN M R, et al. PbS quantum dots-sensitized ZnO nanorods-based third generation solar cells[J]. Materials Today Chemistry, 2023, 29: 101444-1–101444-6.
- [4] YANG S, LI F, GONG M, et al. Generation of Q-switched and mode-locked pulses based on PbS/CdS saturable absorbers in an Er-doped fiber laser[J]. Journal of Materials Chemistry C, 2023, 10(15): 5956–5961.
- [5] LIU X, LI X, TANG Y, et al. PbS nanoparticles saturable absorber for ultrafast pulse generation in 2- μm fiber laser[J]. Optics Letters, 2020, 45(1): 161–164.
- [6] 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]. Nature photonics, 2021, 15(10): 738–742.
- [7] PANG F, SUN X, GUO H, et al. A PbS quantum dots fiber amplifier excited by evanescent wave[J]. Optics Express, 2010, 18(13): 14024–14030.
- [8] GUO H, PANG F, ZENG X, et al. PbS quantum dot fiber amplifier based on a tapered SMF fiber[J]. Optics Communications, 2012, 285(13-14): 3222–3227.
- [9] SUN X, CHEN J, DAI R, et al. Optical fiber amplifiers based on PbS/CdS QDs modified by polymers[J]. Optics Express, 2013, 21(7): 8214–8219.
- [10] SUN X, DAI R, CHEN J, et al. Enhanced thermal stability of oleic-acid-capped PbS quantum dot optical fiber amplifier[J]. Optics Express, 2014, 22(1): 519–524.
- [11] ZHENG J, DONG Y, PAN X, et al. Ultra-wideband and flat-gain optical properties of the PbS quantum dots-doped silica fiber [J]. Optics Express, 2019, 27(26): 37900–37909.
- [12] 徐灵敏, 商娅娜, 陈振宜. 基于 PbS 掺杂环形芯光纤的光放大器[J]. 光通信技术, 2020, 44(11): 35–38.
- [13] 范美端, 严钰杨, 周爽, 等. 基于介孔二氧化硅和硫化铅量子点结合的光纤放大器[J]. 光通信技术, 2021, 45(11): 59–62.
- [14] WANG W, CHEN Q, ZHAO Y, et al. PbS quantum dots and $\text{BaF}_2\text{:Tm}^{3+}$ nanocrystals co-doped glass for ultra-broadband near-infrared emission[J]. Chinese Optics Letters, 2022, 20(2): 21603-1–21603-6.
- [15] DONG Y, ZHANG M, ZHANG H, et al. Enhanced fluorescence and gain characteristics of PbS doped silica fiber with PbSe nano-semiconductor co-doping[J]. Optical Fiber Technology, 2023, 80: 103370-1–103370-8.
- [16] WEIDMAN M C, BECK M E, HOFFMAN R S, et al. Monodisperse, air-stable PbS nanocrystals via precursor stoichiometry control [J]. ACS NANO, 2014, 8(6): 6363–6371.
- [17] LEE J W, KIM D Y, BAEK S, et al. Inorganic UV-visible-SWIR broad-band photodetector based on monodisperse PbS nanocrystals [J]. Small, 2016, 12(10): 1328–1333.
- [18] DONG Y, SUN W, HUANG C, et al. Influence of particle size on the magneto-refractive effect in PbS quantum dots-doped liquid core fiber[J]. Optical Materials Express, 2022, 12(5): 1838-1–1838-12.
- [19] LUO Z C, LIU M, LIU H, et al. 2 GHz passively harmonic mode-locked fiber laser by a microfiber-based topological insulator saturable absorber [J]. Optics Letters, 2013, 38(24): 5212–5215.
- [20] CHEN W B, LI T J, TONG L Y, et al. Assisting the mode-locking of a figure-9 fiber laser by thermal nonlinearity of graphene-decorated microfiber [J]. Optics Express, 2023, 31(2): 2902–2910.
- [21] WANG Y, HOU S, YU Y, et al. Photonic device combined optical micro-fiber coupler with saturable-absorption materials and its application in mode-locked fiber laser[J]. Optics Express, 2021, 29(13): 20526–20534.