

Ho³⁺/Pr³⁺共掺氟化铝基玻璃光纤 2.86 μm 激光性能研究 (特邀)

张集权¹, 刘 墨¹, 许念念¹, 贾世杰¹, 王顺宾^{1*}, 王鹏飞^{1,2*}

1. 哈尔滨工程大学 纤维集成光学教育部重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001;
2. 深圳大学 光电子器件与系统教育部/广东省重点实验室, 广东 深圳 518060)

摘 要: 文中使用熔融淬火法制备了氟化铝基、氟化钨基和氟化锆基玻璃样品, 通过浸水实验研究了其抗潮解稳定性, 结果表明氟化铝基玻璃具有更好的抗潮解性能。因此制备了不同浓度的 Ho³⁺/Pr³⁺共掺氟化铝基玻璃样品, 测试了其透过光谱, 表明该玻璃具有高的透过率和宽的透过窗口。在 1 150 nm 拉曼激光的激发下, 获得了样品的发射光谱, 并对其发光机理进行了分析。利用吸注法制备了 2 Ho³⁺/0.2 Pr³⁺掺杂的氟化铝基玻璃预制棒, 使用棒管法拉制了氟化铝基玻璃光纤。使用回切法测得光纤在 793 nm 处的损耗为 1.8 dB/m。在 1 150 nm 激光泵浦下, 利用 8.6 cm 长的 Ho³⁺/Pr³⁺共掺氟化铝基玻璃光纤作为增益介质, 获得了功率为 207 mW 的 2.865 μm 激光输出, 斜率效率为 11.4%。上述研究结果表明, 氟化铝基玻璃光纤是一种稳定的中红外激光增益材料。

关键词: 氟化铝基玻璃光纤; Ho³⁺/Pr³⁺共掺; 中红外激光; 2.9 μm 激光

中图分类号: TN248.1 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20201062

2.86 μm lasing in Ho³⁺/Pr³⁺ codoped fluoroaluminate glass fiber (Invited)

Zhang Jiquan¹, Liu Mo¹, Xu Niannian¹, Jia Shijie¹, Wang Shunbin^{1*}, Wang Pengfei^{1,2*}

1. Key Lab of In-Fiber Integrated Optics of Ministry of Education of China, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China;
2. Key Laboratory of Optoelectronic Devices and Systems of Ministry of Education and Guangdong Province, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China)

Abstract: Fluoroaluminate, fluoroindate and fluorozirconate glass samples were prepared by using melt-quenching method, their abilities of resistance to deliquescence were studied by water treatment experiment, proving that the fluoroaluminate glass had better stability than the others. Thus Ho³⁺/Pr³⁺ codoped fluoroaluminate glasses with different concentrations were fabricated, the properties of spectral transmittance were measured, showing a high transmittance and wide transmission window. Under the pump of an 1 150 nm Raman laser, the emission spectra were obtained for analyzing the emitting mechanism. 2 Ho³⁺/0.2 Pr³⁺ codoped fluoroaluminate glass preform were fabricated by suction method and fiber by rod-in-tube method. Using the cutback method, the loss of the fiber at 793 nm was 1.8 dB/m. By using the 1 150 nm Raman laser as pump source, a 2.865 μm lasing with output power as high as 207 mW were detected in an 8.6 cm-long fluoroaluminate glass fiber, its slope efficiency was 11.4%. The above research results show that fluoroaluminate glass fiber is a gain medium material

收稿日期:2020-09-20; 修订日期:2020-10-30

基金项目:国家自然科学基金创新研究组基金(61935006);国家自然科学基金(61905048);中央高校基础研究经费(3072019CFQ2504, GK2250260018);集成光电子技术国家重点实验室开放基金(IOSKL2016KF03);哈尔滨工程大学 111 项目(B13015)

作者简介:张集权(1996-),男,博士生,主要从事中红外光学玻璃材料和光纤激光等方面的研究。Email: 1037706223@qq.com

通讯作者:王顺宾(1988-),男,副教授,博士,主要从事中红外光学玻璃材料和光纤激光等方面的研究。Email: shunbinwang@hrbeu.edu.cn

王鹏飞(1977-),男,教授,博士,主要从事光纤传感器和中红外微腔激光等方面的研究。Email: pengfei.wang@tudublin.ie

that can be used to develop stable mid-infrared fiber lasers.

Key words: fluoroaluminate glass fiber; $\text{Ho}^{3+}/\text{Pr}^{3+}$ codoped; mid-infrared laser; 2.9 μm laser

0 引言

近年来, $\sim 3 \mu\text{m}$ 波段的中红外激光因其在国防安全、医疗健康、传感检测和工业加工中的重要应用, 越来越受到国内外研究者的关注^[1]。在国防领域, 中红外激光器可应用于光电对抗技术, 美国等西方国家装备了大量中红外波段凝视成像制导武器, 国内在该领域和西方国家存在较大的差距, 发展中红外激光对抗武器装备, 是当前国防技术的重要任务之一^[2-4]。在医疗领域, 水分子主吸收峰处于 $2\ 500\sim 3\ 600\ \text{cm}^{-1}$, 对应于 $2.7\sim 4 \mu\text{m}$ 波段皆具有强烈的吸收, 人体组织细胞在受到 $3 \mu\text{m}$ 强激光的照射后, 会瞬间升温气化, 进而利于和其它组织切割剥离, 精确控制手术操作中的切除位置, 而对周围区域产生影响的极小, 因此在皮肤科、牙科、内科、眼科等领域都具有极其重要的应用^[5-8]。在传感领域, 许多工业气体分子如一氧化氮、二氧化碳以及含碳氢键的气体如甲烷等, 在该波段都存在较强的吸收, 对这些气体的检测可以大大增强生产安全, 减少工业加工中的潜在危险^[9]。同时, 含有碳氢键的聚合物, 也同样可以使用中红外激光进行切割、打标^[10]。

以稀土掺杂玻璃光纤为增益介质的光纤激光器, 在当前中红外激光领域占据着主要地位, 这主要得益于光纤激光器的几大优点, 如光束质量好、转换效率高、散热性能好、体积小、易于集成等特性。在谐振腔方面, 可采用高质量的光纤光栅、端面薄膜或者环路反射器等器件, 因而更利于激光器的全光纤化和集成化, 增加使用过程中的稳定性及可靠性。在增益介质方面, 低声子能量的氟化物玻璃, 以其高达 90% 的透光率和长达 $7 \mu\text{m}$ 的透过窗口受到了中红外激光领域的广泛关注。一般而言, 声子能量越低, 发光效率越高, 处于高能级的粒子, 更多的以辐射跃迁的形式到达较低能级从而产生高效发光。尽管石英光纤工艺技术成熟, 光纤质量优异, 但是其透过窗口窄, 声子高达 $1\ 100\ \text{cm}^{-1}$, 这极大地限制了其中红外光纤激光器领域的应用。锆酸盐玻璃、碲酸盐玻璃和磷酸盐玻璃等光学材料, 虽然有较宽的透过窗口, 但是其声子能量依然较高, 中红外波段的发光效率较低。硫

系玻璃光纤的透过窗口宽 (达 $20 \mu\text{m}$)、声子能量低, 但因其原料除杂困难、稀土离子掺杂浓度低等缺点, 目前尚未在稀土离子掺杂的硫系光纤中获得激光输出。因此, 兼备低声子能量、宽透过窗口、高稀土离子溶解度的氟化物玻璃材料, 恰好满足了中红外光纤激光器件的制备要求。近几十年来, 氟化锆基玻璃 (代表组分 ZBLAN: $\text{ZrF}_4\text{-BaF}_2\text{-LaF}_3\text{-AlF}_3\text{-NaF}$) 和氟化铟基玻璃光纤在激光器件研制方面取得了一定成就, 然而, 这两种玻璃材料的抗潮解、抗热损伤和抗机械损伤性能都不尽如人意。特别是在潮湿的空气中, 玻璃材料表面会因潮解造成破坏乃至失效, 因此往往需要在光纤尾端焊接一段稳定性好的光纤端帽作为保护^[11]。

在稀土离子方面, 能够实现 $3 \mu\text{m}$ 波段发光的主要有 Er^{3+} ($\sim 2.7 \mu\text{m}$)、 Dy^{3+} ($\sim 2.9 \mu\text{m}$) 以及 Ho^{3+} ($\sim 2.9 \mu\text{m}$) 这三种离子, 它们在 $\sim 3 \mu\text{m}$ 都具有较强的发光效率。2015 年, Fortin 等人在基于腔内布拉格光栅的被动冷却的 Er^{3+} 掺杂 ZBLAN 全光纤激光器中, 实现了 30.5 W 的 2 938 nm 的连续激光输出, 激光效率为 16%。2018 年, Aydin 等人在一段 6.5 m 长的 Er^{3+} 重掺杂 ZBLAN 光纤中直接写入光纤光栅, 利用双向 980 nm 激光泵浦技术, 实现了平均功率高达 41.6 W 的中红外激光输出^[11]。2016 年, Matthew 等人报道了在 Dy^{3+} 掺杂的 ZBLAN 光纤中, 利用条纹光栅, 实现了 2.95~3.35 μm 的可调谐光纤激光输出^[12]。2019 年, Vicent 等人在掺 Dy^{3+} ZBLAN 光纤中写入布拉格光栅, 获得了 10.1 W 的 3.24 μm 连续激光^[13]。在 Ho^{3+} 掺杂的中红外激光研究方面, 2015 年, Crawford 等人在 9 m 长的 $\text{Ho}^{3+}/\text{Pr}^{3+}$ 共掺 ZBLAN 双包层光纤中, 获得了 7.2 W 的 2 825~2 975 nm 可调谐激光输出, 最大斜率效率 29%^[14]。虽然目前已在稀土掺杂的 ZBLAN 光纤中获得了较高功率的中红外激光输出, 但是因 ZBLAN 玻璃材料本身存在易潮解的缺点, 上述激光器难以在空气中长期运转。因此, 探索稳定性好的抗潮解性能好的中红外玻璃材料是当前需要解决的一个关键问题。2018 年, 贾世杰等人在掺 Ho^{3+} 的氟化铝基光纤中, 实现了功率为 57 mW 的 2 868 nm 激光输出^[15], 但是在激光功率和效

率方面有待提升。文中在玻璃材料中引入 Pr³⁺离子,以解除 Ho³⁺:⁵I₆→⁵I₇ 跃迁因下能级寿命比上能级寿命长而产生的自终止效应,进一步提升了 Ho³⁺在⁵I₆→⁵I₇的~2.9 μm 发光强度,并在 Ho³⁺/Pr³⁺共掺氟化铝基玻璃光纤中实现了 207 mW 的 2.865 μm 的激光输出。

1 氟化铝基玻璃的抗潮解性能

使用熔融淬火法制备了无稀土离子掺杂的氟化铝基 (30AlF₃-10BaF₂-19CaF₂-9.5YF₃-12.5SrF₂-3.5MgF₂-3LiF-10ZrF₄-2.5PbF₂)、氟化铟基 (25.5InF₃-15ZnF₂-18BaF₂-11.5GaF₃-8SrF₂-12PbF₂-5LiF-2.5YF₃-2.5LaF₃) 和 ZBLAN (53ZrF₄-20BaF₂-4LaF₃-3AlF₃-20NaF) 玻璃样品,利用 Perkin Elmer Lambda 750 UV-VIS-NIR 光谱仪和 Perkin Elmer FTIR 中红外傅里叶光谱仪分别测试三种玻璃样品在 250~2 500 nm 和 2 500~12 000 nm 的透过光谱。图 1(a) 是经过抛光并制备成同样大小玻璃样品的光谱透过图,三种玻璃在 450~5 230 nm 都具有超过 90% 的透过率,氟化铟基玻璃的透过窗口长达 11 000 nm。将三种玻璃样品称量后封

装于含有 500 ml 去离子水的棕色玻璃瓶中,在 25 °C 浸泡 24 h,再经过 100 °C 高纯氮气手套箱电炉中干燥处理 12 h,测量后的光谱透过结果如图 1(b) 所示,氟化铟基玻璃和 ZBLAN 玻璃样品在 3 μm 附近都表现出强烈的水吸收,整体透过率低于 70%,氟化铝基玻璃样品经过同样的水处理后,依旧能保持较高的透过率,在 4 722.6 nm 具有最高透过率 91.49%。氟化铝基、氟化铟基和 ZBLAN 玻璃样品的总质量损失百分比分别为 0.072%、0.415% 和 2.584%。实验结果表明,在抗潮解性能方面,氟化铝基玻璃受水分子的影响远小于其他两种玻璃,可作为长期稳定运行的中红外激光器的增益介质。

2 Ho³⁺/Pr³⁺ 共掺氟化铝基玻璃和光纤的制备

使用熔融淬火法制备 Ho³⁺/Pr³⁺ 共掺氟化铝基玻璃。其组分摩尔配比为 30AlF₃-10BaF₂-19CaF₂-(7.5-x)YF₃-12.5SrF₂-3.5MgF₂-3LiF-10ZrF₄-2.5PbF₂-2HoF₃-xPrF₃ (x=0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 1, 2, 3), 命名为 2Ho-xPr。将 15 g 的高纯原料 (99.99%) 按上述配比利用高精度天平 (0.1 mg) 称重,在玛瑙研钵中充分研磨后移入铂金坩埚中,放入手套箱 900 °C 电炉中熔融 1 h,随后浇注在 370 °C 电炉的铜板上,进行退火处理 3 h 以消除内应力,之后随炉冷却到室温。取出玻璃样品将表面抛光至光学级别,制成大小统一的玻璃样品。

采用吸注法制备光纤预制棒,采用棒管法拉制 Ho³⁺/Pr³⁺ 共掺氟化铝基玻璃光纤。首先将 15 g 摩尔组分配比为 30AlF₃-10BaF₂-19CaF₂-7.3YF₃-12.5SrF₂-3.5MgF₂-3LiF-10ZrF₄-2.5PbF₂-2HoF₃-0.2PrF₃ 的纤芯高纯原料和 25 g 摩尔组分配比为 30AlF₃-10BaF₂-20CaF₂-10.5YF₃-13SrF₂-3.5MgF₂-3LiF-10ZrF₄ 的包层高纯原料分别称重后在玛瑙研钵中研磨均匀,装在铂金坩埚后放在手套箱的 900 °C 电炉中熔融 1 h,先将包层熔融液体倒入预热模具中,再迅速将纤芯熔融液浇入,利用热胀冷缩原理将纤芯吸入到包层中,形成芯包界面良好的光纤预制棒。随炉冷却到室温后,抛光外表面,使用拉丝塔将其拉细成~3 mm 粗的细棒后,夹套在另外一根包层管中,在氮气环境中进一步拉制成直径为~240 μm 的氟化铝基光纤。

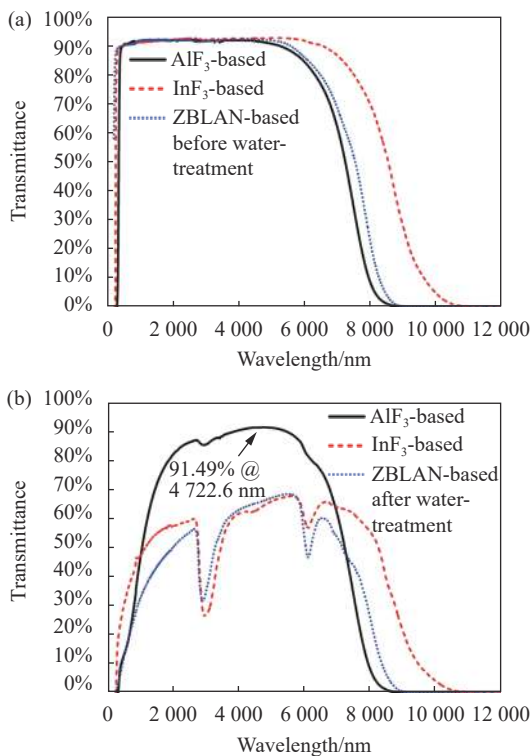


图 1 氟化铝基、氟化铟基和 ZBLAN 玻璃样品在 (a) 水处理前和 (b) 水处理后的透过光谱

Fig.1 Transmission spectra of AlF₃-based, InF₃-based and ZBLAN glass samples (a) before and (b) after water treatment

3 Ho³⁺/Pr³⁺ 共掺氟化铝基玻璃的光学性能

利用 Perkin Elmer Lambda 750 UV-VIS-NIR 光谱仪和 Perkin Elmer FTIR 中红外傅里叶光谱仪分别测试玻璃样品在 250~2 500 nm 和 2 500~12 000 nm 的透过和吸收光谱。2Ho 和 2Ho-0.2Pr 氟化铝基玻璃样品的测试结果如图 2 所示,图 2(a) 表明氟化铝基玻璃样品具有良好光谱透过性能,透过率高达 92%,截止波长 9 μm,因而可作为中红外激光的增益介质和传输介质。透过光谱的下降位置是两种稀土离子的吸收峰,将波长单位转换成波数单位后如图 2(b) 所示。Ho³⁺ 的吸收峰位于 5 139、8 680、11 261、13 369、15 625、18 657、20 661、21 186、21 365、22 222、24 039、26 042 cm⁻³,分别对应于⁵I₇、⁵I₆、⁵I₅、⁵I₄、⁵F₅、⁵S₂与⁵F₄、⁵F₃、⁵F₂、³K₈、⁵G₆与⁵F₁、⁵G₅、⁵G 与³K₇能级。Pr³⁺的吸收峰位于 2 322、4 496、5 149、6 540、6 973、9 885、16 840、20 706、21 330、21 500 和 22 535 cm⁻³,分别对应于³H₅、³H₆、³F₂、³F₃、³F₄、¹G₄、¹D₂、³P₀、³P₁与¹I₆和³P₂能级。通过

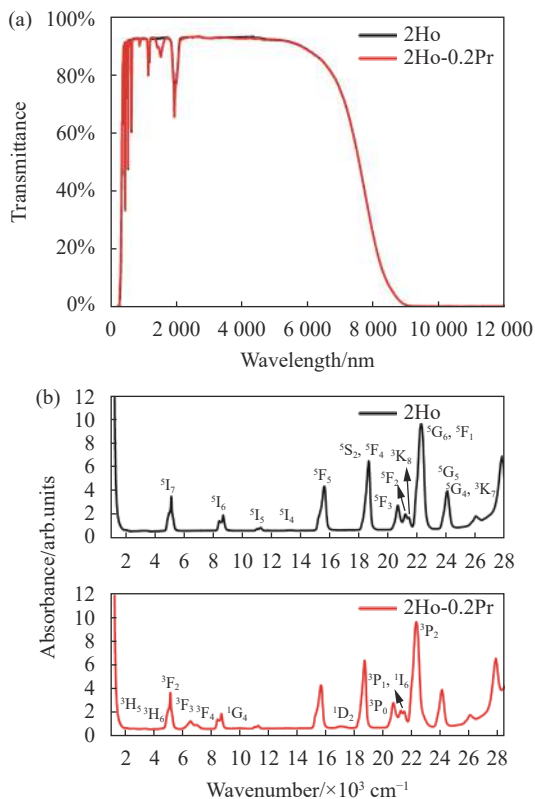


图 2 2Ho 和 2Ho-0.2Pr 氟化铝基玻璃样品的 (a) 透过光谱和 (b) 吸收光谱

Fig.2 (a) Transmission and (b) absorbance spectra of 2Ho and 2Ho-0.2Pr fluoroborate glass samples

吸收光谱的吸收峰位置可知,利用 1 150 nm 激光对 Ho³⁺可进行有效泵浦,将基态⁵I₈能级的粒子泵浦到⁵I₆能级上。

泵浦光源为频准激光公司生产的 1 150 nm 光纤拉曼激光器 (型号: RFL-1 150 nm), 荧光光谱采用卓立汉光 Zolix Omni-λ300i 单色仪进行测试。图 3 展示了 2Ho-xPr 氟化铝基玻璃样品在该泵浦源激发下测得的荧光光谱。图 3(a) 展示了⁵I₆→⁵I₈跃迁产生的光谱,峰值波长为 1 190 nm,当 Pr³⁺浓度从 0 逐渐增大时,光谱

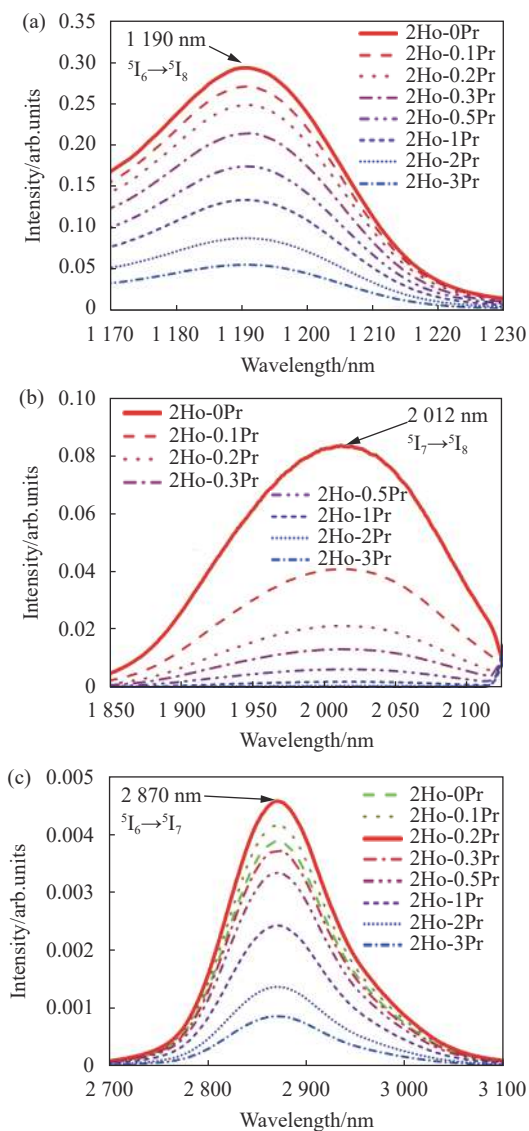


图 3 不同浓度的 Ho³⁺/Pr³⁺共掺氟化铝基玻璃样品在 1 150 nm 泵浦光下的荧光光谱图。(a) 1 190 nm; (b) 2 012 nm; (c) 2 870 nm

Fig.3 Fluorescence spectra of Ho³⁺/Pr³⁺ codoped fluoroborate glass samples with different concentration under the pump of a 1 150 nm laser. (a) 1 190 nm; (b) 2 012 nm; (c) 2 870 nm

强度逐渐降低。其原理如图 4 所示,随着 Pr^{3+} 浓度的增大, ET1 过程逐渐增强, Ho^{3+} 中处于 $^5\text{I}_6$ 能级的能量会传递给 Pr^{3+} 的 $^3\text{F}_4$ 能级,因此过高浓度的掺杂会对 $^5\text{I}_6$ 能级粒子产生不利影响,降低 $^5\text{I}_6 \rightarrow ^5\text{I}_7$ 跃迁。图 3(b) 展示了 $^5\text{I}_7 \rightarrow ^5\text{I}_8$ 跃迁产生的光谱,峰值波长为 2 012 nm,在 Pr^{3+} 浓度逐渐增大的过程中,处于 $^5\text{I}_7$ 能级的粒子将能量传递给 $^3\text{F}_2$ 和 $^3\text{H}_6$ 能级 (ET2 和 ET3),消耗 $^5\text{I}_7$ 能级的粒子数,这一过程降低了 $^5\text{I}_7$ 能级的寿命,解除了 $^5\text{I}_6 \rightarrow ^5\text{I}_7$ 跃迁的自终止效应,从而增强了 2 870 nm 波段的发光效率。不同的 Pr^{3+} 浓度掺杂条件下,上能级粒子和下能级粒子表现出不同的粒子数比例。图 3(c) 反映出掺入 Pr^{3+} 后,上下能级的综合表现结果。当 Pr^{3+} 浓度从 0 增大到 0.2 时,更多的位于 $^5\text{I}_7$ 能级的粒子将能量传递给 Pr^{3+} ,从图 3(b) 也可以看出,低浓度掺杂时,2 012 nm 光谱强度迅速下降,而 1 190 nm 发光强度下降不明显,表明 $^5\text{I}_6$ 能级的粒子通过 ET1 过程转移给 Pr^{3+} 较少,如图 3(a) 所示。因此在 Pr^{3+} 浓度较小时,2 870 nm 发光强度因跃迁的自终止效应的逐渐解除而增强。当 Pr^{3+} 浓度进一步增大时,ET1 过程将带来负面影响,从而降低了 2 780 nm 的光谱强度。因此,合适的浓度配比有利于增强 2 870 nm 的发光。低浓度掺杂的 2Ho-0.2Pr 浓度被选择作为光纤纤芯的稀土离子掺杂浓度。

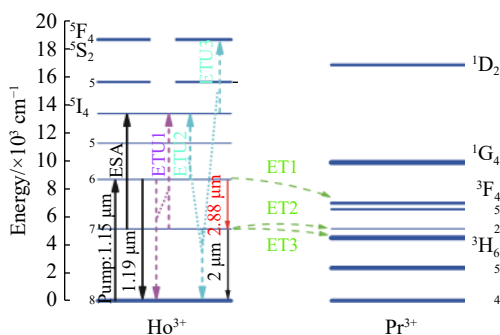


图 4 $\text{Ho}^{3+}/\text{Pr}^{3+}$ 共掺氟化铝基玻璃样品的发光机理

Fig.4 Emitting mechanism of $\text{Ho}^{3+}/\text{Pr}^{3+}$ codoped fluoroaluminate glass samples

4 $\text{Ho}^{3+}/\text{Pr}^{3+}$ 共掺氟化铝基玻璃光纤的 2.9 μm 激光产生

图 5 展示了 2.9 μm 光纤激光输出的实验装置。1 150 nm 光纤拉曼激光器尾端装有准直器,从而输出平行光束,为了保护泵浦激光器不受到反向激光的影

响,在光路中安装了空间光隔离器 (ISO: isolator)。ISO 输出的激光经过聚焦透镜 (焦距为 6 mm),汇聚于垂直切割的 2Ho-0.2Pr 共掺光纤端面的纤芯区域。为了获得高性能的 2.9 μm 激光,一片 2.8~3 μm 高反、1 150 nm 高透的二向色镜 (Dichroic Mirror, DM) 紧贴于光纤前端面,尾端利用 4% 的非涅尔反射构成谐振腔,光纤输出的激光由 InF_3 跳线空间机械对接后导入到光谱分析仪 (Optical Spectra Analyzer, OSA) 进行检测。

图 6 是测得的在 8.6 cm 长的光纤中获得的激光光谱图,激光波长为 2 865.3 nm,如图 7 所示,激光最

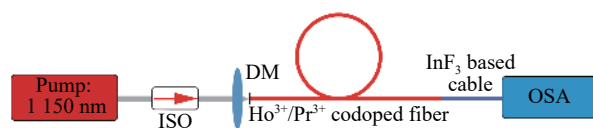


图 5 $\text{Ho}^{3+}/\text{Pr}^{3+}$ 共掺氟化铝基玻璃光纤 ~2.9 μm 激光装置原理图

Fig.5 Schematic diagram of the experimental setup for the ~2.9 μm $\text{Ho}^{3+}/\text{Pr}^{3+}$ codoped fluoroaluminate glass fiber laser

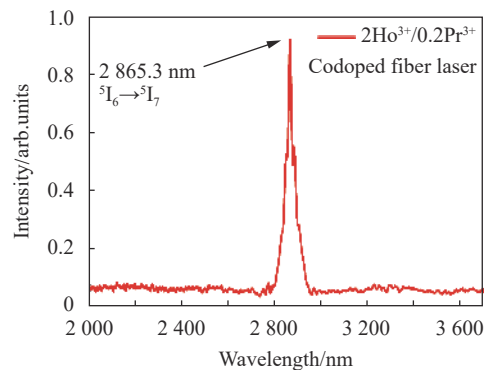


图 6 2 865.3 nm 激光光谱图

Fig.6 Spectrum of the 2 865.3 nm laser

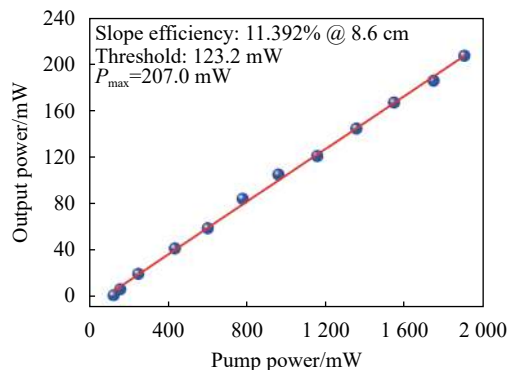


图 7 8.6 cm 长光纤的激光输出功率和泵浦功率的关系图

Fig.7 Laser output power as a function of the pump power in an 8.6 cm-long fiber

高未饱和输出功率为 207 mW, 相比之前报道的掺 Ho³⁺氟化铝基光纤激光功率提升了近四倍^[15], 激光阈值为 123.2 mW, 斜率效率为 11.4%。

为了进一步探索光纤长度和激光效率之间的关系, 采用回切法对光纤进行了测试。如图 8 所示, 当光纤长度为 269.32 cm 时, 输出光功率和输入光功率的斜率效率为 2.721%。当光纤逐渐缩短时, 斜率效率逐渐升高至 11.4%。

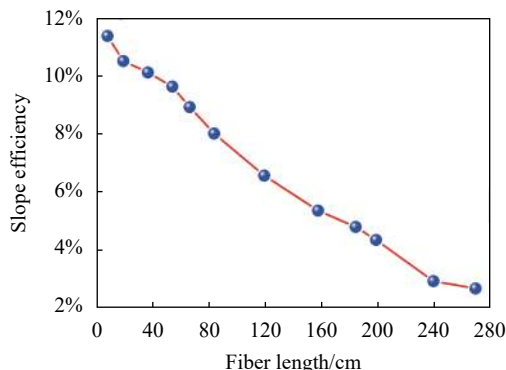


图 8 斜率效率和光纤长度关系图

Fig.8 Relationship between slope efficiency and fiber length

5 结 论

实验对比了氟化铝基玻璃相对于氟化钬基和 ZBLAN 玻璃的抗潮解性能。经过对 Ho³⁺/Pr³⁺共掺氟化铝基玻璃发光光谱的分析, 选用 2Ho-0.2Pr 作为激光增益离子的配比浓度。利用棒管法制备了 Ho³⁺/Pr³⁺共掺氟化铝基玻璃光纤, 在 1 150 nm 泵浦光的激发下, 实现了 207 mW 的 2 865.3 nm 的激光输出, 斜率效率为 11.4%。氟化铝基玻璃材料以其优良的光学特性及化学稳定性, 有望研制高功率、稳定的中红外光纤激光器。

参考文献:

[1] Wang W C, Zhou B, Xu S H, et al. Recent advances in soft optical glass fiber and fiber lasers [J]. *Progress in Materials*

Science, 2019, 101: 90-171.

[2] Li S, Yan X. Research on mid-infrared laser source in laser countermeasure system and key technology [J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2018, 33(5): 19-23.

[3] Molocher B. Countermeasure laser development[C]//European Symposium on Optics and Photonics for Defence and Security, 2005.

[4] Bekman H H P T, Van Den Heuvel J C, Van Putten F J M, et al. Development of a mid-infrared laser for study of infrared countermeasures techniques[C]//SPIE, 2005, 5615: 27-38.

[5] Benedikt J, Bende T. Mid-IR Laser Applications in Medicine[M]. Berlin: Springer, 2003.

[6] Kaufmann R, Hartmann A, Hibst R. Cutting and skin-ablative properties of pulsed mid-infrared laser surgery [J]. *Journal of Dermatologic Surgery & Oncology*, 2013, 20(2): 112-118.

[7] Treat M, Trokel S L, Defilippi V J, et al. Mid-infrared lasers for endoscopic surgery. A new class of surgical lasers [J]. *Am Surg*, 1989, 55(2): 81-84.

[8] Hutchens T C, Darafsheh A, Fardad A, et al. Novel microsphere chain fiber tips for use in mid-infrared ophthalmic laser surgery[C]//SPIE, 2012, 8218: 821803.

[9] Liu J, Tan Q, Zhang W, et al. Miniature low-power IR monitor for methane detection [J]. *Measurement*, 2011, 44(5): 823-831.

[10] Tittel F K, Richter D, Fried A. Mid-Infrared Laser Applications in Spectroscopy[M]. Berlin: Springer, 2003.

[11] Aydin Y O, Fortin V, Vallée R, et al. Towards power scaling of 2.8 μm fiber lasers [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(18): 4542-4545.

[12] Majewski M R, Jackson S D. Tunable dysprosium laser [J]. *Optics Letters*, 2016, 41(19): 4496.

[13] Fortin V, Jobin F, Maxence L, et al. 10-W-level monolithic dysprosium-doped fiber laser at 3.24 μm [J]. *Optics Letters*, 2019, 44(3): 491.

[14] Crawford S, Hudson D D, Jackson S D. High-power broadly tunable 3-μm fiber laser for the measurement of optical fiber loss [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2015, 7(3): 1-1.

[15] Jia S J, Jia Z X, Yao C F, et al. Ho³⁺ doped fluoroaluminate glass fibers for 2.9 μm lasing [J]. *Laser Physics*, 2018, 28(1): 015802.