



·新型激光技术专题·研究快报·

## 基于氟化铝基玻璃光纤的瓦级 $\sim 3\ \mu\text{m}$ 激光\*

王鹏飞<sup>1,2</sup>, 刘 墨<sup>1</sup>, 张集权<sup>1</sup>, 许念念<sup>1</sup>, 王顺宾<sup>1</sup>

(1. 哈尔滨工程大学 物理与光电工程学院, 纤维集成光学教育部重点实验室, 哈尔滨 150001; 2. 深圳大学 光电工程学院 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:** 研究了基于  $\text{Ho}^{3+}/\text{Pr}^{3+}$  共掺  $\text{AlF}_3$  基玻璃单包层光纤的瓦级  $\sim 3\ \mu\text{m}$  激光。采用单模 1150 nm 光纤激光器泵浦上述增益光纤, 得到了波长 2.87  $\mu\text{m}$  的激光输出, 其最大输出功率为 1.02 W, 激光斜率效率为 10.7%, 输出激光的光束质量因子  $M^2 \approx 1.2$ 。研究结果表明,  $\text{AlF}_3$  基玻璃光纤是一种潜在的可获得高功率中红外激光输出的增益介质。

**关键词:** 氟化铝基;  $\text{Ho}^{3+}/\text{Pr}^{3+}$  共掺;  $\sim 3\ \mu\text{m}$  激光; 瓦级; 稳定性

中图分类号: TN248

文献标志码: A doi: 10.11884/HPLPB202133.210311

## Watt-level $\sim 3\ \mu\text{m}$ laser in $\text{AlF}_3$ -based glass fiber

Wang Pengfei<sup>1,2</sup>, Liu Mo<sup>1</sup>, Zhang Jiquan<sup>1</sup>, Xu Niannian<sup>1</sup>, Wang Shunbin<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of In-Fiber Integrated Optics Ministry of Education, College of Physics and Optoelectronic Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China;

2. Key Laboratory of Optoelectronic Devices and Systems of Ministry of Education and Guangdong Province, College of Optoelectronic Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China)

**Abstract:** A mid-infrared fiber laser operating at  $\lambda \approx 3\ \mu\text{m}$  is demonstrated using a  $\text{Ho}^{3+}/\text{Pr}^{3+}$  co-doped  $\text{AlF}_3$ -based glass fiber as a gain fiber. Under 1150 nm single-mode fiber laser pumping, the fixed-wavelength laser had maximum output power of 1.02 W, a slope efficiency of 10.7%, and  $M^2 \approx 1.2$ . The results prove this type of fiber is a potential gain medium for more powerful mid-infrared fiber lasers.

**Key words:**  $\text{AlF}_3$ -based;  $\text{Ho}^{3+}/\text{Pr}^{3+}$  co-doped;  $\sim 3\ \mu\text{m}$  laser; watt-level; stability

光纤激光器具有效率高、阈值低、光束质量好、易于散热、结构简单紧凑以及可在恶劣环境下工作等优势。一般定义  $\lambda \approx 2\sim 20\ \mu\text{m}$  为中红外波段, 工作在此波段的光纤激光器有着广阔的应用前景。特别是  $\lambda \approx 3\ \mu\text{m}$  附近包含水等众多重要分子的吸收带, 在此波长范围内工作的中红外激光光源在光电对抗、激光手术、传感和材料加工等领域中具有重要的应用, 在过去的 30 年中一直是研究热点<sup>[1-9]</sup>。由于传统的石英光纤在中红外波段损耗高而无法使用, 中红外波段的光纤激光器往往使用低声子能量、低损耗的氟化物光纤及硫系光纤等。目前中红外激光输出主要基于  $\text{ZrF}_4\text{-BaF}_2\text{-LaF}_3\text{-AlF}_3\text{-NaF}$  (ZBLAN) 玻璃光纤, 然而 ZBLAN 光纤易潮解, 并且机械强度低, 不利于实际应用。功率提升是光纤激光发展的主要方向之一, 光纤激光的应用领域随着功率的提升不断拓展, 而增加中红外光纤激光输出功率会是一个持续的挑战。探索物化性质稳定的低声子能量的玻璃基质是实现高功率、稳定中红外激光输出的一个方向。可以通过  $\Delta T = T_x - T_g$  的值评估一种玻璃的热稳定性, 其中  $T_x$  为玻璃析晶开始温度,  $T_g$  为玻璃转变温度,  $\Delta T$  表明了玻璃基质抗析晶能力及被拉制成纤的能力。而玻璃抗激光损伤的能力与玻璃转变温度与有关, 与 ZBLAN 玻璃相比,  $\text{AlF}_3$  基玻璃具有更高的玻璃转变温度 (约 370  $^\circ\text{C}$ )、更高的耐酸性和耐水性<sup>[10-11]</sup> 以及更高的机械强度, 在高功率光纤激光器上的应用具有很大的潜力。与在中红外激光中广泛应用的 ZBLAN 光纤相比, 基于  $\text{AlF}_3$  的玻璃光纤仍处于发展阶段。

工作在  $\lambda \approx 3\ \mu\text{m}$  波段的光纤激光器通常依靠  $\text{Ho}^{3+}$ :  $^5\text{I}_6 \rightarrow ^5\text{I}_7$ ,  $\text{Er}^{3+}$ :  $^4\text{I}_{11/2} \rightarrow ^4\text{I}_{13/2}$  和  $\text{Dy}^{3+}$ :  $^6\text{H}_{13/2} \rightarrow ^6\text{H}_{15/2}$  等跃迁来实现。

\* 收稿日期: 2021-07-23; 修订日期: 2021-11-10

基金项目: 国家自然科学基金项目 (61935006, 62090062, 62005060, 61905048); 国家重点研发计划项目 (2020YFA0607602); 中央高校基础科研业务经费项目 (3072021CF2514); 深圳市基础研究项目 (JCYJ20190808173619062); 哈尔滨工程大学 111 引智项目 (B13015)

联系方式: 王鹏飞, pengfei.wang@tudublin.ie.

通信作者: 王顺宾, shunbinwang@hrbeu.edu.cn.

一般来说,  $\text{Dy}^{3+}$  掺杂光纤可以在较宽的波长范围内输出激光, 但功率较低; 而  $\text{Er}^{3+}$  掺杂光纤能产生较高功率的激光输出。2018年, Majewski 等人报道了  $\text{Dy}^{3+}$  掺杂的可调谐光纤激光器, 其调谐区间长度达到了  $0.573 \mu\text{m}^{[12]}$ 。同年, Aydin 等人报道了掺  $\text{Er}^{3+}$  (7 mol%) 的 ZBLAN 光纤激光器, 其输出功率为 41.6 W, 波长为  $\lambda \approx 2.82 \mu\text{m}^{[13]}$ 。与  $\text{Er}^{3+}$  相比, 掺  $\text{Ho}^{3+}$  的光纤在  $\lambda \approx 3 \mu\text{m}$  波段可以产生更长的发射波长, 并且与水的吸收带有着更好的重叠。因此, 掺  $\text{Ho}^{3+}$  的光纤激光器有着更为广泛的应用前景, 如外科手术。但是,  $\text{Ho}^{3+}: ^5\text{I}_7$  的寿命 (约 12 ms) 比  $\text{Ho}^{3+}: ^5\text{I}_6$  更长, 这意味着  $\text{Ho}^{3+}: ^5\text{I}_6 \rightarrow ^5\text{I}_7$  跃迁是一个自终止过程。为了获得在  $\lambda \approx 3 \mu\text{m}$  的高效激光输出, 可以通过与  $\text{Pr}^{3+}$  共掺杂来消耗激光下能级的粒子数的方式来解除自终止效应。2015年, Crawford 等人报道了  $\text{Ho}^{3+}/\text{Pr}^{3+}$  共掺的 ZBLAN 可调谐光纤激光器, 其输出功率为 7.2 W, 调谐范围为  $\lambda \approx 2.82 \sim 2.97 \mu\text{m}^{[14]}$ 。

$\text{AlF}_3$  基光纤激光器的研究也取得了一定的进展。2018年, 贾世杰等人报道了一种工作在  $2.87 \mu\text{m}$  的  $\text{Ho}^{3+}$  掺杂  $\text{AlF}_3$  基光纤激光器, 其最大输出功率为 57 mW, 斜率效率为 5.1%<sup>[15]</sup>。2020年, 王顺宾等人报道了一种工作在约  $2.9 \mu\text{m}$   $\text{Ho}^{3+}/\text{Pr}^{3+}$  共掺的  $\text{AlF}_3$  基光纤激光器, 其输出功率为 173 mW, 斜率效率为 10.3%<sup>[16]</sup>。

本文对工作在  $\lambda \approx 3 \mu\text{m}$  波段的  $\text{Ho}^{3+}/\text{Pr}^{3+}$  共掺  $\text{AlF}_3$  基光纤激光器进行了研究, 其最大输出功率达到了 W 级, 这表明  $\text{AlF}_3$  玻璃基质在高功率中红外激光器中具有很大的应用潜力。

## 1 实验和结果

图 1 为  $\text{Ho}^{3+}$  和  $\text{Pr}^{3+}$  的能级图及相关的发光跃迁示意图 (采用波长为 1150 nm 的激光器泵浦)。  $\lambda \approx 3 \mu\text{m}$  激光的上能级  $^5\text{I}_6$  的寿命短于激光下能级  $^5\text{I}_7$  的寿命。为了得到高效的  $\sim 3 \mu\text{m}$  激光输出, 一般通过级联输出  $\lambda \approx 2 \mu\text{m}$  激光或共掺  $\text{Pr}^{3+}$  的方式来消耗激光下能级  $^5\text{I}_7$  的粒子数。通过共掺  $\text{Pr}^{3+}$ ,  $\text{Ho}^{3+}: ^5\text{I}_7$  向  $\text{Pr}^{3+}: ^3\text{F}_2$  传递能量, 过程如图 1 中的 ET 所示。在低声子能量的氟化物玻璃基质中, 存在较强的激发态吸收 (ESA) 和能量传递上转换 (ETU) 过程, 而 ESA 和  $\text{ETU}_1$  过程可以降低  $^5\text{I}_7$  的粒子数并增加  $^5\text{I}_6$  的粒子数, 有利于降低激光输出阈值和提高斜率效率。

实验用光纤是使用棒管法控制的, 具有二层结构, 分为纤芯和包层, 包层折射率小于纤芯折射率。按照纤芯组分  $30\text{AlF}_3\text{-}10\text{BaF}_2\text{-}19\text{CaF}_2\text{-}7.3\text{YF}_3\text{-}12.5\text{SrF}_2\text{-}3.5\text{MgF}_2\text{-}3\text{LiF}\text{-}10\text{ZrF}_4\text{-}2.5\text{PbF}_2\text{-}2\text{HoF}_3\text{-}0.2\text{PrF}_3$  (mol%) 配置玻璃原料 15 g, 按照包层组分  $30\text{AlF}_3\text{-}10\text{BaF}_2\text{-}20\text{CaF}_2\text{-}10.5\text{YF}_3\text{-}13\text{SrF}_2\text{-}3.5\text{MgF}_2\text{-}3\text{LiF}\text{-}10\text{ZrF}_4$  (mol%) 配置玻璃原料 30 g, 之后分别在玛瑙研钵中充分研磨均匀后放置在铂金坩埚中于  $950 \text{ }^\circ\text{C}$  熔制 2 h。再将包层玻璃液和纤芯玻璃液依次倒入预热在  $375 \text{ }^\circ\text{C}$  的铜质模具并将模具放置在电炉中退火 3 h, 然后关闭电炉, 待模具冷却到室温取出光纤预制棒。上述利用玻璃的热胀冷缩制备光纤预制棒的方法称作吸注法。采用包层玻璃原料来制备光纤包层玻璃管, 包层玻璃管呈一端开口的空心管状结构, 可以使用旋转浇注机来制备。为了得到较细的纤芯, 需要将预制棒进行预拉伸, 然后将拉细后的预制棒放入包层玻璃管中, 在光纤拉丝塔上拉制成光纤。图 2 的插图展示了光纤的横截面: 光纤外径为  $\sim 230 \mu\text{m}$ , 纤芯直径为  $\sim 9 \mu\text{m}$ , 数值孔径 (NA) 为 0.28。通过公式  $V = 2\pi a NA / \lambda$  ( $a$  为光纤纤芯半径), 计算得到此光纤在  $2.9 \mu\text{m}$  处的归一化频率  $V = 2.73$ , 表明此光纤在  $2.9 \mu\text{m}$  附近允许传输多个模式。用回切法测量了在光纤  $\lambda \approx 793 \text{ nm}$  和  $\lambda \approx 2.87 \mu\text{m}$  处的背景损耗, 分别为  $\sim 1.9 \text{ dB/m}$  和  $3.9 \text{ dB/m}$ 。此光纤在  $\lambda \approx 2.87 \mu\text{m}$  处损耗高于  $\lambda \approx 793 \text{ nm}$  处, 主要是由纤芯中残留的 OH<sup>-</sup> 和重金属离子的吸收引起的。将 14.6 cm 长的此光纤与石英单模光纤熔接, 使用宽带光源 (YSL, SC Series) 和光纤光谱仪 (Yokogawa AQ6370D) 测量其吸收光谱, 结果如图 2 所示。由光纤吸收光谱, 14.6 cm 长的该

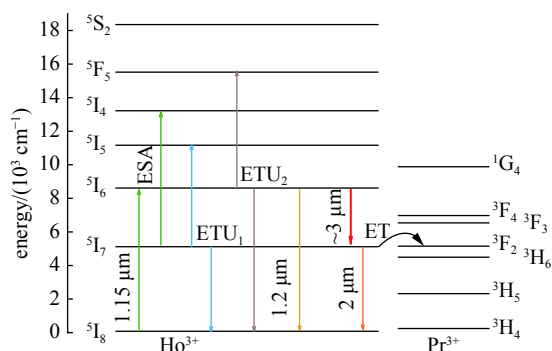


Fig. 1 Partial energy level diagrams of  $\text{Ho}^{3+}$  and  $\text{Pr}^{3+}$  and corresponding transitions related to  $\sim 3 \mu\text{m}$  laser

图 1  $\text{Ho}^{3+}$  和  $\text{Pr}^{3+}$  的能级图及和  $\sim 3 \mu\text{m}$  发光相关的跃迁

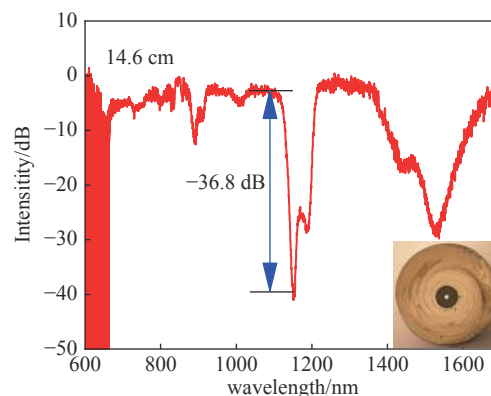


Fig. 2 Absorption spectrum of  $\text{Ho}^{3+}/\text{Pr}^{3+}$  co-doped  $\text{AlF}_3$ -based fiber

图 2  $\text{Ho}^{3+}/\text{Pr}^{3+}$  共掺  $\text{AlF}_3$  基光纤吸收光谱

光纤在 1150 nm 处的吸收为 36.8 dB。吸收系数  $\alpha$  可由公式  $\alpha = \ln(I_0/I_L)/L$  计算, 其中  $I_0$  为入射光强,  $I_L$  为经过  $L$  长度光纤的透射光强, 则该光纤在 1150 nm 泵浦波长处的吸收系数  $\alpha = 0.58 \text{ cm}^{-1}$ 。

图 3 为激光实验装置图, 使用 1150 nm 拉曼光纤激光器泵浦 22 cm 长的  $\text{Ho}^{3+}/\text{Pr}^{3+}$  共掺氟铝基光纤。泵浦光束通过透镜 ( $f = 11 \text{ mm}$ ,  $NA = 0.2$ ) 和二向色镜 (DM) (在  $\lambda \approx 1.15 \mu\text{m}$  处透射率  $> 95\%$ , 在  $\lambda \approx 2.9 \mu\text{m}$  处反射率  $\sim 99.8\%$ ) 聚焦到光纤芯中。在激光实验中, 光纤末端的菲涅耳反射 (在  $2.868 \mu\text{m}$  处约 4%) 和腔镜形成了激光腔, 光纤需要紧靠腔镜的高反面以得到高效率的激光输出。将光纤放置在带有 V 型凹槽的铜质水冷板上以便保护光纤。检测输出功率时, 使用滤光片 (在  $300 \sim 2200 \text{ nm}$  处透过率  $T < 0.1\%$ ) 滤除泵浦光和上转换荧光。

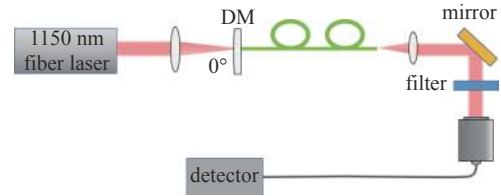


Fig. 3 Schematic of the experimental set-up

图 3 实验装置示意图

经测试, 激光系统的耦合效率为 80%。随着 1150 nm 激光泵浦功率增加到 85 mW, 观察到了在  $\lambda \approx 2.844 \mu\text{m}$  的激光。当泵浦功率进一步增加时, 激光波长发生偏移。图 4 为在  $\lambda \approx 2.87 \mu\text{m}$  处的光纤激光器输出功率随吸收泵浦功率的关系图, 黑色直线是其线性拟合曲线, 图 4 中插图是 1.019 W 激光输出的光谱, 22 cm 长光纤的最大输出为 1.02 W, 斜率效率  $\eta = 10.7\%$ 。实验中用光谱分析仪 (OSA) (YOKOGAWA AQ6377) 监测激光光谱, 其分辨率为 0.2 nm。

使用光束质量分析仪 (Ophir Photonics NanoModeScan) 表征输出的激光光束质量。使用 6 mm 焦距的 ZnSe 透镜 (Innovation photonics) 准直  $\sim 2.9 \mu\text{m}$  激光, 用 100 mm 焦距的平凸  $\text{CaF}_2$  透镜沿光束质量分析仪的光轴聚焦光束, 得出在  $x$  轴和  $y$  轴方向  $M^2 \approx 1.2$ 。

图 5 为在 45 min 内最大输出功率的稳定性, 插图为实验装置实物图。水冷板温度保持在  $16 \text{ }^\circ\text{C}$ , V 型槽里覆盖上导热硅脂以快速吸收光纤热量。45 min 内, 最高输出功率为 1.024 W, 最低输出功率为 1.018 W, 表明  $\sim 3 \mu\text{m}$  激光输出的稳定性较好。在最大功率下未观察到光纤末端被损坏, 表明了  $\text{AlF}_3$  基光纤的使用寿命在高功率泵浦下具有较长的稳定性。

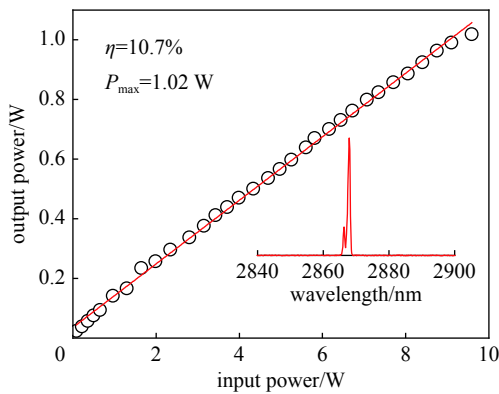


Fig. 4 Laser output power at  $\lambda \approx 2.87 \mu\text{m}$  as a function of absorbed pump power at  $\lambda \approx 1.15 \mu\text{m}$

图 4 波长约  $2.87 \mu\text{m}$  激光输出和 1150 nm 泵浦光功率依赖性曲线

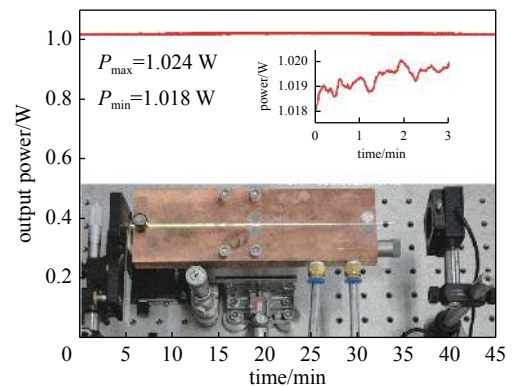


Fig. 5 Temporal dependence of output power over a period of 45 min. The inset shows the experimental set-up

图 5 输出功率稳定性测试结果

实验中使用的单包层光纤纤芯直径为  $\sim 9 \mu\text{m}$ , 当 1150 nm 光纤激光器输出达到  $\sim 10 \text{ W}$  时, 光纤输入端面的功率密度达  $\sim 10^{11} \text{ W/m}^2$ 。该光纤对 1150 nm 泵浦光具有很大吸收系数, 且功率仅在直径  $9 \mu\text{m}$  的纤芯中传播, 所以光纤泵浦端的热效应十分显著而过高的泵浦功率密度很容易损坏光纤端面。在单包层  $\text{AlF}_3$  基光纤中实现 W 级的中红外激光输出充分展示了  $\text{AlF}_3$  基玻璃材料及其光纤在更高功率中红外光纤激光器的应用前景。值得指出的是, 使用光纤切割机 (Vytran LDC401A) 将光纤末端进行了垂直切割, 具有良好的表面质量。如果切割更高质量的光纤端面, 聚焦光束与光纤纤芯之间更好的耦合将有助于进一步提高输出功率。在未来的工作中, 可进一步使用光纤布拉格光栅、双包层光纤和包层泵浦, 以及采用全光纤化来增加输出功率和提高激光稳定性能。其中制备双包层光纤和采用包层泵浦是提高  $\text{Ho}^{3+}/\text{Pr}^{3+}$  共掺  $\text{AlF}_3$  基光纤的  $\lambda \approx 3 \mu\text{m}$  激光输出功率到 10 W 量级的突破口。

## 2 结论

本文研究了基于 22 cm 长  $\text{Ho}^{3+}/\text{Pr}^{3+}$  共掺  $\text{AlF}_3$  基光纤的瓦级  $\sim 3 \mu\text{m}$  连续光纤激光。在  $\lambda \approx 1.15 \mu\text{m}$  的单模光纤激

光泵浦下,该光纤产生的最大激光输出功率为 1.02 W,斜率效率为 10.7%。此研究为更高功率中红外光纤激光器的研制奠定了基础。

#### 参考文献:

- [1] Zhu Xiushan, Jain R. Watt-level 100-nm tunable 3- $\mu\text{m}$  fiber laser[J]. *IEEE Photonics Technol Lett*, 2008, 20(2): 156-158.
- [2] Wei Chen, Zhu Xiushan, Wang F, et al. Graphene Q-switched 2.78  $\mu\text{m}$  Er<sup>3+</sup>-doped fluoride fiber laser[J]. *Opt Lett*, 2013, 38(17): 3233-3236.
- [3] Tsang Y H, El-Taher A E. Efficient lasing at near 3  $\mu\text{m}$  by a Dy-doped ZBLAN fiber laser pumped at  $\sim 1.1$   $\mu\text{m}$  by an Yb fiber laser[J]. *Laser Phys Lett*, 2011, 8(11): 818-822.
- [4] Sumiyoshi T, Sekita H, Arai T, et al. High-power continuous-wave 3- and 2- $\mu\text{m}$  cascade Ho<sup>3+</sup>: ZBLAN fiber laser and its medical applications[J]. *IEEE J Sel Top Quantum Electron*, 1999, 5(4): 936-943.
- [5] Pollnan M. The route toward a diode-pumped 1-W erbium 3- $\mu\text{m}$  fiber laser[J]. *IEEE J Quantum Electron*, 1997, 33(11): 1982-1990.
- [6] Li Jianfeng, Luo Hongyu, Wang Lele, et al. Tunable Fe<sup>2+</sup>: ZnSe passively Q-switched Ho<sup>3+</sup>-doped ZBLAN fiber laser around 3  $\mu\text{m}$ [J]. *Opt Express*, 2015, 23(17): 22362-22370.
- [7] Li Jianfeng, Hudson D D, Jackson S D. High-power diode-pumped fiber laser operating at 3  $\mu\text{m}$ [J]. *Opt Lett*, 2011, 36(18): 3642-3644.
- [8] Jackson S D, King T A, Pollnau M. Diode-pumped 1.7-W erbium 3- $\mu\text{m}$  fiber laser[J]. *Opt Lett*, 1999, 24(16): 1133-1135.
- [9] Hudson D D, Williams R J, Withford M J, et al. Single-frequency fiber laser operating at 2.9  $\mu\text{m}$ [J]. *Opt Lett*, 2013, 38(14): 2388-2390.
- [10] Frischat G H, Hueber B, Ramdohr B. Chemical stability of ZrF<sub>4</sub>- and AlF<sub>3</sub>-based heavy metal fluoride glasses in water[J]. *J Non-Cryst Solids*, 2001, 284(1/3): 105-109.
- [11] Wang Yuhu, Sawanobori N, Nagahama S. Formation of fluoride glasses based on AlF<sub>3</sub>-YF<sub>3</sub>-PbF<sub>2</sub> system[J]. *J Non-Cryst Solids*, 1991, 128(3): 322-325.
- [12] Majewski M R, Woodward R I, Jackson S D. Dysprosium-doped ZBLAN fiber laser tunable from 2.8  $\mu\text{m}$  to 3.4  $\mu\text{m}$ , pumped at 1.7  $\mu\text{m}$ [J]. *Opt Lett*, 2018, 43(5): 971-974.
- [13] Aydin Y O, Fortin V, Vallée R, et al. Towards power scaling of 2.8  $\mu\text{m}$  fiber lasers[J]. *Opt Lett*, 2018, 43(18): 4542-4545.
- [14] Crawford S, Hudson D D, Jackson S D. High-power broadly tunable 3  $\mu\text{m}$  fiber laser for the measurement of optical fiber loss[J]. *IEEE Photonics J*, 2015, 7: 1502309.
- [15] Jia S J, Jia Z X, Yao C F, et al. Ho<sup>3+</sup> doped fluoroaluminate glass fibers for 2.9  $\mu\text{m}$  lasing[J]. *Laser Phys*, 2018, 28: 015802.
- [16] Wang Shunbin, Zhang Jiquan, Xu Niannian, et al. 2.9  $\mu\text{m}$  lasing from a Ho<sup>3+</sup>/Pr<sup>3+</sup> co-doped AlF<sub>3</sub>-based glass fiber pumped by a 1150 nm laser[J]. *Opt Lett*, 2020, 45(5): 1216-1219.