

激光与光电子学进展

蓝光 LD 泵浦稀土掺杂可见光光纤激光器的研究进展

张料林^{1*}, 朱思豫¹, 黄嘉楠², 刘佳², 黄建辉¹, 游维雄²

¹江西理工大学稀土学院, 江西 赣州 341000;

²江西理工大学材料冶金化学学部, 江西 赣州 341000

摘要 位于人眼可见波段 380~780 nm 的光纤激光器在照明、显示、医疗、天文等领域得到了广泛应用。传统可见光光纤激光器主要利用稀土离子上转换实现可见光激光输出,效率较低。近年来,蓝光半导体激光器(LD)的发展迅速,采用蓝光 LD 泵浦稀土掺杂增益光纤实现可见光激光输出成为主流方式。介绍了蓝光 LD 泵浦可见光激光的产生方式和特点,总结了稀土离子掺杂可见光光纤激光器及其在倍频产生紫外光激光方面的近期研究进展,并对可见光光纤激光器的发展进行了展望。

关键词 材料; 可见光光纤激光器; 稀土掺杂增益光纤; 泵浦

中图分类号 O437 文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1516016

Research Progress on Blue LD-Pumped Rare Earths Doped Visible Fiber Lasers

Zhang Liaolin^{1*}, Zhu Siyu¹, Huang Jianan², Liu Jia², Huang Jianhui¹, You Weixiong²

¹College of Rare Earths, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, Jiangxi, China;

²Faculty of Materials Metallurgy and Chemistry, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, Jiangxi, China

Abstract Visible fiber lasers with visible wavelengths ranging from 380~780 nm have been widely used in lighting, display, medical treatment, astronomy, and other applications. Traditional visible light fiber lasers rely on rare earth ion upconversion to produce visible light laser output, and their efficiency is low. Blue light semiconductor lasers (LD)-pumped rare earth doped gain fibers have recently become the primary approach for generating visible light laser output due to the rapid development of blue light LD. This study introduces the generation methods, the characteristics of blue LD-pumped visible laser, and the recent research progress of blue LD-pumped rare earth ion doped visible fiber laser. Furthermore, it summarizes its application in frequency doubling ultraviolet lasers and the prospects for developing visible light fiber lasers.

Key words materials; visible fiber laser; rare earth doped gain fiber; pumping

1 引言

位于人眼可见波段 380~780 nm 范围的光纤激光器在激光显示、照明、医疗、天文、通信等领域具有重要的应用价值,近年来受到了人们的广泛关注^[1-2]。由于蓝光半导体激光器(LD)的发展比较缓慢,传统可见光光纤激光器主要采用近红外 LD 泵浦稀土离子掺杂增益光纤,通过稀土离子的上转换实现可见光激光输出。如采用近红外 LD 泵浦 Er³⁺、Tm³⁺、Ho³⁺、Pr³⁺等掺杂玻璃光纤,利用稀土离子上转换效应实现可见光激光输出^[3-7]。但稀土离子上转换发光属于反斯托克斯发

光现象,发光效率较低,且利用稀土离子上转换实现激光输出泵浦的阈值较高,泵浦过程的能量损失大,难以实现高效率、高功率的可见光激光输出。相比上转换可见光激光,采用蓝光泵浦稀土离子掺杂光纤实现可见光激光输出时泵浦波长与激光输出波长接近,泵浦效率高,且蓝光泵浦稀土离子产生可见光的过程属于下转换形式,激光泵浦阈值低,对基质材料的要求也较低。

Farries 等^[8]用氩离子蓝光激光器泵浦 Sm³⁺ 掺杂的石英光纤实现可见光激光输出,后续又有利用蓝光氩离子激光器泵浦稀土掺杂氟化物光纤实现其他颜色

收稿日期: 2022-05-05; 修回日期: 2022-06-20; 录用日期: 2022-06-21

基金项目: 江西省自然科学基金(20192BAB217015)、江西省教育厅科学技术研究项目(GJJ190483)

通信作者: *zhangliaolin@126.com

可见光激光的输出^[9-11]。但氩离子激光器的成本较高、体积大,一定程度上限制了蓝光泵浦可见光光纤激光器的发展。近年来,蓝光LD技术迅猛发展,商用蓝光LD的功率已达10 W量级,为掺杂稀土离子的固体激光器提供了高效泵浦源,成为实现可见光光纤激光输出的主流泵浦方式。目前利用蓝光LD泵浦能实现可见光激光输出的稀土离子主要有Pr³⁺、Tb³⁺、Dy³⁺、Ho³⁺等。本文介绍了蓝光LD泵浦稀土离子可见光光纤激光器常用的稀土离子,分析总结了激光的产生机理和研究进展,并对蓝光LD泵浦稀土掺杂可见光激光器的问题与发展前景进行了展望。

2 Pr³⁺掺杂可见光光纤激光器的研究

Pr³⁺是一种能通过受激辐射跃迁产生多种可见光波长发射的稀土离子。Adam等^[12]首次报道了掺Pr³⁺可见光激光器,Pr³⁺的能级结构如图1所示^[13]。其中,³P₀为亚稳态能级,寿命与基质的材料有关。Pr³⁺掺杂增益材料在可见光波段的发射峰主要有5个,分别对应³P₀→³H₄(482 nm)、³P₁→³H₅(523 nm)、³P₀→³H₆(605 nm)、³P₀→³F₂(637 nm)以及³P₀→³F₄(719 nm)能级跃迁。Pr³⁺最有效的激发谱线为³H₄→³P₂和³H₄→³P₀跃迁,分别对应442 nm和480 nm的位置,正好与商用GaN半导体激光器的输出波长相匹配。在442 nm激光泵浦下,粒子从基态能级³H₄受激吸收跃迁到激发态³P₂能级,由于³P₂能级与下能级¹I₆、³P₁和³P₀的能量间隔很小,粒子快速弛豫到³P₁和³P₀能级,通过辐射跃迁产生可见光荧光发射。可用于激光输出的能级跃迁主要有³P₀→³H₄(482 nm)、³P₁→³H₅(523 nm)、³P₀→³H₆(605 nm)、³P₀→³F₂(637 nm)以及³P₀→³F₄(719 nm)。

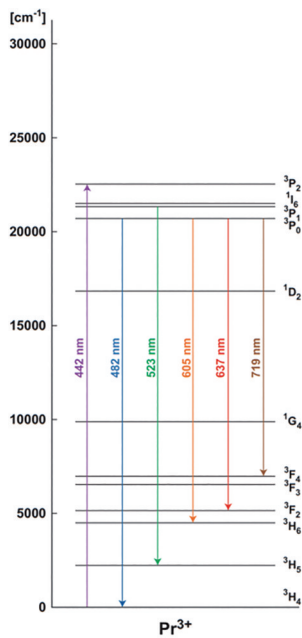


图1 Pr³⁺能级的结构图^[13]

Fig. 1 Structure diagram of Pr³⁺ energy level^[13]

由于基态能级³H₄存在较强的自吸收效应,很难实现482 nm激光输出。³P₁和³P₀能级的能量间隔很小,处于³P₁能级上的粒子会快速多声子弛豫到³P₀,很难在³P₁和³H₅能级之间形成粒子数反转,因此利用Pr³⁺掺杂难以实现蓝光及绿光激光输出。³P₀能级向³H₆、³F₂、³F₄能级跃迁可以形成稳定的四能级系统,常用来实现可见光激光输出。³P₀和¹D₂能级的能量间隔约为3500 cm⁻¹,基质材料声子能量太大会引起两个能级间的无辐射跃迁,从而降低³P₀能级的荧光量子效率,不易产生粒子数反转,难以实现激光输出。因此,目前实现可见光激光的输出主要集中在Pr³⁺掺杂较低声子能量的氟化物玻璃光纤中。

Smart等^[11]利用氩离子激光器作为泵浦源,采用Pr³⁺掺杂锆系氟化物(ZBLAN)光纤作为增益介质,在491、520、605、635、715 nm处实现激光输出,在635 nm和605 nm处,最大输出功率可分别达到250 mW和150 mW。Richter等^[14]利用980 nm LD倍频产生479.7 nm激光泵浦Pr³⁺掺杂ZBLAN光纤,光纤长度为20 cm,质量分数为10⁻³的Pr³⁺掺杂光纤芯径为椭圆形(长轴长度a=2.6 μm,短轴长度b=3 μm),635 nm激光输出泵浦阈值为146 mW,斜率效率为19.4%。质量分数为2×10⁻³的Pr³⁺掺杂光纤芯径为圆形,直径为6 μm,在635 nm激光输出泵浦阈值为50 mW,斜率效率提高到41.5%。为了在273 mW激光泵浦下实现94 mW红光激光输出,激光谐振腔采用一个高反射镜及光纤端面。泵源采用倍频LD会使整个激光装置不够紧凑,且倍频后泵源输出波长与Pr³⁺掺杂ZBLAN光纤在蓝光波段的最大吸收波长不匹配。此外,采用较高掺杂及较大的纤芯直径有利于提升激光的斜率效率。Fujimoto等^[15]利用442 nm的蓝光GaN LD泵浦Pr³⁺掺杂AlF₃-YF₃-PbF₃玻璃光纤,Pr³⁺掺杂的质量分数为3×10⁻³,光纤纤芯直径为6 μm,包层直径为200 μm。光纤在442 nm处的吸收峰为0.68 cm⁻¹,光纤长度为4 cm。采用442.6 nm GaN LD作为泵浦源,激光实验装置如图2所示。通过选择相应波长的腔镜,在488、523、605、635 nm处实现激光输出。其中:635 nm处的激光泵浦效率为18.1%,激光振荡泵浦阈

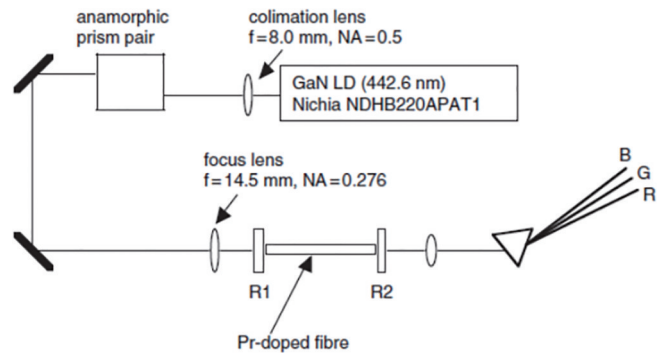


图2 激光实验装置示意图^[15]

Fig. 2 Schematic diagram of the laser experimental setup^[15]

值为 20.8 mW, 在 171.9 mW 激光泵浦下实现最大输出功率 25.4 mW; 在 605 nm 处激光的泵浦效率为 10%, 激光振荡泵浦阈值为 41.6 mW, 在 171.9 mW 激光泵浦下实现最大输出功率 12.5 mW。由于存在自吸收及热效应, 该光纤在 488 nm 及 523 nm 处的激光输出不稳定。相比倍频 LD 泵浦, 直接采用 GaN 蓝光 LD 泵浦使整个激光装置更加紧凑, 但由于输出腔镜反射率较高, 激光斜率效率较低。

Okamoto 等^[16]采用 Pr^{3+} 掺杂 ZBLAN 光纤, Pr^{3+} 的质量分数为 3×10^{-3} , 光纤纤芯直径为 3.8~3.9 μm , 包层直径为 125 μm , 光纤数值孔径 (NA) 为 0.22。在 448 nm 的 LD 泵浦下, 采用不同参数的谐振腔在 9 cm 长光纤中实现 479~497 nm、515~548 nm、597~737 nm、849~960 nm 范围可调激光输出, 但光纤芯径

较小及泵浦波长与光纤最大吸收波长不匹配导致该光纤的斜率效率及最大输出功率较低。Nakanishi 等^[17]将光纤芯径增大到 8 μm 并采用数值孔径为 0.154 的透镜进行耦合提高耦合效率, 利用 442 nm 的 GaN LD 泵浦长为 4 cm、 Pr^{3+} 质量分数为 3×10^{-3} 的 $\text{AlF}_3\text{-YF}_3\text{-PbF}_3$ 玻璃光纤, 在 638 nm 处实现 311.4 mW 的激光输出, 将激光器的斜率效率提高到 41.6%。Okamoto 等^[18]提出全光纤结构 Pr^{3+} 掺杂 ZBLAN 光纤激光器, 将两端涂有电介质薄膜的石英光纤拼接到掺 Pr^{3+} 的 ZBLAN 光纤两端, 然后将石英光纤加热到 ZBLAN 光纤软化点温度之上并将其与掺 Pr^{3+} 的 ZBLAN 光纤熔接在一起, 如图 3 所示。采用 448 nm 激光泵浦在 532 nm 处实现全光纤激光输出, 最大输出功率和斜率效率分别为 322 mW 和 53%。

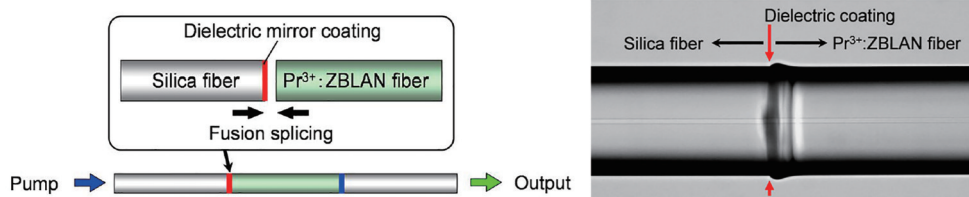


图 3 ZBLAN 光纤的熔接示意图。(a) 熔接示意图; (b) 熔接点的显微照片^[18]

Fig. 3 Schematic diagram of welding of ZBLAN fiber. (a) Schematic diagram of welding; (b) micrograph of welding point^[18]

Nakanishi 等^[19]采用 S 偏振 GaN 半导体激光和 P 偏振激光进行合束, 将泵浦功率提高到 2.91 W, 采用 Pr^{3+} 掺杂 $\text{AlF}_3\text{-YF}_3\text{-PbF}_3$ 光纤实现最大输出功率为 1.24 W 的激光输出, 光纤纤芯直径为 16 μm , 包层直径为 300 μm , Pr^{3+} 掺杂的质量分数为 3×10^{-3} , 激光输出波长为 638 nm, 激光斜率效率为 44.3%。Fujimoto 等^[20]采用与文献 [19] 相同的泵浦方式在 Pr^{3+} 掺杂 $\text{AlF}_3\text{-YF}_3\text{-PbF}_3$ 光纤中实现瓦级功率的蓝光、绿光及红光激光输出, 在 493.6、522.2、605.6、638.6 nm 处的最大输出功率分别达到 1.38、1.52、0.52、1.62 W, 斜率效率分别为 30%、33.8%、20.0%、35.7%。该光纤为单包层结构光纤, 若要保持较高的激光输出光束质量, 需保证纤芯直径较小, 且对泵浦光束质量的要求较高, 不利于泵浦耦合效率的提高。双包层结构光纤能利用较大的外包层截面有效提高耦合效率及纤芯吸收效率, 且对泵浦光束质量要求较低。Kajikawa 等^[21]设计并制备了 Pr^{3+} 掺杂 $\text{AlF}_3\text{-YF}_3\text{-PbF}_3$ 双包层光纤结构, 纤芯直径为 5.2 μm , 内包层直径为 14 μm , 外包层直径为 270 μm , 单模传输, 光束质量因子 M^2 为 1, 掺杂质量分数为 3×10^{-3} 。采用 10 cm 长的光纤实现单模 638 nm 激光输出, 最大输出功率为 251.7 mW, 斜率效率为 43.4%, 输出光束质量因子 M^2 为 1。Fujimoto 等^[22]将纤芯直径增加到 10 μm , 内包层直径为 14 μm , 利用蓝光 GaN LD 双向泵浦 Pr^{3+} 掺杂 $\text{AlF}_3\text{-YF}_3\text{-PbF}_3$ 双包层光纤, 将单模红光激光最大输出功率提高到 2 W, 斜率效率为 36.1%。Kifle 等^[23]采用更大内包层

直径 Pr^{3+} 掺杂 ZBLAN 光纤实现了单模 535 nm 激光输出, 最大输出功率超 1 W, 采用的双包层光纤纤芯直径为 5.5 μm , 内包层直径为 115~125 μm , 由于未对 Pr^{3+} 掺杂的质量分数及增益光纤长度进行优化, 激光斜率效率为 19.4%。Lord 等^[24]通过将双包层 SiO_2 光纤布拉格光栅 (FBG) 直接与 Pr^{3+} 掺杂 ZrF_4 双包层光纤进行熔接, 形成全光纤激光输出, 实现了最大功率达 2.3 W 的单模红光激光输出。由于双包层增益光纤的内包层损耗较高, 增益光纤长度较长, 导致该光纤的斜率效率仅为 14%。

Pr^{3+} 掺杂氟化物玻璃光纤除了应用于连续可见光激光输出外, 也被广泛应用于可见光脉冲激光输出。Kojou 等^[25]采用 444 nm GaN 的 LD 作为泵浦, Pr^{3+} 掺杂 $\text{AlF}_3\text{-YF}_3\text{-PbF}_3$ 光纤作为增益介质, 声光调制器进行腔内调 Q, 在 607 nm 处实现脉冲激光输出, 峰值功率为 105.6 W, 脉冲宽度为 20 ns, 重复频率为 8.3 kHz。Li 等^[26]采用一维碳纳米管 (SWNT) 作为 Q 开关元件进行腔内锁模, 实现了 Pr^{3+} -ZBLAN 全光纤可见光脉冲激光输出, 激光波长为 716 nm, 在 32.6~86.5 kHz 范围内的最大平均输出功率为 1.5 mW, 单脉冲能量最高可达 18.3 nJ。Kajikawa 等^[27]采用正色散补偿镜作为调 Q 锁模元器件, 用 442 nm GaN 的 LD 作为泵浦, Pr^{3+} 掺杂 $\text{AlF}_3\text{-YF}_3\text{-PbF}_3$ 双包层光纤作为增益介质, 在 638.6 nm 处实现脉冲宽度为 270 ns、重复频率为 107 kHz 的激光输出。Wu 等^[28]采用自调 Q 锁模方法, 用 444 nm 的 GaN LD 作为泵浦, Pr^{3+} -ZBLAN 光纤作

为增益介质,采用光纤自吸收作为锁模器件在 635 nm 实现了短脉冲的产生,最大平均输出功率为 22.5 mW,转换效率约 5%,重复频率为 25.8 MHz。Kajikawa 等^[29-31]用饱和吸收体石墨烯作为 Q 开关,在 Pr³⁺:DC-WPFGF 中实现了 636 nm 脉冲激光输出,输出功率为 325 mW,斜率效率为 22.1%,并证明了石墨烯是可见光范围内调 Q 脉冲振荡的可饱和吸收体,获得的激光器脉冲能量是目前可见光波段被动调 Q 激光器中的最大值,为 280 nJ,实验装置如图 4 所示。其中:R_{avg}为平均反射率;AR 为高反膜;*f*为焦距;Φ 为光斑直径。

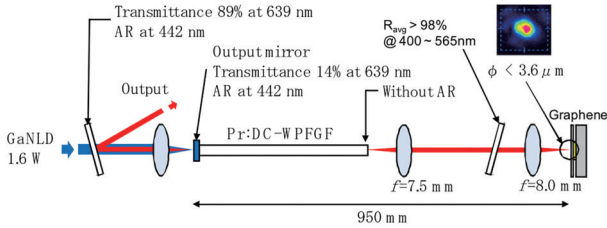


图 4 调 Q 脉冲激光振荡的实验装置图^[31]
Fig. 4 Experimental setup of Q-switched pulsed laser oscillation^[31]

Pr³⁺具有特殊的能级系统,在可见光波段能实现多波长激光输出,且激光能级系统普遍为四能级系统,在蓝光波段吸收截面大,激光泵浦阈值低,可实现高效率激光输出。虽然 Pr³⁺掺杂增益光纤目前已经实现了可见光连续及脉冲激光输出,且单模激光输出普遍超瓦级,但仍然存在一些问题。首先,蓝光 LD 的泵浦效率是影响光纤激光器输出功率及效率的关键,为了提高泵浦效率,需要较高的掺杂浓度,导致 Pr³⁺极易发生浓度猝灭效应,而大模场面积光纤有利于提高泵浦效率并进一步提高单模激光功率。其次,目前仅在较低声子能量的 Pr³⁺掺杂氟化物玻璃光纤中实现了可见光激光输出,采用的氟化物玻璃基质组成主要为 ZBLAN 和 AlF₃-YF₃-PbF₃ 玻璃。ZBLAN 玻璃易潮解、热稳定性和机械强度较差,在高功率系统中光纤中的热量会加剧这种水解反应,从而破坏系统的稳定性,且 ZBLAN 玻璃的熔点和损伤阈值较低。相比 ZBLAN 玻璃,AlF₃基玻璃具有更高的玻璃转变温度(约 370 °C)、更高的耐酸性和耐水性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。但 AlF₃基玻璃具有较大的析晶倾向,最大声子能量为 610 cm⁻¹,比 ZBLAN 玻璃基质高^[13]。因此,开发新型光纤基质材料对于进一步提高可见光光纤激光输出功率及斜率效率具有重要意义。

3 Tb³⁺掺杂可见光光纤激光器的研究

Tb³⁺常作为绿激光器的增益介质激活离子,其能级示意图如图 5 所示。可以发现,⁵D₄→⁷H_j(*J*=6、5、4、3)跃迁能获得四条主要发射谱线,分别位于 485、

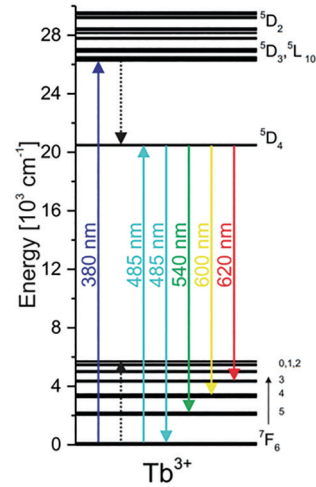


图 5 Tb³⁺的能级结构示意图^[33]
Fig. 5 Schematic diagram of Tb³⁺ energy level^[33]

540、600、620 nm 处。Tb³⁺的能级系统是典型的四能级系统,可通过蓝光泵浦将基态能级 ⁷F₆ 上的粒子泵浦到 ⁵D₃, 粒子无辐射跃迁至亚稳态能级 ⁵D₄ 上,最终在亚稳态能级 ⁵D₄ 和激光下能级 ⁷H_j(*J*=5、4、3)间发生受激辐射跃迁,实现激光输出。其中,⁵D₄→⁷F₅受激辐射跃迁产生的 540 nm 绿光最强,且光谱较窄。相比 Pr³⁺, Tb³⁺离子激光上能级 ⁵D₄ 与最近的下能级 ⁷H₀ 的能级间隔大,通过多声子弛豫非辐射跃迁的概率低,因此基质声子能量对其影响较小^[32-34]。Tb³⁺的基态能级 ⁷F₆ 与上能级 ⁷F₀ 的能级间隔小,在可见光波段没有与其能量相对应的激发态吸收能级对,不会出现浓度猝灭效应,可以实现高浓度掺杂^[35-36]。

Yamashita 等^[10, 37]用蓝光氩离子激光器泵浦掺 Tb³⁺氟化物光纤,首次成功实现了 542.8 nm 连续激光器的工作,最大输出功率为 1.6 mW,斜率效率为 8.4%,如图 6 所示。激光输出功率及斜率效率较低的原因是 Tb³⁺掺杂氟化物光纤在蓝光波段吸收较低,难

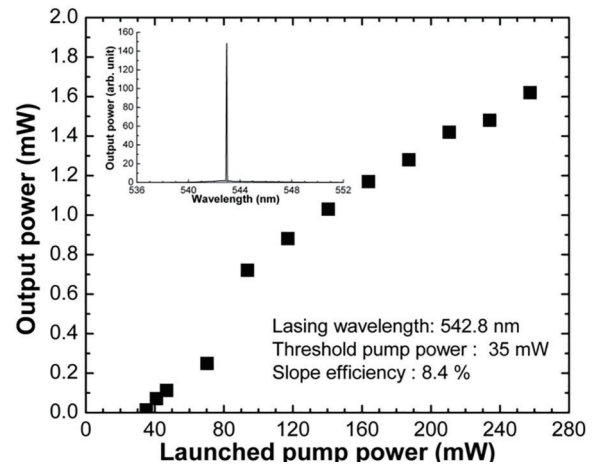


图 6 Tb³⁺:氟化物光纤激光的输出特性和光谱^[37]
Fig. 6 Output characteristics and spectrum of Tb³⁺:fluoride fiber laser^[37]

以实现高效率泵浦,且 Tb³⁺ 掺杂氟化物光纤在 488 nm 激光泵浦过程中,激发态能级 ⁵D₄ 存在强烈的激发态能级吸收及合作上转换过程,如图 7 所示。激发态吸收主要由电子从 ⁵D₄ 能级到 4f⁷5d 能级跃迁引起,4f⁷5d 能级的能量越高,越有利于降低激发态吸收和合作上转换的影响。4f⁷5d 能级的位置受基质材料的影响较大,Dorenbos^[38] 的研究也表明,氟化物基质材料在一定程度上有利于降低 4f⁷5d 能级。

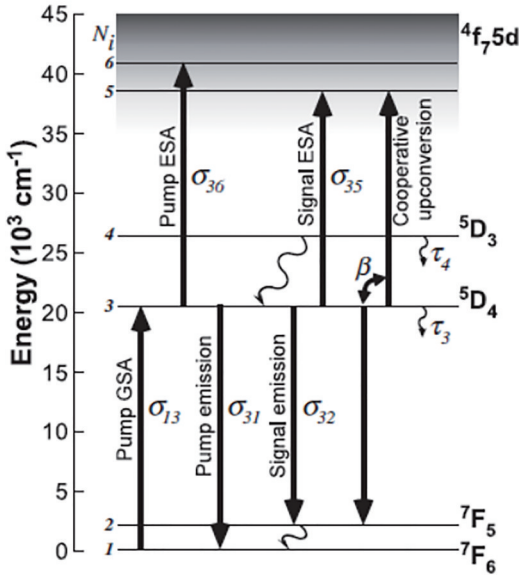


图 7 Tb³⁺ 掺杂氟化物光纤的泵浦示意图^[10]

Fig. 7 Schematic diagram of pumping of Tb³⁺ doped fluoride fiber^[10]

关于蓝光 LD 泵浦 Tb³⁺ 掺杂的光纤激光器报道不多,且功率及效率较低,原因是 Tb³⁺ 在蓝光波段吸收很弱,激光泵浦过程中存在激发态吸收及合作上转换等过程。通过共掺在蓝光波段吸收较强的敏化离子,将泵浦光能量转移到 Tb³⁺ 有望实现高效率的泵浦,通过设计新型光纤基质组成,降低 4f⁷5d 能级有望抑制泵浦过程中的激发态吸收及合作上转换过程,从而提高光纤激光输出功率及效率。

4 Dy³⁺ 掺杂可见光光纤激光器的研究

Dy³⁺ 掺杂增益介质常用于实现黄色激光输出,其能级结构如图 8 所示^[13]。Dy³⁺ 的 ⁴F_{9/2} 能级为亚稳态能级,寿命约 1 ms,五条主要的发射谱线分别为 ⁴F_{9/2} → ⁶H_{15/2} (482 nm)、⁴F_{9/2} → ⁶H_{13/2} (575 nm)、⁴F_{9/2} → ⁶H_{11/2} (664 nm)、⁴F_{9/2} → ⁶H_{9/2} + ⁶F_{11/2} (745 nm) 和 ⁴F_{9/2} → ⁶F_{9/2} + ⁶H_{7/2} (840 nm)。其中:⁴F_{9/2} → ⁶H_{13/2} 跃迁产生的 575 nm 激光常用来实现黄色激光输出;664 nm 和 745 nm 发射由于发射截面较低,很少用于实现激光输出。Dy³⁺ 的能级结构较复杂,基态能级 ⁶H_{15/2} 具有较大的重吸收,且 ⁶H_{15/2} 基态能级到 ⁶H_{9/2}、⁶H_{7/2} 及 ⁶H_{5/2} 的能级差与激发态 ⁴F_{9/2} 到 ⁶F_{5/2}、⁶F_{11/2} 及 ⁶H_{5/2} 的能级差相匹配,相邻 Dy³⁺ 间

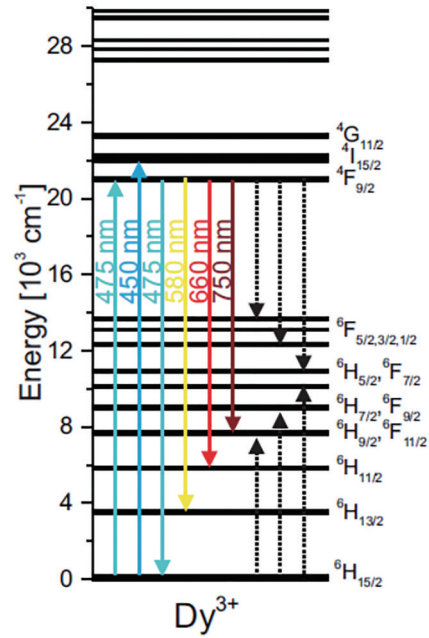


图 8 Dy³⁺ 能级的结构示意图^[13]

Fig. 8 Schematic diagram of Dy³⁺ energy level^[13]

容易发生交叉弛豫,最大掺杂浓度(格位浓度)在 10²¹ cm⁻³ 左右,在很多基质材料中的质量分数对应低于 10%^[39]。Dy³⁺ 的 4f⁶5d 能级较高,与激发态的能级间隔较大,⁴F_{9/2} 能级激发态的吸收发生概率较低,因此基质材料对于 Dy³⁺ 黄光发射的影响较小^[33]。

Limpert 等^[40] 使用 457 nm 的氩离子激光器泵浦 Dy³⁺:ZBLAN 光纤实现了 575 nm 的黄光激光输出,但输出功率仅为 10 mW,斜率效率为 1.5%。原因是 Dy³⁺ 的掺杂质量分数过低,仅为 10⁻³,较低的掺杂质量分数以及 Dy³⁺ 在蓝光波段吸收较小导致用较长的增益光纤才能实现黄光激光输出,这会导致激光损耗增加、功率及效率较低。Fujimoto 等^[41] 用 398.8 nm GaN LD 泵浦高 Dy³⁺ (质量分数为 10⁻²) 掺杂的氟化铝光纤,在 575 nm 处实现光纤激光输出,最大输出功率为 10.3 mW,斜率效率为 17.1%,由于掺杂质量分数较高,用 40 mm 长的增益光纤即可实现激光起振和输出,其斜率效率相比长增益光纤提高了 11 倍。由于 Dy³⁺ 的吸收效率较低,激光输出功率仅为十几毫瓦。Wang 等^[42] 采用 447 nm LD 泵浦 Dy³⁺:ZBLAN 掺杂光纤实现黄光激光输出,波长可从 568.7 nm 连续调谐至 581.9 nm,覆盖了黄色光谱范围的一半以上,最大输出功率为 142 mW,斜率效率达 34.9%。Zou 等^[43] 采用 450 nm 的 LD 泵浦 Dy:ZBLAN 光纤首次实现了瓦级的高功率黄光激光输出,在 575 nm 处的最大输出功率为 1.12 W,斜率效率为 33.6%,如图 9 所示。

Majewski 等^[44] 采用 445 nm 的蓝光 LD 泵浦 Dy³⁺ (质量分数为 3 × 10⁻³) 掺杂铝硅酸盐玻璃光纤,在 581 nm 处实现 3 mW 激光输出,激光斜率效率为 1.8%,证明了在具有高声子能量的基质中(硅酸盐)实

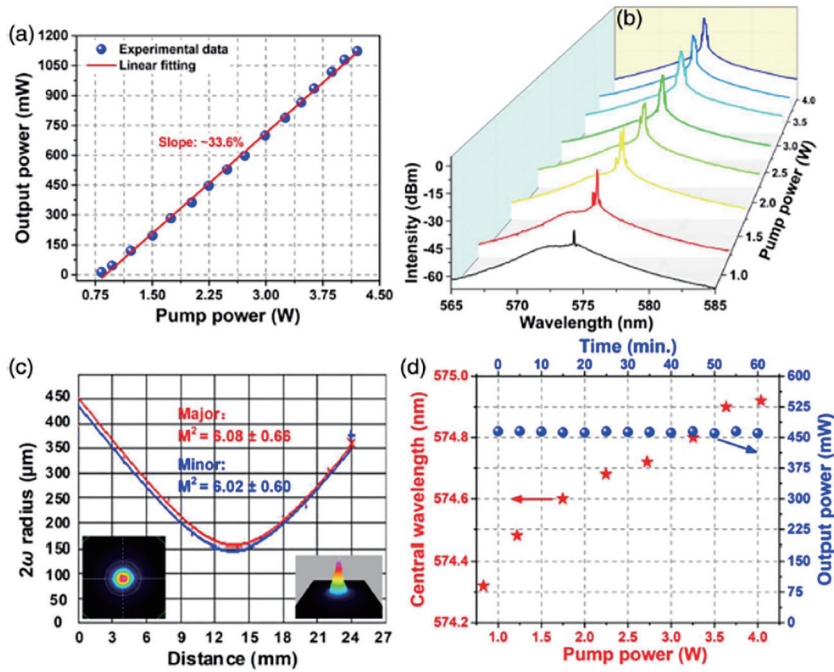


图 9 Dy:ZBLAN 光纤的性能。(a)斜率效率;(b)激光光谱;(c)光强分布;(d)激光中心波长随泵浦功率及输出功率随时间的变化曲线^[43]

Fig. 9 Performance of Dy:ZBLAN fiber. (a) Slope efficiency; (b) laser spectrum; (c) intensity distribution; (d) curve of laser center wavelength versus pump power and output power versus time^[43]

现 Dy³⁺ 掺杂可见光光纤激光器是可行的。造成激光最大输出功率及效率较低的原因是约 40% 的泵浦光能量被散射且光纤在激光输出波段的损耗较高。

Dy³⁺ 在蓝光波段的吸收较弱, 只能通过增加掺杂量及光纤长度提高泵浦效率, 但 Dy³⁺ 的能级结构较复杂, 在高浓度掺杂情况下, 极易发生浓度猝灭效应, 导致激光上能级寿命急剧衰减, 而增加光纤长度容易导致斜率效率下降。采用在蓝光波段吸收较强的其他敏化离子共掺有望实现较高效率黄光激光输出, 采用大模场面积光纤增加光纤纤芯也有利于提高激光输出效率。此外, 降低光纤的本征损耗也有助于提高光纤激光效率及功率。

5 Ho³⁺ 掺杂可见光光纤激光器的研究

Ho³⁺ 除了实现 2 μm 左右的近红外激光输出外^[45-48], 也常用于实现可见光激光输出。在可见光区域, Ho³⁺ 发射谱线主要来源于 ⁵F₄, ⁵S₂ → ⁵I₈ 和 ⁵F₄, ⁵S₂ → ⁵I₇ 跃迁, 发射波长分别为 540 nm 和 750 nm, 其能级结构如图 10 所示^[49]。Ho³⁺ 在 450 nm 左右的吸收截面约为 10⁻²⁰ cm²^[33], 与商用蓝光 LD 的波长相匹配。采用 450 nm 半导体激光器泵浦时, 粒子受激辐射跃迁到 ⁵F₃ 能级, 处于 ⁵F₃ 能级上的粒子无辐射弛豫到 ⁵F₄, ⁵S₂ 能级上, 然后通过受激辐射跃迁产生可见光, 进而实现激光输出。

Allain 等^[6] 采用 647.1 nm 氩离子激光器泵浦 Ho³⁺ (质量分数为 1.2 × 10⁻³) 掺杂 ZBLAN 光纤, 光纤纤芯和包层直径分别为 11 μm 和 125 μm, 在 540、553、

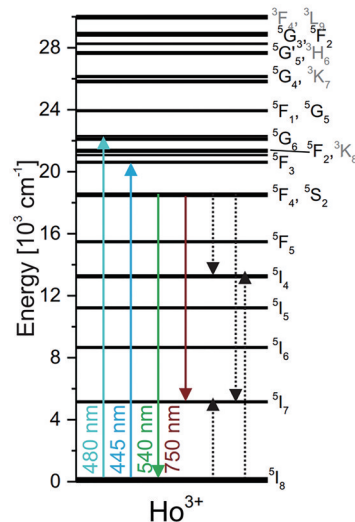


图 10 Ho³⁺ 能级的结构示意图^[33]

Fig. 10 Schematic diagram of the Ho³⁺ energy level^[33]

750 nm 处实现激光输出。其中: 540 nm 和 553 nm 属于上转换激光输出, 最大输出功率达到 10 mW; 750 nm 属于下转换激光输出, 输出功率为 2 mW。Li 等^[50] 采用 450 nm 蓝光激光泵浦 Ho³⁺ (质量分数为 5 × 10⁻³) 掺杂 ZBLAN 光纤, 纤芯直径为 7.5 μm, 包层直径为 125 μm, 通过调节泵浦功率在 543~550 nm 及 754~758 nm 范围内实现可调谐激光输出, 如图 11 所示。可以发现: 在 543~550 nm 范围内激光的输出功率超过 150 mW, 斜率效率为 36.4%; 在 754~758 nm 范围内激光输出的最大功率为 16 mW, 斜率效率为 3.9%。

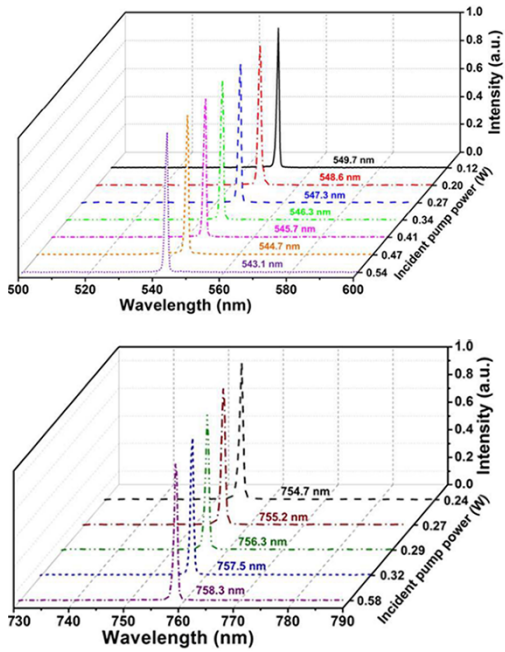


图 11 Ho^{3+} 掺杂 ZBLAN 光纤激光器的可调谐激光输出光谱^[50]
Fig. 11 Tunable laser output spectrum of Ho^{3+} doped ZBLAN fiber laser^[50]

通过自调 Q 锁模: 在 543~550 nm 范围内实现波长可调谐的脉冲激光输出, 脉冲重复频率范围为 80.19~97.66 kHz, 最窄脉冲宽度为 605 ns, 最大脉冲能量为 196 nJ; 在 754~758 nm 范围内, 实现连续波的输出功率为 16 mW, 脉冲输出重复频率在 59.88~100.5 kHz 范围内可调, 最窄脉冲宽度为 2.02 μs , 最大脉冲能量为 58 nJ^[50]。但深红色激光输出性能并没有获得太大改善。

原因是蓝光 LD 耦合后的泵浦功率有限, 且激光下能级 $^5\text{I}_7$ 的荧光寿命大于 10 ms, 导致粒子数反转难度增加^[51]。Li 等采用线性激光腔, 利用蓝光半导体激光直接泵浦 Ho^{3+} 掺杂 ZBLAN 光纤, 在 543.9 nm 处实现 300 mW 激光输出, 激光斜率效率为 59.3%。通过调整增益光纤长度在 536~549 nm 范围内实现 100 mW 的可调激光输出^[52]。

Ji 等^[53] 采用 532 nm 绿光激光作为泵浦源, 减少了非辐射跃迁产生的能量损失, 同时可以有效增强 $^5\text{I}_7$ 能级的激发态吸收概率, 降低激光下能级 $^5\text{I}_7$ 的寿命, 提高激光输出功率及效率, 泵浦过程如图 12 所示。采用 532 nm 作为泵浦源, 在 Ho^{3+} 掺杂 ZBLAN 光纤中实现 1.64 W 的 752.4 nm 深红色激光输出, 激光斜率效率为 50.2%, 激光输出功率、激光光谱、激光光斑强度分布及激光输出功率随时间的变化曲线如图 13 所示。

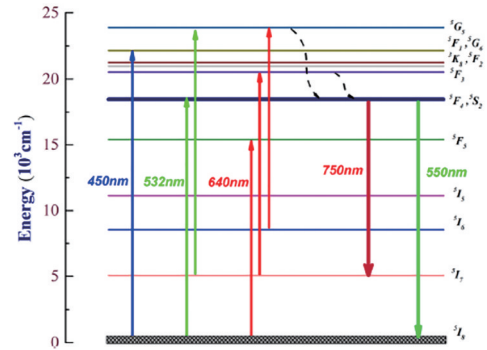


图 12 532 nm 绿光泵浦 Ho^{3+} 实现 750 nm 激光能级的示意图^[53]
Fig. 12 Schematic diagram of 532 nm green light pumping Ho^{3+} to realize 750 nm laser energy level^[53]

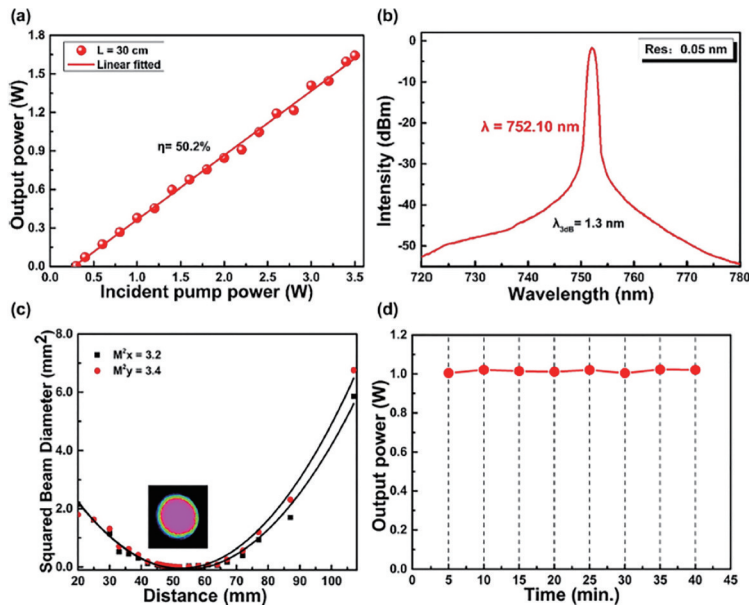


图 13 532 nm 激光泵浦 Ho^{3+} 掺杂 ZBLAN 光纤的性能。(a) 输出功率; (b) 激光光谱; (c) 激光光斑强度分布; (d) 激光输出功率随时间的变化曲线^[53]

Fig. 13 Performance of Ho^{3+} doped ZBLAN fiber pumped by 532 nm laser. (a) Output power; (b) laser spectrum; (c) intensity distribution of laser spot; (d) variation curve of laser output power with time^[53]

6 可见光光纤激光器用于倍频紫外激光输出的研究

位于日盲光谱(波长 $\lambda \leq 280$ nm)波段范围的深紫外激光在科学研究及军事领域具有重要的应用价值,广泛应用于光通信、光谱分析、材料加工及医疗等领域^[54-58]。目前,深紫外激光一般为准分子激光器,如实现 280 nm 激光的 Kr-F 准分子激光器,但准分子激光器的体积大、价格昂贵且维护困难^[59-60]。通过近红外光纤激光器进行四倍频可以实现深紫外激光输出,提高激光稳定性且能使激光系统结构简单,如利用 Yb^{3+} 掺杂近红外光纤激光进行四倍频实现 253.7 nm 深紫外激光输出^[61]。倍频过程属于非线性过程,在倍频过程中激光能量会有一定的损失,输出激光效率随倍频次数的增大呈指数下降。可见光光纤激光器只需进行二倍频过程就可以实现深紫外激光输出,从而大大提高倍频效率和深紫外激光输出功率。Fujimoto 等^[62]采用双包层 Pr^{3+} 掺杂氟化铝基玻璃光纤以及简单的二倍频在紫外波段实现 319 nm 波长激光输出,激光最大输出功率达 515 mW,相对于 InGaN-LD 泵浦源,319 nm 激光的斜率效率为 11%,如图 14 所示。

Li 等^[63]采用 10 cm 长的 Ho^{3+} 掺杂 ZBLAN 光纤作为增益介质,BBO 晶体作为倍频元件,450 nm 蓝光 LD 作为泵浦源,实验装置如图 15 所示。通过简单的二倍频实现深紫外激光输出,激光输出波长为 272.6 nm,激光输出功率为 1.36 mW,相对于绿光激光,其倍频效率为 0.53%。通过调整闪耀光栅可以使深紫外激光波长在 269.5~275.4 nm 范围可调,如图 16 所示。

目前,采用可见光光纤激光器进行倍频产生紫外光激光输出的研究进展缓慢,紫外光激光输出功率及

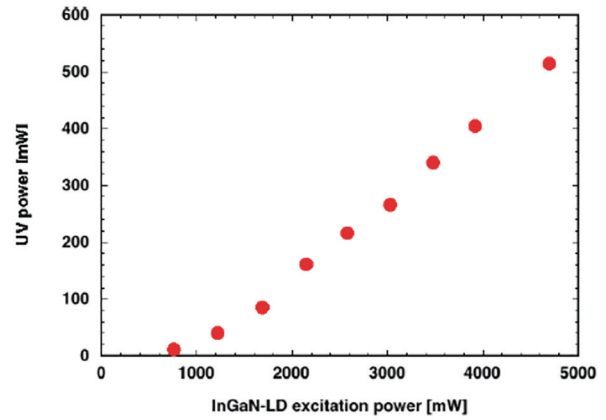


图 14 319 nm 激光输出功率随 InGaN-LD 注入功率的变化曲线^[62]

Fig. 14 Variation curve of 319 nm laser output power with InGaN-LD injection power^[62]

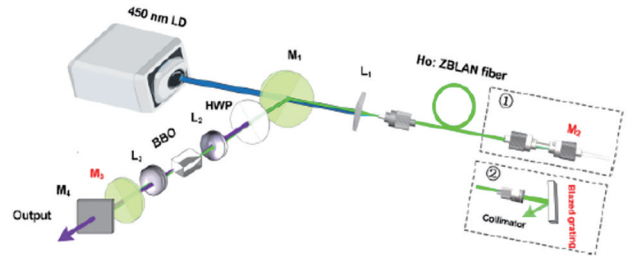


图 15 倍频深紫外激光装置示意图^[63]

Fig. 15 Schematic diagram of the frequency-doubling deep-ultraviolet laser device^[63]

倍频效率较低,主要原因在于可见光光纤激光输出功率较低,脉冲可见光激光的脉冲宽度较宽,峰值功率过低。如果能将可见光激光输出功率提高到 10 W 以上,脉冲可见光激光的脉冲宽度压缩到飞秒量级,对于发展高功率紫外激光具有重要意义。

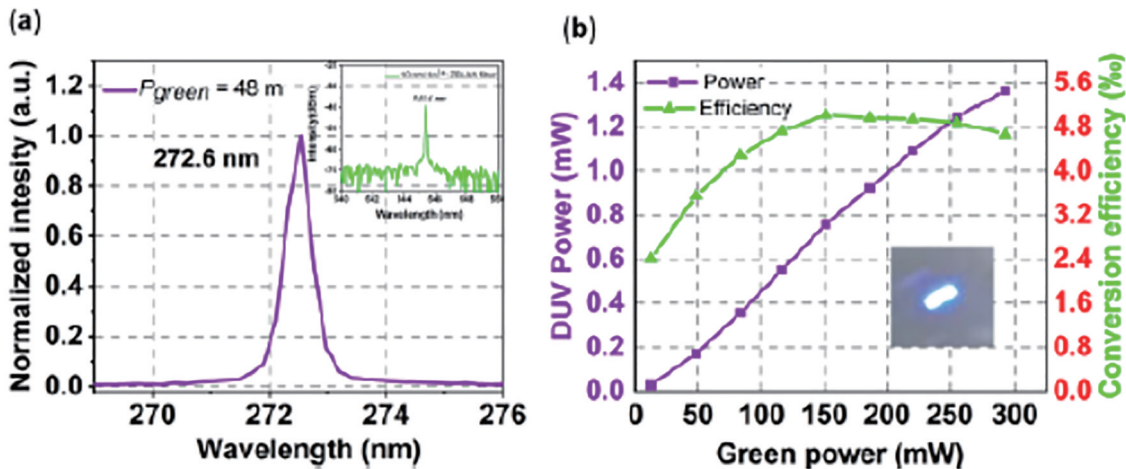


图 16 倍频深紫外激光的性能。(a)光谱;(b)输出功率及斜率效率^[63]

Fig. 16 Performance of frequency-doubled deep-ultraviolet laser. (a) Spectrum; (b) output power and slope efficiency^[63]

7 结 论

综上所述,稀土离子中, Pr^{3+} 输出的可见光发展最快,在蓝光 LD 泵浦下能实现蓝光、绿光、橙光、红光以及深红光激光高效输出,且能在峰值波长周围较宽的波长范围内调谐激光输出波长。但 Pr^{3+} 在玻璃基质中极易发生浓度猝灭,难以实现高浓度掺杂。相比于 Pr^{3+} , Ho^{3+} 可以实现较高浓度的掺杂,且在蓝光波段吸收截面较大,可用于绿光及深红光激光输出,但目前绿光激光的输出功率仍有待提高。在深红光波段激光下能级 $^5\text{I}_1$ 的荧光寿命大于 10 ms,导致粒子数反转难度增加,直接采用蓝光泵浦实现激光输出效率较低,采用绿光激光泵浦可以有效提高深红光激光输出功率及效率。掺 Dy^{3+} 光纤激光器在黄色光谱波段 $^4\text{F}_{9/2} \rightarrow ^6\text{H}_{13/2}$ 表现出较强的荧光发射^[64-65],弥补了大多数稀土离子的掺杂基质发射光谱不能覆盖黄色波长范围的空缺,但 Dy^{3+} 掺杂光纤在蓝光波段吸收截面小,难以实现有效泵浦,利用敏化离子进行敏化有望提升泵浦效率,但如何选择合适的敏化离子还有待研究。 Tb^{3+} 在玻璃基质中浓度猝灭效应不明显,可以实现高浓度掺杂,但其在蓝光波段吸收较小,导致激光泵浦效率较低,通过高掺杂浓度和增加增益光纤长度有望提升激光斜率效率,但增加光纤长度会导致损耗增加,因此降低光纤损耗对于实现高效率激光输出极其重要。

目前蓝光泵浦可见光光纤激光器发展迅速,在 Pr^{3+} 及 Ho^{3+} 掺杂增益光纤中均能实现瓦级功率激光输出,但增益光纤基质材料主要为氟化物玻璃。氟化物玻璃的转变温度较低(约为 260 °C),抗热性差、损伤阈值较低,且氟化物光纤的制备工艺复杂、成本较高。因此,研究开发适用于可见光波段的新颖增益玻璃光纤,如铝酸盐、硅酸盐、锆酸盐、镱酸盐,对于发展高功率高效率可见光激光器具有重要意义。

参 考 文 献

- [1] 黎黎,张悦,李萌茜,等.激光技术在眼科的应用现状与进展[J].中国激光,2022,49(5):0507103.
Li L, Zhang Y, Li M X, et al. Current application and progress of laser technology in ophthalmology[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(5): 0507103.
- [2] 张灵浩,夏克贵,马兴华,等.激光光强波动无关的 248 nm 退偏器检测方法[J].中国激光,2022,49(4):0404003.
Zhang L H, Xia K G, Ma X H, et al. Detection method for 248 nm depolarizer independent of laser intensity fluctuation[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(4): 0404003.
- [3] Grubb S G, Bennett K W, Cannon R S, et al. CW room-temperature blue upconversion fibre laser[J]. Electronics Letters, 1992, 28(13): 1243-1244.
- [4] Xie P, Gosnell T R. Room-temperature upconversion fiber laser tunable in the red, orange, green, and blue

spectral regions[J]. Optics Letters, 1995, 20(9): 1014-1016.

- [5] Sandrock T, Scheife H, Heumann E, et al. High-power continuous-wave upconversion fiber laser at room temperature[J]. Optics Letters, 1997, 22(11): 808-810.
- [6] Allain J Y, Monerie M, Poignant H. Room temperature CW tunable green upconversion holmium fibre laser[J]. Electronics Letters, 1990, 26(4): 261-263.
- [7] Booth I J, MacKechnie C J, Ventrudo B F. Operation of diode laser pumped Tm^{3+} : ZBLAN upconversion fiber laser at 482 nm[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1996, 32(1): 118-123.
- [8] Farries M C, Morkel P R, Townsend J E. Samarium³⁺-doped glass laser operating at 651 nm[J]. Electronics Letters, 1988, 24(11): 709-711.
- [9] Farries M C, Morkel P R, Townsend J E. Spectroscopic and lasing characteristics of samarium doped glass fibre [J]. IEE Proceedings J (Optoelectronics), 1990, 137(5): 318-322.
- [10] Yamashita T, Ohishi Y. Amplification and lasing characteristics of Tb^{3+} -doped fluoride fiber in the 0.54 μm band[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2007, 46(41): L991-L993.
- [11] Smart R G, Carter J N, Tropper A C, et al. CW room temperature operation of praseodymium-doped fluorozirconate glass fibre lasers in the blue-green, green and red spectral regions[J]. Optics Communications, 1991, 86(3/4): 333-340.
- [12] Adam J L, Sibley W A, Gabbe D R. Optical absorption and emission of $\text{LiYF}_4:\text{Pr}^{3+}$ [J]. Journal of Luminescence, 1985, 33(4): 391-407.
- [13] Fujimoto Y, Nakanishi J, Yamada T, et al. Visible fiber lasers excited by GaN laser diodes[J]. Progress in Quantum Electronics, 2013, 37(4): 185-214.
- [14] Richter A, Scheife H, Heumann E, et al. Semiconductor laser pumping of continuous-wave Pr^{3+} doped ZBLAN fibre laser[J]. Electronics Letters, 2005, 41(14): 794-795.
- [15] Fujimoto Y, Ishii O, Yamazaki M. Multi-colour laser oscillation in Pr^{3+} -doped fluoro-aluminate glass fibre pumped by 442.6 nm GaN-semiconductor laser[J]. Electronics Letters, 2009, 45(25): 1301-1302.
- [16] Okamoto H, Kasuga K, Hara I, et al. Visible-NIR tunable Pr^{3+} -doped fiber laser pumped by a GaN laser diode[J]. Optics Express, 2009, 17(22): 20227-20232.
- [17] Nakanishi J, Yamada T, Fujimoto Y, et al. High-power red laser oscillation of 311.4 mW in Pr^{3+} -doped waterproof fluoro-aluminate glass fibre excited by GaN laser diode[J]. Electronics Letters, 2010, 46(18): 1285-1286.
- [18] Okamoto H, Kasuga K, Kubota Y. Efficient 521 nm all-fiber laser: splicing Pr^{3+} -doped ZBLAN fiber to end-coated silica fiber[J]. Optics Letters, 2011, 36(8): 1470-1472.
- [19] Nakanishi J, Yamada T, Fujitomo Y, et al. Watt-order output power at 638 nm in wavelength by direct oscillation with Pr-doped fiber laser[C]//2012 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO), May 6-11, 2012, San Jose, CA, USA. Wahington, D.C.: OSA, 2012:

- CM2N.4.
- [20] Fujitomo Y, Murakami M, Nakanishi J, et al. Visible lasers in waterproof fluoro-aluminate glass fibers excited by GaN laser diodes[C]//Advanced Solid State Lasers 2013, October 27-November 1, 2013, Paris, France. Wahington, D.C.: OSA, 2013: AM2A.2.
- [21] Kajikawa S, Terao T, Yoshida M, et al. Single-mode visible laser oscillation in Pr-doped double-clad structured waterproof fluoro-aluminate glass fibre[J]. Electronics Letters, 2016, 52(10): 861-863.
- [22] Fujimoto Y, Nakahara M, Binun P, et al. 2 W single-mode visible laser oscillation in Pr-doped double-clad structured waterproof fluoro-aluminate glass fiber[C]//2019 Conference on Lasers and Electro-Optics Europe & European Quantum Electronics Conference (CLEO/Europe-EQEC), June 23-27, 2019, Munich, Germany. New York: IEEE Press, 2019: 19538874.
- [23] Kifle E, Starecki F, Loiko P, et al. Watt-level visible laser in double-clad Pr³⁺-doped fluoride fiber pumped by a GaN diode[J]. Optics Letters, 2021, 46(1): 74-77.
- [24] Lord M P, Fortin V, Maes F, et al. 2.3 W monolithic fiber laser operating in the visible[J]. Optics Letters, 2021, 46(10): 2392-2395.
- [25] Kojou J, Watanabe Y, Agrawal P, et al. Wavelength tunable Q-switch laser in visible region with Pr³⁺-doped fluoride-glass fiber pumped by GaN diode laser[J]. Optics Communications, 2013, 290: 136-140.
- [26] Li W S, Du T J, Lan J L, et al. 716 nm deep-red passively Q-switched Pr: ZBLAN all-fiber laser using a carbon-nanotube saturable absorber[J]. Optics Letters, 2017, 42(4): 671-674.
- [27] Kajikawa S, Murakami T, Yoshida M, et al. Visible Q-switched pulse generation in Pr-doped double-clad structured waterproof fluoro-aluminate glass fiber[C]//2017 Conference on Lasers and Electro-Optics Europe & European Quantum Electronics Conference (CLEO/Europe-EQEC), June 25-29, 2017, Munich, Germany. New York: IEEE Press, 2017: 17333054.
- [28] Wu D D, Quan C J, Guo Z R, et al. Self Q-switched mode-locking in compact red Pr³⁺-doped ZBLAN fiber laser[J]. Journal of Optics, 2018, 20(8): 085501.
- [29] Fujimoto Y, Suzuki T, Ochante R A M, et al. Generation of orange pulse laser in waterproof fluoride glass fibre with graphene thin film[J]. Electronics Letters, 2014, 50(20): 1470-1472.
- [30] Zhong Y L, Cai Z P, Wu D D, et al. Passively Q-switched red Pr³⁺-doped fiber laser with graphene-oxide saturable absorber[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2016, 28(16): 1755-1758.
- [31] Kajikawa S, Yoshida M, Ishii O, et al. Visible Q-switched pulse laser oscillation in Pr-doped double-clad structured waterproof fluoride glass fiber with graphene [J]. Optics Communications, 2018, 424: 13-16.
- [32] Marzahl D T, Reichert F, Metz P W, et al. Efficient laser operation of diode-pumped Pr³⁺, Mg²⁺: SrAl₁₂O₁₉ [J]. Applied Physics B, 2014, 116(1): 109-113.
- [33] Kränkel C, Marzahl D T, Moglia F, et al. Out of the blue: semiconductor laser pumped visible rare-earth doped lasers[J]. Laser & Photonics Reviews, 2016, 10(4): 548-568.
- [34] Metz P W, Marzahl D T, Majid A, et al. Efficient continuous wave laser operation of Tb³⁺-doped fluoride crystals in the green and yellow spectral regions[J]. Laser & Photonics Reviews, 2016, 10(2): 335-344.
- [35] Chen H, Uehara H, Kawase H, et al. Efficient visible laser operation of Tb: LiYF₄ and LiTbF₄[J]. Optics Express, 2020, 28(8): 10951-10959.
- [36] Zhang L L, Peng M Y, Dong G P, et al. An investigation of the optical properties of Tb³⁺-doped phosphate glasses for green fiber laser[J]. Optical Materials, 2012, 34(7): 1202-1207.
- [37] Yamashita T, Qin G S, Suzuki T, et al. A new green fiber laser using terbium-doped fluoride fiber[C]//OFC/NFOEC 2008-2008 Conference on Optical Fiber Communication/National Fiber Optic Engineers Conference, February 24-28, 2008, San Diego, CA, USA. New York: IEEE Press, 2008: 10054033.
- [38] Dorenbos P. The 5d level positions of the trivalent lanthanides in inorganic compounds[J]. Journal of Luminescence, 2000, 91(3/4): 155-176.
- [39] Shaw L B, Cole B, Thielen P A, et al. Mid-wave IR and long-wave IR laser potential of rare-earth doped chalcogenide glass fiber[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2001, 37(9): 1127-1137.
- [40] Limpert J, Zellmer H, Riedel P, et al. Laser oscillation in yellow and blue spectral range in Dy³⁺: ZBLAN[J]. Electronics Letters, 2000, 36(16): 1386-1387.
- [41] Fujimoto Y, Ishii O, Yamazaki M. Yellow laser oscillation in Dy³⁺-doped waterproof fluoro-aluminate glass fibre pumped by 398.8 nm GaN laser diodes[J]. Electronics Letters, 2010, 46(8): 586-587.
- [42] Wang H J, Zou J H, Dong C C, et al. High-efficiency, yellow-light Dy³⁺-doped fiber laser with wavelength tuning from 568.7 to 581.9 nm[J]. Optics Letters, 2019, 44(17): 4423-4426.
- [43] Zou J H, Li T R, Dou Y B, et al. Direct generation of watt-level yellow Dy³⁺-doped fiber laser[J]. Photonics Research, 2021, 9(4): 446-451.
- [44] Majewski M R, Jackson S D. Diode pumped silicate fiber for visible laser emission[EB/OL]. (2021-10-31)[2022-01-02]. <https://arxiv.org/abs/2110.06515>.
- [45] Ghisler C, Lüthy W, Weber H P, et al. A Tm³⁺ sensitized Ho³⁺ silica fibre laser at 2.04 μm pumped at 809 nm[J]. Optics Communications, 1994, 109(3/4): 279-281.
- [46] Wu J F, Yao Z D, Zong J, et al. Single-frequency fiber laser at 2.05 μm based on Ho-doped germanate glass fiber [J]. Proceedings of SPIE, 2009, 7195: 358-364.
- [47] Richards B, Jha A, Tsang Y, et al. Tellurite glass lasers operating close to 2 μm[J]. Laser Physics Letters, 2010, 7(3): 177-193.
- [48] Jackson S D, Bugge F, Erbert G. Directly diode-pumped holmium fiber lasers[J]. Optics Letters, 2007, 32(17): 2496-2498.

- [49] Jenssen H, Castleberry D, Gabbe D, et al. Stimulated emission at 5445 Å in Tb³⁺:YLF[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1973, 9(6): 665.
- [50] Li W S, Wu J J, Guan X F, et al. Efficient continuous-wave and short-pulse Ho³⁺-doped fluorozirconate glass all-fiber lasers operating in the visible spectral range[J]. Nanoscale, 2018, 10(11): 5272-5279.
- [51] Wetenkamp L, West G F, Többen H. Optical properties of rare earth-doped ZBLAN glasses[J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 1992, 140: 35-40.
- [52] Li W S, Zahng S, Ji S H, et al. High-efficiency broadband tunable green laser operation of direct diode-pumped holmium-doped fiber[J]. Optics Express, 2021, 29(10): 15564-15575.
- [53] Ji S H, Song Y Y, Wang Z Y, et al. High power downconversion deep-red emission from Ho³⁺-doped fiber lasers[J]. Nanophotonics, 2022, 11(8): 1603-1609.
- [54] Shute R D. Electrodeless ultraviolet communications system[J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 1995, 10(11): 2-7.
- [55] Tognoni E, Palleschi V, Corsi M, et al. Quantitative micro-analysis by laser-induced breakdown spectroscopy: a review of the experimental approaches[J]. Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy, 2002, 57(7): 1115-1130.
- [56] Shi J H, Wong T T W, He Y, et al. High-resolution high-contrast mid-infrared imaging of fresh biological samples with ultraviolet-localized photoacoustic microscopy [J]. Nature Photonics, 2019, 13(9): 609-615.
- [57] Lancry M, Poumellec B. UV laser processing and multiphoton absorption processes in optical telecommunication fiber materials[J]. Physics Reports, 2013, 523(4): 207-229.
- [58] Boulnois J L. Photophysical processes in recent medical laser developments: a review[J]. Lasers in Medical Science, 1986, 1(1): 47-66.
- [59] Askerov D, Valiev K, Velikov L, et al. Pulsed lithography using ArF and KrF lasers[M]. New York: Plenum Publishing Corporation, 1990.
- [60] 赵阳, 向阳, 李婷婷. 深紫外激光辐照加速材料老化系统的光学设计[J]. 光学学报, 2021, 41(5): 0522001. Zhao Y, Xiang Y, Li T T. Optical design of deep ultraviolet laser irradiation system for accelerating material aging[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(5): 0522001.
- [61] Hu J M, Zhang L, Liu H L, et al. High power room temperature 1014.8 nm Yb fiber amplifier and frequency quadrupling to 253.7 nm for laser cooling of mercury atoms[J]. Optics Express, 2013, 21(25): 30958-30963.
- [62] Fujimoto Y, Nakahara M, Binun P, et al. Simple CW-UV generator by SHG technique with double-clad Pr-doped waterproof fluoro-aluminate glass fiber laser[C]//2021 Conference on Lasers and Electro-Optics Europe & European Quantum Electronics Conference (CLEO/Europe-EQEC), June 21-25, 2021, Munich, Germany. New York: IEEE Press, 2021: 21160595.
- [63] Li T R, Zou J H, Ruan Q J, et al. Intracavity frequency doubling deep-ultraviolet Ho³⁺:ZBLAN fiber laser with wavelength tuning from 269.5 to 275.4 nm[C]//2021 IEEE 6th Optoelectronics Global Conference, September 15-18, 2021, Shenzhen, China. New York: IEEE Press, 2021: 24-26.
- [64] Piramidowicz R, Klimczak M, Malinowski M. Short-wavelength emission analysis in Dy:ZBLAN glasses[J]. Optical Materials, 2008, 30(5): 707-710.
- [65] Kaur M, Singh A, Thakur V, et al. Thermal, optical and structural properties of Dy³⁺ doped sodium aluminophosphate glasses[J]. Optical Materials, 2016, 53: 181-189.