

DOI: 10.12086/oe.2022.210364

掺 Pr³⁺ 固体激光器研究进展概述

曹伟航^{1†}, 李 状^{1†}, 石成堃¹, 林嘉珍¹, 林修己¹,
徐国镇², 许惠英¹, 蔡志平^{1*}

¹厦门大学电子科学与技术学院电子工程系, 福建 厦门 361005;

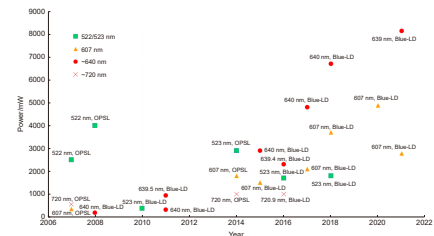
²福州大学物理与信息工程学院, 福建 福州 350108

摘要: 可见光激光器在激光彩色显示、激光医疗、量子信息、光通讯等领域有着十分重要的作用。三价镨离子 (Pr³⁺) 因在可见光波段存在丰富的激光能级跃迁而备受人们关注。特别是近年来, 激光二极管 (LD)、光泵浦半导体激光器 (OPSL) 等商业化泵浦源的出现, 更是使得掺 Pr³⁺ 固体激光器的研究得到了长足的发展。本文按照掺 Pr³⁺ 固体激光器连续、脉冲和单纵模三种输出类型, 介绍了每种输出类型在特定波段处的典型工作, 以时间为主线对掺 Pr³⁺ 固体激光器的研究历程与现状进行了概述, 以及对未来掺 Pr³⁺ 固体激光器的研究做了展望。

关键词: 掺 Pr³⁺ 固体激光器; 连续输出; 脉冲输出; 单纵模输出

中图分类号: TN248.1

文献标志码: A



曹伟航, 李状, 石成堃, 等. 掺 Pr³⁺ 固体激光器研究进展概述 [J]. 光电工程, 2022, 49(4): 210364

Cao W H, Li Z, Shi C K, et al. Overview of research and development of Pr³⁺ doped solid-state lasers[J]. *Opto-Electron Eng*, 2022, 49(4): 210364

Overview of research and development of Pr³⁺ doped solid-state lasers

Cao Weihang^{1†}, Li Zhuang^{1†}, Shi Chengkun¹, Lin Jiazhen¹, Lin Xiuji¹,
Xu Guozhen², Xu Huiying¹, Cai Zhiping^{1*}

¹Department of Electronic Engineering, School of Electronic Science and Engineering, Xiamen University, Xiamen, Fujian 361005, China;

²College of Physics and Information Engineering, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350108, China

Abstract: Visible lasers are used extensively in laser color display, laser medical treatment, quantum information, optical communication, and other applications. Trivalent Pr-ion (Pr³⁺) has attracted much attention because of its rich transitions in the visible band. Especially in recent years, the emergence of commercial pump sources such as laser diode (LD) and optically pumped semiconductor laser (OPSL) has made great progress in the research of Pr³⁺ doped solid-state lasers. According to the three output types of Pr³⁺ doped solid-state lasers: continuous-wave output, pulse output and single longitudinal mode output, this paper introduces the typical work of each output type in a specific band. The research history and current status of Pr³⁺ doped solid-state lasers are summarized with time as the main line, and the future prospects of Pr³⁺ doped solid-state lasers are projected.

Keywords: Pr³⁺ doped solid state laser; continuous-wave output; pulse output; single longitudinal mode output

收稿日期: 2021-11-15; 收到修改稿日期: 2022-02-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61975168)

*通信作者: 蔡志平, zpcal@xmu.edu.cn.

†为同等贡献作者

版权所有©2022 中国科学院光电技术研究所

1 引言

激光具有单色性好、相干性好、方向性好、亮度高等特点, 被誉为 20 世纪最伟大的发现。激光器按常见的工作物质划分可分为气体激光器、固体激光器、染料激光器以及半导体激光器, 其中固体激光器由于输出的能量大、峰值功率高、结构紧凑、结实耐用、价格适宜、种类丰富并且波长覆盖面较广等优点而备受关注。对于可见光激光, 除了用于激光显示外, 在医疗、工业、通讯、量子信息等领域也有着广泛应用。例如, 在激光医疗中绿光激光可用于视网膜病变的激光手术治疗; 相比于红外激光, 在工业中使用可见光进行激光加工的效率更高; 通讯领域中由于海水在蓝绿光波段透明度最好, 因此蓝绿光激光被认为是水下通讯最好的光源。采用固态增益介质获得可见光是目前应用最为广泛的手段, 可通过可见光激光二极管、利用非线性光学材料对红外光进行激光倍频、基于非线性过程的光学参量振荡、掺杂稀土离子的上转换、掺杂稀土离子的直接下转换等方式获得可见光激光。在掺杂稀土离子的直接下转换获得可见光激光的方式中, 镨离子(Pr^{3+})与其他稀土掺杂离子相比由于其有丰富的激光发射谱线, 且谱线的波长范围几乎覆盖了整个可见光区域而备受关注, 因此对掺 Pr^{3+} 固体激光器研究也最为广泛。不论是有关掺 Pr^{3+} 固体激光器的连续输出还是调 Q 和锁模, 科研人员都对其进行了较为细致的研究。在研究过程中作为其基质晶体的种类繁多, 比较常见的有 YLF、YAP、LLF、BYF、KYF、YGF、 CaF_2 、 LaF_3 、ASL、LMA、SRA^[1-6]等, 目前掺 Pr^{3+} 固体激光器输出的波段已经覆盖了蓝光、

绿光、橙光、红光、近红外光等区域。本文针对掺 Pr^{3+} 固体激光器的相关研究成果做了较为全面的总结以及对未来掺 Pr^{3+} 固体激光器的发展做了展望。

2 连续型激光器研究

具有特殊光谱特性的稀土离子^[7-10]在很多领域都有着重要的研究及应用价值, 其中对掺 Pr^{3+} 晶体的研究最为广泛。图 1 为镨系稀土离子中 Pr^{3+} 的能级结构图^[11-12], 从图中可以明显看出 Pr^{3+} 有着非常丰富的发射谱线, 可以实现蓝光 (~480 nm)、绿光 (~525 nm)、橙光 (~610 nm)、红光 (~640 nm) 以及深红光 (~700 nm、~720 nm) 等可见光波段的激光输出。

在二十世纪 70、80 年代, 科研人员掌握了一些有关掺镨氟化物材料的能级结构和光谱特性, 但是由于当时对泵浦源和激光材料的研究不够成熟, 采用掺 Pr^{3+} 材料实现激光运转的报道并不多^[13-23]。直到后来氩离子激光器的诞生, 掺 Pr^{3+} 固体激光的相关研究才有了很大进展。1994 年, 德国汉堡大学的 Sandrock 等人^[24]使用中心波长为 457.9 nm 的氩离子激光器泵浦 Pr:YLF 晶体, 首次在室温条件下实现了六个波长的连续激光发射: 绿光 (522 nm、545 nm)、橙光 (607 nm)、红光 (639.5 nm、720 nm)、近红外光 (907.4 nm), 其中在 522 nm 和 639.5 nm 处的最大输出功率分别为 144 mW 和 266 mW, 他们还使用氩离子激光器分别泵浦了 Pr:GLF 和 Pr:KYF 晶体, 实现波长为 639 nm 和 642.5 nm 的连续激光输出。同年, 汉堡大学 Danger 等人^[25]利用氩离子激光器泵浦 Pr:YAP 晶体实现了两个红外连续激光 (939.5 nm、996.0 nm) 跃迁, 还获得了可见光谱范围内的七个连续激光 (613.9 nm、621.6

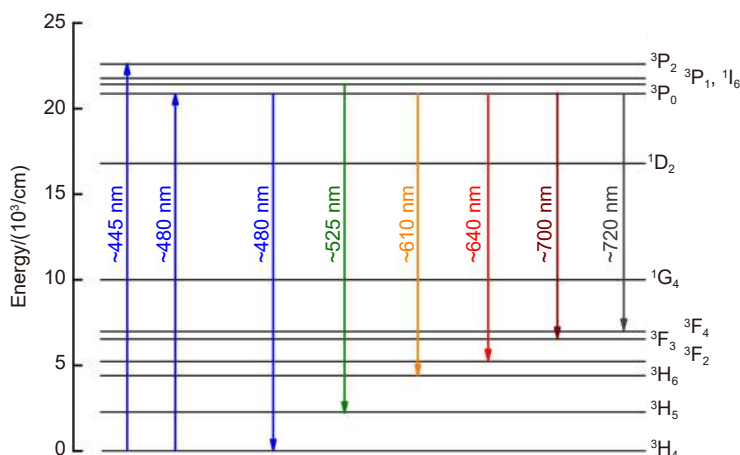


图 1 Pr^{3+} 能级结构图^[11]

Fig. 1 Energy level structure of Pr^{3+} ^[11]

nm、662.4 nm、719.5 nm、743.7 nm、746.9 nm、753.7 nm), 其中在波长为 746.9 nm 处得到的结果最好, 最大斜效率为 24.6%, 最大输出功率为 49.6 mW, 激光阈值为 25 mW。

2004 年之前, 氩离子激光器是实现掺 Pr³⁺ 晶体激光运转一种常用的泵浦源, 但氩离子激光器体型较大、价格较高, 且激光光源的中心波长与 Pr³⁺ 的吸收峰匹配较差, 导致获得激光的方法复杂、效率不高; 而相比于氩离子激光器, 激光二极管 (LD) 有着结构紧凑、价格合理、可商用等特点, 它的出现受到人们的青睐。2004 年, 汉堡大学 Richter 等人^[26]首次报道了使用中心波长为 442 nm、最大输出功率为 25 mW 的 GaN 蓝光 LD 泵浦 Pr:YLF 晶体, 实现了 639.7 nm 红光激光激射, 但此时输出的红光功率只有 1.8 mW。除了 LD 泵浦源外, 光泵浦半导体激光器 (OPSL) 有着光斑质量好、光功率大、波长可灵活扩展、体积小等特点, 也是一种很好的实现激光运转的泵浦源。2005 年, Richter 等人^[27-28]利用中心波长为 479.5 nm 的 OPSL 泵浦 Pr:YLF 晶体, 在吸收泵浦功率为 1.4 W 的条件下获得了最高功率为 600 mW 的绿光 (523 nm) 和红光 (640 nm、720 nm), 以及 350 mW 的橙光 (607 nm) 输出; 另外他们采用 LBO 倍频晶体对 640 nm 激光进行腔内倍频, 获得了输出功率超过 360 mW 的紫外 (320 nm) 激光输出, 其实验装置如图 2 所示。同年, 美国相干公司 Ostroumov 等人^[29]使用中心波长为 479 nm、5.3 W 大功率 OPSL 泵浦 Pr:YLF 晶体, 获得了波长为 522 nm、输出功率为 2.5 W 的绿光, 之后他们利用两个 OPSL 进行双端泵浦, 在 9.6 W 泵浦功率条件下获得了输出功率超过 4 W 的 522 nm 绿光^[30]。

随着人们对 Pr:YLF、Pr:YAP、Pr:LiLuF₄、Pr:LaF₃

等不同掺 Pr³⁺ 材料特性的深入研究, 激光输出功率被不断优化和提高, 同时泵浦掺 Pr³⁺ 晶体出现了新的波长激射^[31-52]。2008~2014 年间, 德国汉堡大学和飞利浦研究所对绿光、橙光、红光波段的研究较为突出。2010 年, Hansen 等人^[41]以及 Weichmann 等人^[42]使用蓝光 LD 泵浦 Pr:YLF 晶体, 分别获得了 358 mW 和 378 mW 的 523 nm 绿光输出。2011 年, Gün 等人^[43]采用两个中心波长为 443.9 nm、最大输出功率为 1 W 的 InGaN LD 和掺杂浓度为 0.5 at.%、长 2.9 mm 的 Pr:YLF 晶体, 实现了波长为 639.5 nm、607.2 nm、545.9 nm 和 522.6 nm 的可见光激光, 输出功率分别为 938 mW、418 mW、384 mW 和 773 mW, 这是首次报道的利用 LD 作为泵浦源产生 545.9 nm 波长激光的实验。随着激光实验的深入研究, 一些波长的输出功率步入瓦级。2014 年, Metz 等人^[44]利用中心波长为 479 nm、功率为 5 W 的 OPSL 泵浦 Pr:YLF 晶体, 获得了输出功率都超过 1 W 的 523 nm、546 nm、604 nm、607 nm、698 nm、720 nm 七种不同波长的激光, 其中 523 nm 处的输出功率高达 2.9 W, 斜效率为 72%, 光-光效率为 67% (相对于入射泵浦功率)。

2015 年, 日本 Keio 大学的 Iijima 等人^[45]采用 Z 型折叠腔, 用四个 InGaN 蓝光 LD 泵浦两个 Pr:YLF 晶体获得了 607 nm 和 640 nm 的激光输出, 输出功率分别为 1.5 W 和 2.9 W。2018 年, Tanaka 等人^[47]又将四个功率为 5 W 的蓝光 LD 作为泵浦源泵浦 12 mm 长、掺杂浓度为 0.3 at.% 的 Pr:YLF 晶体, 将 607 nm 和 640 nm 处的激光输出功率分别提高到了 3.7 W 和 6.7 W, 并且在吸收泵浦功率为 5.4 W 时实现了最高输出功率为 1.8 W 的 523 nm 绿光。

除了德国汉堡大学、飞利浦研究所、日本 Keio 大学等研究单位, 来自国内厦门大学的蔡志平教授团

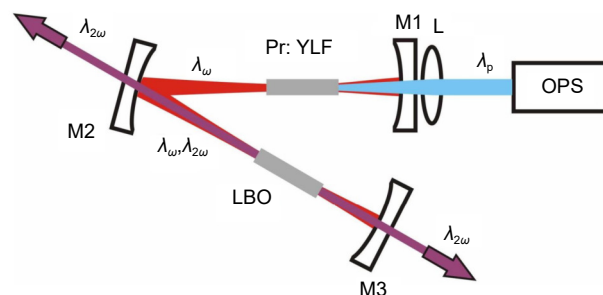


图 2 腔内倍频实验示意图^[28]。

OPS: 光泵浦半导体; M1: 输入耦合器 ($R=50$ mm); M2: 折叠镜 ($R=100$ mm); M3: 端镜 ($R=50$ mm)

Fig. 2 Schematic diagram of intracavity frequency doubling experiment setup^[28].

OPS: optically pumped semiconductor; M1: input mirror ($R=50$ mm); M2: folding mirror ($R=100$ mm); M3: end mirror ($R=50$ mm)

队在掺 Pr^{3+} 固体激光器研究领域中也有着较为细致的研究, 部分可见光波段的激光输出功率突破了瓦级。2016年, Luo 等人^[49]利用多模 InGaN LD 泵浦 Pr:YLF 晶体, 获得了 523.0 nm、604.1 nm、606.9 nm、639.4 nm、697.8 nm 和 720.9 nm 的激光发射, 其中 523.0 nm 处的输出功率为 1.7 W, 639.4 nm 处输出功率为 2.3 W。2020年, Lin 等人^[50]使用蓝光 LD 泵浦 12 mm 长的 a 切 Pr:YLF 晶体, 实现了高斜效率的 607 nm 橙光输出, 在吸收泵浦功率为 12.15 W 时产生的最大输出功率为 4.88 W, 斜效率约为 49%, 这

是据我们所知的目前报道利用蓝光 LD 泵浦 Pr:YLF 晶体在 607 nm 处获得的最高功率; 此外, 他们采用凹平腔体进一步提高光束质量, 获得了 3.8 W 的橙光输出, X 方向和 Y 方向的光束质量因子 M^2 分别为 1.7 和 2.2, 其结构如图 3 所示。2021年, Lin 等人^[51-52]利用低掺杂浓度的 Pr:YLF 晶体, 蓝光 LD 作为泵浦源, 在 639 nm 红光处获得了最大输出功率为 8.14 W 的激光输出, 这是迄今为止我们已知的利用蓝光 LD 泵浦 Pr:YLF 晶体在 639 nm 处产生的最高激光功率。图 4 总结了近 15 年来在绿光、橙光、红光波段中几

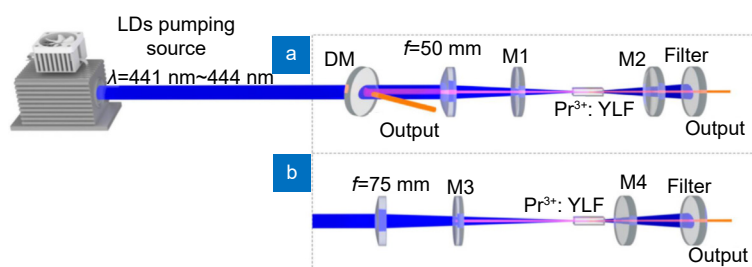


图 3 实验装置示意图^[50]。

- (a) 4.88 W 高功率高效橙色激光器, 腔长为 51 mm, M1、M2 是曲率半径都为 50 mm 的平凹镜; (b) 具有改进光束质量的 3.8 W 高功率橙色激光器, 腔体是 72 mm 的凹平腔, M3 是曲率半径为 100 mm 的平凹镜, M4 是输出可调的平面镜

Fig. 3 Schematic diagram of experimental setup^[50].

- (a) 4.88 W high power high-efficiency orange laser, the cavity length is 51 mm, M1 and M2 are flat-concave mirrors with curvature radius of 50 mm; (b) 3.80 W high power orange laser with improved beam quality, the cavity is a 72 mm flat concave cavity, M3 is a flat concave mirror with curvature radius of 100 mm, and M4 is a flat mirror with tunable transmission

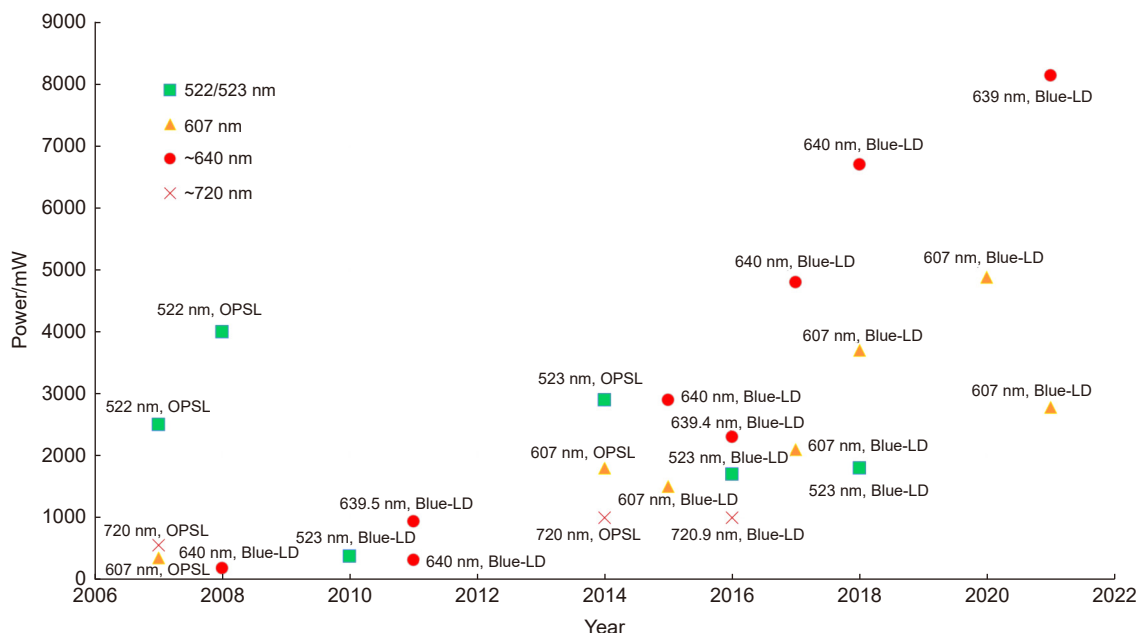


图 4 几种典型 Pr:YLF 连续型可见光激光的研究现状。

每个标记点对应的是输出波长和泵浦 Pr:YLF 晶体所使用的泵浦源类型

Fig. 4 Research status of several typical Pr:YLF continuous-wave visible lasers.

The label for each marker corresponds to the output wavelength and the type of pump source used in the pumped Pr:YLF crystal

种典型的 Pr:YLF 连续型可见光激光的研究现状。

多波长激光在医疗、显示等方面有着广泛的应用,也是激光领域中的一个研究热点^[53-57]。1995 年中国科学院西安光学精密研究所的 Ruan 等人^[53]首次在 Pr:YLF 晶体中实现 607 nm 和 639 nm 双波长连续激光运转。2015 年, Luo 等人^[55]将功率为 2 W、中心波长范围在 439.8 nm~442 nm 的 InGaN LD 作为泵浦源,使用长度为 10 mm、掺杂浓度为 0.5 at.% 的 c 切 Pr:YLF 晶体,第一次获得了 696 nm 和 719 nm 的连续双波长激光,最大输出功率为 102 mW。2021 年, Lin 等人^[57]采用 LD 泵浦 Pr:YLF 晶体实现了一种在 670 nm 附近的波长可切换连续激光输出,其实现装置如图 5 所示,在波长为 670.4 nm、674.2 nm 和 678.9 nm 处获得的输出功率分别为 2.60 W、1.26 W 和 0.21 W,斜效率分别为 34.7%、27.3% 和 12.3%,光束质量良好 ($M^2 < 1.6$),其中 670.4 nm 波长处的输出功率和斜效率是目前在 LD 泵浦的 Pr:YLF 激光器中所报道的最高功率和最高斜效率;同时又通过在腔内精密调节一个/两个标准具,获得了 670.1 nm/674.8 nm、670.1 nm/679.1 nm 和 675.0 nm/679.4 nm 的双波长激光,另外也成功地实现了三波长激光运转 (672.2 nm/674.2 nm/678.6 nm 和 670.4 nm/674.8 nm/679.4 nm)。

3 脉冲型激光器研究

3.1 调 Q 脉冲激光器

调 Q 技术又称 Q 开关技术,是一种通过改变激光谐振腔的 Q 值,获得较窄脉冲宽度和高峰值功率的技术。由于在激光制导,激光加工,激光核聚变等领域有着很广泛的应用,在激光被发现不久后的 1961 年,就有人提出了调 Q 的概念,并于 1962 年研制成了第一台调 Q 激光器^[58]。随后在 1998~2014 年期间,人们对掺 Pr³⁺激光晶体实现调 Q 进行了研究^[59-69],其中研究较为细致的是日本的 Keio 大学、捷克 Czech Tech 大学等。2009 年,日本 Keio 大学

Kojou 等人^[62]报道了最大输出功率为 700 mW、泵浦波长约为 445 nm 的 GaN 激光二极管作为泵浦源,激光晶体为 Pr:LYF,采用 V 型腔结构和声光调制器 AOM (acousto-optic modulator) 通过主动调 Q 方式获得了波长为 639 nm、频率为 77 kHz、最大峰值功率为 48 W、脉宽为 270 ns 的激光输出。同年,捷克 Czech Tech 大学 Fibrich 等人^[64]在室温条件下实现了闪光灯泵浦 Pr:YAP 调 Q 激光器。采用基于四分之一波结构的 LiNbO₃ 普克尔斯盒电光调制器,通过主动调 Q 的方式在室温条件下获得了能量为 5 mJ、线宽为 1.4 nm、脉宽为 50 ns、相应峰值功率为 100 kW 的 747 nm 激光输出,并且用 BBO 晶体进行倍频产生了 373.5 nm 的激光,其输出脉冲能量为 30 μJ、脉宽为 34 ns、线宽为 1.1 nm、相应峰值功率为 0.9 kW。2014 年, Kojou 等人^[69]将 InGaN LD 泵浦的 Pr³⁺:LiYF₄ 激光器进行腔内倍频,实现了 261 nm 和 320 nm 的主动调 Q 深紫外光运转,其中最大峰值功率分别为 61.6 W (重复频率 7.7 kHz 时脉冲能量为 8.7 μJ) 和 594 W (重复频率 7.7 kHz 时脉冲能量 19.0 μJ)、脉宽分别为 142 ns 和 35 ns。

在 2017~2019 年期间,科研人员对掺 Pr³⁺晶体实现调 Q 激光脉冲输出进行了更深层次的研究^[70-78]。2018 年厦门大学蔡志平教授团队的 Luo 等人^[73]报道了利用几层 Bi₂Se₃ 可饱和吸收体,在蓝光 LD 泵浦的 Pr:YLF 激光器上实现了深红色 (721 nm)、红色 (640 nm) 和橙色 (607 nm + 604 nm) 的调 Q 激光,三个波长的最窄脉冲宽度、最大脉冲能量和峰值功率分别为 (368 ns、0.17 μJ、0.46 W)、(210 ns、0.16 μJ、0.73 W) 和 (263 ns、0.19 μJ、0.71 W),脉冲重复频率分别为 185.2 kHz、263.1 kHz 和 192.3 kHz,这些研究成果揭示了 Bi₂Se₃ 在可见光固体激光器中是一种很有前途的可饱和吸收体,其实验结构图如图 6 所示^[73]。

2019 年 Wang 等人^[75]利用金纳米星 (GNSS) 作为可饱和吸收体,实现了被动调 Q Pr:YLF 激光器,并

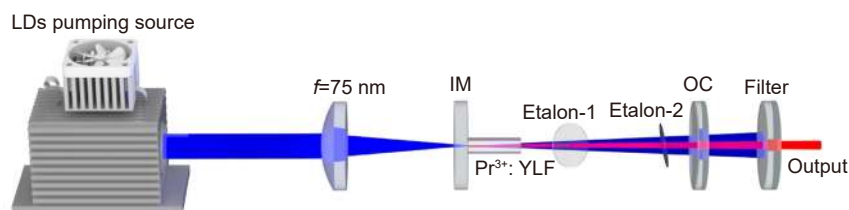


图 5 二极管泵浦 Pr:YLF 在 670 nm 处附近波长可切换的实验示意图^[57]

Fig. 5 Schematic diagram of the experiment of diode-pumped Pr:YLF with switchable wavelength near 670 nm^[57]

测量了金纳米星在 639 nm 处的非线性饱和和吸收特性, 计算出其调制通量和饱和通量分别为 3.0% 和 0.3 GW/cm^2 , 利用 GNSS 作为可饱和吸收体分别获得了 639 nm 和 721 nm 的高效被动调 Q 激光, 最大输出功率和最短脉冲宽度分别为 (256 mW、168 ns) 和 (238 mW、198 ns), 在 639 nm 处的脉冲重复频率为 272 kHz、最大脉冲能量约为 0.94 μJ 、对应峰值功率为 5.60 W, 在 721 nm 处的最大重复频率为 240 kHz、最短脉冲宽度对应的脉冲能量为 0.99 μJ 、最大峰值功率为 5.00 W, 这是第一次使用 GNSS 作为可饱和吸收体 (SA) 的可见光固体脉冲激光器。同年, 厦门大学蔡志平教授团队的 Li 等人^[78] 使用激光二极管 LD 泵浦 Pr:YLF 晶体, 采用 V 形腔和 Co:AsL 可饱和吸收体, 在调 Q 模式下获得了波长为 639 nm, 重复频率为 91 kHz, 脉冲宽度约为 149 ns, 脉冲能量约为 2.5 μJ , 脉冲峰值功率为 16.9 W 的被动调 Q 激光。

2020~2021 年期间, 关于利用掺镨 (Pr^{3+}) 晶体实

现调 Q 的研究仍有被报道^[79-84]。2020 年, 长春理工大学 Li 等人^[79] 提出了一种蓝光 LD 泵浦 Pr:YLF 晶体声光调 Q 双脉冲激光器, 获得了 639 nm 红光输出, 并且阐述了 Pr:YLF 双脉冲激光器的输出原理, 建立了高重复频率下双脉冲序列分布的四能级微分速率方程模型, 当激光重复频率为 10 kHz 时, 双阶跃信号发生器作为声光调 Q 的调制器 (AO), 在一个泵浦周期内开启两次调 Q, 获得最大输出功率为 144 mW, 脉冲能量为 7.1 μJ , 输出脉冲间隔为 20 μs 的可见光双脉冲, 实验装置如图 7 所示。

2021 年, 齐鲁工业大学 Han 等人^[84] 利用开孔 Z 扫描方法研究碲薄膜在可见光波段的非线性光学吸收特性, 在激光调制应用方面以碲薄膜为可饱和吸收体, 实现了橙光 (605 nm)、红光 (639 nm)、深红光 (721 nm) 的被动调 Q Pr:YLF 激光器, 晶体吸收泵浦功率在 2.4 W 时的最大被动调 Q 输出功率分别为 50 mW、62 mW 和 53 mW, 最大重复频率分别为 208 kHz、

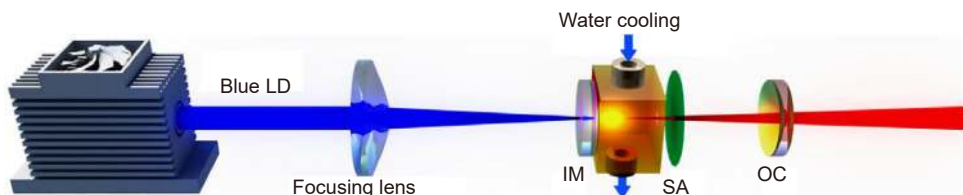


图 6 以 Bi_2Se_3 为 SA 的二极管泵浦调 Q Pr:YLF 可见光激光器的实验装置示意图^[73]。

IM: 输入镜, OC: 输出耦合器

Fig. 6 Schematic diagram of diode-pumped Q-switched Pr:YLF visible laser using Bi_2Se_3 as SA^[73].

IM: input mirror, OC: output coupler

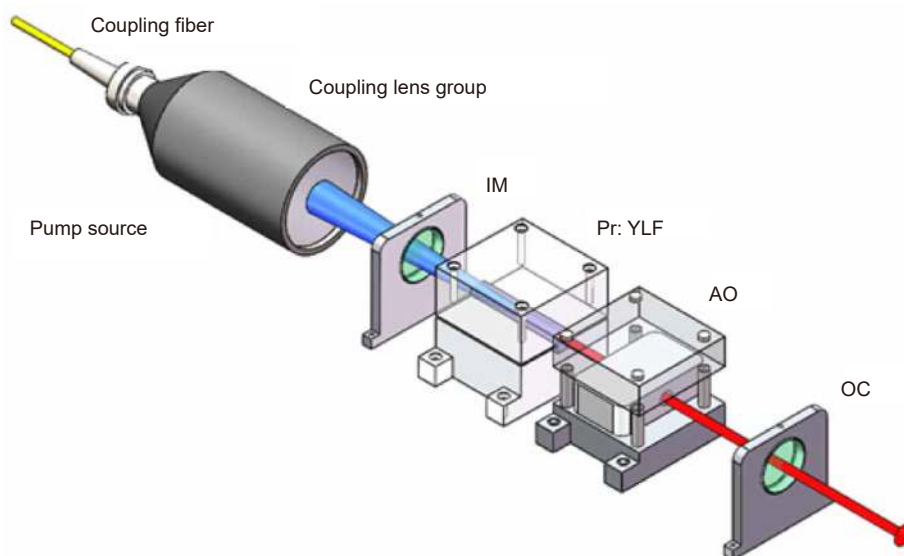


图 7 Pr:YLF 双脉冲激光器实验装置原理图^[79]

Fig. 7 Schematic diagram of Pr:YLF double pulse laser experiment setup^[79]

331 kHz 和 214 kHz, 脉冲宽度分别为 173 ns、159 ns、120 ns, 最大脉冲能量分别约为 0.24 μJ 、0.19 μJ 、0.25 μJ , 相应峰值功率分别为 1.39 W、1.19 W 和 2.08 W, 相应线宽分别为 0.22 nm、0.34 nm、0.26 nm。这说明了碲薄膜具有显著的非线性光吸收特性, 有望成为一种很有前途的可见光调制器材料。

3.2 锁模脉冲激光器

激光器输出的激光可理解为在增益带宽下能够在谐振腔内起振的一个个纵模叠加的效果, 而锁模技术就是通过一些方式把在谐振腔振荡的纵模使其频率间隔固定, 具有确定的相位关系, 这样在叠加之后激光器就可以输出一个个具有极窄线宽、极高峰值功率的脉冲。采用锁模技术输出的激光脉冲宽度要比调 Q 技术的脉冲宽度更窄, 可以达到飞秒 (fs) 量级, 实际应用中常用于精密测距、激光全息照相、医疗祛斑等领域。在物理动力学、光化学、等离子体物理学、非线性光学等学科领域中都十分迫切地需要可重复的、皮秒 (ps) 或者飞秒量级的激光脉冲。美国贝尔电话实验室最早观察到锁模现象, 早在 1964 年就发表了 He-Ne 激光锁模的报告, 不过在上世纪七十年代激光锁模才开始真正投入研究。由于早期半导体可饱和吸收体工艺不够完善, 最早科研人员采用克尔 (Kerr) 透镜实现锁模, 直到现在利用 Kerr 透镜锁模仍然是比较常见的锁模方法。1994 年, 帝国理工学院的 Ruan 等人^[85]报道了利用固体饱和吸收体对运转在 639 nm 的 Pr:YLF 激光器进行克尔透镜锁模, 产生了重复频率约为 100 MHz、脉冲宽度为 8 ps 的锁模脉冲。1996

年, 帝国理工学院的 Tong 等人^[86]通过优化激光谐振腔的几何结构, 在 Pr:YLF 激光器系统中观察到了真正的自启动克尔透镜锁模, 在 607 nm 处获得了 15 ps 的激光脉冲。同年 Sutherland 等人^[87]在 Pr:YLF 晶体中观察到 14 个新的可见光激光跃迁, 在激光器稳定后输出了波长为 613 nm, 脉冲宽度为 400 fs 的锁模脉冲, 这是首次通过克尔透镜锁模从连续固体激光器中直接实现可见光波段的飞秒脉冲, 也是目前我们已知的报道利用氩离子激光器泵浦 Pr:YLF 晶体实现的最短锁模脉冲宽度。随着在材料化学等领域的发展不断突破, 特别是在半导体产业上取得了一系列成就。2014 年, 瑞士纳沙泰尔大学 Gaponenko 等人^[88]报道了第一台半导体可饱和吸收镜 (SESAM) 锁模固体激光器, 激光器以 Pr:YLF 晶体为增益介质, GaInP 量子阱 SESAM 为基础, 实现了中心波长为 639.5 nm 的自启动连续锁模激光器, 其中在泵浦功率为 3.75 W 时, 激光平均输出功率为 16 mW、最大线宽为 0.09 nm、脉冲重复频率为 85.55 MHz、脉冲宽度约为 18 ps, 其具体结构如图 8 所示。

2016~2017 年期间, 研究人员仍对掺 Pr³⁺晶体作为激光增益介质实现锁模进行不断研究^[89-95]。2016 年, 山东大学的 Zhang 等人^[89]首次展示了高效的 LD 泵浦掺 Pr³⁺晶体实现自锁模可见光激光器, 其具有从绿光到深红光的宽带光谱, 采用掺 Pr³⁺的 GdLiF₄ 晶体作为增益介质, 获得了重复频率分别为 2.8 GHz、3.1 GHz 和 3.0 GHz 的 522 nm、607 nm、639 nm 和 720 nm 的稳定自锁模可见光激光脉冲, 对应的

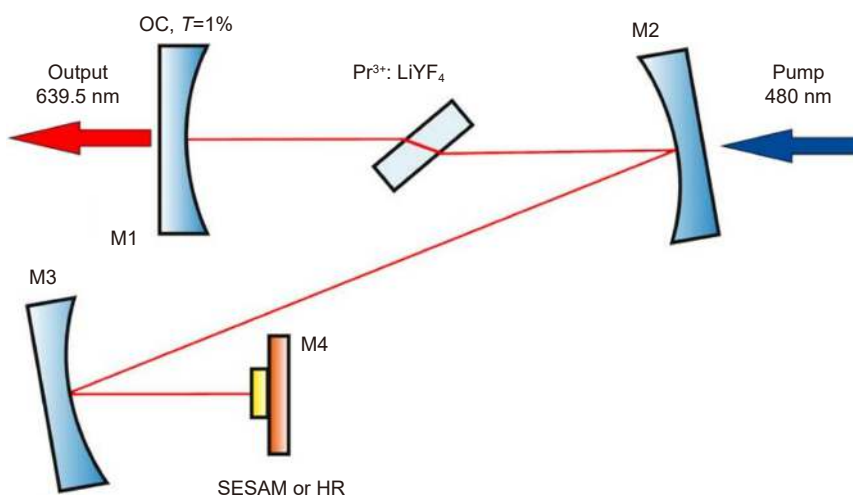


图 8 锁模 Pr³⁺:LiYF₄ 激光器的腔型^[88]

Fig. 8 Cavity configuration of the mode-locked Pr³⁺:LiYF₄ laser^[88]

脉冲宽度分别为 72 ps、69 ps、53 ps 和 74 ps, 相应的半高宽 (FWHM) 分别为 0.11 nm、0.17 nm、0.19 nm 和 0.19 nm, 并且在 639 nm 处激光的最大输出功率为 612 mW, 斜率效率为 46.9%。2017 年, 捷克理工大学的 Fibrich 等人^[92]报道了用非线性反射镜锁模的固体激光器, 这是非线性镜 (NLM) 方法首次用于镨基有源介质的锁模, 实验以 Pr³⁺浓度为 0.6 at.% 的 Pr:YAlO₃ 晶体作为活性介质, 采用非线性 BBO 晶体和适当设计的二向色性反射镜组成强度依赖反射的输出耦合器, 在光经过 BBO 倍频和 M4(二向色性反射镜) 反射后再次回到 BBO 右端, 通过控制基频光和倍频光的相位相差, 从而使得 BBO 与 M4 的组合器件的反射率随光强变化, 在 3.5 W InGaN 激光二极管泵浦下实现了平均输出功率为 100 mW 的连续锁模激光运转, 激光中心振荡波长为 747 nm、重复频率为 105 MHz、输出脉宽为 250 ps, 具体实验装置结构如图 9 所示。

随着激光锁模技术的不断发展, 锁模脉冲的宽度进一步变窄^[94-97], 2018 年厦门大学蔡志平教授团队的 Luo 等人^[94]首次展示了激光二极管泵浦的 Pr:YLF 晶体在 915 nm 处的被动锁模激光。利用两个偏振组合蓝光泵浦激光二极管 (LD) 和一个半导体可饱和吸收镜 (SESAM), 实现了稳定的激光锁模运转, 最大平均输出功率为 408 mW, 斜率效率为 10.8%, 激光

脉冲宽度为 15 ps, 半高宽 (FWHM) 为 0.15 nm, 重复率为 1.53 GHz, 具体的结构如图 10 所示。

2019 年, 厦门大学 Li 等人^[95]首次报道了在可见光谱区直接产生被动锁模涡旋激光器, 以 Pr:YLF 晶体作为增益介质, 利用石墨烯可饱和吸收镜实现了 TEM₀₀ 模的稳定锁模, 最大平均输出功率为 75 mW, 在约 140 MHz 的重复频率下, 锁模脉冲宽度约为 73.4 ps, 激光波长约为 721 nm, 光谱宽度约为 0.5 nm, 通过轻微调动激光谐振腔, 还获得了一阶拉盖尔—高斯模 (LG_{0,1}), 输出功率降低到约 22 mW, 这项工作为直接产生超快涡旋激光器提供了一种简单而通用的方法, 通过使用不同的激光增益介质, 可以很容易地将超快涡旋激光器扩展到其他光谱区域。同年, 山东大学 Zhang 等人^[97]报道了由蓝光 LD 泵浦的克尔透镜锁模 Pr:LLF 激光器, 通过对激光增益中群速度色散的理论计算, 采用补偿的方法实现了 604 nm 的连续锁模激光器, 平均输出功率约为 48 mW、光谱宽度为 0.37 nm、平均重复频率约为 106.8 MHz、脉冲宽度为 1.1 ps, 这是目前我们已知的激光二极管 LD 泵浦的掺 Pr³⁺固体激光器中锁模的最短脉冲宽度; 同时也总结了 1994 年至今可见光范围内掺 Pr³⁺晶体锁模的研究现状, 具体如图 11 所示, 图中符号的颜色代表不同的波长: 绿光为 522 nm, 橙光为 604 nm 或 607 nm 或 613 nm, 红光为 639 nm, 深红光为 720 nm^[97]。

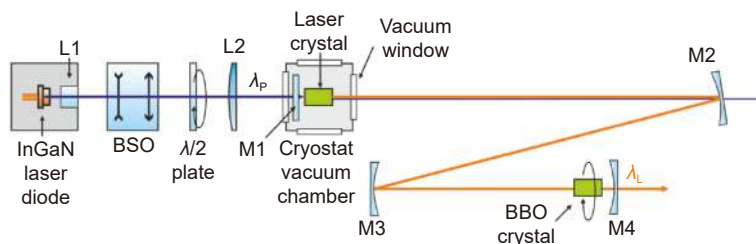


图 9 采用非线性镜像法的 Pr:YAlO₃ 锁模激光系统版图^[92]

Fig. 9 Layout of the Pr:YAlO₃ mode-locked laser system using the nonlinear mirror method^[92]

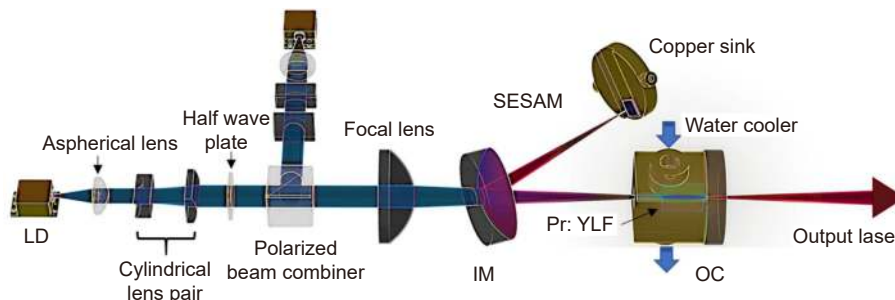
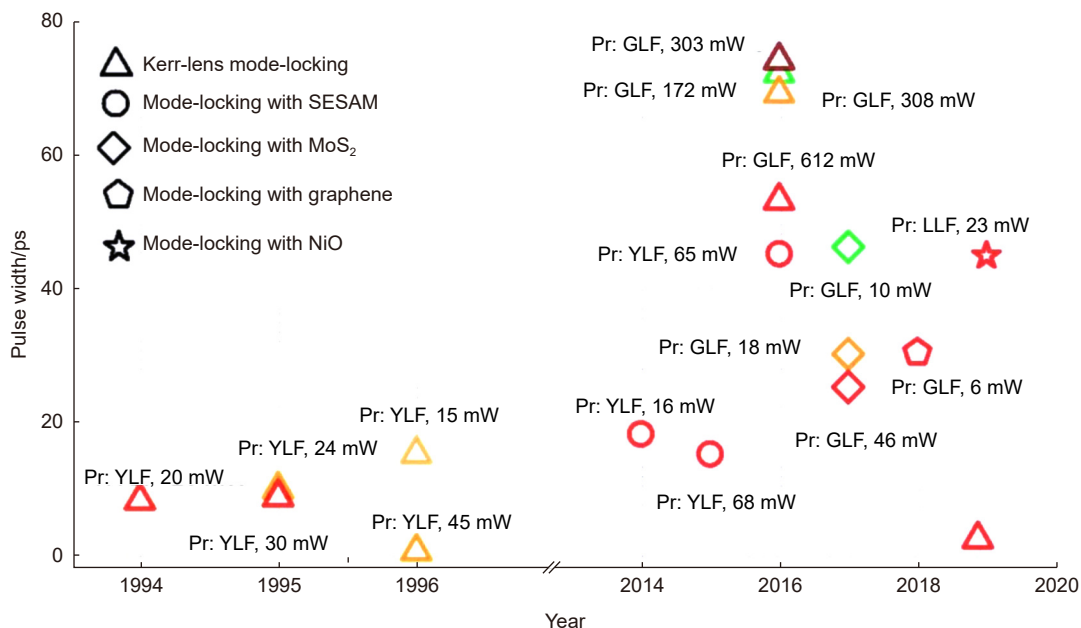


图 10 InGaN 蓝激光二极管泵浦的 SESAM 被动锁模 Pr:YLF 激光器原理图^[94]

Fig. 10 Schematic of the passively mode-locked Pr:YLF laser with a SESAM and pumped by InGaN blue LDs^[94]

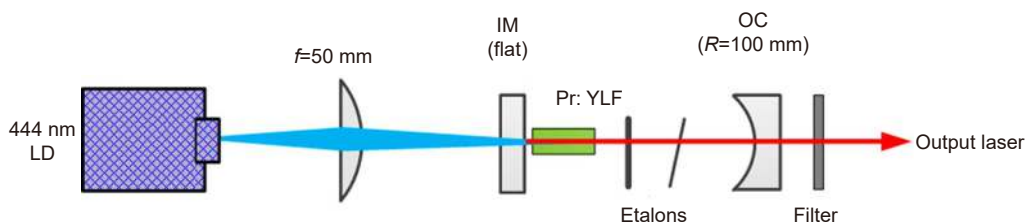
图 11 掺 Pr³⁺ 晶体可见光锁模综述^[97]Fig. 11 Summary of Pr³⁺ doped crystal mode-locking in the visible range^[97]

4 单纵模激光器研究

单纵模激光器由于其窄谱线输出和低相位噪声的特点, 已被广泛应用于激光多普勒测速、引力波探测、多普勒激光雷达和光通讯等领域, 在可见光波段的单纵模脉冲在光源、光谱学和医学方面具有巨大的潜力^[98]。

2016年, 长春理工大学 Li 等人^[99]采用 Pr:YLF 激光器, 通过对调 Q 预激光过程进行了模拟和优化, 得到了波长为 607 nm、脉冲能量为 94.4 μJ、脉冲宽度为 14.2 ns 的单纵模输出。2019年, 南京理工大学 Luo 等人^[100]首次采用 c 切 Pr:YLF 晶体作为泵浦材料, 将两个四分之一波片和一个布鲁斯特片组合成一个扭曲模腔, 获得了直接输出的 640 nm 单纵模 (SLM) 激光, 其中线宽为 150 MHz, 输出光束沿 X 和 Y 方向的 M² 因子分别为 1.10 和 1.07。同年, 长春理工大学 Dai 等人^[101]以 Pr:YLF 激光器为例, 对注入低能量单

纵模 (SLM) 预调 Q 的影响进行了分析, 并给出了具体的优化过程, 与常规调 Q 激光器相比, 获得的单纵模脉冲能量达到了 85.2 μJ, 脉冲宽度为 15.2 ns。2020年长春理工大学 Jin 等人^[98]通过使用 Q 开关激光技术结合 Fabry-Perot 标准具的方法, 在 639.5 nm 处获得可见光直接振荡调 Q 单纵模 Pr:YLF 激光器, 重复频率为 10 kHz、脉冲能量为 3.9 μJ、脉冲宽度为 81.1 ns、谱线宽度约为 33 MHz。同年厦门大学 Zhang 等人^[102]首次报道了橙光范围的蓝光二极管泵浦单频 Pr:YLF 激光器, 提出了一种相比于通过复杂低效的 Nd³⁺ 激光器和频混频更为简单的产生橙光光谱单频激光的方法, 单频 σ 偏振 607 nm 处激光的最大输出功率可达 175 mW, 斜率效率约为 16.6%, 线宽约为 6 MHz; 单频 π 偏振 604 nm 处激光的最大输出功率可达 91 mW, 斜率效率约为 8.9%, 线宽约为 22 MHz, 两种单频橙光激光器的波长调谐范围分别为 0.15 nm 和 0.35 nm, 实验装置如图 12 所示。

图 12 二极管泵浦的 604 nm 和 607 nm 正交偏振 SLM-Pr:YLF 激光器实验装置^[102]Fig. 12 Diode pumped 604 nm and 607 nm quadratically polarized SLM-Pr:YLF laser experimental setup^[102]

5 结论

本文介绍了掺 Pr³⁺ 固体激光器在连续、脉冲、单纵模三种激光输出类型方面的研究成果。到目前为止, 连续激光方面比较典型的波段有绿光、橙光、红光, 其中 522 nm 绿光处的最大输出功率超过 4 W, 607 nm 橙光处的最大功率达到了 4.88 W, 639 nm 红光处最大功率高达 8.14 W, 在 546 nm、604 nm、698 nm、720 nm 等波长处的输出功率也都达到了瓦级, 同时多波长激射方面也在不断发展。对于脉冲型激光, 在调 Q 方面利用掺 Pr³⁺ 固体激光器获得的激光脉冲宽度一般在几十纳秒到几百纳秒之间。在锁模方面, 掺 Pr³⁺ 固体激光器在红光 639 nm、橙光 613 nm、604 nm 处分别获得了 8 ps、400 fs 和 1.1 ps 的锁模脉冲宽度, 其他已报道的可见光波段锁模脉冲宽度从十几皮秒到几百皮秒不等。对于单纵模激光, 利用掺 Pr³⁺ 晶体实现单频激光输出的研究工作目前主要集中在 360 nm 紫外^[103], 604 nm、607 nm 橙光以及 639 nm、640 nm 红光处, 其余波段的单纵模激光器还有待实现。总之, 掺 Pr³⁺ 固体激光器的频段还可扩展, 功率可望进一步提高。

参考文献

- Binun P W, Boyd T L, Pessot M A, et al. Pr: YLF, intracavity-pumped, room-temperature upconversion laser[J]. *Opt Lett*, 1996, **21**(23): 1915–1917.
- Hashimoto K, Kannari F. Stimulated emission at an orange wavelength from cryogenically cooled Pr³⁺-doped LiYF₄ and Y₃Al₅O₁₂[J]. *Jpn J Appl Phys*, 2014, **46**(2): 589–592.
- Calmano T, Siebenmorgen J, Reichert F, et al. Crystalline Pr: SrAl₁₂O₁₉ waveguide laser in the visible spectral region[J]. *Opt Lett*, 2011, **36**(23): 4620–4622.
- Fibrich M, Jelínková H, Šulc J, et al. Pr: YAlO₃ and Pr: LiYF₄ laser emission comparison under GaN laser diode pumping[J]. *Proc SPIE*, 2010, **7578**: 757828.
- Paboeuf D, Mhibik O, Bretenaker F, et al. Continuous-wave diode-pumped Pr³⁺: BaY₂F₈ orange laser[C]//*Proceedings of 2011 Conference on Lasers and Electro-Optics Europe and 12th European Quantum Electronics Conference*, 2011.
- Dong Y, Li S T, Zhang X H. All-solid-state blue laser pumped Pr: KY₃F₁₀-BBO ultraviolet laser at 305 nm[J]. *Laser Phys Lett*, 2011, **9**(2): 116–119.
- Li N, Liu B, Shi J J, et al. Research progress of rare-earth doped laser crystals in visible region[J]. *J Inorg Mater*, 2019, **34**(6): 573–589.
李纳, 刘斌, 施佼佼, 等. 可见光波段稀土激光晶体的研究进展[J]. *无机材料学报*, 2019, **34**(6): 573–589.
- Jia Y L, Zhang K Y, Jiao Z Y. Overview of novel tunable transition metal ion doped laser crystals characteristics and application[J]. *J Qingdao Univ (Nat Sci Ed)*, 2008, **21**(3): 53–59.
贾玉磊, 张凯云, 焦志勇. 新型掺杂稀土离子的可调谐激光晶体特性及应用[J]. *青岛大学学报(自然科学版)*, 2008, **21**(3): 53–59.
- Sun D L, Zhang Q L, Wang Z B, et al. Study on the spectral characteristics of Nd: GSGG laser crystal[J]. *Chin J Quantum Electron*, 2005, **22**(4): 570–573.
孙敦陆, 张庆礼, 王召兵, 等. Nd: GSGG激光晶体的光谱性能研究[J]. *量子电子学报*, 2005, **22**(4): 570–573.
- Noginov M A, Loutts G B, Bonner C E, et al. Crystal growth and characterization of a new laser material, Nd: Ba₅(PO₄)₃Cl[J]. *J Opt Soc Am B*, 2000, **17**(8): 1329–1334.
- Liu Z. Research on spectroscopic properties and laser performance of Pr: YLF crystal[D]. Xiamen: Xiamen University, 2013.
刘哲. Pr: YLF晶体光谱特性与激光性能研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2013.
- Adam J L, Sibley W A, Gabbe D R. Optical absorption and emission of LiYF₄: Pr³⁺[J]. *J Lumin*, 1985, **33**(4): 391–407.
- Caspers H H, Rast H E. Electronic and vibronic spectra of Pr³⁺ in LiYF₄[J]. *J Lumin*, 1975, **10**(6): 347–369.
- Esterowitz L, Bartoli F J, Allen R E. Spectroscopic determination of ground configuration energy levels in LiYF₄: Pr³⁺[J]. *J Lumin*, 1979, **21**(1): 1–16.
- Renfro G M, Windscheif J C, Sibley W A, et al. Optical transitions of Pr³⁺ and Er³⁺ ions in LiYF₄[J]. *J Lumin*, 1980, **22**(1): 51–68.
- Esterowitz L, Bartoli F J, Allen R E, et al. Energy levels and line intensities of Pr³⁺ in LiYF₄[J]. *Phys Rev B*, 1979, **19**(12): 6442–6455.
- Reid M F, Richardson F S. Electric dipole intensity parameters for Pr³⁺ in LiYF₄[J]. *J Lumin*, 1984, **31–32**: 207–209.
- Lakshman S V J, Buddhudu S. Racah and Judd-Ofelt parameters for Pr³⁺, Nd³⁺, and Er³⁺ ions in a laser liquid[J]. *J Quant Spectrosc Radiat Transf*, 1980, **24**(3): 251–257.
- Esterowitz L, Allen R, Kruer M, et al. Blue light emission by a Pr: LiYF₄ laser operated at room temperature[J]. *J Appl Phys*, 1977, **48**(2): 650–652.
- German K R, Kiel A, Guggenheim H. Stimulated emission from PrCl₃[J]. *Appl Phys Lett*, 1973, **22**(3): 87–89.
- Eichler H J, Liu B, Lu Z K, et al. Orange, red and deep-red flashlamp-pumped Pr³⁺: LiYF₄ laser with improved output energy and efficiency[J]. *Appl Phys B*, 1994, **58**(5): 421–424.
- Knowles D S, Zhang Z, Gabbe D, et al. Laser action of Pr³⁺ in LiYF₄ and spectroscopy of Eu²⁺-sensitized Pr in BaY₂FR₃[J]. *IEEE J Quantum Electron*, 1988, **24**(6): 1118–1123.
- Kaminskii A A. Visible lasing on five intermultiplet transitions of the ion Pr³⁺ in LiYF₄[J]. *Sov Phys Dokl*, 1983, **28**: 668.
- Sandrock T, Danger T, Heumann E, et al. Efficient continuous wave-laser emission of Pr³⁺-doped fluorides at room temperature[J]. *Appl Phys B*, 1994, **58**(2): 149–151.
- Danger T, Bleckmann A, Huber G. Stimulated emission and laser action of Pr³⁺-doped YAlO₃[J]. *Appl Phys B*, 1994, **58**(5): 413–420.
- Richter A, Heumann E, Osiać E, et al. Diode pumping of a continuous-wave Pr³⁺-doped LiYF₄ laser[J]. *Opt Lett*, 2004, **29**(22): 2638–2640.
- Richter A, Heumann E, Osiać E, et al. Semiconductor laser pumping of a continuous-wave Pr³⁺: LiYF₄ laser emitting at several wavelengths[C]//*Proceedings of 2005 Conference on Lasers and Electro-Optics*, 2005.
- Richter A, Heumann E, Huber G, et al. Power scaling of semiconductor laser pumped Praseodymium-lasers[J]. *Opt Express*, 2007, **15**(8): 5172–5178.
- Ostroumov V, Seelert W, Hunziker L, et al. 522/261 nm cw

- generation of Pr: YLF laser pumped by OPS laser[J]. *Proc SPIE*, 2007, **6451**: 645104.
- [30] Ostroumov V, Seelert W. 1 W of 261 nm cw generation in a Pr³⁺: LiYF₄ laser pumped by an optically pumped semiconductor laser at 479 nm[J]. *Proc SPIE*, 2008, **6871**: 68711K.
- [31] Fibrich M, Jelínková H, Šulc J, et al. Visible cw laser emission of GaN-diode pumped Pr: YAlO₃ crystal[J]. *Appl Phys B*, 2009, **97**(2): 363–367.
- [32] Fibrich M, Šulc J, Jelínková H, et al. Two wavelength generation of Pr: YAlO₃ laser by Lyot filter tuning[J]. *Laser Phys Lett*, 2010, **7**(4): 290–293.
- [33] Strotkamp M, Schwarz T, Jungbluth B, et al. Efficient, green laser based on a blue-diode pumped rare-earth-doped fluoride crystal in an extremely short resonator[J]. *Proc SPIE*, 2010, **7578**: 757800.
- [34] Fibrich M, Šulc J, Jelínková H, et al. Continuous-wave blue generation of intracavity frequency-doubled Pr: YAP laser[J]. *Opt Lett*, 2010, **35**(2): 214–216.
- [35] Xu B, Camy P, Doualan J L, et al. Visible laser operation of Pr³⁺-doped fluoride crystals pumped by a 469 nm blue laser[J]. *Opt Express*, 2011, **19**(2): 1191–1197.
- [36] Gün T, Metz P, Huber G. Efficient continuous wave deep ultraviolet Pr³⁺: LiYF₄ laser at 261.3nm[J]. *Appl Phys Lett*, 2011, **99**(18): 181103.
- [37] Wang F J, Liu Z, Xu B, et al. Blue laser diode pumped Pr³⁺: YLF visible lasers[J]. *Chin J Lasers*, 2013, **40**(12): 1202002. 王凤娟, 刘哲, 徐斌, 等. 蓝光激光二极管抽运Pr³⁺: YLF红绿可见光激光器[J]. *中国激光*, 2013, **40**(12): 1202002.
- [38] Fibrich M, Jelínková H. Power-scaled Pr: YAlO₃ laser at 747 and 720 nm wavelengths[J]. *Laser Phys Lett*, 2013, **10**(3): 035801.
- [39] Cornacchia F, Lieto A D, Tonelli M, et al. Efficient visible laser emission of GaN laser diode pumped Pr-doped fluoride scheelite crystals[J]. *Opt Express*, 2008, **16**(20): 15932–15941.
- [40] Weichmann U, Mackens U, Moench H. 47.2: Solid-state lasers emitting at red, green and orange wavelengths for projection applications[J]. *SID Symp Dig Tech Papers*, 2011, **42**(1): 681–684.
- [41] Hansen N O, Bellancourt A R, Weichmann U, et al. Efficient green continuous-wave lasing of blue-diode-pumped solid-state lasers based on praseodymium-doped LiYF₄[J]. *Appl Opt*, 2010, **49**(20): 3864–3868.
- [42] Weichmann U, Bellancourt A R, Mackens U, et al. Solid-state lasers for projection[J]. *J Soc Inf Dis*, 2010, **18**(10): 813–820.
- [43] Gün T, Metz P, Huber G. Power scaling of laser diode pumped Pr³⁺: LiYF₄ cw lasers: efficient laser operation at 522.6 nm, 545.9 nm, 607.2 nm, and 639.5 nm[J]. *Opt Lett*, 2011, **36**(6): 1002–1004.
- [44] Metz P W, Reichert F, Moglia F, et al. High-power red, orange, and green Pr³⁺: LiYF₄ lasers[J]. *Opt Lett*, 2014, **39**(11): 3193–3196.
- [45] Iijima K, Kariyama R, Tanaka H, et al. Power scaling and Q-switched operation of a Pr³⁺ doped YLF laser pumped by four high power InGaN-Blue-LDs[C]//*Proceedings of 2015 Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim*, 2015.
- [46] Tanaka H, Kannari F. Power scaling of continuous-wave visible Pr³⁺: YLF laser end-pumped by high power blue laser diodes[C]//*Proceedings of the Advanced Solid State Lasers 2017*, 2017.
- [47] Tanaka H, Fujita S, Kannari F. High-power visibly emitting Pr³⁺: YLF laser end pumped by single-emitter or fiber-coupled GaN blue laser diodes[J]. *Appl Opt*, 2018, **57**(21): 5923–5928.
- [48] Liu Z, Cai Z P, Huang S L, et al. Diode-pumped Pr³⁺: LiYF₄ continuous-wave deep red laser at 698 nm[J]. *J Opt Soc Am B*, 2013, **30**(2): 302–305.
- [49] Luo S Y, Yan X G, Cui Q, et al. Power scaling of blue-diode-pumped Pr: YLF lasers at 523.0, 604.1, 606.9, 639.4, 697.8 and 720.9nm[J]. *Opt Commun*, 2016, **380**: 357–360.
- [50] Lin X J, Zhu Y, Ji S H, et al. Highly efficient LD-pumped 607 nm high-power CW Pr³⁺: YLF lasers[J]. *Opt Laser Technol*, 2020, **129**: 106281.
- [51] Lin X J, Cui S W, Ji S H, et al. LD-pumped high-power high-efficiency orange vortex Pr³⁺: YLF₄ lasers[J]. *Opt Laser Technol*, 2021, **133**: 106571.
- [52] Lin X J, Chen M P, Feng Q C, et al. LD-pumped high-power CW Pr³⁺: YLF Laguerre-Gaussian lasers at 639 nm[J]. *Opt Laser Technol*, 2021, **142**: 107273.
- [53] Ruan S C, Sutherland J M, French P M W, et al. Dual wavelength Pr: YLF laser[J]. *Chin J Lasers B*, 1995, **4**(3): 207.
- [54] Yang H, Xu B, Cai Z P, et al. Orange laser at 604 nm and multi-wavelength emissions of orange and red laser of Pr³⁺: LiYF₄ pumped by blue LD[J]. *Acta Opt Sin*, 2014, **34**(10): 1014003. 杨晗, 徐斌, 蔡志平, 等. 蓝光LD抽运Pr³⁺: LiYF₄ 604nm橙光激光器和红橙多波长激光[J]. *光学学报*, 2014, **34**(10): 1014003.
- [55] Luo S Y, Xu B, Cui S W, et al. Diode-pumped continuous-wave dual-wavelength c-cut Pr³⁺: LiYF₄ laser at 696 and 719nm[J]. *Appl Opt*, 2015, **54**(34): 10051–10054.
- [56] Lin X J, Huang X X, Liu B, et al. Continuous-wave laser operation at 743 and 753 nm based on a diode-pumped c-cut Pr: YAlO₃ crystal[J]. *Opt Mater*, 2018, **76**: 16–20.
- [57] Lin X J, Feng Q C, Zhu Y, et al. Diode-pumped wavelength-switchable visible Pr³⁺: YLF₄ laser and vortex laser around 670 nm[J]. *Opto-Electron Adv*, 2021, **4**(4): 210006.
- [58] 陈家璧, 彭润玲. 激光原理及应用[M]. 第3版. 电子工业出版社, 2013: 94–95.
- [59] Kaminskii A A, Lyashenko A I, Isaev N P, et al. Quasi-cw Pr³⁺: LiYF₄ laser with $\lambda = 0.6395 \mu\text{m}$ and an average output power of 2.3 W[J]. *Quantum Electron*, 1998, **28**(3): 187–188.
- [60] Fibrich M, Jelínková H, Šulc J, et al. Radiation at the wavelength of 747 nm generated by flash-lamp pumped Pr: YAP laser[J]. *Proc SPIE*, 2008, **7138**: 71380B.
- [61] Jelínková H, Fibrich M, Čech M, et al. Blue generation of flash-lamp pumped Pr: YAP laser by intracavity frequency doubling[J]. *Laser Phys Lett*, 2010, **7**(1): 34–37.
- [62] Kojou J, Watanabe Y, Kannari F. High-power GaN diode pumped Q-switch Pr³⁺-doped LiYF₄ laser[C]//*Proceedings of 2009 Conference on Lasers & Electro Optics & The Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics*, 2009: 1–2.
- [63] Jelínková H, Fibrich M, Čech M, et al. Electro-optically Q-switched Pr: YAP laser generating at 747 nm[J]. *Laser Phys Lett*, 2009, **6**(7): 517–520.
- [64] Fibrich M, Jelínková H, Cech M, et al. Pr: YAP generation in blue spectral region[J]. *Proc SPIE*, 2009, **7354**: 735415.
- [65] Fibrich M, Jelínková H, Šulc J, et al. Flash-lamp pumped Pr: YAP laser operated at wavelengths of 747 nm and 662 nm[J]. *Proc SPIE*, 2009, **7193**: 71932N.
- [66] Kojou J, Watanabe Y, Kojima Y, et al. Q-switching of Pr³⁺-doped LiYF₄ visible lasers pumped by a high-power GaN diode laser[C]//*CLEO/QELS: 2010 Laser Science to Photonic Applications*, San Jose, 2010: 1–2.
- [67] Savitski V G, Ranieri I M, Krysa A B, et al. Passively Q-

- switched Pr:YLF laser[C]//*Proceedings of the CLEO: Science and Innovations 2011*, 2011.
- [68] Kojou J, Watanabe Y, Kojima Y, et al. Intracavity second-harmonic generation at 320 nm of an actively Q-switched Pr:LiYF₄ laser[J]. *Appl Opt*, 2012, **51**(9): 1382–1386.
- [69] Kojou J, Abe R, Kariyama R, et al. InGaN diode pumped actively Q-switched intracavity frequency doubling Pr:LiYF₄ 261 nm laser[J]. *Appl Opt*, 2014, **53**(10): 2030–2036.
- [70] Cheng Y J, Peng J, Xu B, et al. Passive Q-switching of Pr:LiYF₄ orange laser at 604 nm using topological insulators Bi₂Se₃ as saturable absorber[J]. *Opt Laser Technol*, 2017, **88**: 275–279.
- [71] Demesh M, Marzahl D T, Yasukevich A, et al. Passively Q-switched Pr: YLF laser with a Co²⁺: MgAl₂O₄ saturable absorber[J]. *Opt Lett*, 2017, **42**(22): 4687–4690.
- [72] Fibrich M, Doroshenko M, Šulc J, et al. InGaN diode pumped Pr: SrF₂ laser at 639 nm wavelength[J]. *Proc SPIE*, 2017, **10082**: 1008220.
- [73] Luo S Y, Yan X G, Xu B, et al. Few-layer Bi₂Se₃-based passively Q-switched Pr: YLF visible lasers[J]. *Opt Commun*, 2018, **406**: 61–65.
- [74] Tian Q Y, Xu B, Li N, et al. Direct generation of orthogonally polarized dual-wavelength continuous-wave and passively Q-switched vortex beam in diode-pumped Pr: YLF lasers[J]. *Opt Lett*, 2019, **44**(22): 5586–5589.
- [75] Wang P C, Yang Q, Wang X Y. Gold nanostars as the saturable absorber for a Q-switched visible solid-state laser[J]. *Appl Opt*, 2019, **58**(25): 6733–6736.
- [76] Xu B, Luo S Y, Yan X G, et al. CdTe/CdS quantum dots: effective saturable absorber for visible lasers[J]. *IEEE J Select Top Quant Electron*, 2017, **23**(5): 1900507.
- [77] Yang Q, Cao Y P, Liu X Q, et al. Passive Q-switching of Pr:LiYF₄ visible laser using SnS₂ as a saturable absorber[J]. *Opt Laser Technol*, 2019, **112**: 183–187.
- [78] Li N, Xu B, Cui S W, et al. High-order vortex generation from CW and passively Q-switched Pr: YLF visible lasers[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2019, **31**(17): 1457–1460.
- [79] Li Y, Jin L, Dai W C, et al. Study of an acousto-optic Q-switched double pulse output Pr: YLF all solid-state laser[J]. *Laser Phys*, 2020, **30**(12): 125002.
- [80] Hara Y, Fujita S, Shioya Y, et al. 640-nm Pr: YLF regenerative amplifier seeded by gain-switched laser diode pulses[J]. *Appl Opt*, 2020, **59**(17): 5098–5101.
- [81] Wu H, Xu J L, Zhang C, et al. Nonlinear saturable absorption in antimonene quantum dots for passively Q-switching Pr: YLF laser[J]. *Nano Sel*, 2021, **2**(9): 1741–1749.
- [82] Qi Y Y, Huo X W, Bai Z X, et al. High-energy, nanosecond orange laser at 604 nm based on Pr: YLF crystal at room temperature[J]. *Results Phys*, 2021, **26**: 104382.
- [83] Quan C, Sun D L, Zhang H L, et al. Performance of a 968-nm laser-diode side-pumped, electro-optical Q-switched Er, Pr: YAP laser with emission at 2.7 μm[J]. *Opt Eng*, 2021, **60**(6): 066112.
- [84] Han L L, Yang Z X, Yang Q, et al. Visible nonlinear optical properties of tellurium and application as saturable absorber[J]. *Opt Laser Technol*, 2021, **137**: 106817.
- [85] Ruan S, Sutherland J M, French P M W, et al. Kerr lens modelocked solid state laser in the red (639 nm)[J]. *Electron Lett*, 1994, **30**(19): 1601–1602.
- [86] Tong Y P, Sutherland J M, French P M W, et al. Self-starting Kerr-lens mode-locked femtosecond Cr⁴⁺: YAG and picosecond Pr³⁺: YLF solid-state lasers[J]. *Opt Lett*, 1996, **21**(9): 644–646.
- [87] Sutherland J M, French P M W, Taylor J R, et al. Visible continuous-wave laser transitions in Pr³⁺: YLF and femtosecond pulse generation[J]. *Opt Lett*, 1996, **21**(11): 797–799.
- [88] Gaponenko M, Metz P W, Härkönen A, et al. SESAM mode-locked red praseodymium laser[J]. *Opt Lett*, 2014, **39**(24): 6939–6941.
- [89] Zhang Y X, Yu H H, Zhang H J, et al. Laser-diode pumped self-mode-locked praseodymium visible lasers with multi-gigahertz repetition rate[J]. *Opt Lett*, 2016, **41**(12): 2692–2695.
- [90] Iijima K, Kariyama R, Tanaka H, et al. Pr³⁺: YLF mode-locked laser at 640 nm directly pumped by InGaN-diode lasers[J]. *Appl Opt*, 2016, **55**(28): 7782–7787.
- [91] Luo S Y, Xu B, Xu H Y, et al. High-power self-mode-locked Pr: YLF visible lasers[J]. *Appl Opt*, 2017, **56**(34): 9552–9555.
- [92] Fibrich M, Šulc J, Zavadilová A, et al. Nonlinear mirror mode-locked Pr: YAlO₃ laser[J]. *Laser Phys*, 2017, **27**(5): 055801.
- [93] Tanaka H, Iijima K, Sawada R, et al. Solid-state lasers directly pumped by InGaN-based green and blue laser diodes[C]//*Proceedings of 2017 Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim*, 2017: 1–4.
- [94] Luo S Y, Cai Z P, Xu H Y, et al. Diode-pumped 915-nm Pr: YLF laser passively mode-locked with a SESAM[J]. *Opt Express*, 2018, **26**(19): 24695–24701.
- [95] Li N, Huang J J, Xu B, et al. Direct generation of an ultrafast vortex beam in a CVD-graphene-based passively mode-locked Pr: LiYF₄ visible laser[J]. *Photonics Res*, 2019, **7**(11): 1209–1213.
- [96] Sugiyama N, Fujita S, Hara Y, et al. Diode-pumped 640 nm Pr: YLF regenerative laser pulse amplifier[J]. *Opt Lett*, 2019, **44**(13): 3370–3373.
- [97] Zhang Y X, Miao R L, Lu D Z, et al. Kerr-lens mode-locked Pr³⁺: LuLiF₄ laser[J]. *Opt Lett*, 2019, **44**(15): 3665–3668.
- [98] Jin L, Dai W C, Yu Y J, et al. Single longitudinal mode Q-switched operation of Pr: YLF laser with pre-lase and Fabry-Pérot etalon technology[J]. *Opt Laser Technol*, 2020, **129**: 106294.
- [99] Li Q S, Zhu L X, Zhang X H, et al. The effect of the depth of single longitudinal mode modulation in Q-switching pre-Pr³⁺: YLF laser[J]. *Opt Commun*, 2016, **372**: 250–254.
- [100] Luo S Y, Cai Z P, Xu H Y, et al. Direct oscillation at 640-nm in single longitudinal mode with a diode-pumped Pr: YLF solid-state laser[J]. *Opt Laser Technol*, 2019, **116**: 112–116.
- [101] Dai W C, Jin L, Dong Y, et al. The effect of injected energy on low energy single longitudinal mode pre-lase Q-switched Pr: YLF laser[J]. *J Appl Math Phys*, 2019, **7**(12): 2968–2978.
- [102] Zhang Y S, Zhou L B, Zhang T, et al. Blue diode-pumped single-longitudinal-mode Pr: YLF lasers in orange spectral region[J]. *Opt Laser Technol*, 2020, **130**: 106373.
- [103] Wei D, Pu S S, Niu N, et al. Combined dual-wavelength laser diode beam end-pumped single longitudinal mode Pr³⁺: LiYF₄ 360 nm ultraviolet laser[J]. *Acta Phys Sin*, 2019, **68**(5): 054202.
- 窦微, 浦双双, 牛娜, 等. 双波长二极管合束端面抽运掺镨氟化铋锂单纵模360 nm紫外激光器[J]. *物理学报*, 2019, **68**(5): 054202.

作者简介



曹伟航 (1997-), 男, 硕士研究生, 从事固体激光器研究。

E-mail: 23120201150212@stu.xmu.edu.cn



李状 (1996-), 男, 硕士研究生, 从事固体激光器研究。

E-mail: 23120201150233@stu.xmu.edu.cn

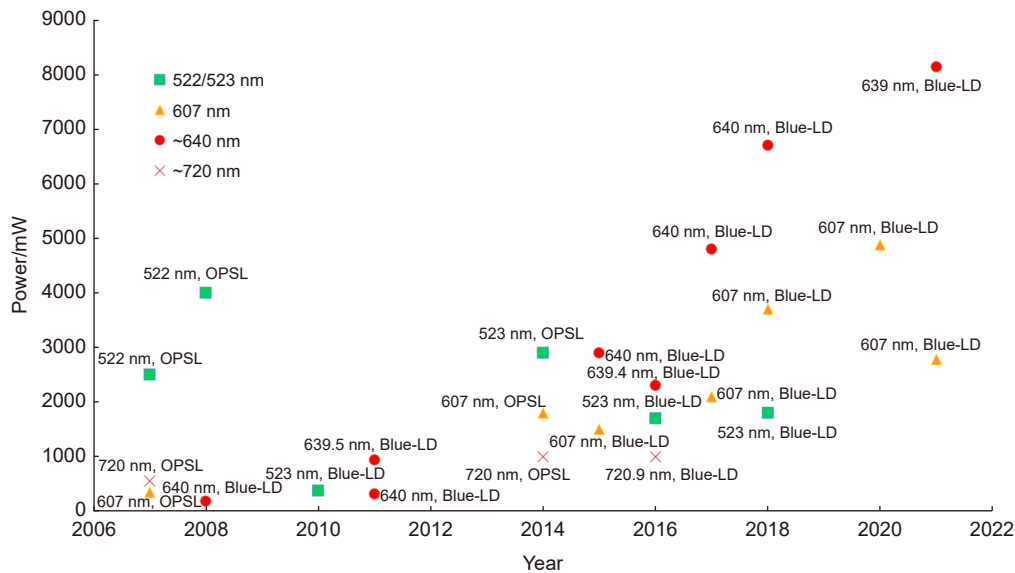


【通信作者】蔡志平 (1965-), 男, 博士生导师, 教授, 从事固体与光纤激光器研究。

E-mail: zpcai@xmu.edu.cn

Overview of research and development of Pr³⁺ doped solid-state lasers

Cao Weihang^{1†}, Li Zhuang^{1†}, Shi Chengkun¹, Lin Jiazhen¹, Lin Xiuji¹,
Xu Guozhen², Xu Huiying¹, Cai Zhiping^{1*}



Research status of several typical Pr:YLF continuous-wave visible lasers.

Overview: Visible lasers are used extensively in laser color display, laser medical treatment, quantum information, optical communication, and other applications. Trivalent Pr-ion (Pr³⁺) has attracted much attention due to its rich transitions in the visible band. As early as the 1960s, praseodymium-doped (Pr³⁺) crystals were investigated as gain mediums for laser production. Compared with the way of obtaining visible laser by optical nonlinear processes such as frequency doubling and mixing, the way of directly down converting the laser energy level by using Pr³⁺ doped crystal to obtain visible laser avoids the use of the nonlinear optical crystal, which makes the laser have high conversion efficiency, compact structure, good quality of laser beam, and no requirement of strict temperature control. Especially in recent years, the emergence of commercial pump sources such as laser diode (LD) and optically pumped semiconductor laser (OPSL) has made great progress in the research of Pr³⁺ doped solid-state lasers. In this paper, Pr³⁺ solid-state lasers are divided into three types: continuous-wave output type, pulse output type and single longitudinal mode output type. Among them, the continuous-wave laser is typical in green, orange and red laser bands. The laser output power can exceed the watt level. The maximum output power at 522 nm green laser is more than 4 W, and the maximum power at 607 nm orange laser is 4.88 W. The maximum power at 639 nm red laser is up to 8.14 W. For pulse laser, the laser output with a pulse width of tens to hundreds of nanoseconds can be obtained in Q-switching, and the pulse width in mode-locking is narrower. The mode-locked pulse widths of 8 ps, 400 fs and 1.1 ps are obtained at red 639 nm, orange 613 nm and 604 nm respectively. The mode-locked pulse widths of other visible optical bands have been reported to range from more than ten picoseconds to hundreds of picoseconds. In the aspect of single longitudinal mode, the research work of realizing single-frequency laser output by using Pr³⁺ doped crystal mainly focuses on 360 nm UV, 604 nm, 607 nm orange laser and 639 nm, 640 nm red laser. At the same time, taking time as the mainline, this paper summarizes the research history and current status of Pr³⁺ doped solid-state lasers, and looks forward to the future of Pr³⁺ doped solid-state lasers.

Cao W H, Li Z, Shi C K, et al. Overview of research and development of Pr³⁺ doped solid-state lasers[J]. *Opto-Electron Eng*, 2022, 49(4): 210364; DOI: [10.12086/oe.2022.210364](https://doi.org/10.12086/oe.2022.210364)

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (61975168)

¹Department of Electronic Engineering, School of Electronic Science and Engineering, Xiamen University, Xiamen, Fujian 361005, China;

²College of Physics and Information Engineering, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350108, China

* E-mail: zpcai@xmu.edu.cn

†These authors contributed equally to this work.