

激光与光电子学进展

单掺钬固体激光器的研究进展

闵欢欢, 刘广华, 翟学君, 兰瑞君, 申英杰*, 张骏**

烟台大学光电信息科学技术学院, 山东 烟台 264005

摘要 中红外 $2\ \mu\text{m}$ 波段固体激光在工业、军事、医疗和科研等领域有着广泛的应用。单掺钬固体激光器是产生 $2\ \mu\text{m}$ 波段激光的重要手段, $2\ \mu\text{m}$ 激光器还可以为中红外光学参量振荡器提供有效的泵浦源。本文介绍了单掺钬固体激光器的优点, 综述了近十年来基于各种基质的单掺钬固体激光器的研究进展, 最后对单掺钬固体激光器的未来发展前景进行了展望。

关键词 激光器; 固体激光器; $2\ \mu\text{m}$ 单掺钬激光; 被动锁模; 主动调 Q

中图分类号 TN248

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.210002

Research Progress of Single-Doped Holmium Solid-State Lasers

Min Huanhuan, Liu Guanghua, Zhai Xuejun, Lan Ruijun, Shen Yingjie*, Zhang Jun**

School of Opto-Electronic Information Science and Technology, Yantai University,
Yantai 264005, Shandong, China

Abstract The mid-infrared $2\ \mu\text{m}$ band solid-state laser has a wide range of applications in the fields of industry, military, medical, and scientific research. Single-doped holmium solid-state laser is an important method to produce $2\ \mu\text{m}$ lasers. $2\ \mu\text{m}$ lasers can also provide an effective pump source for mid-infrared optical parametric oscillator. This paper introduces the advantages of single-doped holmium solid-state laser, and summarizes the research progress of single-doped holmium solid-state lasers based on various substrates in the past decades. Finally, the future development prospect of single-doped holmium solid-state lasers is prospected.

Key words lasers; solid-state laser; $2\ \mu\text{m}$ single-doped holmium laser; passive mode-locking; active Q-switching

1 引 言

单掺钬固体激光器的输出中心波长位于 $2\ \mu\text{m}$ 波段附近, 它的输出波长处在大气窗口、水的吸收峰值以及人眼安全区, 并且在大气中衰减较低, 因而高功率的 $2\ \mu\text{m}$ 钬激光器在气象监测、激光雷达、激光测距、光学参量振荡器、激光医疗外科手术、材料加工和光谱学等领域显示出重要的应用前景并且备受关注^[1-6]。单掺钬固体激光器的 $2\ \mu\text{m}$ 激光位于 CO_2 和水分子的吸收峰处, 可以用它作为光源, 探测大气中 CO_2 和水分子, 还可以用于激光测距和激光雷达, 在军事方面应用广泛^[7]。使用 $2\ \mu\text{m}$ 波段的激光作为光学参量振荡器的泵浦源, 可以产生 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 中红外激光, 可用于石油开采、大气中温室气体检测、数据通信和激光光谱学研究等^[8-9]。在医学方面, 人体组织吸收峰值在 $1.93\ \mu\text{m}$ 附

近, 因此 $2\ \mu\text{m}$ 激光对组织的吸收不是很强烈, 从而对组织的穿透深度就比较浅, 在手术中利用汽化与切割相结合的方式, 有利于血液的凝结, 进一步减小手术创伤, 较传统手术更安全, 并发症少, 而且 $2\ \mu\text{m}$ 波段激光在手术中不会对医生视觉系统造成影响, 从而给医生提供清晰的手术视野, 这将有利于提高外科手术精度^[10]。目前 $2\ \mu\text{m}$ 激光应用于前列腺增生症等泌尿科疾病的治疗, 已取得巨大成功^[11]。在工业加工方面, 随着 $2\ \mu\text{m}$ 激光技术的成熟, 激光可以对塑料材料进行高精度的激光加工, 在集成电路的制造、材料的切割和焊接等方面具有重要的应用价值^[12]。

经过近十几年的快速发展, 随着激光增益介质的不断拓展和晶体生长工艺的逐渐成熟, 实现高功率、高重复频率、窄脉宽和高光束质量的单掺钬固体激光器是目前研究的重点。

收稿日期: 2021-09-12; 修回日期: 2021-10-13; 录用日期: 2021-10-27

基金项目: 国家自然科学基金(61805209)

通信作者: *yingjiey@163.com; **jzhang@ytu.edu.cn

2 单掺钬固体激光器

固体激光器的波长主要由所掺杂的粒子决定,掺 Ho^{3+} 的激光器输出的中心波长在 $2\ \mu\text{m}$ 波段,所以单掺 Ho^{3+} 的物质作为激光介质是产生 $2\ \mu\text{m}$ 波长的重要手段。单掺 Tm^{3+} 、 Tm^{3+} 和 Ho^{3+} 双掺也可以得到 $2\ \mu\text{m}$ 激光输出^[13],由于二极管激光器(LD)的成熟发展^[14],使用单掺 Tm^{3+} 的固体激光器产生 $2\ \mu\text{m}$ 激光较为实用,但在脉冲输出下,和连续输出相比存在较大的不足,而 Tm^{3+} 和 Ho^{3+} 双掺激光器,工作条件相对严格,而且其 Ho^{3+} 上转换和吸收损耗也较大,影响 Tm^{3+} 和 Ho^{3+} 双掺激光器的输出性能,大大降低输出功率,对于单掺 Ho^{3+} 固体激光器来说,其本身的单掺 Ho^{3+} 离子的增益介质拥有较大的发射截面和较长的上能级寿命,更容易实现 $2\ \mu\text{m}$ 高性能脉冲激光输出。

早在 20 世纪 60 年代,就出现了单掺 Ho^{3+} 固体激光器的报道。美国贝尔实验室,在低温条件下,首次实现了单掺 Ho^{3+} 固体激光器 $2\ \mu\text{m}$ 激光输出^[15]。单掺 Ho^{3+} 晶体的吸收峰主要集中在 $1.9\ \mu\text{m}$ 波段附近,近几十年随着 $1.9\ \mu\text{m}$ 激光技术越来越成熟,采取单掺 Tm^{3+} 激光器(波长为 $1.9\ \mu\text{m}$)直接泵浦单掺 Ho^{3+} 激光器是获得高性能 $2\ \mu\text{m}$ 波段激光输出的最好方案^[16],使得单掺 Ho^{3+} 固体激光器再次受到研究学者的青睐。单掺 Ho^{3+} 晶体按照基质材料的不同,可以分为单掺 Ho^{3+} 氧化物晶体、单掺 Ho^{3+} 氟化物晶体、单掺 Ho^{3+} 钽酸盐晶体、单掺 Ho^{3+} 硅酸盐晶体、单掺 Ho^{3+} 钨酸盐晶体、单掺 Ho^{3+} 钼酸盐晶体,接下来主要以常用的基质材料为工作物质的单掺 Ho^{3+} 固体激光器的发展现状进行介绍,同时结合激光器的连续输出、调 Q、锁模、单纵模、可调谐等研究方向进行具体介绍。

3 基于各基质单掺钬激光器的发展现状

3.1 单掺钬氧化物固体激光器

单掺钬氧化物固体激光器的掺杂基质主要以石

榴石晶体(YAG)和铝酸盐晶体(YAP)为代表,其中 YAG 晶体属于立方晶系,是一种石榴石结构的各向同性复合氧化物,可作为优异的激光晶体基质,以石榴石作为基质的激光器研究是最多的,也是较为成熟的,我们就从单掺钬石榴石($\text{Ho}:\text{YAG}$)激光器的连续输出、调 Q、锁模、单纵模、可调谐等研究方向进行介绍。

对于连续激光器的研究主要在大功率输出和简单紧凑的结构上,2012 年,德国 LISA 的 Lamrini 等^[17]采用简单的平平腔结构的谐振腔,使用激光二极管堆栈直接泵浦,受可用泵功率的限制,在连续波运转下获得了 55 W 的激光输出功率,输出波长在 $2.122\ \mu\text{m}$,斜率效率达到 62%,实验装置如图 1 所示。同年,哈尔滨工业大学的 Shen 等^[18]报道了两个级联 $\text{Ho}:\text{YAG}$ 晶体的高功率双端泵浦 $\text{Ho}:\text{YAG}$ 激光器,用四个波长为 $1.91\ \mu\text{m}$ 的 $\text{Tm}:\text{YLF}$ 固体激光器作为泵浦源,在连续波运转下,获得了输出功率最高为 103 W 的 2097 nm 和 2122 nm 的激光输出,实现了 $\text{Ho}:\text{YAG}$ 激光器的百瓦级输出,斜率效率为 67.8%,实验装置如图 2 所示。随后对 $\text{Ho}:\text{YAG}$ 激光器的研究呈现多样化,体现在增益介质 $\text{Ho}:\text{YAG}$ 材料结构上,2018 年,马克斯普朗克量子光学研究所的 Zhang 等^[19]用 Tm 光纤激光器泵浦的 $\text{Ho}:\text{YAG}$ 薄盘激光器,获得 50 W 的输出功率,光光转换效率达到 58%,斜率效率为 61%。2018 年,哈尔滨工业大学的 Duan 等^[20]使用双晶 $\text{Ho}:\text{YAG}$ 板条激光器,获得 146.4 W 的最大连续输出功率,实现了 $\text{Ho}:\text{YAG}$ 激光器输出功率的进一步增大,对应的斜率效率为 66.0%,光光转换效率为 61.2%。2020 年,中国科学院的 Hu 等^[21]报道了一个结构紧凑的 Ho 激光器,通过普通 808 nm LD 泵浦 $\text{Tm}:\text{YVO}_4$ 激光器,进行腔内泵浦 $\text{Ho}:\text{YAG}$ 晶体,实现了在 2122 nm 处最大输出功率为 954 mW 的 Ho 激光振荡,可以看到掺 Tm 晶体和掺 Ho 晶体共用一个谐振腔的内腔式泵浦,不利于实现高功率激光输出。

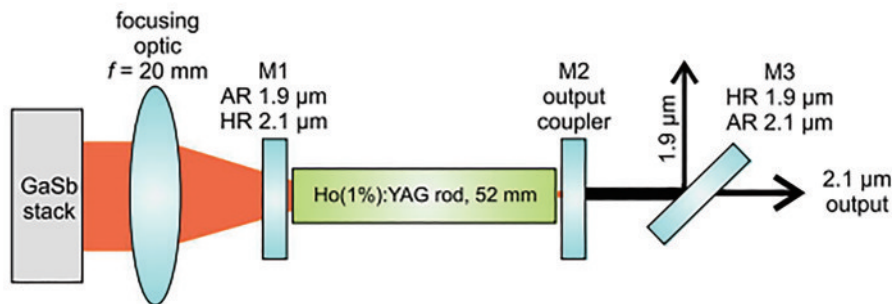


图 1 Tm 激光器泵浦 $\text{Ho}:\text{YAG}$ 激光器^[17]

Fig. 1 $\text{Ho}:\text{YAG}$ laser pumped by Tm laser^[17]

激光器的调 Q 研究集中在主动调 Q 和被动调 Q,用于实现激光器的短脉宽、高峰值功率和高重复频率

输出。2014 年,北京理工大学 Wang 等^[22]报道了工作在 2097 nm 的主动调 Q $\text{Ho}:\text{YAG}$ 陶瓷激光器,最短脉

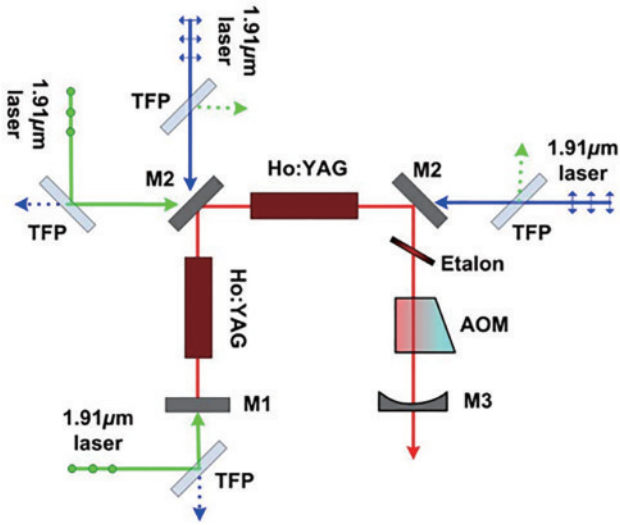


图 2 1.91 μm Tm:YLF 固体激光器泵浦 Ho:YAG 激光器^[18]
Fig. 2 Ho:YAG laser pumped by 1.91 μm Tm:YLF solid-state laser^[18]

宽为 83 ns, 在脉冲重复频率 (PRF) 为 200 Hz 时脉冲能量为 9.6 mJ。2015 年, 清华大学的 Ji 等^[23] 使用波长为 1907 nm 的 Tm 光纤激光器泵浦 Ho:YAG 激光器, 在脉冲操作下, 重复频率为 1 kHz 时, 实现了 12.8 mJ 的单脉冲能量输出, 峰值功率达到 514.5 kW。2018 年, Zhao 等^[24] 用 1907 nm 的 Tm 光纤激光器谐振泵浦混合多晶陶瓷 Ho:YAG 激光器进行主动调 Q 实验, 在 500 Hz 的脉冲重复频率和 280 kW 的峰值功率下, 获得 6.8 ns 的最短脉冲持续时间。同年, Duan 等^[25] 采用双端泵浦结构泵浦 Ho:YAG 激光器, 在声光调 Q 模式下, 脉冲重复频率为 20 kHz 时, 获得最大平均输出功率为 106 W、脉冲能量为 5.3 mJ、脉冲宽度为 21 ns 的激光, 他们还使用双晶 Ho:YAG 板条激光器^[20] 进行声光调 Q 实验, 在 20 kHz 的脉冲重复率下实现了 141.3 W 的最大平均输出功率, 获得了 39 ns 的最小脉冲宽度。在被动调 Q 的研究中, 2016 年, 崔铮等^[26] 采用 Tm 光纤激光器作为 Ho:YAG 激光器泵浦源, 使用多层石墨烯作为可饱和吸收体, 获得最小脉冲宽度

3.1 μs、重复频率 66.6 kHz 的脉冲激光输出。2017 年, 清华大学的 Ji 等^[27] 还报道了使用 Cr²⁺:CdSe 作为饱和和吸收体, 实现 Ho:YAG 激光器的被动调 Q, 对应于 685 Hz 的重复频率, 脉冲持续时间为 15.4 ns, 脉冲峰值功率为 114.7 kW。

激光器的锁模研究也是为了获得短脉宽, 但锁模激光器的脉宽更窄, 一般能达到 ps 和 fs 量级。2016 年, 德国 Wang 等^[28] 用 1908 nm 的 Tm 光纤激光器泵浦 Ho:YAG 陶瓷激光器, 以 GaSb 材质 SESAM 饱和和吸收体进行了被动锁模实验, 实验装置如图 3 所示, 在 2059~2121 nm 的调谐范围内实现了稳定的锁模激光输出, 波长为 2121 nm, 脉冲重复频率为 82 MHz, 最大输出功率为 230 mW, 在 2064 nm 处获得了 2.1 ps 的最短脉宽。同年, 王吉等^[29] 报道了采用带内抽运方式, 使用 Tm:YLF 作为抽运源, 可在室温下工作的输出连续锁模脉冲的主动锁模 Ho:YAG 激光器, 获得了 82.75 MHz 的脉冲重复频率, 激光中心波长为 2097.25 nm, 斜率效率为 13.3%, 锁模脉冲宽度约 86.6 ps, 采用主动锁模的方式能获得输出脉宽百皮秒量级的锁模钛激光器。2019 年, 清华大学 Zhang 等^[30] 基于再吸收效应, 得到了掺杂 Tm 光纤激光器泵浦的紧凑自锁模 Ho:YAG 激光器。在入射泵功率 26.9 W 时, 得到 431.3 ps 的最短脉宽, 脉冲重复频率为 656.6 MHz, 中心波长为 2128.36 nm, 实验装置如图 4 所示。

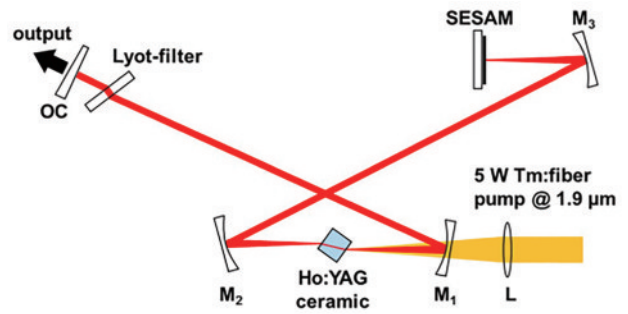


图 3 锁模 Ho:YAG 陶瓷激光器^[28]
Fig. 3 Mode-locked Ho:YAG ceramic laser^[28]

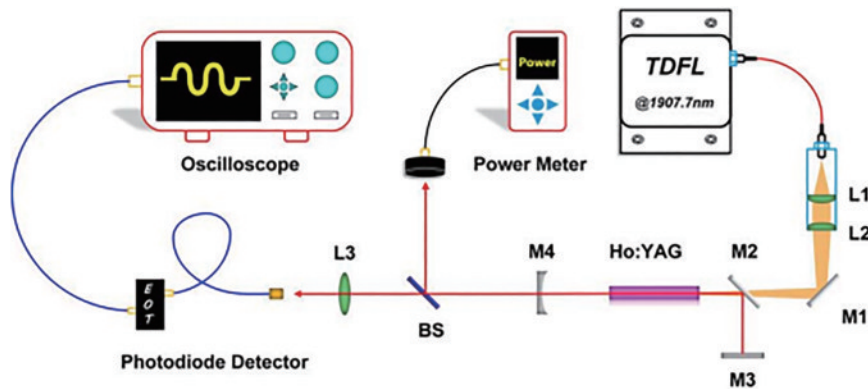


图 4 自锁模 Ho:YAG 激光器^[30]
Fig. 4 Self-mode-locked Ho:YAG laser^[30]

与普通的自激激光器相比,单纵模(SLM)激光器可以提供更长的相干长度、更窄的线宽和更好的光束质量^[31-32]。在单纵模激光器的研究中,2017年,北京理工大学 Li 等^[33]通过使用两个腔内法布里-珀罗(F-P)标准具,实现波长从 2119.7 nm 到 2131.5 nm 调谐,在 2129.6 nm 处获得了 102 mW 的最大单纵模输出功率。2020年,哈尔滨工业大学 Dai 等^[34]实现了在连续波和脉冲操作下具有扭曲模腔的单纵模 Ho:YAG 激光器。在 2097.46 nm 波长处获得了 0.76 W 的最大连续波单纵模输出功率,对应的斜率为 28.9%,输出波长可以从 2096.94 nm 调谐到 2098.48 nm。脉冲重复频率为 2 kHz,单频脉冲能量达到 0.2 mJ,脉冲宽度为 116.5 ns,实验装置如图 5 所示。

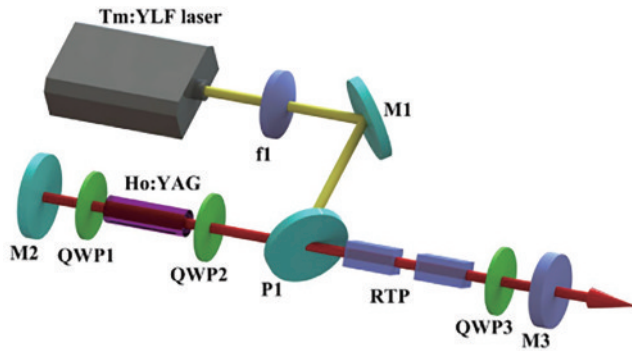


图 5 扭曲模式 Ho:YAG 激光器^[34]

Fig. 5 Twisted-mode Ho:YAG laser^[34]

由于 Ho:YAG 晶体具有良好的机械性能和泵浦吸收特性,其晶体适合作为结构紧凑、高功率的单掺钬激光器的增益介质,对 Ho:YAG 晶体的研究方向很多,有连续运转高功率、调 Q 锁模以及窄脉宽等研究,都取得了不错的研究成果。单掺 Ho:YAG 激光器在高功率连续输出激光中表现优异,可以在室温下连续运转,但它自身存在热致双折射现象显著的缺点。其输出功率也受到泵浦功率的限制, Ho:YAG 晶体的吸收峰比较锐利,因此其对泵浦光的波长稳定性和输出线宽要求较高。在单掺 Ho:YAG 激光器调 Q 实验中, Ho³⁺ 离子具有较长激光上能级寿命对于调 Q 操作非常有利,主动调 Q 的实验相比被动调 Q 易于操作,而被动调 Q 其结构简单、成本低,深受研究者青睐。单掺 Ho:YAG 激光器在锁模实验中,由于 YAG 具有出色的热机械性能,表现出比其他掺杂基质更好的锁模特性。

YAP 晶体属于斜方晶系结构,各向异性的负双轴晶体,具有非常优异的自然双折射特性,有利于获得较高功率的激光输出。

在 Ho:YAP 激光器连续激光输出研究中,2012年,哈尔滨工业大学的 Shen 等^[35]在室温下用二极管泵浦的 Tm:YLF 激光器谐振泵浦 a 轴切割的 Ho:YAP 激光器, Tm:YLF 激光器输出波长 1.91 μm,在

2118.7 nm 处获得的最大连续运转的平均输出功率为 14.6 W,对应于吸收泵浦功率的斜率效率为 69.35%,光光转换效率为 63.04%,光束质量因子 $M^2=1.51$,实验装置如图 6 所示。2020年,江苏师范大学的 Tang 等^[36]将自制的 1930.5 nm Tm 掺杂全光纤主振荡功率放大(MOPA)系统用于纵向泵浦 Ho:YAP 晶体,在 2117 nm 处获得高达 107.3 W 的连续输出功率,吸收泵浦功率为 215.4 W,对应的斜率效率为 50.6%,实验装置如图 7 所示。

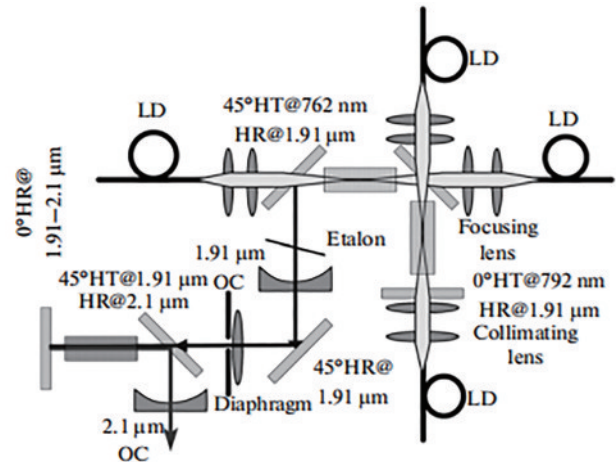


图 6 Tm:YLF 激光器共振泵浦 Ho:YAP 激光器^[35]

Fig. 6 Ho:YAP laser resonantly pumped by Tm:YLF laser^[35]

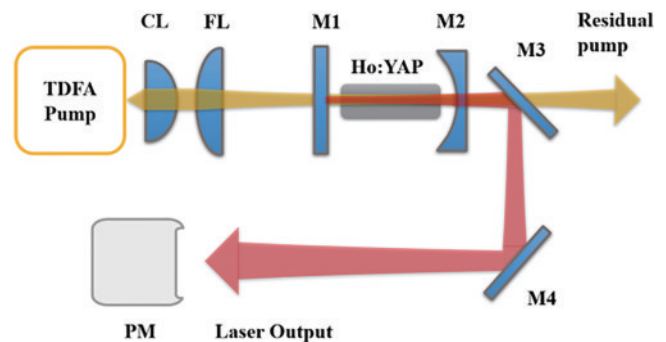


图 7 1930.5 nm TDF 泵浦的 Ho:YAP 激光器^[36]

Fig. 7 Ho:YAP laser pumped by 1930.5 nm TDF^[36]

在 Ho:YAP 激光器调 Q 实验的研究中,2014年,哈尔滨工业大学的 Wang 等^[37]利用 Tm 光纤激光器带内双端泵浦 Ho:YAP 激光器,在主动调 Q 模式、重复频率 10 kHz 下,实现了大于 1 mJ 的单脉冲能量,以及 36.9 kW 的峰值功率和 29 ns 的脉冲宽度,实验装置如图 8 所示。2018年,Duan 等^[38]报道了双端泵浦 Ho:YAP 激光器声光调 Q 实验,在 3 kHz 的重复频率下,获得 15 ns 的脉冲宽度。2021年,长春理工大学的 Niu 等^[39]通过 LD 双端泵浦结构,泵浦 Ho:YAP 激光器,进行声光调 Q 实验,在输出中心波长为 2129.22 nm 处,获得 18.02 W 的平均功率,最短脉宽为 104.2 ns,斜率效率到达 70.11%。

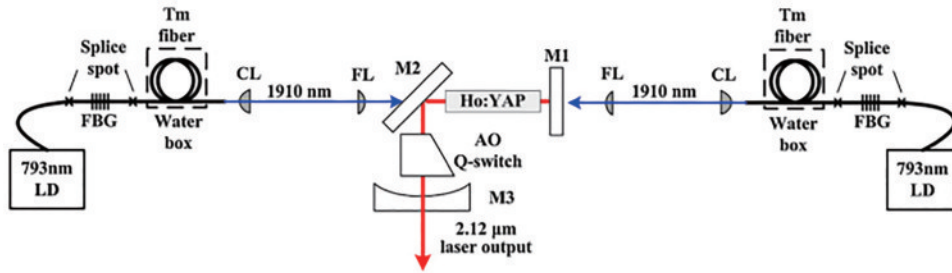


图 8 Tm 光纤激光器泵浦 a 切 Ho:YAP 激光器^[37]

Fig. 8 The a-cut Ho:YAP laser pumped by Tm fiber laser^[37]

在 Ho:YAP 激光器的锁模实验的研究中, 2016 年, 哈尔滨工业大学的 Duan 等^[40]用 1.91 μm Tm 光纤激光器作为泵浦源, 泵浦 Ho:YAP 激光器, 实验装置如图 9 所示。在主动锁模实验中, 在 25.9 W 的入射泵浦功率下得到 2.87 W、2117.8 nm 的脉冲光输出, 在 81.52 MHz 的重复频率下获得了 254.8 ps 的脉冲, $M^2=1.6$ 。

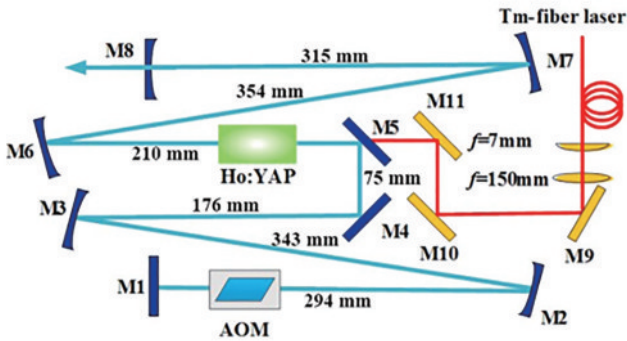


图 9 Tm 光纤激光器泵浦 Ho:YAP 连续波锁模激光器^[40]

Fig. 9 Continuous-wave mode-locked Ho:YAP laser pumped by Tm fiber laser^[40]

在 Ho:YAP 激光器的单纵模实验的研究中, 2021 年, 哈尔滨工业大学的 Dai 等^[41]提出了一种单频 Ho:YAP 环形激光器, 通过旋转法拉第旋转器和半波片, 实现了 307 mW 的单频 Ho:YAP 激光输出, 波长为 2118.45 nm, 把法布里-珀罗标准具插入单向运转 Ho:YAP 环形谐振腔时, 获得了 2117.05~2119.25 nm 可调谐的单频激光输出, 实验装置如图 10 所示。

YAP 晶体具有热导率高、最大声子能量低和激光损伤阈值高的特点, 正交对称和钙钛矿结构使 YAP 晶体具有双折射特性, 掺 Tm 的固体激光器或全光纤激光器作为 Ho:YAP 激光器的带内泵浦源, 可以有效提高 Ho:YAP 激光器的输出功率, 和 Ho:YAG 激光器一样, 在输出高功率上表现突出, 也是研究最广泛和深入的激光器之一。

Y_2O_3 也是常见的钬掺杂的氧化物基质, 2020 年, 江苏师范大学的 Li 等^[42]用 1931 nm 的高亮度光纤激光源泵浦 Ho:Y₂O₃ 陶瓷激光器, 进行声光调 Q 实验, 在 10 kHz 的脉冲重复频率下, 42.6 W 的吸收泵浦功率产

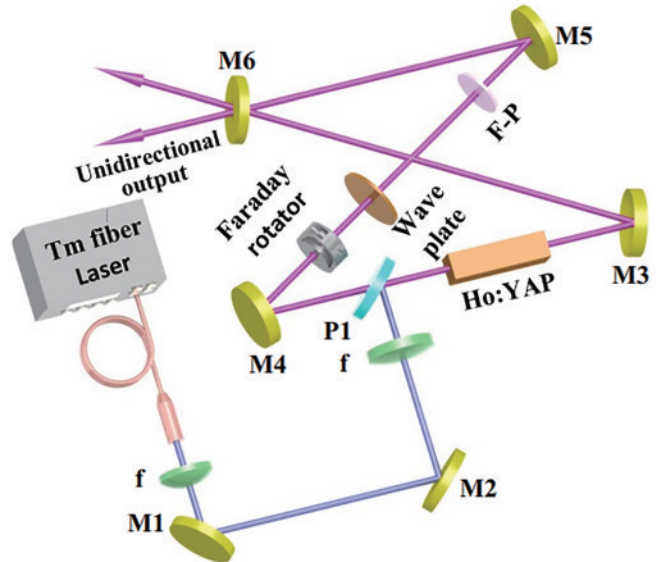


图 10 Ho:YAP 环形激光器^[41]

Fig. 10 Ho:YAP ring laser^[41]

生了超过 20 W 的平均输出功率, 获得 33.1 ns 的最短脉宽。单掺钬氧化物固体激光器的掺杂基质还有 LuAG 晶体, 也是立方石榴石结构的氧化物晶体。2009 年, 哈尔滨工业大学的 Duan 等^[43]在室温下完成了 2.1 μm 的 Ho:LuAG 激光器的主动调 Q 实验。在 10 kHz 的重复频率下, Ho:LuAG 激光器的最大平均输出功率为 9.9 W, 相对于吸收泵浦功率的斜率效率为 69.9%。此外, 还获得的最小脉冲宽度为 33.0 ns, 对应的峰值功率为 30.0 kW 的激光输出。

3.2 单掺钬氟化物固体激光器

氟化物晶体中典型的是氟化钇锂 (YLF)、氟化钙 (CaF₂) 和氟化镱锂 (LLF) 等晶体, 和 YAG 晶体相比, 氟化物晶体的上能级寿命时间长, 发射截面大, 在实现高功率和大能量方面具有优势。

在单掺钬氟化物固体激光器连续实验的研究中, 2021 年, Wang 等^[44]报道了一种紧凑而高效的 Ho:YLF 板条激光器, 由自制的 Tm:YAP 板条激光器泵浦, 泵浦光通过两个柱面透镜耦合到晶体中, 在 2064 nm 的波长处, 最大输出功率为 125 W, Ho:YLF 激光振荡器达到百瓦级输出功率。

在单掺钬氟化物固体激光器调 Q 实验的研究中,

2010年,法国的 Schellhorn^[45]实现了波长为 1.94 μm 的 Tm 光纤激光器泵浦 Ho:LLF 晶体调 Q 激光器,在重复频率为 100 Hz 时,波长为 2052 nm,最大单脉冲能量为 24.8 mJ,脉宽为 47 ns。2013年,挪威的 Fonnum 等^[46]用 1.94 μm 的 Tm 光纤激光器泵浦 Ho:YLF 激光器,获得了重复频率为 1 Hz、脉宽为 14 ns、输出波长为 2.051 μm 、单脉冲能量为 550 mJ 的激光脉冲输出。2018年,哈尔滨工业大学 Duan 等^[47]报道了一种线宽变窄的连续波(CW)和声光调 Q Ho:CaF₂ 激光器。使用体布拉格光栅,在 2100.5 nm 波长处的最大连续输出功率为 6.94 W,斜率效率为 57.9%,获得了

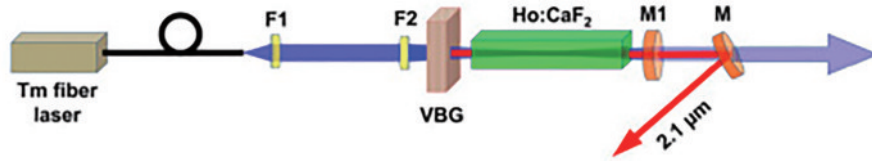


图 11 CW 波长锁定 Ho:CaF₂ 激光器^[47]
Fig. 11 CW wavelength locked Ho:CaF₂ laser^[47]

在单掺钬氟化物固体激光器锁模实验中,2011年,意大利米兰理工大学的 Coluccelli 等^[50]使用半导体饱和吸收镜(SASEM)为饱和吸收体,实现了 Ho:YLF 被动锁模固体激光器输出,实验装置如图 12 所示,获得了平均输出功率为 0.58 W,输出激光中心波长为 2.06 μm ,重复频率 122 MHz,最小脉冲宽度为 1.1 ps 的激光脉冲。

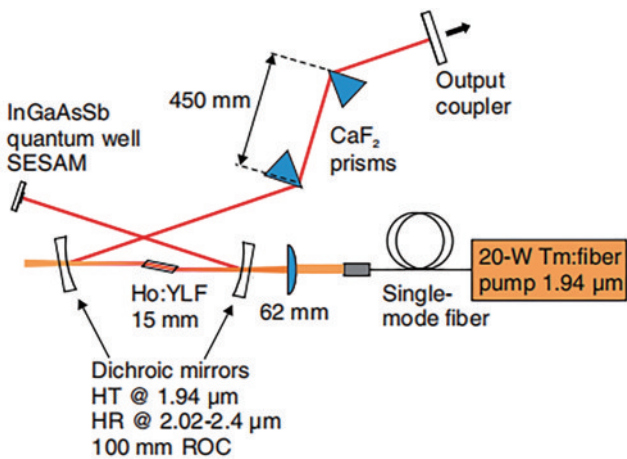


图 12 被动锁模 Ho:YLF 激光器^[50]
Fig. 12 Passively mode-locked Ho:YLF laser^[50]

在可调谐单纵模激光器实验中,2017年哈尔滨工业大学 Wu 等^[51]报道了基于法拉第效应的高效可调谐单纵模 Ho:YLF 环形激光器,用于测量大气二氧化碳含量,波长 2051.65 nm 的单纵模功率达到 528 mW,斜率效率为 39.5%, M^2 因子为 1.07,通过插入 0.5 mm 厚度的 F-P 标准具获得约 178 GHz 的可调谐范围。此外,通过主振荡器功率放大器(MOPA)技术在 2051.65 nm 处注入功率为 528 mW,最大单纵模功率

0.31 nm 的线宽。在声光调 Q 实验中, Ho:CaF₂ 激光器获得的最大平均输出功率为 6.08 W,对应于 51.2% 的斜率效率,在 3 kHz 的脉冲重复频率下实现了 54 ns 的最小脉冲宽度,实验装置如图 11 所示。2020年, Zhang 等^[48]用氧化钨锡作为 Ho:YLF 激光器的可饱和吸收体进行被动调 Q 实验,在 20.53 kHz 的重复频率下,获得了 312 mW 最大平均输出功率和 2.42 μs 脉冲宽度。同年,他们还用石墨炔纳米材料作为 Ho:YLF 激光器的可饱和吸收体^[49],获得 443 mW 的最大平均输出功率,10.8 W 的峰值功率和 1.38 μs 脉冲宽度。

达到 1.5 W,实验装置如图 13 所示。同年,布拉格捷克技术大学的 Némec 等^[52]报告了用波长 1.94 μm 的 Tm 光纤激光器带内泵浦的 Ho:CaF₂ 可调谐固体激光器,实现波长从 2073 nm 到 2114 nm 调谐,在输出波长 2113 nm 处输出能量 1.6 mJ,吸收泵浦能量为 34 mJ。

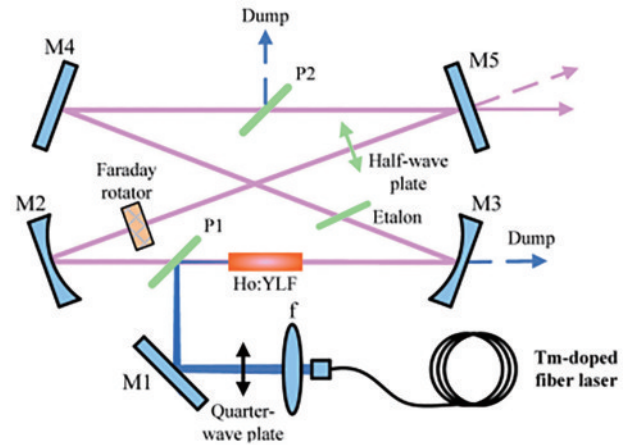


图 13 Ho:YLF 环形激光器^[51]
Fig. 13 Ho:YLF ring laser^[51]

由以上研究结果可见,单掺钬氟化物晶体自发荧光寿命长,上能级寿命高,非常有利于能量的存储,在调 Q 运转模式下,很容易产生单脉冲能量较高的激光,单掺钬氟化物激光器是实现 2 μm 高能量脉冲激光输出的一个良好选择。

3.3 单掺钬钒酸盐固体激光器

钒酸盐晶体主要包括钒酸钇(YVO₄)和钒酸钪(GdVO₄)等,属于四方晶系,具有锆石结构,晶体的导热率高、机械强度大、化学性能稳定。

在激光器的连续输出中,2014年,哈尔滨工业大学 Han 等^[53]报告了由 1.94 μm 激光器在连续波和调 Q 模式下泵浦的 Ho:YVO₄ 激光器。通过使用 $T=30\%$ 的输出耦合器,在 2052 nm 处获得了 3.9 W 的最大 CW 输出功率,对于 12.5 W 的吸收泵浦功率,其光束质量因子 $M^2=1.09$ 。在激光器的调 Q 模式下,实现了

最大脉冲能量 0.38 mJ 和最小脉冲宽度 25 ns,峰值功率 15.2 kW 的激光输出,实验装置如图 14 所示。同年,同实验组的 Yao 等^[54]用 1.94 μm 的 Tm 光纤激光器作为泵浦源,泵浦 Ho:GdVO₄,在重复频率为 5 kHz 时,获得的最小脉宽为 4.7 ns,波长为 2.048 μm 的脉冲激光光下,其单脉冲能量为 0.9 mJ,实验装置如图 15 所示。

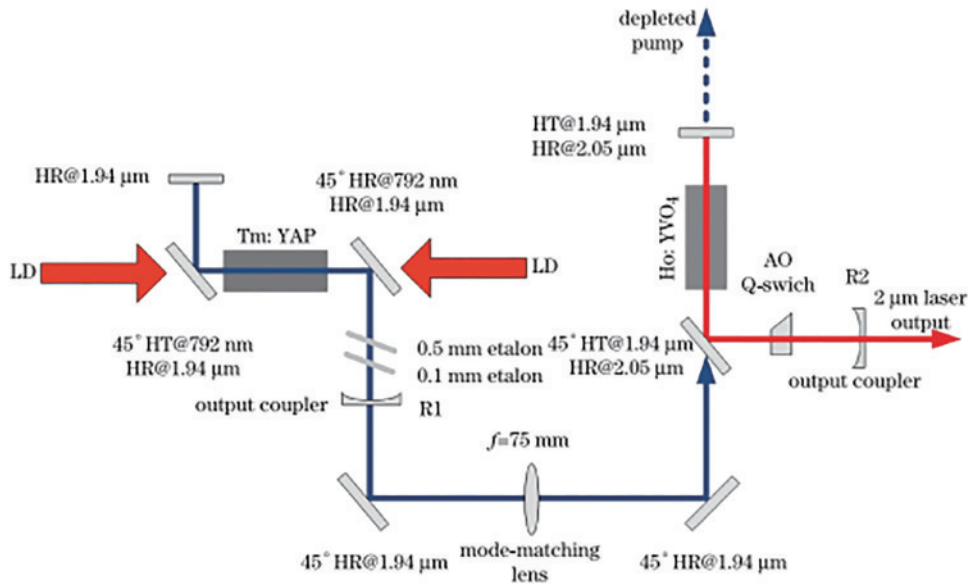


图 14 Tm:YAP 激光器泵浦 Ho:YVO₄ 激光器^[53]

Fig. 14 Ho:YVO₄ laser pumped by Tm:YAP laser^[53]

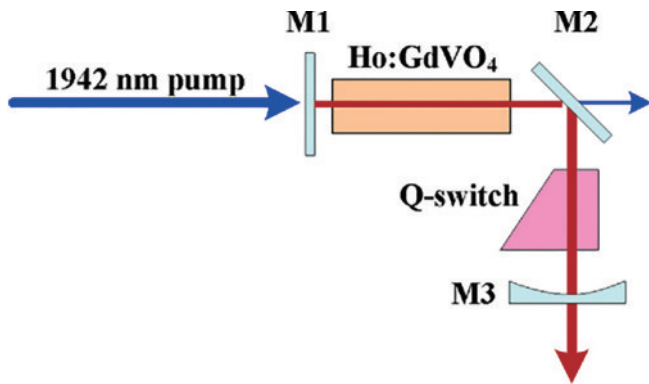


图 15 主动调 Q Ho:GdVO₄ 激光器^[54]

Fig. 15 Actively Q-switched Ho:GdVO₄ laser^[54]

在单纵模激光器中,2017年,哈尔滨工业大学 Wu 等^[55]实现了基于声光效应的单纵模 Ho:YVO₄ 单向环形激光器,利用声光调 Q 开关和半波片的特点,实现了单向操作。当吸收泵浦功率为 4.4 W 时,2053.9 nm 处的最大功率为 941 mW,产生近 50% 的斜率效率, $M^2=1.1$,实验装置如图 16 所示。

和单掺钽的氧化物和氟化物相比,单掺钒酸盐的晶体对泵浦带的吸收带较宽,吸收截面和发射截面更大,其本身的自然双折射较弱,热光特性良好,传导率小,所以常用在中小功率激光器中,而关于较为新型的 GdVO₄ 晶体的报道较少,但 GdVO₄ 晶体还是具有较大

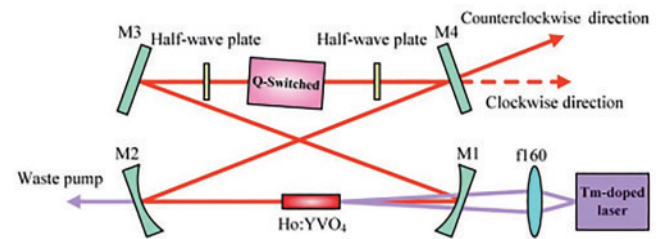


图 16 Ho:YVO₄ 单向环形激光器^[55]

Fig. 16 Ho:YVO₄ unidirectional ring laser^[55]

的发展潜力的。

3.4 单掺钽硅酸盐固体激光器

典型的硅酸盐晶体主要有 YSO、LSO、SSO 等,在激光器连续输出中,2017年,长春理工学院的 Qin^[56]使用 Tm 光纤激光器泵浦 Ho:LSO 双通激光器,在吸收泵功率为 10.5 W 的情况下,最大达到 3.6 W 的输出功率,斜率效率为 59.3%,输出激光波长为 2105.1 nm。2019年,哈尔滨工程大学 Yang 等^[57]研究了 Ho:SSO 微芯片激光器的连续和被动调 Q 操作,实现了最大 418 mW 的连续激光输出,采用 Cr²⁺:ZnSe 作为可饱和吸收体,获得了 103 ns 的脉冲宽度,最大脉冲能量为 481 μJ 。同年,哈尔滨工业大学的 Duan 等^[58]还使用新型掺杂材料硅酸盐晶体 SYSO,实现了 1940.3 nm 窄线宽 Tm 光纤泵浦 Ho:

SYSO 激光器。在吸收泵浦功率为 20.4 W 时,连续波 Ho:SYSO 激光器在 2097.67 nm 处产生 10.3 W 最大输出功率,吸收泵浦功率的斜率效率为 54.7%, $M^2=1.7$ 。他们还研究了 Ho:SYSO 激光的主动调 Q 实验^[59],用两个 1.91 μm 激光二极管泵浦板条 Ho:SYSO 晶体,板条 Ho:SYSO 激光器在 5 kHz 的脉冲重复频率下产生高达 3.4 mJ 的脉冲能量和 20 ns 的最小脉冲宽度,对应于 170 kW 的峰值功率,在这个实验中,激光器

连续状态下,在 2097.9 nm 处产生 20.7 W 最大输出功率,相对于吸收泵浦功率的斜率效率为 53.1%。

硅酸盐晶体具有 YAG 晶体没有的自然双折射效应,可以减弱激光器内的热致双折射现象。其本身具有较低的对称性,吸收和发射截面较大,有利于硅酸盐晶体成为输出高功率激光的基质材料,但是硅酸盐晶体的热力学参数较差,而且激活离子荧光寿命短,影响激光器的输出性能。

表 1 单掺钬硅酸盐固体激光器的研究进展

Table 1 Research progress of holmium single-doped silicate solid-state lasers

| Laser crystal | Output power P / W | Wavelength λ / nm | Pulse duration τ_p / ns | Year | Reference |
|---------------|----------------------|---------------------------|------------------------------|------|-----------|
| Ho:LSO | 3.60 | 2105.10 | — | 2017 | [56] |
| Ho:SSO | 0.42 | 2111.81 | 103 | 2019 | [57] |
| Ho:SYSO | 10.30 | 2097.67 | — | 2019 | [58] |
| Ho:SYSO | 20.70 | 2097.90 | 20 | 2019 | [59] |

3.5 单掺钬钨酸盐固体激光器

钨酸盐晶体属于单斜晶系的一种双光轴晶体,常用的有 KGdW、KLuW 等晶体,主要以 KYW 晶体为代表,2016 年,西班牙的 Jambunathan 等^[60]用 1946 nm 的 Tm 激光器带内泵浦 Ho:KY(WO₄)₂ 微芯片,在 2105 nm 处达到 205 mW 最大输出功率,斜率效率高达 85%。2018 年, Mateos 等^[61]搭建了 Ho:KYW 的被动调 Q 薄盘

激光器,它在 2056 nm 处产生 551 mW 的平均输出功率,相对于吸收的泵浦功率的斜率效率为 44%。单脉冲能量 4.1 μJ ,最短脉宽为 201 ns,重复率为 135 kHz,连续波模式的转换效率高达 93%。2019 年,中国科学院福建物质结构研究所 Zhang 等^[62]使用 Tm 激光器在 1946 nm 处带内泵浦 Ho:MgWO₄,在 2104 nm 波长处获得了 52 mW 输出功率,斜率效率达到 72%。

表 2 单掺钬钨酸盐固体激光器的研究进展

Table 2 Research progress of holmium single-doped tungstate solid-state lasers

| Laser crystal | Output power P / mW | Wavelength λ / nm | Pulse duration τ_p / ns | Year | Reference |
|----------------------|-----------------------|---------------------------|------------------------------|------|-----------|
| Ho:KYW | 205 | 2105 | — | 2016 | [60] |
| Ho:KYW | 551 | 2056 | 201 | 2018 | [61] |
| Ho:MgWO ₄ | 52 | 2104 | — | 2019 | [62] |

3.6 单掺钬钽酸盐固体激光器

单掺钬钽酸盐固体激光器常用的晶体是钽酸钬(Ho:GTO)晶体,GTO 晶体是一种新型的单掺钬固体激光器基质,GTO 晶体对称性低,对称晶场强,有利于获得偏振激光输出,提高光致发光效率,2019 年,哈尔滨工业大学 Duan 等^[63]在室温下用 1940.3 nm Tm 光纤激光器泵浦的新型 Ho:GdTaO₄ 晶体,在 2068.39 nm 处实现了 11.2 W 的最大输出功率,对应于 72.9% 的斜率效率,光束质量因子约为 1.4。同年,同实验室 Dai 等^[64]完成了 Ho:GTO 晶体的钕光纤泵浦连续波单纵模激光器。通过在激光腔中插入法拉第旋转器和半

波片,在单向环形激光器中获得了波长为 2068.33 nm 的单纵模输出,输出功率为 392 mW,相对于吸收的泵浦功率的斜率效率为 60.2%。2021 年,哈尔滨师范大学的 Zhang 等^[65]报道了 Tm:YAG 腔内泵浦 Ho:GdTaO₄ (Ho:GTO) 激光器,在 2019.1 nm 处获得了 8.38 W 的输出功率,斜率效率为 59.9%,他们还进行了 Ho:GTO 激光器的主动调 Q 实验^[66],在重复频率为 1 kHz 时,最大脉冲能量为 3 mJ,获得 17 ns 的脉冲宽度,对应的最大峰值功率为 176.47 kW,连续状态下的输出功率为 4.13 W,激光的连续输出波长为 2068.4 nm。

表 3 单掺钬钽酸盐固体激光器的研究进展

Table 3 Research progress of holmium single-doped tantalate solid-state laser

| Laser crystal | Output power P / W | Wavelength λ / nm | Pulse duration τ_p / ns | Year | Reference |
|---------------|----------------------|---------------------------|------------------------------|------|-----------|
| Ho:GTO | 11.20 | 2068.39 | — | 2019 | [63] |
| Ho:GTO | 0.39 | 2068.33 | — | 2019 | [64] |
| Ho:GTO | 8.38 | 2019.10 | — | 2021 | [65] |
| Ho:GTO | 4.13 | 2068.40 | 17 | 2021 | [66] |

4 结束语

从 20 世纪 60 年代开始,人们对 2 μm 波段激光器输出功率及效率进行了多方位的探索研究。近年来,随着 1.9 μm 激光器的快速发展,带内泵浦单掺钬固体激光器引起了越来越多的关注。在 2 μm 激光输出的方案中通常以 1.9 μm 激光器泵浦单掺钬激光器, Ho^{3+} 较高的上能级寿命使得激光器调 Q 运转时易于存储能量,因此以 1.91 μm 激光为泵浦源,其量子损耗小,输出效率较高。同时 2 μm 脉冲激光器是中波红外和长波红外波段的光参量振荡和光参量放大的理想高效的泵浦源,因此单掺钬固体激光器能够在常温下实现高功率、窄线宽,结构紧凑以及高光束质量的 2 μm 激光输出,以及高能量、高重复频率和稳定的 2 μm 脉冲激光输出,是近十年来国内外的研究热点。

从目前已报道的结果来看,单掺钬氧化物晶体和单掺钬氟化物晶体的研究最广泛和深入,单掺钬氧化物固体激光器有潜力实现更高功率、更高质量的 2 μm 激光输出,连续输出功率可以达到百瓦级,在调 Q、锁模、单纵模的实验中也表现出优异的性能,调 Q 的脉冲最短可以达到十几纳秒,单脉冲能量能达到十几毫焦,锁模脉宽可以达到几皮秒,单掺钬氟化物固体激光器的调 Q 锁模性能比单掺钬氧化物更优异,是实现 2 μm 高能量脉冲激光输出的良好选择,在可调谐单纵模实验中也表现突出。单掺钬钒酸盐激光器的输出功率远不如单掺钬氧化物和单掺钬氟化物激光器,输出功率在十几瓦,单脉冲能量小于 1 mJ,所以常用在中小功率激光器中。单掺钬硅酸盐激光器的新型材料输出性能优于单掺钬钒酸盐激光器,但它们的锁模报道较少,还有待进一步的研究。单掺钬钨酸盐激光器的输出功率在几百毫瓦,脉宽在几百纳秒,斜率效率相对较高。单掺钬钽酸盐激光器是近年来新型掺杂基质激光器,其输出功率在几十瓦,脉冲宽度在十几纳秒, $\text{Ho}:\text{GTO}$ 激光器的输出波长大约在 2.07 μm ,是其他掺杂基质没有的波长。

由于这些晶体作为单掺钬固体激光器的基质材料,在晶体的结构、成分以及晶体场作用等方面存在着差异,所以以这些材料为基质的单掺钬固体激光在激光性能上表现出明显的不同。但它们在 2 μm 波段附近,都在朝着高功率、高能量、短脉宽、高光束质量的方向发展。

尽管单掺钬固体激光器在高功率、高脉冲能量、高脉冲峰值功率、短脉宽、窄线宽等方面取得的成果显著,但仍有一些问题需要进一步优化和研究。

1) 单掺钬固体激光器的输出功率受到泵浦功率的限制,需要寻找性能优异的泵浦源来进一步提高激光器的输出性能。

2) 为了获得更短的脉宽,可以设计寻找新的高损伤阈值和高调制深度的饱和吸收体。

3) 上述基质材料构成的单掺钬固体激光器在高功率运转下易出现热致双折射、激光材料损伤等问题,寻找研究新的掺杂基质是一种解决途径,也可以优化或者创新设计谐振腔结构来提升激光器的输出性能。

所以,未来单掺钬固体激光器的发展需要在优异性能的泵浦源、寻找新的激光增益介质材料、改善掺基质的光学物理性能以及创新设计谐振腔的结构等方面实现进一步的突破,提升单掺钬固体激光器的性能,来满足不同的应用需求。

参 考 文 献

- [1] 刘高佑,魏迪生,陈毅,等. 2 μm 单掺 Ho 固体激光器及 ZnGeP_2 晶体应用于中长波输出的研究进展[J]. 红外与激光工程, 2020, 49(12): 20201056.
Liu G Y, Wei D S, Chen Y, et al. Research progress of 2 μm Ho single-doped solid laser and application of ZnGeP_2 on middle-long-wave infrared[J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49(12): 20201056.
- [2] Godard A. Infrared (2-12 μm) solid-state laser sources: a review[J]. Comptes Rendus Physique, 2007, 8(10): 1100-1128.
- [3] Koch G J, Beyon J Y, Barnes B W, et al. High-energy 2 μm Doppler lidar for wind measurements[J]. Optical Engineering, 2007, 46(11): 116201.
- [4] Schellhorn M, Spindler G, Eichhorn M. Mid-infrared ZGP OPO with divergence compensation and high beam quality[J]. Optics Express, 2018, 26(2): 1402-1410.
- [5] Yong A. Devices for minimally-invasive microdissection: current status and future prospects[J]. Expert Review of Medical Devices, 2020, 17(2): 131-138.
- [6] Bach T, Herrmann T R W, Cellarius C, et al. Bladder neck incision using a 70 W 2 micron continuous wave laser (RevoLix)[J]. World Journal of Urology, 2007, 25(3): 263-267.
- [7] 陈忆兰,朱小磊,张俊旋,等. 单频 2 μm 波段全固态脉冲激光器技术进展[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(5): 050006.
Chen Y L, Zhu X L, Zhang J X, et al. Development of pulsed single-frequency 2 μm all-solid-state laser[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(5): 050006.
- [8] 吴月,翟刚,姚治海. 2 μm 波段激光器的发展状况[J]. 激光杂志, 2008, 29(4): 1-2.
Wu Y, Zhai G, Yao Z H. The development of 2 μm wave band laser[J]. Laser Journal, 2008, 29(4): 1-2.
- [9] 欣云,叶兵,方万里. 钬激光应用与进展[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(4): 040003.
Xin Y, Ye B, Fang W L. Application and development of holmium laser[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(4): 040003.
- [10] 吴春婷,姜妍,戴通宇,等. 2 μm 掺钬固体激光器研究进展[J]. 发光学报, 2018, 39(11): 1584-1597.
Wu C T, Jiang Y, Dai T Y, et al. Research progress of 2 μm Ho-doped solid-state laser[J]. Chinese Journal of Luminescence, 2018, 39(11): 1584-1597.
- [11] 代立菊,万志敏,赵俊华. 经尿道 2 μm 激光前列腺切除

- 术治疗高龄高危良性前列腺增生症 198 例围术期护理[J]. 齐鲁护理杂志, 2014, 20(2): 50-51.
- Dai L J, Wan Z M, Zhao J H. Perioperative nursing care of 198 elderly patients with high-risk benign prostatic hyperplasia treated by transurethral 2 μm laser prostatectomy[J]. Journal of Qilu Nursing, 2014, 20(2): 50-51.
- [12] 钱传鹏. 高功率 Ho: YAG 振荡器及泵浦的中长波红外固体激光器研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019: 1-20.
- Qian C P. Research on the high power Ho: YAG laser and its application to pump the mid- and long-wave infrared laser[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019: 1-20.
- [13] 戴通宇. 单掺 Ho 注入锁频激光器研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013: 1-15.
- Dai T Y. Research on injection-seeded holmium single-doped laser[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013: 1-15.
- [14] 付星, 刘廷昊, 雷新星, 等. 二极管泵浦重复频率纳秒高能固体激光器研究进展[J]. 中国激光, 2021, 48(15): 1501003.
- Fu X, Liu T H, Lei X X, et al. High energy diode-pumped rep-rated nanosecond solid-state laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(15): 1501003.
- [15] Johnson L F, Geusic J E, van Uitert L G. Coherent oscillations from Tm^{3+} , Ho^{3+} , Yb^{3+} and Er^{3+} ions in yttrium aluminum garnet[J]. Applied Physics Letters, 1965, 7(5): 127-129.
- [16] 陈广鹏. 连续波及声光调 Q 运转 LD 泵浦单掺 Ho: SYSO 激光器的实验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020: 1-12.
- Chen G P. Experimental study of continuous wave and acousto-optic Q-switched Ho: SYSO laser pumped by LD[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020: 1-12.
- [17] Lamrini S, Koopmann P, Schäfer M, et al. Efficient high-power Ho: YAG laser directly in-band pumped by a GaSb-based laser diode stack at 1.9 μm [J]. Applied Physics B, 2012, 106(2): 315-319.
- [18] Shen Y J, Yao B Q, Duan X M, et al. 103 W in-band dual-end-pumped Ho: YAG laser[J]. Optics Letters, 2012, 37(17): 3558-3560.
- [19] Zhang J W, Schulze F, Mak K F, et al. High-power, high-efficiency Tm: YAG and Ho: YAG thin-disk lasers[J]. Laser & Photonics Reviews, 2018, 12(3): 1700273.
- [20] Duan X M, Shen Y J, Yao B Q, et al. 146.4 W end-pumped Ho: YAG slab laser with two crystals[J]. Quantum Electronics, 2018, 48(8): 691-694.
- [21] Hu H W, Huang H Z, Huang J H, et al. Tm: YVO₄ laser intra-cavity pumped 2.1 μm Ho laser[J]. Optics Communications, 2020, 472: 125748.
- [22] Wang L, Gao C Q, Gao M W, et al. A resonantly-pumped tunable Q-switched Ho: YAG ceramic laser with diffraction-limit beam quality[J]. Optics Express, 2014, 22(1): 254-261.
- [23] Ji E C, Liu Q, Hu Z Y, et al. High-power, high-energy Ho: YAG oscillator pumped by a Tm-doped fiber laser[J]. Chinese Optics Letters, 2015, 13(12): 121402-121406.
- [24] Zhao T, Yang X F. Actively Q-switched operation of a resonantly pumped polycrystalline ceramic Ho: YAG laser[J]. Optical Engineering, 2018, 57(2): 026121.
- [25] Duan X M, Shen Y J, Yao B Q, et al. A 106 W Q-switched Ho: YAG laser with single crystal[J]. Optik, 2018, 169: 224-227.
- [26] 崔铮, 陈毅, 姚宝权, 等. 基于多层石墨烯可饱和吸收体的被动调 Q Ho: YAG 激光器[J]. 发光学报, 2016, 37(6): 696-700.
- Cui Z, Chen Y, Yao B Q, et al. Passively Q-switched Ho: YAG laser with multilayer graphene-based saturable absorber[J]. Chinese Journal of Luminescence, 2016, 37(6): 696-700.
- [27] Ji E C, Nie M M, Fu X, et al. Cr^{2+} : CdSe passively Q-switched Ho: YAG laser[J]. Optics Letters, 2017, 42(13): 2555-2558.
- [28] Wang Y C, Lan R J, Mateos X, et al. Broadly tunable mode-locked Ho: YAG ceramic laser around 2.1 μm [J]. Optics Express, 2016, 24(16): 18003-18012.
- [29] 王吉, 王涛. 室温下的主动锁模 Ho: YAG 激光器[J]. 激光技术, 2016, 40(6): 840-842.
- Wang J, Wang T. Actively mode-locked Ho: YAG laser at room temperature[J]. Laser Technology, 2016, 40(6): 840-842.
- [30] Zhang G J, Zhang H K, Fu X, et al. Compact Ho: YAG laser at 2.1- μm mode locked by re-absorption[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2019, 31(3): 222-225.
- [31] 王庆, 高春清. 人眼安全波段全固态单频激光器研究进展[J]. 中国激光, 2021, 48(5): 0501004.
- Wang Q, Gao C Q. Research progress on eye-safe all-solid-state single-frequency lasers[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(5): 0501004.
- [32] 牛昌东, 戴瑞峰, 刘瑞科, 等. 固体激光器单纵模选择技术及应用[J]. 光电技术应用, 2020, 35(5): 38-47.
- Niu C D, Dai R F, Liu R K, et al. Single-longitudinal-mode selection technology and application of solid-state laser[J]. Electro-Optic Technology Application, 2020, 35(5): 38-47.
- [33] Li W J, Wang Q, Wang Y L, et al. Tunable single-longitudinal-mode Ho: YAG laser pumped by a 1.13 μm diode laser[J]. Applied Optics, 2017, 56(35): 9809-9813.
- [34] Dai T Y, Wang Y P, Guo S X, et al. Tunable twisted-mode Ho: YAG laser at continuous-wave and pulsed operation[J]. Optics Express, 2020, 28(21): 31775-31780.
- [35] Shen Y J, Yao B Q, Duan X M, et al. High-power and efficiency continuous-wave operation of a-cut Ho: YAP laser at room temperature[J]. Laser Physics, 2012, 22(4): 712-714.
- [36] Tang J W, Li E H, Wang F, et al. High power Ho: YAP laser with 107 W of output power at 2117 nm[J]. IEEE Photonics Journal, 2020, 12(2): 19447763.
- [37] Wang Z W, Ma X Z, Li W H. Efficient Ho: YAP laser dual-end-pumped by Tm fiber laser[J]. Optical Review, 2014, 21(2): 150-152.
- [38] Duan X M, Li L J, Shen Y J, et al. Efficient Ho: YAP laser dual end-pumped by a laser diode at 1.91 μm in a wing-pumping scheme[J]. Applied Physics B, 2018, 124(9): 179.
- [39] Niu C, Jiang Y, Wen Y, et al. High-efficiency Ho: YAP

- pulse laser pumped at 1989 nm[J]. Crystals, 2021, 11(6): 595.
- [40] Duan X M, Lin W M, Cui Z, et al. Resonantly pumped continuous-wave mode-locked Ho: YAP laser[J]. Applied Physics B, 2016, 122(4): 88.
- [41] Dai T Y, Fan J W, Chen Y, et al. Tunable single-longitudinal-mode resonantly-pumped Ho: YAP unidirectional ring laser[J]. Optical and Quantum Electronics, 2021, 53(3): 155.
- [42] Li E H, Tang J W, Shen Y J, et al. High peak power acousto-optically Q-switched Ho: Y₂O₃ ceramic laser at 2117 nm[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2020, 32(8): 492-495.
- [43] Duan X M, Yao B Q, Li G, et al. High efficient actively Q-switched Ho: LuAG laser[J]. Optics Express, 2009, 17(24): 21691-21697.
- [44] Wang Q C, Long Q L, Gao Y, et al. High-efficiency Ho: YLF slab laser with 125 W continuous-wave output power[J]. Applied Optics, 2021, 60(26): 8046-8049.
- [45] Schellhorn M. High-energy, in-band pumped Q-switched Ho³⁺:LuLiF₄ 2 microm laser[J]. Optics Letters, 2010, 35(15): 2609-2611.
- [46] Fonnum H, Lippert E, Haakestad M W. 550 mJ Q-switched cryogenic Ho: YLF oscillator pumped with a 100 W Tm: fiber laser[J]. Optics Letters, 2013, 38(11): 1884-1886.
- [47] Duan X M, Li L J, Guo X S, et al. Wavelength-locked continuous-wave and Q-switched Ho: CaF₂ laser at 2100.5 nm[J]. Optics Express, 2018, 26(21): 26916-26924.
- [48] Zhang C, Zu Y Q, Yang W, et al. Epsilon-near-zero medium for optical switches in Ho solid-state laser at 2.06 μm[J]. Optics & Laser Technology, 2020, 129: 106271.
- [49] Zhang C, Hao Q Q, Zu Y Q, et al. Graphdiyne saturable absorber for passively Q-switched Ho³⁺-doped laser[J]. Nanomaterials, 2020, 10(9): 1848.
- [50] Coluccelli N, Lagatsky A, di Lieto A, et al. Passive mode locking of an in-band-pumped Ho: YLiF₄ laser at 2.06 μm[J]. Optics Letters, 2011, 36(16): 3209-3211.
- [51] Wu J, Ju Y L, Dai T Y, et al. 1.5 W high efficiency and tunable single-longitudinal-mode Ho: YLF ring laser based on Faraday effect[J]. Optics Express, 2017, 25(22): 27671-27677.
- [52] Němec M, Šulc J, Jelínek M, et al. Thulium fiber pumped tunable Ho: CaF₂ laser[J]. Optics Letters, 2017, 42(9): 1852-1855.
- [53] Han L, Yao B Q, Duan X M, et al. Experimental study of continuous-wave and Q-switched laser performances of Ho: YVO₄ crystal[J]. Chinese Optics Letters, 2014, 12(8): 81401-81403.
- [54] Yao B Q, Ding Y, Duan X M, et al. Efficient Q-switched Ho: GdVO₄ laser resonantly pumped at 1942 nm[J]. Optics Letters, 2014, 39(16): 4755-4757.
- [55] Wu J, Ju Y L, Yao B Q, et al. High power single-longitudinal-mode Ho³⁺: YVO₄ unidirectional ring laser[J]. Chinese Optics Letters, 2017, 15(3): 31402-31405.
- [56] Qin H Y. An efficient continuous wave Ho: LSO laser double-pass pumped by a linewidth-narrowed Tm fiber laser[J]. Journal of Russian Laser Research, 2017, 38(3): 301-304.
- [57] Yang X T, He Y B, Liu X N, et al. A passively Q-switched Ho: SSO laser with a Cr²⁺: ZnSe saturable absorber[J]. Infrared Physics & Technology, 2019, 98: 121-124.
- [58] Duan X M, Qian C P, Shen Y J, et al. Efficient Ho: (Sc₀₅Y₀₅)₂SiO₅ laser at 2.1 μm in-band pumped by Tm fiber laser[J]. Optics Express, 2019, 27(4): 4522-4527.
- [59] Duan X M, Shen Y J, Gao J, et al. Active Q-switching operation of slab Ho: SYSO laser wing-pumped by fiber coupled laser diodes[J]. Optics Express, 2019, 27(8): 11455-11461.
- [60] Jambunathan V, Mateos X, Loiko P A, et al. Growth, spectroscopy and laser operation of Ho: KY(WO₄)₂[J]. Journal of Luminescence, 2016, 179: 50-58.
- [61] Mateos X, Loiko P, Lamrini S, et al. Ho: KY(WO₄)₂ thin-disk laser passively Q-switched by a GaSb-based SESAM[J]. Optics Express, 2018, 26(7): 9011-9016.
- [62] Zhang L Z, Loiko P, Serres J M, et al. Growth, spectroscopy and first laser operation of monoclinic Ho³⁺: MgWO₄ crystal[J]. Journal of Luminescence, 2019, 213: 316-325.
- [63] Duan X M, Chen G P, Qian C P, et al. Resonantly pumped high efficiency Ho: GdTao₄ laser[J]. Optics Express, 2019, 27(13): 18273-18281.
- [64] Dai T Y, Guo S X, Duan X M, et al. High efficiency single-longitudinal-mode resonantly-pumped Ho: GdTao₄ laser at 2068 nm[J]. Optics Express, 2019, 27(23): 34204-34210.
- [65] Zhang W S, Li L J, Gao Q, et al. Efficient continuous-wave Ho: GTO laser intracavity-pumped by an in-band pumped Tm: YAG laser[J]. Infrared Physics & Technology, 2021, 118: 103849.
- [66] Zhang W S, Gao Q, Zhou S, et al. Diode-pumped acousto-optical Q-switched Ho: GdTao₄ laser at 2.07 μm[J]. Optics & Laser Technology, 2021, 144: 107368.