

陶瓷激光器研究进展

杨昊霖¹, 陈玥¹, 贾富强^{1*}, 王鹏飞^{2**}

¹厦门大学电子科学与技术学院, 福建 厦门 361005;

²哈尔滨工程大学物理与光电工程学院纤维集成光学教育部重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001

摘要 本文总结了 YAG 陶瓷激光器和倍半氧化物陶瓷激光器在高功率激光、超快激光以及中红外激光领域中的研究成果。通过回顾陶瓷激光器的研究进展, 不仅揭示了激光陶瓷材料在固体激光器中的应用价值, 还探讨了陶瓷激光器目前所面临的问题。最后对陶瓷激光器的未来发展方向做出展望。

关键词 材料; 陶瓷激光器; 激光; 激光陶瓷材料; 固体激光器

中图分类号 TN248.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.071610

Research Progress in Ceramic Lasers

Yang Haolin¹, Chen Yue¹, Jia Fuqiang^{1*}, Wang Pengfei^{2**}

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

²Key Laboratory of In-fiber Integrated Optics, Ministry Education of China, School of Physics and Optoelectronic Engineering, Harbin Engineering University, Harbin, Heilongjiang 150001, China

Abstract In this paper, we summarized the related researches of YAG ceramic lasers and sesquioxide ceramic lasers in high-power lasers, ultrafast lasers and mid infrared laser materials. By reviewing the research progress of ceramic lasers, it not only revealed great value of laser ceramic materials applied to solid-state lasers, but also discussed the problems that ceramic lasers currently faced. Finally, the future development of ceramic lasers was prospected.

Key words materials; ceramic lasers; lasers; laser ceramic materials; solid-state lasers

OCIS codes 160.3380; 140.3460; 140.3580

1 引言

自 1960 年世界上第一台红宝石激光器诞生以来^[1], 固体激光器得到了空前的发展。Nd:YAG 单晶材料首次实现连续激光输出以后^[2], 一直是固体激光器的主要增益介质之一。尽管单晶材料的生长技术目前已经非常成熟, 但仍然存在一些不足, 比如成本高、能耗高、晶体生长过程中易受到外界应力的影响以及掺杂离子易在固液相界面发生偏析等问题。

陶瓷材料是一种具有微小结晶结构的无机材料, 一般可以通过真空烧结制成。与单晶材料相比, 陶瓷材料具有可大规模生产、高浓度掺杂、能实现大尺寸和结构多样的复合型结构等优点。此外, 陶瓷

烧结技术能在远低于材料熔点的温度下实现透明化, 因此陶瓷烧结技术可以制备出传统单晶生长技术难以得到的高熔点激光材料, 如倍半氧化物材料。

世界上第一台陶瓷激光器可追溯到 1964 年, Hatch 等^[3]以 CaF₂ 和 DyF₃ 的混合粉末为原料, 采用真空热压烧结技术制备出了晶粒尺寸为 150 μm 的 Dy³⁺:CaF₂ 陶瓷。在低温环境下, 采用氙灯泵浦该 Dy³⁺:CaF₂ 陶瓷实现了激光输出, 激光阈值为 24.6 J, 该陶瓷内部约为 2% 的散射损耗是导致激光阈值较高和激光效率较低的主要原因。1972 年, Greskovich 等^[4-5]在 2170 °C 的氢气环境下对 Nd₂O₃、ThO₂、Y₂O₃ 的混合粉末进行烧结, 获得了内部晶粒尺寸为 130 μm 的 Nd:Y₂O₃-ThO₂ 陶瓷; 基于该样品, 利用氙灯泵浦, 实现了斜效率仅为

收稿日期: 2020-01-06; 修回日期: 2020-02-23; 录用日期: 2020-03-17

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(61935006, 61411130132, 61308053)、教育部“111”引智基地计划(B13015)

* E-mail: jiafq@xmu.edu.cn; ** E-mail: pengfei.wang@tudublin.ie

0.1%的脉冲激光输出。在20世纪80年代,受到基于Nd:YAG单晶材料激光性能方面的启发,材料科学家对Nd:YAG陶瓷进行了一系列的研究^[6-8],但早期所报道的Nd:YAG陶瓷都是一些内部晶粒尺寸较大、气孔较多、晶界不完整的半透明陶瓷材料。这些半透明陶瓷材料内部较大的散射损耗同样也严重地限制了其激光性能。受当时陶瓷制备工艺和半导体激光器输出功率水平的限制,在相当长一段时间内,陶瓷激光器的性能并未获得太大的突破。直到1995年^[9],高质量的Nd:YAG透明陶瓷制备技术才得到了实质性的突破,并且将其作为增益介质实现了309 mW,斜效率为28%的激光输出,此激光输出性能不逊色于单晶Nd:YAG激光器。

陶瓷激光器发展至今已经取得了长足的进展,其中Nd:YAG陶瓷激光器的输出功率已经突破了100 kW量级^[10]。除Nd:YAG陶瓷外,能级结构更简单、量子缺陷低的Yb:YAG陶瓷在高功率激光领域中同样有着不俗的表现,而声子能量低、热导性良好、非线性折射率高的倍半氧化物陶瓷材料在高功率激光、超快激光以及2~3 μm波段中红外激光等领域中还有着巨大的潜能。因此,本文将重点总结以上几类陶瓷激光器的研究进展。

2 YAG陶瓷激光器

2.1 Nd:YAG陶瓷激光器

1995年,Ikesue等^[9]以高纯度(> 99.99%)、平均颗粒尺寸小于2 μm的Al₂O₃、Y₂O₃、Nd₂O₃的混合粉末为原料,采用固相反应与真空烧结技术相结合的方法制备出了平均晶粒尺寸为50 μm、掺杂原子数分数为1.1%的Nd:YAG陶瓷,该激光陶瓷材料的光学损耗为0.9 cm⁻¹。采用激光二极管端面泵浦该激光陶瓷材料实现了激光阈值为309 mW,斜效率为28%的1064 nm连续激光输出,其激光性能与提拉法制备的掺杂原子数分数为0.9%的Nd:YAG单晶材料相近。随后,Ikesue等^[11-13]继续研究了Nd:YAG陶瓷中散射中心以及气孔体积对其激光性能的影响。对于激光陶瓷材料而言,激光陶瓷材料内部的晶界相、气孔、杂质、晶格缺陷等散射中心会产生严重的散射损耗和吸收损耗,从而降低激光陶瓷材料的透明度,进而影响其激光性能。因此为了获得更效率的陶瓷激光器,激光陶瓷材料的光学质量还需要进一步提升。

2000年,日本电子通信大学Ueda课题组对神岛化学公司所制备的Nd:YAG陶瓷的激光性能

进行了实验研究,实现了最高斜效率可达55.4%,光-光转换效率为52.7%的激光输出^[14]。随后,Lu等^[15-16]继续采用纳米技术和真空烧结技术研发了一系列高功率Nd:YAG陶瓷激光器,其中激光输出功率最高可达1.46 kW,但激光斜效率相对较低,最高为42%。

在美国,2005年达信公司研制出了持续时间为10 s,功率高达5 kW的Nd:YAG陶瓷激光器^[17]。随后,2006年劳伦斯利弗莫尔国家实验室(LLNL)将5块串联在一起的板条型Nd:YAG陶瓷作为增益介质(每块板条型Nd:YAG陶瓷的尺寸为100 mm×100 mm×20 mm),获得了功率为67 kW的激光输出^[18]。为了进一步提高Nd:YAG陶瓷激光器的输出功率,2009年达信公司从改善Nd:YAG陶瓷激光器的热效应和增大增益介质体积的角度出发,将锯齿型激光器光学体系结构与主振荡功率放大(MOPA)结构相结合,通过增加板条型Nd:YAG陶瓷的长度、数量,以及提高泵浦强度,最终实现了100 kW的激光输出^[19]。随后,美国达信公司在此基础上研制出了“ThinZig”Nd:YAG陶瓷激光器,该激光器总共含有7个模块,每个模块均采用大尺寸板条型Nd:YAG陶瓷作为增益介质,随着模块数的增加,激光的输出功率得到了进一步提升,单个板条型陶瓷模块可实现17 kW的激光输出,在两个模块工作的情况下,此陶瓷激光器的激光输出功率为30 kW,但是激光光束质量会严重下降,最终该激光器的输出功率突破了100 kW量级^[10]。

从1995年Nd:YAG陶瓷首次实现激光输出到输出功率突破100 kW量级,大约付出了15年的努力,Nd:YAG陶瓷激光器输出功率随年份的变化如图1所示。从图1中可以预见,Nd:YAG陶瓷激光器的输出功率正朝着1 MW量级发展,但同时仍需

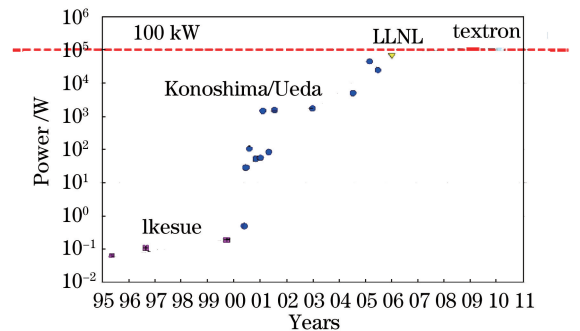


图1 Nd:YAG陶瓷激光器输出功率随年份的变化^[19]
Fig. 1 Evolution of laser output power versus year for Nd:YAG ceramic lasers^[19]

要关注高功率激光输出时的两个重要指标:1)激光光束质量或亮度;2)可靠性和稳定性。

Nd:YAG 陶瓷除了1064 nm 这条激光发射谱线外,在 0.9 μm,1.3~1.4 μm 以及 1.8 μm 范围内都有激光发射,如图 2 所示。然而,这些激光波长对应能级跃迁谱线的跃迁截面较小,一般需要通

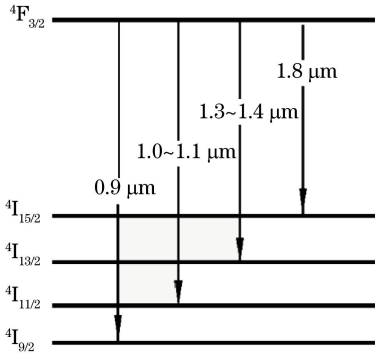


图 2 不同能级间跃迁对应辐射的激光波段^[20]

Fig. 2 Laser bands corresponding to transitions between different energy levels^[20]

过一些波长选择元件来实现,比如:镀有相应膜系的腔镜、光栅、棱镜和标准具等。表 1 列举了 1~1.8 μm Nd:YAG 陶瓷激光器的输出性能。

2017 年,尉鹏飞等^[20]报道了激光输出波长为 1.83 μm 的 Nd:YAG 陶瓷激光器。由于 1.83 μm 对应⁴F_{3/2}→⁴I_{15/2} 能级跃迁的截面比⁴F_{3/2}→⁴I_{11/2} 最强能级跃迁对应的跃迁截面小了近两个数量级,因此为了实现 1.83 μm 的激光输出,他们使用对 1.83 μm 波段高反,对其他波段高透的腔镜增加了其他能级跃迁谱线对应激光的损耗,最终得到了功率为 0.65 W,斜效率为 5.8% 的 1.83 μm 激光输出。

2018 年,Feng 等^[26]报道了人眼安全波段的 1.44 μm 皮秒 Nd:YAG 陶瓷激光器。此激光器的谐振腔由多个腔镜组成,如图 3(a)所示。M1、M2、M4 都镀有对 1300~1400 nm 波段的高反膜,输出镜 M3 对 1443 nm 的透过率为 2%,在 808 nm 激光二极管的泵浦下,得到了最大输出功率为 842 mW,脉宽为 20.8 ps 的锁模激光输出。

表 1 1~1.8 μm Nd:YAG 陶瓷激光器的输出性能

Table 1 Output performance of 1-1.8 μm Nd:YAG ceramic lasers

Year	Laser wavelength /nm	Output power /W	Efficiency /%	Reference
2005	946	1.5	22.5 (optical to optical)	[21]
2009	1123	10.8	41.4 (optical to optical)	[22]
2010	1319	5.92	30.3 (slope)	[23]
	1338		29 (optical to optical)	
2010	1319	3.2	30 (optical to optical)	[24]
	1338			
2013	1356	3.01	31.9 (slope)	[25]
2017	1830	0.65	5.8 (slope)	[20]
2018	1440	0.842	7.7 (slope)	[26]

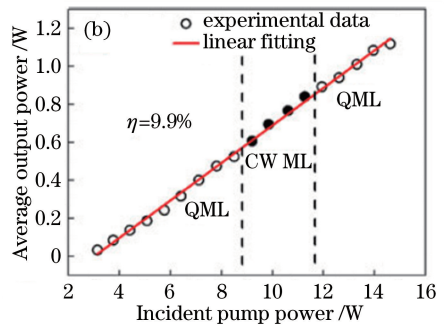
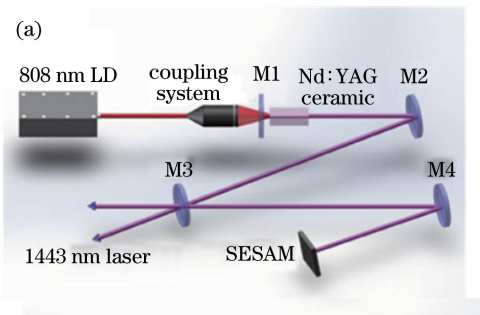


图 3 1443 nm Nd:YAG 陶瓷激光器。(a)实验结构图;(b)输出性能^[26]

Fig. 3 1443 nm Nd:YAG ceramic laser. (a) Experimental setup; (b) output performance^[26]

近年来,基于各种可饱和吸收体的脉冲 Nd:YAG 陶瓷激光器得到了研究。与连续 Nd:YAG 陶瓷激光器相比,脉冲 Nd:YAG 陶瓷激光器具有

输出能量大、峰值功率高等优点。表 2 列出了基于不同可饱和吸收体的脉冲 Nd:YAG 陶瓷激光器。

表 2 基于不同可饱和吸收体的脉冲 Nd:YAG 陶瓷激光器

Table 2 Pulsed Nd:YAG ceramic lasers based on different saturable absorbers

Year	Laser wavelength /nm	Saturable absorber	Output power / mW	Energy / μ J	Pulse width /ns	Repetition rate /kHz	Peak power /W	Reference
2015	1357	V:YAG	628	42	21	15	2000	[27]
2015	1415	Graphene	601	5.95	470	101	12.7	[28]
	1442.8							
2015	946	Cr:YAG	532	161	13	3.3	12400	[29]
2016	1357	Graphene	340	53	380	209	139	[30]
2016	1112	Cr:YAG	713	66	8	10.8	8250	[31]
2017	1123	GNTs-SA	172	0.38	231	457	1.630	[32]
2017	1064	Ag-NRs	114	0.5	197	223.7	2.590	[33]
2018	1064	Doubly Q	1270	63.5	25	20	2540	[34]
2020	1064	SESAM/	—	4300	80	—	60000	[35]
		Cr:YAG						

Note: GNTs-SA is gold nanotriangles-saturable absorber, Ag-NRs is silver nanorods

调 Q 激光器分为主动型和被动型,后者与前者相比,无需声光、电光调制器,所以更为紧凑灵活,并且结合以上陶瓷材料尺寸可灵活设计的优点,可以满足紧凑型高功率、高能量脉冲激光器的要求。除了 Cr:YAG 这种常见的可饱和吸收体之外,碳纳米管、石墨烯、拓扑绝缘体、黑磷等二维材料以及三阶非线性高、吸收谱线灵活可调的金属纳米材料在脉冲 Nd:YAG 陶瓷激光器中也得到了应用。2016 年, Feng 等^[30]报道了基于石墨烯的被动调 Q Nd:YAG 陶瓷激光器。该石墨烯为 4 层结构,在 600~1600 nm 波段内的总透射率约为 89%。在 808 nm 激光二极管的泵浦下,该石墨烯作为可饱和吸收体在泵浦功率为 1.56 W 时,成功地实现了脉冲输出。随着泵浦功率的增加,该陶瓷激光器的输出脉宽从 655 ns 减小至 380 ns,重复频率从 100 kHz 增加到 209 kHz,最大输出功率为 340 mW。2017 年, Bai 等^[32]报道了基于金纳米三角片的被动调 Q Nd:YAG 陶瓷激光器,实验结构如图 4(a)所示。该金纳米三角片由种子媒介的合成方法制成,图 4(b)的吸收光谱显示该金纳米三角片分别在 754 nm 和 1092 nm 处具有较强的吸收特性,其调制深度约为 16.1%。将该金纳米三角片直接插入激光谐振中,由于插入损耗以及吸收损耗,1123 nm 激光阈值由原来的 2.04 W 上升至 3.87 W。最终在 7 W 的泵浦下,获得了最小脉宽为 231 ns、最大重复频率为 457 kHz 的 1123 nm 脉冲激光输出[图 4(c)和(d)]。同年, Wu 等^[33]采用银纳米金属材料作为可饱和吸收体,实现了 1064 nm 的被动调 Q Nd:YAG 陶瓷激光器。

随着陶瓷工艺的提升,激光陶瓷材料的结构越

发多样化,其中复合型陶瓷材料作为一种新型的激光材料,具有比普通激光陶瓷材料更多的功能特性,在激光性能方面也更具潜力。与普通陶瓷激光器相比,复合型陶瓷激光器可以控制输出激光的模式、增加调 Q 等功能以及实现小型化。传统单晶材料间的复合是把功能不同的单晶材料通过抛光和热扩散结合在一起,需要克服结合面强度较弱、易产生空气间隙等困难,而利用陶瓷烧结工艺制备复合型陶瓷材料,其结合面强度较强,制备时间也较短^[36]。

不同结构的复合型 Nd:YAG 陶瓷及其特性如图 5 所示。掺杂浓度为梯度变化的复合型陶瓷材料经烧结后,其掺杂离子分布会更平滑化,在端面泵浦时,材料中的热能分布更为均匀,有利于实现高功率激光输出。多层复合型陶瓷材料可以与不同功能的单晶材料或者陶瓷材料相结合,结合后其功能特性会更加多样化。平面波导型复合陶瓷材料是一种高纵横比的三明治结构,由折射率高的波导层和周围折射率低的包层所构成,不仅对泵浦吸收效率高,也能及时传导激光发射中产生的废热,避免产生热透镜效应,从而实现高功率激光输出。光纤型复合陶瓷材料继承了光纤出色的散热性,并且其纤芯中的浓度掺杂分布是可控的,因此通过控制其纤芯中的浓度掺杂分布可以改变激光的输出模式。

2008 年, Li 等^[37]利用陶瓷工艺制备了多层复合型 YAG/Nd:YAG/YAG 陶瓷(掺杂原子数分数为 1.0%),采用光纤耦合激光二极管端面泵浦该激光陶瓷材料实现了阈值为 488 mW、斜效率为 4%、功率为 8 mW 的连续激光输出。由于该复合型陶瓷材料内部的光学散射损耗较高,同时没有对激光系统进行优化设计,因此该复合型陶瓷激光器性能

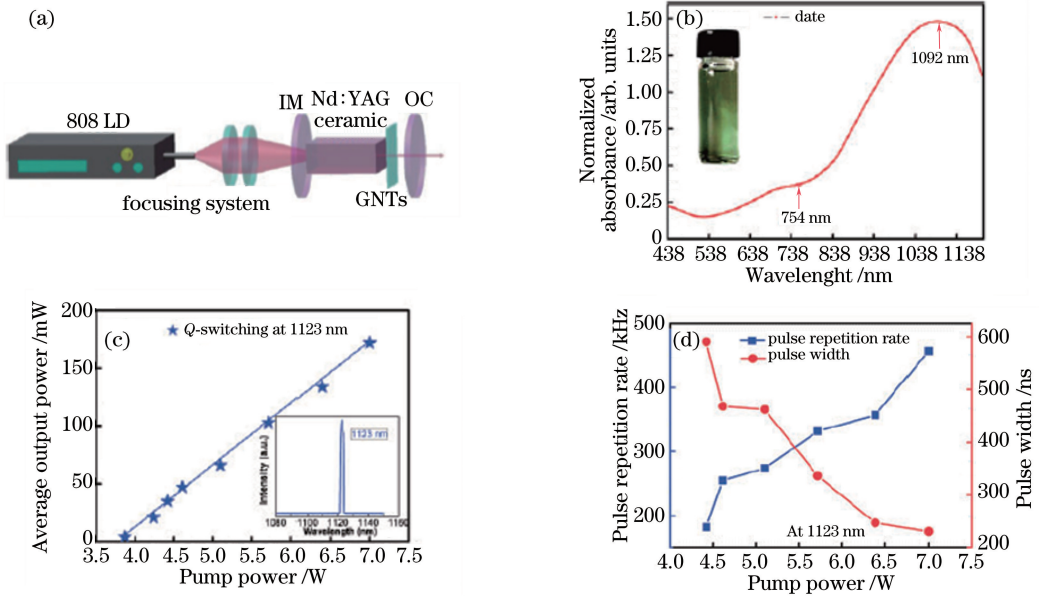


图 4 1123 nm 被动调 Q Nd:YAG 陶瓷激光器。(a)实验结构图;(b)金纳米三角片的吸收光谱;(c)输出功率;(d)脉宽以及重复频率随泵浦功率的变化^[32]

Fig. 4 Passively Q-switched Nd:YAG ceramic laser at 1123 nm. (a) Experimental setup; (b) absorption spectrum of the GNTs-SA; (c) output power; (d) evolution of pulse repetition rate and pulse width varying with pump power^[32]

	YAG Nd:YAG YAG multiple-layer	cylindrical fiber	waveguide	fiber	gradient
high power & efficiency	●	●	●	●	●
beam quality & thermal lens	●	●	●	●	●
beam mode control	—	○	○	●	—
beam pattern control	—	○	○	—	●
high functionalization (eg: Q-switched)	●	○	—	○	—
miniaturization of laser	○	○	○	●	○

● very good ○ good — as same as conventional

图 5 不同结构的复合型 Nd:YAG 陶瓷及其特性

Fig. 5 Composite Nd:YAG ceramics with different structures and their properties

较差。随后, Liu 等^[38]对复合型陶瓷激光器的泵浦方式进行了优化。实验装置如图 6 所示,利用 808 nm 激光二极管侧面泵浦长度为 82 mm、直径为 3 mm 的复合型棒状 YAG/Nd:YAG/YAG 陶瓷,实现了功率为 20.3 W、斜效率为 10.1% 的 1064 nm 连续激光输出。在此实验中,虽然该复合型陶瓷激光器的斜效率和输出功率较之前得到了提升,但是该复合型陶瓷材料内部仍存在较多的气孔,散射损耗依然较高。

2012 年, Tang 等^[39]采用流延成型和真空烧结技术成功制备了光学质量更佳的复合型 YAG/Nd:YAG/YAG 陶瓷(掺杂原子数分数为

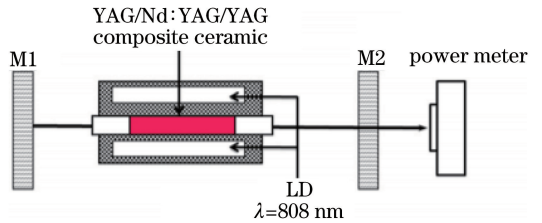


图 6 激光二极管侧面泵浦复合型棒状陶瓷的实验结构图^[38]
Fig. 6 Experimental setup for laser diode side-pumped composite rod ceramic^[38]

2.0%), 并使用 808 nm 激光二极管端面泵浦该材料, 在输出镜的透过率为 10% 时, 实现了最大功率为 1.82 W、斜效率为 38% 的激光输出。该复合型陶

瓷激光器斜效率的提升得益于其激光陶瓷材料在 900~1100 nm 波段的高透过率(>83%),但是该激光陶瓷材料的透过率在短波有大幅度的下降,这说明了其内部仍存在一定数量的光学散射中心,光学透过性能仍有提升空间。

为了提高复合型陶瓷激光器的性能,Ikesue

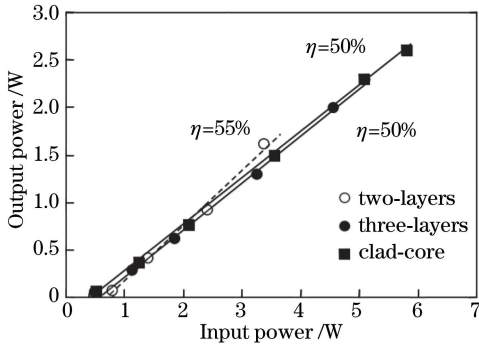
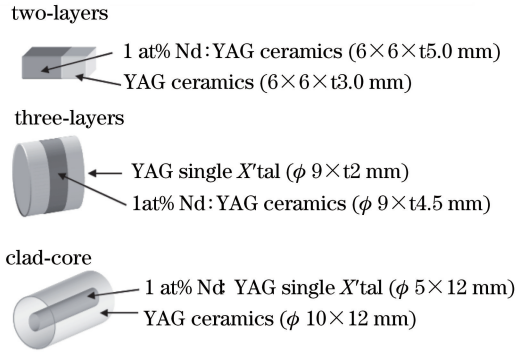


图 7 各种复合型 Nd:YAG 陶瓷器的激光性能^[36]

Fig. 7 Laser performance of various types of composite Nd:YAG ceramic^[36]

等^[36,40]对复合型陶瓷材料的制备工艺进行了优化,并成功制备出了不同复合型结构的 Nd:YAG 陶瓷。图 7 为不同结构的复合型 Nd:YAG 陶瓷激光器的输出结果,可以看出,这三种复合型 Nd:YAG 陶瓷激光器的斜效率均大于 50%,其中最高的斜效率达 55%。



2014 年,中国科学院上海硅酸盐研究所 Ge 等^[41]在国际上首次采用流延成型和陶瓷烧结技术,成功制备了平面波导型 YAG/Nd:YAG/YAG 陶瓷,该陶瓷在 1064 nm 处具有非常高的透过率(>84%)。随后在 2016 年,Liu 等^[42]报道了重复频率为 100 Hz、单脉冲能量为 327 mJ、峰值功率为 1308 W 的平面波导型 YAG/Nd:YAG/YAG 陶瓷激光器。该激光器主要包括三个部分[图 8(a)]:种子源、耦合系统以及放大器。放大器的增益介质为平面波导型 YAG/Nd:YAG/YAG 陶瓷,尺寸为 1 mm×10 mm×60 mm,如图 8(b)所示。泵浦源经慢轴缩束以及快轴聚焦后,以特定的角度倾斜泵浦此平面波导型 YAG/Nd:YAG/YAG 陶瓷,种子

光源则直接从平面波导型 YAG/Nd:YAG/YAG 陶瓷的一端注入,另一端输出。同年,Ma 等^[43]报道了被动调 Q 平面波导型 YAG/Nd:YAG/YAG 陶瓷激光器。首先对掺杂原子数分数分别为 1.0% 和 1.5% 的平面波导型 YAG/Nd:YAG/YAG 陶瓷进行了连续激光实验,通过对比研究在不同输出透过率下的连续激光输出性能,得出了最佳的 Nd³⁺ 掺杂浓度和输出透过率的组合。随后,采用初始透过率分别为 80% 和 85% 的 Cr:YAG 晶体作为可饱和吸收体进行调 Q 实验,获得了最大平均功率为 4.14 W、最高脉冲能量为 54.8 μJ、最窄脉宽为 11 ns 的脉冲激光输出。另外,在该实验中 Ma 等还对平面波导型 YAG/Nd:YAG/YAG 陶瓷和 Nd:YAG

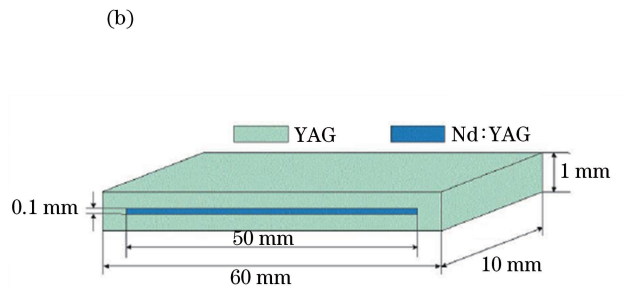
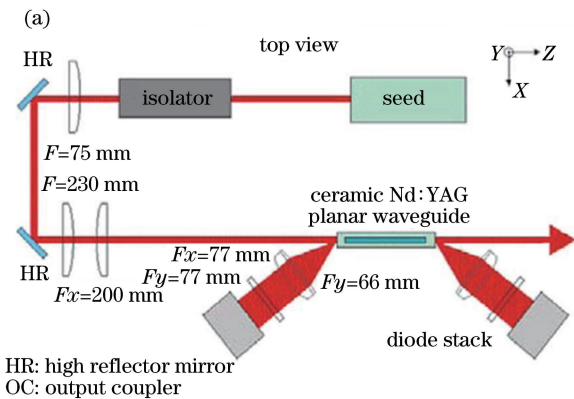


图 8 平面波导型 YAG/Nd:YAG/YAG 陶瓷激光器。(a)实验结构图;(b)平面波导型 YAG/Nd:YAG/YAG 陶瓷的结构^[42]

Fig. 8 Planar waveguide YAG/Nd:YAG/YAG ceramic laser. (a) Experimental setup;

(b) structure of planar waveguide YAG/Nd:YAG/YAG ceramic^[42]

陶瓷的热效应进行了模拟分析,在 20 W 的泵浦功率下,前者在泵浦区域的最高温度为 325 K,后者则达到了 339.2 K,这表明平面波导激光陶瓷材料具有更为优秀的散热性,以及在提高陶瓷激光器输出功率和光束质量上更具优势。

2017 年, Li 等^[44-45]报道了输出功率高达 7.08 kW 的复合型 YAG/Nd:YAG/YAG 板条陶瓷激光器。该



图 9 双浓度掺杂的 YAG/Nd:YAG/YAG 板条陶瓷的结构示意图^[45]

Fig. 9 Schematic of the dual concentration doping YAG/Nd:YAG/YAG slab ceramic^[45]

2.2 Yb:YAG 陶瓷激光器

Yb:YAG 陶瓷与 Nd:YAG 陶瓷相比具有更加优良的特性:1)Yb³⁺的主要吸收峰与发射峰之间的波长更接近,量子亏损更小,有利于减少 Yb:YAG 陶瓷中的热累积;2)Yb³⁺较长的荧光寿命使得 Yb:YAG 陶瓷更适合储能;3)Yb³⁺能级结构简单,所以 Yb:YAG 陶瓷在高浓度掺杂下也不会发生浓度猝灭。基于这些优点, Yb:YAG 陶瓷激光器被认为是实现高功率激光输出的一种重要途径,并得到了广泛关注。本文主要从连续输出和脉冲输出两个方面进行总结。

2.2.1 连续输出 Yb:YAG 陶瓷激光器

表3列出了一些连续输出 Yb:YAG 陶瓷激光器的性能对比。2003 年, Takaichi 等^[46]首次报道了 Yb:YAG 陶瓷激光器,该陶瓷激光器采用真空烧结技术所制备的厚度为 1.6 mm,掺杂原子数分数为

复合型 YAG/Nd:YAG/YAG 板条陶瓷具有两种不同的浓度掺杂,如图 9 所示。相比于单浓度掺杂,双浓度掺杂可以明显地提高总能量存储。由于此复合型陶瓷材料是通过真空烧结技术制备的,因此在不同掺杂浓度部分的界面处不会发生浓度突变。在 18.06 kW 的泵浦功率下,得到了输出功率为 7.08 kW、光-光转换效率为 39.2% 的连续激光输出。

1.0% 的 Yb:YAG 陶瓷作为增益介质,实现了连续激光输出。由于 Yb:YAG 陶瓷为准三能级系统,将其作为激光增益介质实现激光输出需要较强的泵浦功率,因此在该实验中以光纤耦合输出的 940 nm 激光二极管作为泵浦源,经准直聚焦后,焦点处的泵浦功率密度达到了 60 kW/cm²。利用典型的平凹腔结构,获得了最大连续功率为 345 mW,斜效率为 26% 的激光输出。

为了进一步提高 Yb:YAG 陶瓷激光器的效率,研究人员对高浓度掺杂的 Yb:YAG 陶瓷进行了一系列的研究^[51-54]。2007 年, Dong 等^[51]报道了高浓度掺杂(掺杂原子数分数为 20.0%)的 Yb:YAG 陶瓷激光器,采用厚度为 1 mm 的 Yb:YAG 陶瓷作为增益介质,在输出透过率为 10% 的条件下,实现了斜效率为 52%,功率为 2.7 W 的高效激光输出。实验中为了降低准三能级系统再吸收效应的影响,采

表 3 连续输出 Yb:YAG 陶瓷激光器

Table 3 Continuous lasers with Yb:YAG ceramics

Year	Doping concentration /%	Gain medium thickness /mm	Laser operation mode	Output power /W	Efficiency /%	Reference
2003	1.0	1.6	CW	0.345	26	[46]
2005	5.0	0.3	QCW	410 (peak)	55	[47]
			CW	285	41	
2006	5.0	0.3	CW	300	49	[48]
2006	9.8	1	CW	1.73	79	[49]
2007	10.0	0.2	QCW	520 (peak)	56	[50]
			CW	414	47	
2007	20.0	1	CW	2.7	52	[51]
2008	10.0	1	CW	5.5	52	[52]
2008	9.8	1	CW	6.8	72	[53]
2009	10.0	3.5	CW	13.5	43.4	[54]
	5.0			40	39.3	
2010	9.0	0.2	CW	6500	53	[55]
2016	10.0	0.15	CW	1800	74.1	[56]

Note: QCW is quasi-continuous-wave, CW is continuous wave

用如图 10 所示的双通泵浦结构,泵浦光在激光谐振腔内会对该 Yb:YAG 陶瓷进行二次泵浦,通过这样的方式提高了该 Yb:YAG 陶瓷上的泵浦强度,同时采用较短的 Yb:YAG 陶瓷提高了吸收效率,最后实现了较高的激光斜效率。随后,2008 年,Nakamura 等^[53]通过优化 V 型谐振腔的腔长进一步提升了 Yb:YAG 陶瓷激光器的激光性能。在实验中以掺杂原子数分数为 9.8% 的 Yb:YAG 陶瓷作为增益介质,在输出透过率为 10%,腔长为 20 mm 的条件下,实现了最大功率为 6.8 W,斜效率为 72% 的连续激光输出。在相同的谐振腔中,Nakamura 等通过在腔内插入棱镜调节腔内损耗,进一步地实现了波长连续可调的激光输出。其调节范围为 1020.1~1083.6 nm。

2009 年,Hao 等^[54]研究了 Yb³⁺ 掺杂浓度对

Yb:YAG 陶瓷激光器性能的影响。如图 11 采用平平腔结构,对 Yb³⁺ 掺杂原子数分数分别为 5.0% 和 10.0% 的 Yb:YAG 陶瓷进行了激光输出实验。在低泵浦功率情况下,利用高 Yb³⁺ 掺杂浓度(原子数分数为 10.0%)的陶瓷材料,在输出透过率为 5% 时,获得了最高斜效率为 43.4% 的激光输出;在高泵浦功率条件下,利用较低 Yb³⁺ 掺杂浓度(原子数分数为 5.0%)的陶瓷材料,获得了的最大输出功率为 40 W,斜效率为 39.3% 的激光输出,当泵浦功率大于 90 W 时,激光输出功率开始出现饱和现象(图 12)。受限于实验条件中的散热方式和散热能力,随着激光输出功率的增加,光束质量逐步降低,如图 13 所示。因此为了获得更高输出功率的 Yb:YAG 陶瓷激光器,高效的制冷系统是进一步提升输出功率、获得高光束质量激光输出的重要手段。

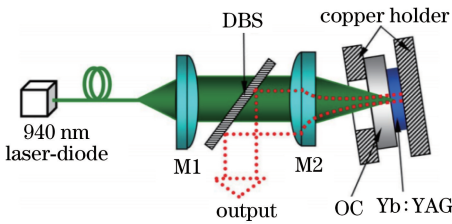


图 10 双通泵浦激光器结构^[51]

Fig. 10 Two-pass-pumping laser configuration^[51]

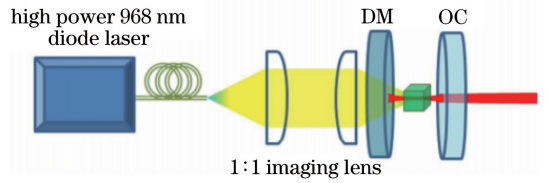


图 11 Yb:YAG 陶瓷激光器实验结构图^[54]

Fig. 11 Experimental setup of Yb:YAG ceramic laser^[54]

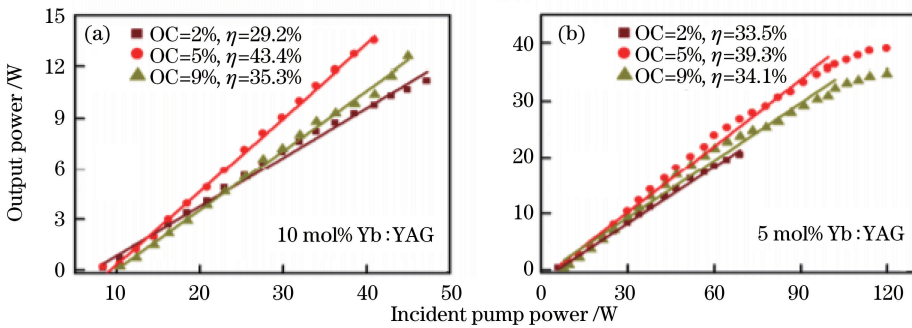


图 12 实验结果。(a) 10.0% Yb:YAG 陶瓷激光器输出功率;(b) 5.0% Yb:YAG 陶瓷激光器输出功率^[54]

Fig. 12 Experimental results. (a) Output power of 10.0% Yb:YAG ceramic laser;

(b) output power of 5.0% Yb:YAG ceramic laser^[54]

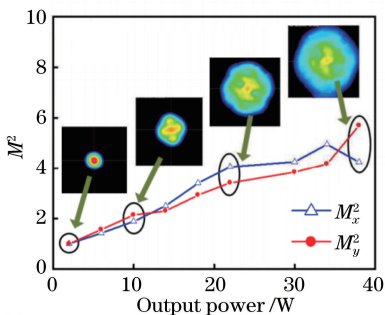


图 13 光束质量随输出功率的变化^[54]

Fig. 13 Beam quality as a function of the output power^[54]

虽然高浓度的 Yb³⁺ 掺杂提高了 Yb:YAG 陶瓷的增益,但是 Yb³⁺ 的激光能级系统为准三能级系统,其需要较强的泵浦强度来实现激光输出。因此在高强度泵浦以及高浓度 Yb³⁺ 掺杂的情况下,即便是热导性优良的 Yb:YAG 陶瓷在泵浦区也会出现较严重的局域热效应,从而限制其激光性能。通过优化激光陶瓷材料的几何结构,将泵浦光分布引起的温度分布梯度和热传导产生的温度梯度方向分离,可以把热效应的影响尽可能地降低,因此研究人员对微片型(厚度小于 1 mm)Yb:YAG 陶瓷激光器展开了一系

列的实验研究^[47,48,50,55,56]。由表 3 可知,由于微片 Yb:YAG 陶瓷具有出色的散热性,Yb:YAG 陶瓷激光器的输出功率得到了很大的提升。

近年来,研究人员对锯齿形(Zig-Zag)的板条 Yb:YAG 陶瓷激光器进行了研究^[57-60]。锯齿形(Zig-Zag)光学体系可以提高泵浦光与腔模的空间重叠,有利于获得更高效率的激光输出,还可以增加泵浦光通过增益介质的次数,从而提高增益介质的泵浦吸收效率。2011 年,Furuse 等^[58]报道了锯齿

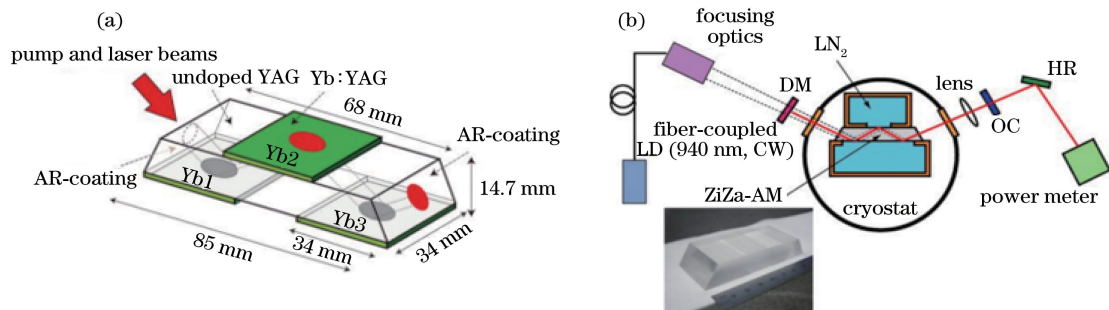


图 14 复合型 Yb:YAG/YAG 陶瓷激光器。(a) 复合型陶瓷结构图;(b) 陶瓷激光器实验结构图^[58]

Fig. 14 Composite YAG/Yb:YAG/YAG ceramic laser. (a) Structural diagram of composite ceramic; (b) experimental setup of ceramic laser^[58]

2020 年,Meng 等^[60]报道了准连续的锯齿(Zig-Zag)板条型 Yb:YAG 陶瓷激光器。在实验中,采用泵浦持续时间为 $560 \mu\text{s}$,重复频率为 160 Hz 的准连续泵浦光泵浦掺杂原子数分数为 0.6% 的板条型 Yb:YAG 陶瓷,获得了峰值功率为 6.2 kW,斜效率为 72.1% 的高效 1030.1 nm 准连续激光输出,实验装置如图 15 所示。

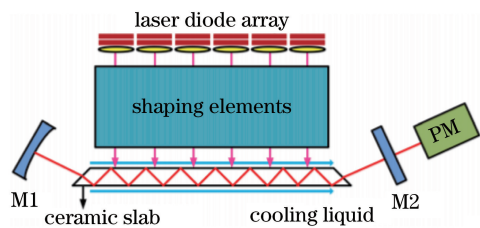


图 15 板条型 Yb:YAG 陶瓷激光器的实验结构图^[60]

Fig. 15 Experimental setup of slab Yb:YAG ceramic laser^[60]

2019 年,Jiang 等^[61]采用非水基流延成型技术、陶瓷真空烧结技术以及热等静压技术成功制备了大尺寸,高质量的平面波导型 YAG/10.0% Yb:YAG/YAG 陶瓷,该陶瓷总尺寸为 $1 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$,掺杂区尺寸为 $0.1 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ 。将该平面波导型陶瓷材料作为主放大器的增益介质,在 940 nm 激光二极管的双端泵浦下,实现了输出功率高达 1.25 kW、斜效率

形(Zig-Zag)光学体系的复合型 Yb:YAG/YAG 陶瓷激光器。此陶瓷激光器的实验结构如图 14 所示,图 14(a)为复合型 Yb:YAG/YAG 陶瓷的结构图,Yb1、Yb2、Yb3 分别为厚度为 $120 \mu\text{m}$ 、 $170 \mu\text{m}$ 、 $300 \mu\text{m}$ 的微片型 Yb:YAG 陶瓷,掺杂原子数分数均为 9.8%。此复合型 Yb:YAG/YAG 陶瓷放在低温恒温器中,并使用液氮制冷散热,在 940 nm 泵浦光的泵浦下[图 14 (b)],实现了功率为 214 W、斜效率为 63% 的连续激光输出。

为 30% 的 1030 nm 激光输出(图 16)。平面波导结构作为板条结构的进化,可以更有效地约束非衍射极限的光束,并防止其在自由空间发散。同年,林伟平等^[62-63]采用平面波导型 YAG/Yb:YAG/YAG 陶瓷分别实现了功率为 1.41 kW 的 1030 nm 连续激光输出以及输出能量为 36 mJ 的 1319 nm 脉冲激光输出。

从上述的研究中可知,改善 Yb:YAG 陶瓷的热效应是提高 Yb:YAG 陶瓷激光器性能的关键点,可以通过优化 Yb^{3+} 掺杂浓度、优化 Yb:YAG 陶瓷的几何结构,以及提高制冷散热效率(液氮制冷)等手段实现。

2.2.2 脉冲输出 Yb:YAG 陶瓷激光器

Yb:YAG 陶瓷除了在高功率激光领域中有着广泛的应用,在被动调 Q 脉冲激光器以及超快锁模激光器的研究中同样有着不错的表现。 Yb^{3+} 的长荧光寿命使得 Yb:YAG 陶瓷在调 Q 操作中易获得高阈值、高能量的脉冲激光输出,而且复合型 Yb:YAG/Cr:YAG 陶瓷非常适用于小型化、集成化的高能量脉冲激光器。另外, Yb^{3+} 的荧光带宽较宽,因此在锁模操作中易获得皮秒甚至飞秒级别的窄脉宽输出。表 4 和表 5 分别给出了典型的复合型 Yb:YAG/Cr:YAG 被动调 Q 陶瓷激光器以及锁模 Yb:YAG 陶瓷激光器

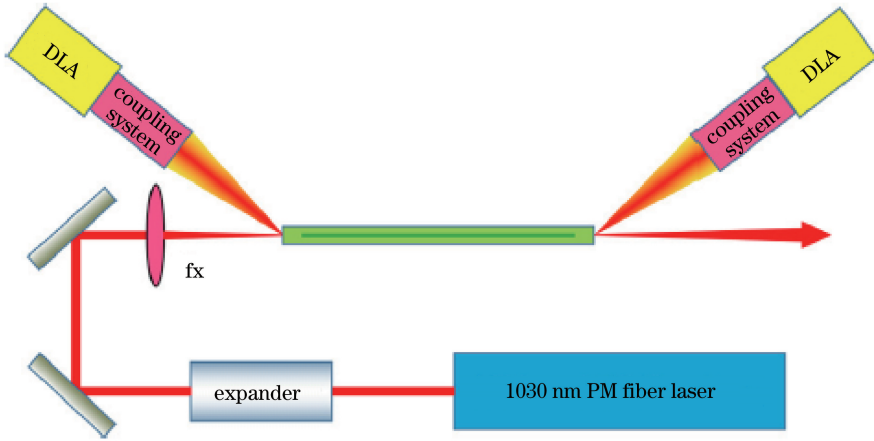


图16 平面波导型 YAG/10% Yb:YAG/YAG 陶瓷 MOPA 的实验结构图^[61]

Fig. 16 Experimental setup of the planar waveguide YAG/10% Yb:YAG/YAG ceramic MOPA^[61]

表 4 复合型 Yb:YAG/Cr:YAG 被动调 Q 陶瓷激光器

Table 4 Passively Q-switched lasers with composite Yb:YAG/Cr:YAG ceramics

Year	Efficiency / %	Energy / μ J	Repetition rate / kHz	Pulse width / ps	Peak power / kW	Reference
2006	37	31	12.4	380	82	[64]
2007	27	125	3.8	1200	105	[65]
2007	29	172	3.5	237	720	[66]
2013	10	25	30	3000	9	[67]

表 5 被动锁模 Yb:YAG 陶瓷激光器

Table 5 Passively mode-locked lasers with Yb:YAG ceramics

Year	Mode-locked element	Output power / W	Repetition rate / MHz	Pulse width / fs	Dispersion compensation/compressor	Reference
2016	SESAM	240	102.41	970	Yes	[68]
2016	SESAM	—	119	2400	No	[69]
2016	Yb:YAG	0.32	—	97	Yes	[70]
2017	YAG/Yb:YAG	91	100	70	Yes	[71]
2018	SESAM	0.17	448.918 448.982	2800 2600	No	[72]

Note: SESAM is semiconductor saturable absorber mirror

2016年,高子叶等^[70]使用 Yb:YAG 陶瓷作为克尔锁模介质实现了输出功率为 320 mW、脉宽为 97 fs 的自锁模激光输出。在该激光谐振腔中,采用棱镜补偿了腔内色散。这是 Yb:YAG 陶瓷首次作为克尔锁模介质实现锁模激光输出。

2017年,Liu 等^[71]报道了脉宽为 70 fs,输出功率为 90 W 的高功率锁模激光。此激光系统主要包含三个部分:陶瓷振荡器、前置放大器和主放大器,如图 17 所示。该陶瓷振荡器是基于 Yb:YAG 陶瓷和半导体可饱和吸收镜(SESAM)的锁模激光器,输出的激光脉宽为 3 ps。前置放大器和主放大器均采用大模场的光子晶体光纤作为增益介质。经前置放大器和主放大器放大后的脉冲激光被光栅压缩后,

脉宽变为 70 fs。

2.3 Tm/Ho/Er:YAG 陶瓷激光器

除了 Yb³⁺ 和 Nd³⁺ 掺杂的 YAG 陶瓷激光器外,Tm/Ho/Er:YAG 陶瓷激光器产生的 1.4 ~ 2 μ m 的人眼安全波段激光在空间通信、遥感、激光雷达等领域有着重要的应用。

2012年,Li 等^[73]通过固相反应的方法制备了掺杂原子数分数为 1.0% 的 Er:YAG 陶瓷,在 1532 nm 激光的泵浦下获得了最大输出功率为 13 W,斜效率为 51% 的 1645 nm 激光输出。2015年,Gluth 等^[74]报道了 2 μ m 波段的被动锁模 Tm:YAG 陶瓷激光器。在连续激光实验中,使用双折射滤波片实现了调谐范围最大为 1925 ~ 2058 nm 的

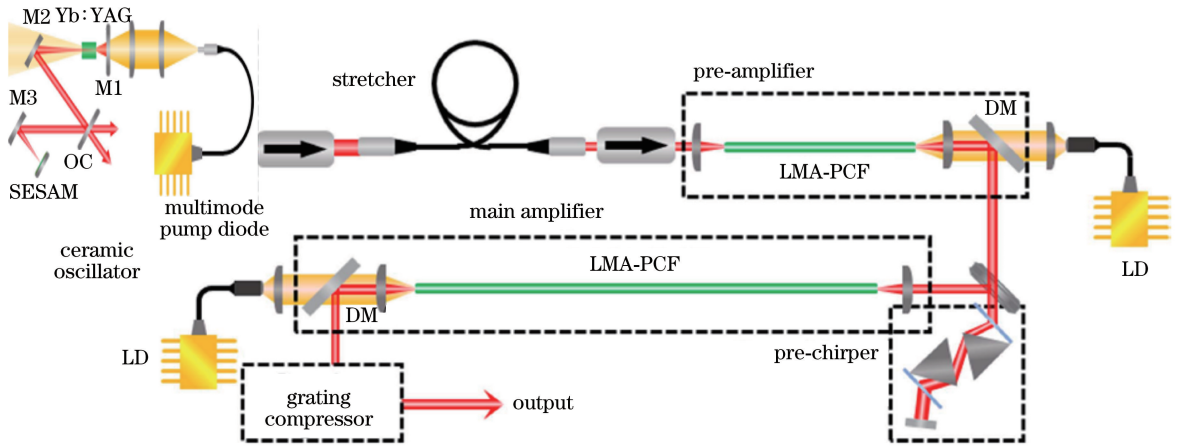


图 17 激光系统的实验结构图^[71]

Fig. 17 Experimental setup of laser system^[71]

2 μm 波段激光输出。在锁模激光实验中,使用 GaSb 表面量子阱半导体可饱和吸收镜和色散棱镜对,实现了最窄脉冲宽度为 3 ps、重复频率为 89 MHz、最大输出功率为 150 mW 的 2 μm 波段锁模激光输出。在连续激光实验中接近 133 nm 的可调带宽证明了 Tm:YAG 陶瓷产生小于 100 fs 锁模激光的可能性。2016 年, Lan 等^[75] 报道了基于 1910 nm 光纤激光泵浦的微片 Ho:YAG 陶瓷激光器。该陶瓷激光器分别采用单壁碳纳米管、石墨烯和 Cr:ZnSe 可饱和吸收体作为调 Q 元件,实现了不同性能的调 Q 激光输出。当以单壁碳纳米管作为调 Q 元件时,实现了转换效率高达 70% 的 2090 nm 脉冲激光输出,该脉冲激光在 165 kHz 重复频率下的脉宽为 85 ns。在以 Cr:ZnSe 可饱和吸收体作为调 Q 元件时,获得了 11 ns 的最短脉冲输出。2018 年,王硕等^[76] 报道了单频脉冲 Er:YAG 陶瓷激光器。该激光器采用单块 Er:YAG 非平面环形腔激光器

作为种子源,通过注入锁定技术,在重复频率为 200 Hz 的条件下获得了脉冲能量为 11.45 mJ、脉宽为 174 ns 的 1645 nm 单频激光输出,并且在 x 和 y 方向的光束质量因子 M^2 分别为 1.45 和 1.42。

为了实现高功率、高光束质量的 1.4~2 μm 人眼安全波段的陶瓷激光器,在高功率陶瓷激光器中表现出色的平面波导结构被用于 Tm/Ho/Er:YAG 陶瓷激光器中。2016 年, Wu 等^[77] 使用三明治结构的平面波导型 YAG/Ho:YAG/YAG 陶瓷作为激光增益介质,实现了最大功率为 530 mW 的 2.09 μm 单纵模激光输出;并在实验中,通过调节标准具的角度,实现了波长从 2091.1~2092.1 nm 的可调谐激光输出。同年, Yao 等^[78] 报道了 2013.76 nm 平面波导型 YAG/Tm:YAG/YAG 陶瓷激光器。在实验中,首次使用非水基流延成形和固相反应相结合的方法制备了平面波导型 YAG/Tm:YAG/YAG 陶瓷,并在如图 18(a) 所示的平

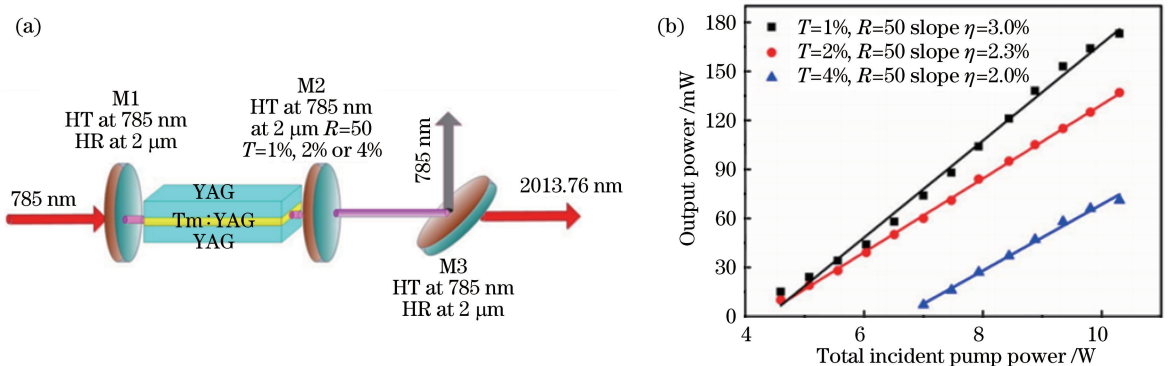


图 18 平面波导型 YAG/Tm:YAG/YAG 陶瓷激光器。(a) 实验结构图; (b) 不同输出镜下的输出功率^[78]

Fig. 18 Planar waveguide YAG/Tm:YAG/YAG ceramic laser. (a) Experimental setup;

(b) output power with different output mirrors^[78]

谐振腔中研究了输出透过率分别为 1%、2% 和 4% 时的激光输出特性。当输出透过率为 1% 时,得到了最大输出功率为 173 mW, 对应斜效率为 3% 的 2013.76 nm 连续激光输出。

3 倍半氧化物陶瓷激光器

谐振腔、增益介质、泵浦源是组成激光器的三大要素,其中增益介质又是其中的核心。理想的基质材料应该具有热导性好、硬度高、折射率不随温度剧烈变化、热膨胀系数低、量子缺陷少、声子能量低等特点。早期的激光陶瓷材料多以 YAG 为基底,近年来,热导性更好、声子能量低、量子缺陷更少的倍半氧化物陶瓷材料得到了广泛的应用。其中 Yb³⁺ 掺杂的 Lu₂O₃、Sc₂O₃、Y₂O₃ 倍半氧化物陶瓷材料在高功率激光和超快激光领域中已经取得了不错的研究成果。Yb³⁺ 能级结构简单,量子缺陷小(约为 10%),有利于减小热量在材料中的累积。另外, Yb³⁺ 的直径与 Lu³⁺、Sc³⁺ 和 Y³⁺ 的直径相当,因此

表 6 掺 Yb³⁺ 倍半氧化物陶瓷激光器的激光输出性能

Table 6 Laser performance of Yb³⁺ doped sesquioxide ceramic lasers

Year	Substrate	Wavelength /nm	Thickness/ length /mm	Doping concentration /%	Output power /W	Efficiency /%	Reference
2003	Sc ₂ O ₃	1094	2.3	2.5	0.42	9	[79]
		1041			0.2	—	
2003	Y ₂ O ₃	1078	0.6	8.0	0.75	12.6	[80]
		1030			1.3	45	
2004	Y ₂ O ₃	1075	0.8	4.0	1.4	72	[81]
		1035			0.7	36	
2005	Lu ₂ O ₃	1075	1	3.0	0.95	53	[82]
2005	Y ₂ O ₃	1078	3	8.0	9.2	41	[83]
		1040			1.4	57.1	
2006	Y ₂ O ₃	1078	2	8.0	1.74	82.4	[84]
		1031			0.521	53	
2006	Y ₂ O ₃	1031	2	10	0.521	53	[85]
2008	Y ₂ O ₃	1030	1.67	10	80	70	[86]
2014	Lu ₂ O ₃	1034	0.3	3.0	45.1	60.6	[87]
2017	Lu ₂ O ₃	1034	0.15	3.0	174	54	[88]

2004 年, Takaichi 等^[81] 通过改变 Yb:Y₂O₃ 陶瓷的掺杂浓度和厚度, 不仅实现了激光输出波长的转换, 同时也提升了陶瓷激光器的输出功率和斜效率。在实验中, 当 Yb:Y₂O₃ 陶瓷的 Yb³⁺ 掺杂原子数分数为 2.0%, 厚度为 500 μm 时, 激光输出波长为 1030 nm, 斜效率为 45%。当 Yb³⁺ 掺杂原子数分数为 4.0%, 厚度变为 800 μm 时, 激光输出波长发生了移动, 得到了斜效率为 72% 的 1075 nm 激光输出。这证明了当增益介质的掺杂浓度和厚度减小时, 激光下能级上的再吸收效应得以有效抑制。另

将其掺杂进 Lu₂O₃、Sc₂O₃、Y₂O₃ 等基底材料中时, Yb³⁺ 不会破坏基底材料的晶格。

3.1 掺 Yb³⁺ 倍半氧化物陶瓷激光器

Yb:Lu₂O₃、Yb:Sc₂O₃ 和 Yb:Y₂O₃ 陶瓷激光器是掺 Yb³⁺ 倍半氧化物陶瓷激光器的典型代表。表 6 列举了一些 Yb:Lu₂O₃、Yb:Sc₂O₃ 和 Yb:Y₂O₃ 陶瓷激光器的激光性能。

掺 Yb³⁺ 倍半氧化物陶瓷材料的再吸收效应是影响其激光性能以及激光输出波长的重要因素。掺 Yb³⁺ 倍半氧化物陶瓷材料最强发射峰对应的激光波长往往会受到再吸收效应的影响, 再吸收效应会增加腔内最强发射峰对应激光波长的损耗, 当损耗大于其腔内增益时, 此激光波长的振荡就会被抑制, 而受再吸收效应影响较小的次发射峰对应的激光波长就会优先起振, 从而发生激光输出波长漂移的现象^[79-80]。另外, 再吸收效应主要与增益介质的掺杂浓度、厚度以及腔模匹配有关, 通过减小增益介质厚度或者降低掺杂浓度可以有效地减弱再吸收效应。

外, 由于次发射峰对应的激光波长受再吸收效应影响较弱, 在室温环境下, 激光器工作在此波长能获得更高的激光性能^[81,82,84]。

2006 年, Casagrande 等^[85] 研究了低温下 (80 K) Yb:Y₂O₃、Yb:Lu₂O₃ 和 Yb:Sc₂O₃ 陶瓷激光器的性能。在实验中发现, 当环境温度下降到 80 K 时, 增益介质激光下能级上的热粒子数会急剧减少, 再吸收效应几乎消失不见。因此受再吸收效应抑制的激光上能级²F_{5/2}的第一子能级至激光下能级²F_{7/2}的第三子能级的能级跃迁得到增强, 对应的

1031 nm、1032 nm 和 1042 nm 激光迅速得到增益, Yb:Y₂O₃、Yb:Lu₂O₃ 和 Yb:Sc₂O₃ 陶瓷激光器的输出波长分别变为 1031 nm、1032 nm 和 1042 nm, 并且斜效率至少提高了 19%。此实验证明了低温对再吸收效应的抑制作用。2008 年, Merkle 等^[86] 继续采用液氮制冷的办法, 在 77 K 的低温环境下, 得到了功率为 80 W, 斜效率为 70% 的高效 1030 nm Yb:Sc₂O₃ 陶瓷激光器。

为了实现高功率, 高效率的掺 Yb³⁺ 倍半氧化物陶瓷激光器, 不仅要考虑材料的再吸收效应, 也要选择合适的激光波长。虽然位于最强发射峰的激光波长受再吸收效应的影响较为严重, 但是通过提高制冷系统的散热效率、减小材料厚度和优化稀土离子的掺杂浓度可以有效地解决此问题,

因此微片倍半氧化物陶瓷材料在高功率倍半氧化物陶瓷激光器中具有研究意义。另外, 微片倍半氧化物陶瓷材料由于尺寸较小, 通常需要采用多通泵浦的方式提高其增益。2014 年, Nakao 等^[87] 使用厚度为 300 μm 和 250 μm 的掺杂原子数分数为 3.0% Yb:Lu₂O₃ 陶瓷实现了最大功率为 45.1 W, 斜效率最高为 60.6% 的 1034 nm 激光输出, 实验结构如图 19 所示。2017 年, Kitajima 等^[88] 进一步优化了泵浦模组结构, 增加了泵浦光在 Yb:Lu₂O₃ 陶瓷内的反射次数, 并采用厚度更小的 100 μm Yb:Lu₂O₃ 陶瓷作为激光增益介质实现了功率高达 174 W, 斜效率为 54% 的 1034 nm 激光输出。这是目前掺 Yb³⁺ 倍半氧化物陶瓷激光器输出功率的最高记录。

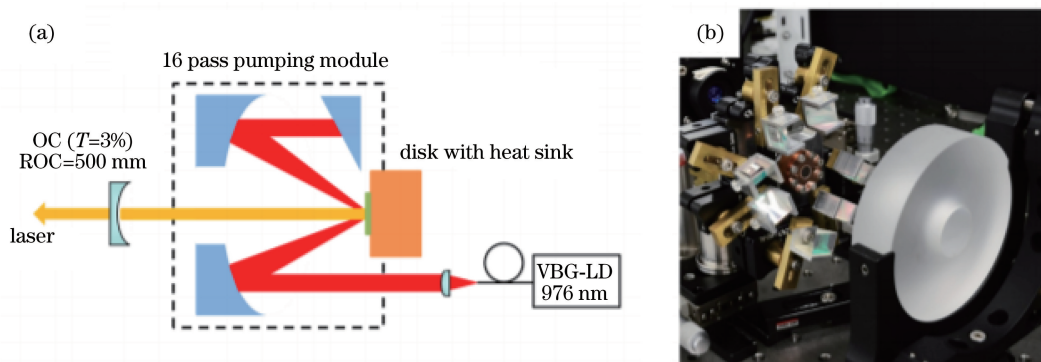


图 19 Yb:Lu₂O₃ 陶瓷激光器。(a) 实验结构图; (b) 泵浦模组图^[87]

Fig. 19 Yb:Lu₂O₃ ceramic laser. (a) Experimental setup; (b) photograph of the pump module^[87]

掺 Yb³⁺ 倍半氧化物陶瓷材料除了在高功率激光领域有着广泛的应用, 在超快激光领域中同样开始崭露头角。掺 Yb³⁺ 倍半氧化物陶瓷较宽的荧光线宽有利于在锁模操作中实现脉宽更窄的超快激光输出。

表 7 给出了近年来掺 Yb³⁺ 倍半氧化物陶瓷材料作为激光增益介质, 并采用可饱和吸收体作为锁模元件实现被动锁模激光的性能对比, 由于受到掺

Yb³⁺ 倍半氧化物陶瓷材料本身荧光线宽的限制, 表 7 所列的被动锁模陶瓷激光器的脉宽都为几百飞秒。但是, 掺 Yb³⁺ 倍半氧化物陶瓷材料的高非线性折射率可以突破这一限制, 因为基于非线性效应的克尔透镜和自相位调制效应会导致材料的光谱发生展宽, 因此掺 Yb³⁺ 倍半氧化物陶瓷材料可以实现脉宽小于 100 fs 的自锁模超快激光输出^[94-96]。

表 7 掺 Yb³⁺ 倍半氧化物陶瓷被动锁模激光器

Table 7 Passively mode-locked lasers with Yb³⁺ doped sesquioxide ceramics

Year	Substrate	Pulse width /fs	Wavelength /nm	Output power /W	Repetition rate /MHz	Reference
2003	Y ₂ O ₃	615	1076.5	0.45	98	[89]
2004	Y ₂ O ₃	430	1037	0.21	98	[90]
2006	Lu ₂ O ₃	357	1033.5	0.352	97	[91]
2007	Y ₂ O ₃	188	1038	0.22	97	[92]
2012	Y ₂ O ₃	547	1030	7.4	45	[93]

通过优化谐振腔结构、控制腔内色散、超快倍半氧化物陶瓷激光器的脉宽有望被进一步压缩。2017 年, 微片 Yb:Lu₂O₃ 晶体已经实现了脉宽为 35 fs 的自锁模超快激光输出, 最大输出功率可达

10.7 W^[97]。随后, Kitajima 等^[98] 报道了脉宽小于 100 fs, 输出功率最大为 3.7 W 的微片 Yb:Lu₂O₃ 陶瓷超快激光器。实验装置如图 20 所示, 采用厚度为 2 mm 的 YAG 薄片作为克尔介质(KM), 通过优

化 KM 处的模场半径和泵浦半径的比例增加调制深度,实现了稳定的克尔锁模。微片倍半氧化物陶瓷材料的高非线性折射率使其非常适合作为克尔介质实现自锁模超快激光,同时其优秀的散热性有利于高功率激光输出。因此基于微片倍半氧化物陶瓷材料的超快自锁模激光器会是倍半氧化物陶瓷激光器在超快激光领域中的未来发展方向。

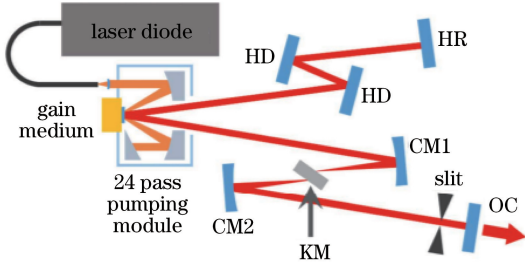


图 20 克尔透镜锁模激光器实验结构图^[98]

Fig. 20 Experimental setup for the Kerr-lens mode-locked laser^[98]

3.2 掺 Tm^{3+} 、 Er^{3+} 倍半氧化物陶瓷激光器

2~3 μm 波段中红外激光器在激光雷达、医疗手术以及光通信等领域具有重要的应用。利用激光二极管泵浦掺 Tm^{3+} 、 Er^{3+} 等稀土离子的激光增益介质产生 2~3 μm 波段中红外激光是目前常用的技术手段。稀土离子能级跃迁产生的中红外受激辐射的几率与基底材料密切相关。声子能量低的激光增益介质有利于减弱材料的无辐射跃迁,而倍半氧化物陶瓷材料的声子能量低,并且其优秀的热导性有利于材料内部废热的散除。

近年来,掺 Tm^{3+} 倍半氧化物陶瓷激光器得到了研究人员的关注。因为 Tm^{3+} 掺杂在倍半氧化物材料中时, Tm^{3+} 的能级会发生强烈的 Stark 劈裂,导致其荧光谱线展宽,其发射谱线会扩展到 2.1 μm 。另外,掺 Tm^{3+} 倍半氧化物材料的吸收光谱覆盖到了 808 nm,因此可以采用性价比高的 808 nm 激光二极管作为泵浦源。

2016 年,Ryabochkina 等^[99]报道了 2 μm 波段的 $\text{Tm}:\text{Y}_2\text{O}_3$ 陶瓷激光器。该陶瓷激光器采用 809 nm 激光二极管泵浦 $\text{Tm}:\text{Y}_2\text{O}_3$ 陶瓷,通过改变输出透过率实现了输出波长的变化。在激光输出波长为 1.95 μm 时,激光最大输出功率为 2.4 W,斜效率为 11%。当激光输出波长变为 2.05 μm 时,激光的输出功率下降到 0.3 W,该陶瓷激光器性能大幅度下降的主要原因有:1)2.05 μm 不是该 $\text{Tm}:\text{Y}_2\text{O}_3$ 陶瓷发射光谱中的最强发射峰,受激发射截面较弱;2)输出透过率没有达到最优值;3) Tm^{3+} 掺杂浓度

未作优化。其中 Tm^{3+} 掺杂浓度是提高 2 μm 波段 $\text{Tm}:\text{Y}_2\text{O}_3$ 陶瓷激光器效率的重要因素,因为增加 Tm^{3+} 掺杂浓度可以增强交叉弛豫过程,从而提高激光跃迁的量子效率。但需要注意的是,过高的掺杂浓度会增强材料的上转换过程,如图 21 所示。在上转换过程中,每当激光上能级 $^3\text{F}_4$ 的粒子跃迁到基态 $^3\text{H}_6$ 时,激光上能级 $^3\text{F}_4$ 上会有其他粒子被激发到 $^3\text{H}_5$ 能级或者 $^3\text{H}_4$ 能级,因此激光上能级 $^3\text{F}_4$ 上的粒子数会发生减少。由于 $^3\text{H}_5$ 能级的能级寿命较短,此能级上的粒子会发生无辐射跃迁进而在材料内部产生热量。激光上能级 $^3\text{F}_4$ 上反转粒子数的减少和无辐射跃迁产生的热量会限制 2 μm 波段激光输出的效率。另外,由图 21 可知, Tm^{3+} 在 1.6~1.7 μm 波段也有较强的吸收,并且此波段的泵浦光可以将 Tm^{3+} 直接抽运到激光上能级,属于同带(In-band)泵浦,可以在一定程度上减弱增益介质的热效应,但是目前缺少 1.6~1.7 μm 波段的高功率激光二极管。2016 年,Antipov 等^[100]报道了基于同带泵浦的 $\text{Tm}:\text{Lu}_2\text{O}_3$ 陶瓷激光器。该陶瓷激光器采用拉曼频移后的掺铒光纤激光作为泵浦源,实现了高效率(光-光转换效应为 51%)的 2 μm 波段激光输出,得益于掺铒光纤激光的高光束质量,输出激光的光束质量也得到了提升。2017 年,Wang 等^[101]比较了 Tm^{3+} 掺杂原子数分数分别为 1.0%、2.0% 和 3.0% 的 $\text{Tm}:\text{Y}_2\text{O}_3$ 陶瓷的激光性能。最终在 Tm^{3+} 掺杂原子数分数为 2.0% 的条件下,得到了最佳的 2050 nm 激光输出(输出功率为 7.25 W,斜效率为 40%);并进一步对该陶瓷激光器进行调 Q 操作,实现了最短脉宽为 115 ns 的脉冲激光输出。

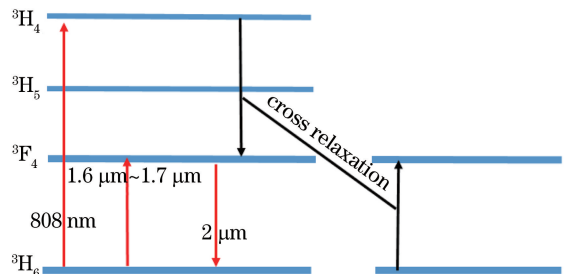


图 21 Tm^{3+} 的能级结构图

Fig. 21 Energy level structure diagram of Tm^{3+}

2017 年,Xu 等^[102]报道了一种新型的 $\text{Tm}:\text{LuScO}_3$ 混晶陶瓷激光器。此 $\text{Tm}:\text{LuScO}_3$ 混晶陶瓷是通过固相反应的方法烧结而成。与 $\text{Tm}:\text{Lu}_2\text{O}_3$ 与 $\text{Tm}:\text{Sc}_2\text{O}_3$ 相比, $\text{Tm}:\text{LuScO}_3$ 混晶陶瓷

在 1.9~2.1 μm 波段范围内光谱曲线更为平滑,发射峰更少,对应的 1970 nm 最强发射峰的光谱半高宽也更宽,这表明了“混晶”这种无序晶体结构展宽材料发射光谱,减少发射峰从而使得发射光谱更为平滑的特性,这有利于获得高性能的锁模激光。该 $\text{Tm}:\text{LuScO}_3$ 混晶陶瓷在连续激光实验中得到了 211 mW 的连续激光输出。在使用单壁碳纳米管作为可饱和吸收体的情况下,获得的最大平均功率为 32 mW,在 34.72 kHz 重复频率处的脉宽为 0.59 μs 。2018 年,Wang 等^[103]首次报道了脉宽接近转换极限的被动锁模 $\text{Tm}:(\text{Lu}_{2/3}\text{Sc}_{1/3})_2\text{O}_3$ 混晶陶瓷激光器。该混晶陶瓷材料由热等静压技术制备而成。在实验中,使用 InGaAsSb 量子阱半导体可饱和吸收镜和啁啾色散补偿镜实现了最小脉宽为 63 fs 的 2.057 μm 锁模激光输出;并进一步指出优

化 Lu_2O_3 和 Sc_2O_3 的掺杂比例或者与 Ho^{3+} 共掺有望得到脉宽小于 50 fs 的 2 μm 波段锁模激光。

掺 Er^{3+} 的倍半氧化物陶瓷材料是 3 μm 波段中红外激光的重要候选材料,因为 Er^{3+} 的 $^4\text{I}_{11/2} \rightarrow ^4\text{I}_{13/2}$ 能级跃迁会激发 2.7 μm 波段中红外激光,并且用于泵浦 Er^{3+} 的泵浦源通常为一些已经商用化且性价比高的 808 nm 或者 980 nm 激光二极管。

2017 年,Wang 等^[104]在室温环境下使用 970 nm 激光二极管泵浦了三种掺杂浓度的 $\text{Er}:\text{Y}_2\text{O}_3$ 陶瓷。三种掺杂浓度的 $\text{Er}:\text{Y}_2\text{O}_3$ 陶瓷在 2~3 μm 波段都具有良好的透过率,没有明显的吸收现象。实验装置如图 22 所示,在输出透过率为 2%。 $\text{Er}:\text{Y}_2\text{O}_3$ 陶瓷的掺杂原子数分数为 3.0% 时,实现了最大功率为 2.05 W,最大斜效率为 11.1% 的 2.7 μm 激光输出。

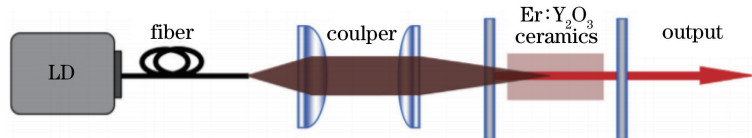


图 22 LD 端面泵浦 $\text{Er}:\text{Y}_2\text{O}_3$ 陶瓷激光器实验结构图^[104]

Fig. 22 Experimental setup for LD end-pumped $\text{Er}:\text{Y}_2\text{O}_3$ ceramic lasers^[104]

同年,Uehara 等^[105]报道了准连续输出的 2.8 μm $\text{Er}:\text{Lu}_2\text{O}_3$ 陶瓷激光器,在泵浦持续时间为 20 ms 的条件下,峰值功率为 1.2 W,斜效率为 15%。在连续泵浦下,输出功率为 0.48 W,斜效率为 22%。

随着中红外激光器应用要求的不断拓展,对高效率、高光束质量的 2~3 μm 波段连续波和脉冲超快激光的需求将会日益增加。中红外陶瓷激光器输出 2~3 μm 波段中红外激光是一种重要的途径,在未来的探索研究中,还有几个重要的方面值得关注:

1)通过陶瓷烧结技术和激光实验相互验证,进一步优化用于激光输出的激光陶瓷材料的参数;2)提升激光陶瓷材料的光学质量,降低材料在中红外波段的损耗;3)采用散热性更佳的复合型倍半氧化物陶瓷材料,提高中红外陶瓷激光器的功率输出水平和光束质量;4)基于倍半氧化物陶瓷材料的高非线性折射率,2~3 μm 波段的自锁模陶瓷激光器也是其潜在发展方向^[96]。

4 结束语

自 1995 年陶瓷材料首次实现激光输出以来,陶瓷材料经过几十年的发展已经具备了不逊色于单晶材料的光学性质和激光性能,并且由于具有散

热高效、高浓度掺杂以及抗热冲击性强等优点,是未来固体激光器的理想增益介质。随着如今应用需求的不断提升,对更高性能激光的追求是必然的趋势。这对于陶瓷激光器的发展既是挑战也是机遇。

在提高激光陶瓷材料的光学质量上,目前的激光陶瓷材料制备技术仍然需要解决以下问题:1)激光陶瓷材料晶界结构、气孔率以及晶粒尺寸等因素所造成的散射问题;2)陶瓷烧结过程中由于区域收缩速率不同导致在不同界面处产生的残余应力;3)烧结过程中离子扩散行为导致的界面处折射率的分布与设计时的差异。这些问题的解决需从提高原料纯度、调控原料粉体粒度、优化陶瓷成型工艺和烧结技术方面入手。除此之外,激光陶瓷材料的单晶化制备应是激光陶瓷材料制备技术的一个重要发展方向。现在大多数的激光陶瓷材料都属于多晶结构,多晶结构中的晶界是造成激光陶瓷材料散射问题的重要原因之一,因此激光陶瓷材料的单晶化对于提高其光学质量是具有重要意义的。另外,激光陶瓷材料的单晶化制备也为一些高熔点的单晶晶体材料提供了新的获得途径,比如难以通过传统晶体生长工艺制备的单晶倍半氧化物材料。 $\text{Nd}:\text{YAG}$ 陶瓷的单晶化已经实现,并且将其作为增益介质,实现了比普通 $\text{Nd}:\text{YAG}$ 陶瓷更高效的激光输出^[106]。

可以预见, Yb:YAG 陶瓷以及倍半氧化物陶瓷材料单晶化的实现, 会让陶瓷激光器得到进一步的发展。

在提高激光转换效率、输出功率和光束质量上, 激光增益介质内部的热效应一直是其最大的阻碍。得益于陶瓷制备工艺在激光陶瓷材料设计上的灵活性和便捷性, 通过不断优化激光陶瓷材料的结构, 比如制备复合型激光陶瓷材料(多层复合结构、平面波导结构等), 为实现高效率、高功率和高光束质量的陶瓷激光器提供了有效的解决方案。考虑到复合型激光陶瓷材料在未来高性能激光上的发展前景, 未来的研究方向应集中于: 1) 复合型激光陶瓷材料的微片化以及制备全反射型复合激光陶瓷材料; 2) 选用热导性更佳的基质, 比如倍半氧化物, 去制备复合型陶瓷材料。从目前来看, 虽然泵浦吸收效率高、散热性好、泵浦阈值低的平面波导激光陶瓷材料最近在高功率、高光束质量陶瓷激光器的研究中取得了不错的成果。但是从它的制备和结构特点的角度出发, 还存在着以下问题: 1) 采用流延成型技术和热键合技术制备平面波导激光陶瓷材料时, 芯层加工难度大, 键合强度弱; 2) 在高功率下, 平面波导激光陶瓷材料中存在的自发辐射和寄生振荡会与激光模式进行增益竞争, 从而限制激光的输出性能。

倍半氧化物陶瓷材料因其出色的散热性被用于高效率、高功率和高光束质量的近红外固体激光器中, 此外, 近年来也成为产生 $2\sim 3\ \mu\text{m}$ 波段中红外激光的重要候选材料。这是因为与 $\text{Tm}/\text{Ho}/\text{Er}:\text{YAG}$ 陶瓷相比, 倍半氧化物陶瓷材料的声子能量更低, 有利于减弱材料的无辐射跃迁, 因此在高效率的 $2\sim 3\ \mu\text{m}$ 波段的中红外激光输出上具有得天独厚的优势。但是采用 $808\ \text{nm}$ 泵浦源泵浦掺 $\text{Tm}^{3+}/\text{Er}^{3+}$ 倍半氧化物陶瓷材料, 激光产生中红外激光的过程中, 量子亏损较大, 材料在泵浦区域累积的热量会严重影响激光输出功率和转换效率。因此复合型倍半氧化物陶瓷材料的制备也为实现高效率、高光束质量的 $2\sim 3\ \mu\text{m}$ 中红外激光提供了新的解决方案。另外, 增益带宽、受激发射截面等光谱参数可进行调控的混晶型倍半氧化物陶瓷材料也为超短脉宽的中红外陶瓷激光器提供了新的增益介质。

除了从激光陶瓷材料的结构优化方面以及制备工艺入手, 寻找性能更佳的新型激光陶瓷材料亦是未来的研究方向, 譬如最近出现的 LuAG 激光陶瓷和 LuYAG 激光陶瓷^[107]。

综上所述, 陶瓷激光器总的发展方向可概括为寻求新型激光陶瓷材料以及对现有激光陶瓷材料的

进一步优化, 前者主要包括寻求性能更佳、可产生新波长和工作波长可调谐的新型激光陶瓷材料, 后者则着重于通过提升激光陶瓷材料的光学质量和优化激光陶瓷材料的结构来获得输出功率更高、光束质量更佳、脉冲宽度更窄、稳定性更好以及工作寿命更长的陶瓷激光器。“一代材料, 一代器件。”正是激光陶瓷材料和激光技术发展的不断相辅相成, 才推动着整个激光行业的不断进步。可以预见的是, 随着激光陶瓷新材料和新功能器件的不断涌现, 将会推动陶瓷激光技术的持续发展, 在此方向上获得更多的技术突破。

参 考 文 献

- [1] Maiman T H. Stimulated optical radiation in ruby [J]. *Nature*, 1960, 187(4736): 493-494.
- [2] Geusic J E, Marcos H M, van Uitert L G. Laser oscillations in nd-doped yttrium aluminum, yttrium gallium and gadolinium garnets[J]. *Applied Physics Letters*, 1964, 4(10): 182-184.
- [3] Hatch S E, Parsons W F, Weagley R J. Hot-pressed polycrystalline $\text{CaF}_2 : \text{Dy}^{2+}$ laser [J]. *Applied Physics Letters*, 1964, 5(8): 153-154.
- [4] Greskovich C, O' Clair C R, Curran M J. Preparation of transparent Y_2O_3 -doped ThO_2 [J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 1972, 55(6): 324-325.
- [5] Greskovich C, Chernoch J P. Polycrystalline ceramic lasers [J]. *Journal of Applied Physics*, 1973, 44(10): 4599-4606.
- [6] De G, van Dijk H J A. Translucent $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ ceramics[J]. *Materials Research Bulletin*, 1984, 19(12): 1669-1674.
- [7] Mulder C, Dewith G. Translucent $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ ceramics: Electron microscopy characterization[J]. *Solid State Ionics*, 1985, 16: 81-86.
- [8] Sekita M, Haneda H, Yanagitani T, et al. Induced emission cross section of $\text{Nd}:\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ ceramics[J]. *Journal of Applied Physics*, 1990, 67(1): 453-458.
- [9] Ikesue A, Kinoshita T, Kamata K, et al. Fabrication and optical properties of high-performance polycrystalline $\text{Nd}:\text{YAG}$ ceramics for solid-state lasers [J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 1995, 78(4): 1033-1040.
- [10] Mandl A, Klimek D E. Textron's J-HPSSL 100 kW ThinZag. laser program[C]// *Conference on Lasers and Electro-Optics 2010*, San Jose, California. Washington, D.C.: OSA, 2010.

- [11] Ikesue A, Kamata K, Yoshida K. Effects of neodymium concentration on optical characteristics of polycrystalline Nd:YAG laser materials [J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 1996, 79(7): 1921-1926.
- [12] Ikesue A, Yoshida K, Yamamoto T, et al. Optical scattering centers in polycrystalline Nd:YAG laser [J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2005, 80(6): 1517-1522.
- [13] Ikesue A, Yoshida K. Influence of prove volume on laser performance of Nd:YAG ceramics[J]. *Journal of Materials Science*, 1999, 34(6): 1189-1195.
- [14] Lu J, Prabhu M, Song J, et al. Optical properties and highly efficient laser oscillation of Nd:YAG ceramics[J]. *Applied Physics B: Lasers and Optics*, 2000, 71(4): 469-473.
- [15] Lu J, Song J, Prabhu M, et al. High-power Nd:Y₃Al₅O₁₂ ceramic laser [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2000, 39(10B): L1048-L1050.
- [16] Lu J R, Ueda K I, Yagi H, et al. Neodymium doped yttrium aluminum garnet (Y₃Al₅O₁₂) nanocrystalline ceramics: a new generation of solid state laser and optical materials [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2002, 341(1/2): 220-225.
- [17] Ren G G, Huang J J. Majorprogress of US 2005' high-energy laser technology [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2006, 43(6): 3-9.
任国光, 黄吉金. 美国高能激光技术 2005 年主要进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2006, 43(6): 3-9.
- [18] Yamamoto R M, Bhachu B S, Cutter K P, et al. The use of large transparent ceramics in a high powered, diode pumped solid state laser [C] // *Advanced Solid-State Photonics*, Nara. Washington, D.C.: OSA, 2008.
- [19] Sanghera J, Kim W, Villalobos G, et al. Ceramic laser materials[J]. *Materials*, 2012, 5(12): 258-277.
- [20] Wei P F, Gan H B, Yu Y, et al. End pumped Nd:YAG ceramics laser emitting at 1.83 μm[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2017, 29(4): 041005.
尉鹏飞, 甘海波, 俞叶, 等. 端面抽运 Nd:YAG 陶瓷 1.83 μm 激光[J]. *强激光与粒子束*, 2017, 29(4): 041005.
- [21] Strohmaier S G P, Eichler H J, Bisson J F, et al. Ceramic Nd:YAG laser at 946 nm [J]. *Laser Physics Letters*, 2005, 2(8): 383-386.
- [22] Zhang S S, Wang Q P, Zhang X Y, et al. Continuous-wave ceramic Nd:YAG laser at 1123 nm [J]. *Laser Physics Letters*, 2009, 6(12): 864-867.
- [23] Guo L, Lan R J, Liu H, et al. 1319 nm and 1338 nm dual-wavelength operation of LD end-pumped Nd:YAG ceramic laser [J]. *Optics Express*, 2010, 18(9): 9098-9106.
- [24] Chen L J, Wang Z P, Liu H, et al. Continuous-wave tri-wavelength operation at 1064, 1319 and 1338 nm of LD end-pumped Nd:YAG ceramic laser [J]. *Optics Express*, 2010, 18(21): 22167-22173.
- [25] Zhu H Y, Duan Y M, Xu C W, et al. Continuous-wave and Q-switched neodymium-doped yttrium aluminum garnet ceramic laser at 1356 nm single wavelength [J]. *Applied Physics Express*, 2013, 6(2): 022705.
- [26] Feng C, Liu Z J, Cong Z H, et al. Eye-safe picosecond solid-state Nd:YAG ceramic laser at 1.44 μm [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2018, 24(5): 1-4.
- [27] Feng C, Zhang H N, Fang J X, et al. Passively Q-switched Nd:YAG ceramic laser with V³⁺:YAG saturable absorber at 1357 nm [J]. *Applied Optics*, 2015, 54(33): 9902-9905.
- [28] Guo J L, Zhang H N, Li P. Graphene Q-switched eye-safe Nd:Y₃Al₅O₁₂ ceramic dual-wavelength laser [J]. *Applied Optics*, 2015, 54(22): 6694-6697.
- [29] Yan R P, Yu X, Ma Y F, et al. High-repetition-rate, high-peak-power passively Q-switched ceramic Nd:YAG 946 nm laser [C] // *Advanced Solid State Lasers*, Berlin. Washington, D.C.: OSA, 2015.
- [30] Feng C, Zhang H N, Wang Q P, et al. 1357 nm passively Q-switched crystalline ceramic laser based on multilayer graphene [J]. *Laser Physics*, 2016, 26(5): 055802.
- [31] Li P, Guo J L, Zheng Y, et al. Continuous wave (CW) and passively Q-switched performance of a diode-pumped Nd:YAG ceramic laser at 1112 nm [J]. *Lasers in Engineering*, 2016, 33: 339-348.
- [32] Bai J X, Li P, Chen X H, et al. Diode-pumped passively Q-switched Nd:YAG ceramic laser with a gold nanotriangles saturable absorber at 1 μm [J]. *Applied Physics Express*, 2017, 10(8): 082701.
- [33] Wu Y J, Zhang C, Liu J J, et al. Silver nanorods absorbers for Q-switched Nd:YAG ceramic laser [J]. *Optics & Laser Technology*, 2017, 97: 268-271.
- [34] Peng Z F, Ma Y F, Yan R P, et al. Doubly Q-

- switched Nd:YAG ceramic laser [J]. Journal of Russian Laser Research, 2018, 39(2): 187-191.
- [35] Saiki T, Hirota N, Kanemori S, et al. Q-switched and mode-locked Nd/Cr: YAG ceramic pulse laser [J]. International Journal of Optics, 2020, 2020: 1-7.
- [36] Ikesue A, Aung Y L. Synthesis and performance of advanced ceramic lasers[J]. Journal of the American Ceramic Society, 2006, 89(6): 1936-1944.
- [37] Li J, Wu Y S, Pan Y B, et al. Laminar-structured YAG/Nd:YAG/YAG transparent ceramics for solid - state lasers [J]. International Journal of Applied Ceramic Technology, 2008, 5(4): 360-364.
- [38] Liu W B, Zeng Y P, Li J, et al. Sintering and laser behavior of composite YAG/Nd:YAG/YAG transparent ceramics [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2012, 527: 66-70.
- [39] Tang F, Cao Y G, Huang J Q, et al. Multilayer YAG/Re:YAG/YAG laser ceramic prepared by tape casting and vacuum sintering method[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2012, 32(16): 3995-4002.
- [40] Ikesue A, Aung Y L. Ceramic laser materials [J]. Nature Photonics, 2008, 2(12): 721-727.
- [41] Ge L, Li J, Zhou Z W, et al. Fabrication of composite YAG/Nd:YAG/YAG transparent ceramics for planar waveguide laser [J]. Optical Materials Express, 2014, 4(5): 1042-1049.
- [42] Liu J, Ge L, Feng L W, et al. Diode-pumped composite ceramic Nd:YAG planar waveguide amplifier with 327 mJ output at 100 Hz repetition rate [J]. Chinese Optics Letters, 2016, 14(5): 051404.
- [43] Ma Y F, He Y, Li X D, et al. Continuous-wave and passively Q-switched tape casting YAG/Nd:YAG/YAG ceramic laser [J]. Optical Materials Express, 2016, 6(9): 2966-2974.
- [44] Li M, Hu H, Gao Q S, et al. A 7.08-kW YAG/Nd:YAG/YAG composite ceramic slab laser with dual concentration doping [J]. IEEE Photonics Journal, 2017, 9(4): 1-10.
- [45] Li M, Hu H, Gao Q S, et al. Dual concentration doped Nd:YAG composite ceramic slab laser with high power [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(5): 0514003.
- 李密, 胡浩, 高清松, 等. 高功率双浓度掺杂的 Nd:YAG 复合陶瓷板条激光器 [J]. 光学学报, 2017, 37(5): 0514003.
- [46] Takaichi K, Yagi H, Lu J, et al. Yb³⁺-doped Y₃Al₅O₁₂ ceramics-A new solid-state laser material [J]. Physica Status Solidi (a), 2003, 200(1): R5-R7.
- [47] Tsunekane M, Dascalu T, Taira T. High-power operation of diode edge-pumped, microchip Yb:YAG laser composed with YAG ceramic pump wave-guide [C] // Advanced Solid-State Photonics, February. 6-9, 2005, Vienna, Austria: Optical Society of America, 2005: 603-607.
- [48] Tsunekane M, Taira T. 300 W continuous-wave operation of a diode edge-pumped, hybrid composite Yb:YAG microchip laser [J]. Optics Letters, 2006, 31(13): 2003-2005.
- [49] Dong J, Shirakawa A, Ueda K I, et al. Efficient Yb³⁺:Y₃Al₅O₁₂ ceramic microchip lasers [J]. Applied Physics Letters, 2006, 89(9): 091114.
- [50] Tsunekane M, Taira T. High-power operation of diode edge-pumped, composite all-ceramic Yb:Y₃Al₅O₁₂ microchip laser [J]. Applied Physics Letters, 2007, 90(12): 121101.
- [51] Dong J, Shirakawa A, Ueda K I, et al. Laser-diode pumped heavy-doped Yb:YAG ceramic lasers [J]. Optics Letters, 2007, 32(13): 1890-1892.
- [52] Nakamura S, Matsubara Y, Ogawa T, et al. High-power and highly efficient Yb³⁺-doped Y₃Al₅O₁₂ ceramic laser at room temperature [C] // 2007 Conference on Lasers and Electro-Optics - Pacific Rim, August 26-31, 2007. Seoul, South Korea. IEEE, 2007: 1-2.
- [53] Nakamura S, Yoshioka H, Matsubara Y, et al. Efficient tunable Yb:YAG ceramic laser [J]. Optics Communications, 2008, 281(17): 4411-4414.
- [54] Hao Q, Li W X, Pan H F, et al. Laser-diode pumped 40-W Yb:YAG ceramic laser [J]. Optics Express, 2009, 17(20): 17734-17738.
- [55] Latham W P, Lobad A, Newell T C, et al. 6.5 kW, Yb:YAG ceramic thin disk laser [C] // International Symposium On High Power Laser Ablation, Apr. 18-22, 2010, Santa Fe, New Mexico, USA: American Institute of Physics, 2010, 1278: 758-764.
- [56] Ikesue A, Aung Y L. Synthesis of Yb:YAG ceramics without sintering additives and their performance [J]. Journal of the American Ceramic Society, 2017, 100(1): 26-30.
- [57] Furuse H, Kawanaka J, Takeshita K, et al. Total-

- reflection active-mirror laser with cryogenic Yb : YAG ceramics[J]. *Optics Letters*, 2009, 34(21): 3439-3441.
- [58] Furuse H, Kawanaka J, Miyanaga N, et al. Zig-zag active-mirror laser with cryogenic Yb³⁺:YAG/YAG composite ceramics[J]. *Optics Express*, 2011, 19(3): 2448-2455.
- [59] Furuse H, Kawanaka J, Miyanaga N, et al. Output characteristics of high power cryogenic Yb : YAG TRAM laser oscillator[J]. *Optics Express*, 2012, 20(19): 21739-21748.
- [60] Meng S, Chen Z Z, Bo Y, et al. 6.2 kW quasi-continuous-wave diode-pumped Yb : YAG ceramic slab laser[J]. *Laser Physics*, 2020, 30(1): 015802.
- [61] Jiang N, Lin W P, Zhao Y, et al. Fabrication and kW-level MOPA laser output of planar waveguide YAG/Yb: YAG/YAG ceramic slab[J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2019, 102(4): 1758-1767.
- [62] Lin W P, Jiang N, Zhou T J, et al. 1030 nm laser amplification of Yb:YAG ceramic planar waveguide[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(5): 0501002.
林伟平, 姜楠, 周唐建, 等. Yb:YAG 陶瓷平面波导1030 nm 激光放大[J]. *中国激光*, 2019, 46(5): 0501002.
- [63] Lin W P, Zhang L, Wang J T, et al. Amplification properties of 1319 nm Nd:YAG planar waveguide[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(1): 011404.
林伟平, 张雷, 王君涛, 等. Nd:YAG 平面波导1319 nm 激光放大研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(1): 011404.
- [64] Dong J, Shirakawa A, Takaichi K, et al. All-ceramic passively Q-switched Yb: YAG/Cr⁴⁺:YAG microchip laser[J]. *Electronics Letters*, 2006, 42(20): 1154-1155.
- [65] Dong J, Shirakawa A, Ueda K I, et al. Ytterbium and chromium doped composite Y₃Al₅O₁₂ ceramics self-Q-switched laser[J]. *Applied Physics Letters*, 2007, 90(19): 191106.
- [66] Dong J, Ueda K I, Shirakawa A, et al. Composite Yb : YAG/Cr⁴⁺ : YAG ceramics picosecond microchip lasers [J]. *Optics Express*, 2007, 15(22): 14516-14523.
- [67] Cheng Y, Ma J, Dong J. Enhancement of Cr, Yb: YAG self-Q-switched microchip laser by bonding Yb:YAG ceramic[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(1): 0102006.
程莹, 马剑, 董俊. Yb:YAG 陶瓷强化 Cr, Yb:YAG 自调 Q 微片激光器性能研究[J]. *中国激光*, 2013, 40(1): 0102006.
- [68] Wang C, Li W X, Bai D B, et al. Mode-locked composite YAG/Yb:YAG ceramic laser and high-power amplification [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, 28(4): 433-436.
- [69] Mužik J, Jelínek M, Jambunathan V, et al. Cryogenically-cooled Yb : YAG ceramic mode-locked laser [J]. *Optics Express*, 2016, 24(2): 1402-1408.
- [70] Gao Z Y, Zhu J F, Wang K, et al. Diode-pumped Kerr-lens mode-locked femtosecond Yb : YAG ceramic laser[J]. *Chinese Physics B*, 2016, 25(2): 024205.
高子叶, 朱江峰, 汪珂, 等. 二极管泵浦克尔锁模飞秒 Yb:YAG 陶瓷激光器[J]. *中国物理 B*, 2016, 25(2): 024205.
- [71] Liu Y, Wang C, Luo D P, et al. Generation of 70 fs broadband pulses in a hybrid nonlinear amplification system with mode-locked Yb : YAG ceramic oscillator[J]. *Journal of Optics*, 2017, 19(12): 125501.
- [72] Yang C, Gu C L, Liu Y, et al. Dual repetition rate mode-locked Yb : YAG ceramic laser [J]. *Acta Physica Sinica*, 2018, 67(9): 094206.
杨超, 顾澄琳, 刘洋, 等. 双重复频率锁模 Yb:YAG 陶瓷激光器[J]. *物理学报*, 2018, 67(9): 094206.
- [73] Li J, Zhou J, Pan Y B, et al. Solid-state reactive sintering and optical characteristics of transparent Er:YAG laser ceramics[J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2012, 95(3): 1029-1032.
- [74] Gluth A, Wang Y C, Petrov V, et al. GaSb-based SESAM mode-locked Tm : YAG ceramic laser at 2 μm[J]. *Optics Express*, 2015, 23(2): 1361-1369.
- [75] Lan R, Loiko P, Mateos X, et al. Passive Q-switching of microchip lasers based on Ho: YAG ceramics[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(18): 4877-4887.
- [76] Wang S, Shi Y, Li S H, et al. Diode-pumped single-frequency Er:YAG ceramic laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(9): 0914003.
王硕, 史阳, 李尚桦, 等. 半导体抽运的 Er:YAG 陶瓷单频脉冲激光器[J]. *光学学报*, 2018, 38(9): 0914003.

- [77] Wu J, Ju L, Yao B Q, et al. Tunable single-longitudinal-mode operation of a sandwich-type YAG/Ho:YAG/YAG ceramic laser [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2016, 78: 40-44.
- [78] Yao B Q, Li X L, Dai T Y, et al. Diode-pumped tape casting planar waveguide YAG/Tm:YAG/YAG ceramic laser at 2013. 76 nm [J]. *Optics letters*, 2016, 41(2): 254-256.
- [79] Lu J, Bisson J F, Takaichi K, et al. Yb³⁺:Sc₂O₃ ceramic laser[J]. *Applied Physics Letters*, 2003, 83(6): 1101-1103.
- [80] Kong J, Lu J, Takaichi K, et al. Diode-pumped Yb:Y₂O₃ ceramic laser [J]. *Applied Physics Letters*, 2003, 82(16): 2556-2558.
- [81] Takaichi K, Yagi H, Lu J R, et al. Highly efficient continuous-wave operation at 1030 and 1075 nm wavelengths of LD-pumped Yb³⁺:Y₂O₃ ceramic lasers[J]. *Applied Physics Letters*, 2004, 84(3): 317-319.
- [82] Takaichi K, Yagi H, Shirakawa A, et al. Lu₂O₃:Yb³⁺ ceramics-a novel gain material for high-power solid-state lasers [J]. *Physica Status Solidi (a)*, 2005, 202(1): R1-R3.
- [83] Kong J, Tang D Y, Zhao B, et al. 9.2-W diode-end-pumped Yb:Y₂O₃ ceramic laser [J]. *Applied Physics Letters*, 2005, 86(16): 161116.
- [84] Kong J, Tang D Y, Chan C C, et al. High-efficiency 1040 and 1078 nm laser emission of a Yb:Y₂O₃ ceramic laser with 976 nm diode pumping[J]. *Optics Letters*, 2007, 32(3): 247-249.
- [85] Casagrande O, Deguil-Robin N, Le Garrec B, et al. Cryogenically cooled ytterbium doped sesquioxide ceramic lasers [C] // LEOS 2006-19th Annual Meeting of the IEEE Lasers and Electro-Optics Society, October 29-November 2, 2006. IEEE, 2006: 739-740.
- [86] Merkle L D, Newburgh G A, Ter-Gabrielyan N, et al. Temperature-dependent lasing and spectroscopy of Yb:Y₂O₃ and Yb:Sc₂O₃ [J]. *Optics Communications*, 2008, 281(23): 5855-5861.
- [87] Nakao H, Inagaki T, Shirakawa A, et al. Yb³⁺ doped ceramic thin-disk lasers of Lu-based oxides [J]. *Optical Materials Express*, 2014, 4(10): 2116-2121.
- [88] Kitajima S, Nakao H, Shirakawa A, et al. CW performance and temperature observation of Yb:Lu₂O₃ ceramic thin-disk laser[C] // *Advanced Solid State Lasers*, January, October. 1-5, 2017, Nagoya, Aichi, Japan: Optical Society of America, 2017, JM5A.32.
- [89] Shirakawa A, Takaichi K, Yagi H, et al. Diode-pumped mode-locked Yb³⁺:Y₂O₃ ceramic laser[J]. *Optics Express*, 2003, 11(22): 2911-2916.
- [90] Shirakawa A, Takaichi K, Yagi H, et al. First mode-locked ceramic laser: femtosecond Yb³⁺:Y₂O₃ ceramic laser [J]. *Laser Physics*, 2004, 14(11): 1375-1381.
- [91] Tokurakawa M, Takaichi K, Shirakawa A, et al. Diode-pumped mode-locked Yb³⁺:Lu₂O₃ ceramic laser[J]. *Optics Express*, 2006, 14(26): 12832-12838.
- [92] Tokurakawa M, Takaichi K, Shirakawa A, et al. Diode-pumped 188 fs mode-locked Yb³⁺:Y₂O₃ ceramic laser[J]. *Applied Physics Letters*, 2007, 90(7): 071101.
- [93] Tokurakawa M, Shirakawa A, Ueda K I, et al. Continuous wave and mode-locked Yb³⁺:Y₂O₃ ceramic thin disk laser[J]. *Optics Express*, 2012, 20(10): 10847-10853.
- [94] Tokurakawa M, Shirakawa A, Ueda K I, et al. Diode-pumped 65 fs Kerr-lens mode-locked Yb³⁺:Lu₂O₃ and nondoped Y₂O₃ combined ceramic laser [J]. *Optics Letters*, 2008, 33(12): 1380-1382.
- [95] Xie G Q, Tang D Y, Zhao L M, et al. High-power self-mode-locked Yb:Y₂O₃ ceramic laser[J]. *Optics Letters*, 2007, 32(18): 2741-2743.
- [96] Lagatsky A A, Antipov O L, Sibbett W. Broadly tunable femtosecond Tm:Lu₂O₃ ceramic laser operating around 2070 nm [J]. *Optics Express*, 2012, 20(17): 19349-19354.
- [97] Paradis C, Modsching N, Wittwer V J, et al. Generation of 35-fs pulses from a Kerr lens mode-locked Yb:Lu₂O₃ thin-disk laser [J]. *Optics Express*, 2017, 25(13): 14918-14925.
- [98] Kitajima S, Shirakawa A, Yagi H, et al. Sub-100 fs pulse generation from a Kerr-lens mode-locked Yb:Lu₂O₃ ceramic thin-disk laser[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(21): 5451-5454.
- [99] Ryabochkina P A, Chabushkin A N, Kopylov Y L, et al. Two-micron lasing on diode-pumped Y₂O₃:Tm ceramics[J]. *Quantum Electronics*, 2016, 46(7): 597-600.
- [100] Antipov O, Novikov A, Larin S, et al. Highly efficient 2 μm CW and Q-switched Tm³⁺:Lu₂O₃ ceramics lasers in-band pumped by a Raman-shifted

- erbium fiber laser at 1670 nm[J]. Optics Letters, 2016, 41(10): 2298-2301.
- [101] Wang H, Huang H T, Liu P, et al. Diode-pumped continuous-wave and Q-switched Tm:Y₂O₃ ceramic laser around 2050 nm [J]. Optical Materials Express, 2017, 7(2): 296-303.
- [102] Xu X D, Hu Z W, Li D Z, et al. First laser oscillation of diode-pumped Tm³⁺-doped LuScO₃ mixed sesquioxide ceramic [J]. Optics Express, 2017, 25(13): 15322-15329.
- [103] Wang Y C, Jing W, Loiko P, et al. Sub-10 optical-cycle passively mode-locked Tm:(Lu_{2/3}Sc_{1/3})₂O₃ ceramic laser at 2 μm[J]. Optics Express, 2018, 26(8): 10299-10304.
- [104] Wang L, Huang H T, Shen D Y, et al. Diode-pumped high power 2.7 μm Er:Y₂O₃ ceramic laser at room temperature[J]. Optical Materials, 2017, 71: 70-73.
- [105] Uehara H, Yasuhara R, Tokita S, et al. Efficient continuous wave and quasi-continuous wave operation of a 2.8 μm Er:Lu₂O₃ ceramic laser[J]. Optics Express, 2017, 25(16): 18677-18684.
- [106] Ikesue A, Aung Y L, Yoda T, et al. Fabrication and laser performance of polycrystal and single crystal Nd:YAG by advanced ceramic processing [J]. Optical Materials, 2007, 29(10): 1289-1294.
- [107] Pirri A, Toci G, Li J, et al. Spectroscopic and laser characterization of Yb_{0.15}:(Lu_xY_{1-x})₃Al₅O₁₂ ceramics with different Lu/Y balance [J]. Optics Express, 2016, 24(16): 17832-17842.