

LD 泵浦 Yb : YAG 固体激光器研究进展

王斯琦, 李永亮, 李仕明, 白冲冲, 王渊博, 雷 雨

(长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022)

摘 要: Yb³⁺ 离子掺杂 YAG 晶体(Yb : YAG)作为一种性能优良的激光晶体已广泛应用于高效、高功率激光领域,在光纤温度传感器、激光切割钻孔以及军用领域都具有重要的应用价值。本文分析了 Yb : YAG 作为激光增益介质的优势,对近年来国内外激光二极管泵浦 Yb : YAG 激光器的研究进展进行了总结,分别介绍了 Yb : YAG 透明陶瓷激光器、掺镜光纤激光器,可调谐 Yb : YAG 激光器、Yb : YAG 薄片激光器以及双波长 Yb : YAG 激光器的最新研究情况,并对其发展前景进行了展望。

关键词: 固体激光器; Yb : YAG 晶体; 激光二极管

中图分类号: TN253 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2018.01.001

Research progress of LD pumped Yb : YAG solid-state laser

WANG Si-qi, LI Yong-liang, LI Shi-ming, BAI Chong-chong, WANG Yuan-bo, LEI Yu

(The School of Electronic Optical Engineering, Changchun University of Science
and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: Yb³⁺ doped YAG crystals(Yb : YAG), as an excellent laser crystal, have been widely used in high efficiency and high power laser fields, and it has important application value in optical fiber temperature sensor, laser cutting, drilling and military field. The advantages of Yb : YAG as laser gain media are analyzed. The research progress of laser diode pumped Yb : YAG lasers at home and abroad in recent years is summarized. The latest research on Yb : YAG transparent ceramic laser, Yb³⁺-doped fiber laser, tunable Yb : YAG laser, Yb : YAG thin-disk laser and Yb : YAG dual-wavelength laser is also introduced, and its development prospect is forecasted.

Key words: solid-state laser; Yb : YAG crystals; LD

1 引 言

自 1960 年世界上第一台红宝石激光器问世,科学工作者不断深入探索固体激光器理论,激光器技术已获得了突飞猛进的发展。泵浦源作为固体激光器的重要组成部分,它的选择直接影响着激光器的输出功率、输出波长以及输出功率稳定性。经过半个多世纪的发展,一些效率不高的泵浦源已被逐渐淘汰,时至今日仍备受人们青睐的只剩闪光灯泵浦、

连续弧光灯泵浦和激光二极管泵浦。而与前者相比,激光二极管作为泵浦源展现出了极大的优势。采用激光二极管泵浦的固体激光器,以其自身的优越性能,已被大量应用于军事和民用中,包括工业生产、武器装备、精密测量、通信与信息处理等方面,并且在相应的领域里实现了突破性变革。

1965 年,美国贝尔实验室的 L. F. Johnson 在 77 K 低温条件下使用闪光灯泵浦,首次实现了

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 61675035);吉林省科技厅重点科技攻关项目(No. 20160204012GX)资助。

作者简介: 王斯琦(1992-),女,硕士研究生,主要从事固体激光器方面的研究。E-mail: 848579566@qq.com

通讯作者: 李永亮(1973-),男,硕士生导师,教授,主要从事激光器与激光医疗方面的研究。E-mail: liyongliang@cust.edu.cn

收稿日期: 2017-05-22; **修订日期:** 2017-06-29

Yb:YAG的激光运转^[1]。但由于Yb³⁺吸收带与闪光灯的光谱匹配差,导致获得的激光效率很低,当时并未引起对Yb:YAG晶体的重视。1971年,Reinberg等人采用GaAs:Si发光二极管作为泵浦源,获得了峰值功率为0.7 W的1029 nm脉冲激光输出^[2],这表明Yb:YAG晶体的激光性能与泵浦条件有关。20世纪八十年代末九十年代初,InGaAs激光二极管(LD)出现并迅速发展,大功率LD阵列被视为稳定的泵浦源,而掺Yb³⁺晶体材料也因其优良的激光性质而重新返回到人们的视野中。Yb³⁺离子能级结构简单(2F_{7/2}-2F_{5/2}),量子效率高,荧光寿命长,适合于LD泵浦。在掺Yb³⁺激光材料中,Yb:YAG晶体相对热承载小,并且具有较高的晶场分裂能和较宽的吸收带,因此成为LD泵浦固体激光器增益介质的主要研究方向之一。目前激光二极管泵浦Yb:YAG晶体已经实现千瓦量级的连续激光输出,其YAG基质具有优秀的热力学、光学、化学稳定性,适合用于LD泵浦下的高功率激光输出。Yb:YAG晶体在激光切割、钻孔、光纤温度传感器以及军用领域都具有重要的应用价值,代表着新型激光材料的发展趋势。

本文分析了Yb:YAG作为激光晶体材料的优势,对近年来国内外Yb:YAG全固态激光器的研究进展进行了总结,分别介绍了Yb:YAG透明陶瓷激光器、掺镱光纤激光器,可调谐Yb:YAG激光器、Yb:YAG薄片激光器以及双波长Yb:YAG激光器的最新研究情况,并对其发展前景进行了展望。

2 Yb:YAG激光晶体材料的优势

Yb:YAG的主要优点之一是吸收和发射峰较为靠近。当941 nm泵浦Yb:YAG激光器时的1029 nm输出产生的相对热生成的计算值<11%,这已被激光量热法实验证明^[3],并且证实横向驰豫和激发态吸收的存在。

从激光性能和可靠性方面来说,吸收带宽和荧光寿命长是Yb:YAG具有的明显优势。Yb:YAG对泵浦二极管波长的温度调控要求不很严格,使成本减少,另外,1 ms的荧光寿命使CW二极管与Yb:YAG一起使用时在一个较宽的脉冲重复频率(PRF)范围内的荧光损耗较少。

从光谱学特性来看,Yb:YAG的上能级在基态上约612 cm⁻¹(室温下约3 kT),由此可以得出结论:一小部分泵浦功率的消耗用于漂白较低能级上的集居数和未经泵浦的部分对该激光波长的吸收。Yb:YAG也有一个较小的发射截面(及较高的饱和

强度),需要较高的泵浦强度以达到一个给定的增益。简言之,Yb:YAG晶体最适合应用于高功率、连续或高脉冲重复频率(PRF)激光。

从上述这些优点可以看出,Yb:YAG晶体是一种适用于LD泵浦的高效、高功率固体激光介质。但同时Yb:YAG也有增益小,泵浦阈值高,受温度影响较大,需要高效率致冷等缺点。其中最主要的缺点就是对泵浦功率密度要求较高,不过采用高功率InGaAs激光二极管作为泵浦源可以很容易克服这个问题。此外虽然还有其他掺镱的系统,如Yb:LiYF₄,Yb:YAlO₃等,但Yb:YAG发展前景最为广阔,因为它适应LD泵浦的带宽,受激辐射截面较大,热传导性质较好,并容易生长出优质晶体。

3 Yb:YAG全固态激光器

3.1 Yb:YAG透明陶瓷激光器

近年来,透明光学陶瓷材料的制备工艺不断取得突破,激光陶瓷作为一种新型激光增益介质材料得到了快速发展。Yb:YAG激光陶瓷制造工艺简单、成本低廉、可以实现多层或多功能陶瓷结构,而且陶瓷的吸收与发射光谱、荧光寿命、热导率等参数都与单晶相似。因此高质量的Yb:YAG陶瓷在未来将是Yb:YAG单晶材料强有力的竞争者。

2003年,K.Takaichi等首次报道了LD泵浦的Yb:YAG陶瓷激光器^[4]。采用2.4 W功率泵浦掺杂浓度为1 at. % ,厚度为1.6 mm的Yb:YAG陶瓷,获得了345 mW的1039 nm激光输出。2006年,日本的JunDong等报道了采用Cr:YAG陶瓷被动调Q的Yb:YAG陶瓷激光器,获得了峰值功率82 kW,脉冲宽度380 ps的1030 nm激光^[5]。2007年,上海硅酸盐研究所的吴玉松等人在国内首次实现Yb:YAG陶瓷的制备,并在泵浦功率7 W条件下得到了268 mW的1030 nm激光^[6]。同年,上海光机所的许毅等人利用国产Yb:YAG激光陶瓷,在泵浦功率为9 W时,获得了1.63 W 1030 nm激光^[7]。2013年,程莹等人报道了通过键合Yb:YAG激光陶瓷来强化Cr,Yb:YAG自调Q薄片激光器光学性能的研究结果^[8]。在抽运功率为7.1 W条件下获得了0.53 W的自调Q激光输出,光光转换效率为7.5%。在实验中获得了脉冲宽度小于3 ns、脉冲能量高于25 μJ、峰值功率9 kW的自调Q脉冲输出。2015年,汪珂,朱江峰等人实验研究了LD抽运国产Yb:YAG陶瓷的高效率连续激光输出与波长调谐输出特性^[9]。比较了不同掺杂原子数分数(1%、2%、5%、10%、15%)和不同厚度(3 mm、

6 mm)的激光陶瓷的输出激光性质。充分证明了高质量国产 Yb:YAG 陶瓷在高功率激光输出方面的光明前景,同时验证了利用锁模技术获得超短激光脉冲的可行性。2016 年,于洋,朱江峰实现了激光二极管抽运国产 Yb:YAG 陶瓷高功率被动调 Q 激光器^[10]。实验装置如图 1 所示,使用半导体可饱和吸收镜作为调 Q 元件,在 6.3 W 的吸收抽运功率下得到了被动调 Q 激光脉冲,输出调 Q 激光脉冲的最大平均输出功率为 1.24 W。

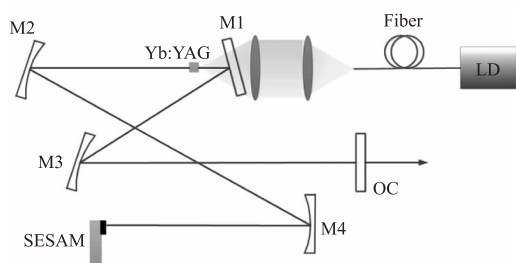


图 1 二极管抽运国产 Yb:YAG 陶瓷被动调 Q 激光器实验装置图

Fig. 1 Experimental schematic of the diode-pumped domestic Yb:YAG ceramic passively Q-switched laser

3.2 掺镱光纤激光器

光纤激光器是指使用光纤作为增益介质的激光器。通过在光纤基质材料中掺杂不同跃迁能级的稀土离子,如钕(Nd),铒(Er),镱(Yb),铥(Tm)等来实现不同波段的激光输出。由于镱离子(Yb^{3+})在石英玻璃基质中溶解度高,其本身能级结构简单,吸收以及发射带较宽,使得掺 Yb^{3+} 光纤激光器相比于其他掺稀土离子光纤激光器更有优势,更易实现高效率、高功率的激光输出。有关文献表明,近 20 年来光纤激光器的输出高功率纪录均由掺镱光纤激光器所创造。目前,掺 Yb^{3+} 光纤激光器的最高输出功率比其他掺稀土离子激光器输出功率高 1~2 个量级^[11]。

掺稀土离子光纤激光器通常采用激光二极管作为泵浦源。光纤激光器和激光二极管几乎在同一时间出现,但由于低亮度的半导体激光难以与直径仅几微米的光纤纤芯耦合,光纤激光器在很长一段时间的激光输出效率很低。1988 年, E. Snitzer 等人提出了一种基于双包层光纤的泵浦技术,这打破了光纤激光器低输出功率的局面^[12],这种新的泵浦技术使光纤激光器输出功率由毫瓦级迅速提升到瓦量级。1994 年, H. M. Pask 等首次将包层泵浦技术用于掺镱光纤中,得到了斜率效率为 80%, 功率为 0.5 W 的 1040 nm 激光输出。1997 年, Muendel 等人利用 916 nm 激光二极管泵浦双包层掺镱光纤获

得 1100 nm 激光,输出功率 35.5 W,激光器效率达 64%。1999 年, Dominic 等人设计了一种双端泵浦方案,成功实现了 110 W 连续单模激光输出,这是光纤激光器输出功率首次突破百瓦量级,引起了研究者的广泛关注。但由于当时光纤和激光二极管制造工艺不够成熟,在此后几年中掺镱光纤激光的输出功率并未取得大的突破。

随着双包层光纤制造工艺的逐渐成熟和 900 nm 波段高功率激光二极管的发展,掺 Yb^{3+} 光纤激光器的输出功率也获得了进一步提升。2004 年英国南安普敦大学的 Jeong 等人报道了世界上首个千瓦量级光纤激光输出^[13]。他们利用 975 nm 激光二极管双端泵浦纤芯直径为 43 μm 的双包层掺镱光纤,产生了功率为 1.01 kW 的 1090 nm 激光输出。同年, Jeong 等采用图 2 所示结构,对激光器参数进行了优化并增加泵浦光功率,使激光器的输出功率提高到了 1.36 kW^[14],输出激光的光束质量得到了明显改善。在之后的十年间,光纤激光器的输出功率开始飞速提升^[15-17]。目前英国的 SPI 公司,美国的 IPG 公司,芬兰的 CoreLase 公司等都开发出了千瓦级光纤激光器产品^[18-19]。IPG 公司于 2009 年研制出单模光纤激光器输出功率为 10 kW^[20],在 2013 年推出的光纤激光器输出功率高达 20 kW^[21],这是迄今为止单模光纤激光器的最高功率。

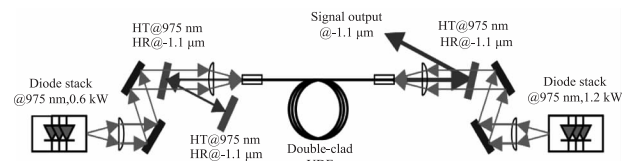


图 2 激光二极管双端泵浦 YDFL 实验装置

HR:高反射率 HT:高透光

Fig. 2 YDFL experimental arrangement with two diode-stack pump sources

HR:high reflectivity, HT:high transmission

3.3 可调谐 Yb:YAG 激光器

随着通信的日趋频繁,通信设备供应商开始渴望快速灵活的新一代通信网络,而可调谐激光器输出功率灵活、可靠性高、噪声低,恰好能满足这种需求,这也为激光器的发展指明了一个方向。

由于 Yb:YAG 在 910~1100 nm 几乎都有发射谱线存在,荧光带宽较宽,因此 Yb:YAG 较为适合进行可调谐运转。1995 年, T. Y. Fan 等采用三个 InGaAs LD 泵浦 Yb:YAG 晶体,在泵浦功率为 3 W 时,获得了 1.05 W 调谐范围 1028.98~1031.74 nm 的可调谐激光^[22]。同年,来自德国斯图加特大学的

U. Brauch 等人在激光器谐振腔内插入双折射滤光器,得到调谐范围为 1018 ~ 1053 nm 的激光^[23]。2000 年日本的 JiroSaikawa 等人通过对双折射滤光片的调节,实现了从 1024.1 ~ 1108.6 nm 的 Yb : YAG 激光输出,他们还将 LBO 晶体插入谐振腔内,获得了 515.3 ~ 537.7 nm 的可调谐绿光^[24]。2001 年,天津大学的张丽哲等人采用两个激光二极管双端泵浦 Yb : YAG 晶体,获得了调谐范围在 1030.5 ~ 1055.5 nm 的激光^[25]。2005 年,日本的 R. Bhandari 等人报道了调谐范围为 14 nm 的声光调 Q 激光和调谐范围为 51 nm 的连续激光^[26]。2008 年,日本的 ShinkiNakamura 等采用 Yb : YAG 陶瓷获得了从 1020.1 ~ 1083.6 nm 的激光^[27],实验装置如图 3 所示,这是首次实现 Yb : YAG 陶瓷的可调谐输出。

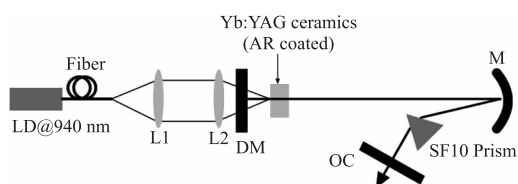


图 3 可调谐 Yb : YAG 陶瓷激光器的实验设置

LD - 光纤耦合二极管激光器;L1,L2 - 聚焦透镜;DM - 平面二向色镜;

M - 凹面镜 (ROC = 250 mm);OC - 输出耦合器

Fig. 3 Experimental setup for tunable Yb : YAG ceramic laser

LD - fiber-coupled diode laser;L1,L2 - focusing lenses;

DM - flat dichroic mirror;M - a concave mirror

(ROC = 250 mm);OC - output coupler

3.4 Yb : YAG 薄片激光器

薄片激光器,顾名思义,其增益介质的厚度非常的薄,激光晶体的厚度一般都在几百个微米左右,并且薄片激光器的谐振腔长度都非常短,由于薄片激光器晶体薄、腔长短,就使得腔内两个纵模的频率间隔增大,进而超过增益带宽,即在荧光谱线的宽度内只存在一个纵模,因而容易获得单纵模激光振荡。LD 抽运的薄片激光器具有体积小、重量轻、结构简单、光学系统集成化等优点,便于实现高效率运转,在材料微加工行业倍受青睐,LD 泵浦的薄片激光器单频性好,被广泛应用于光信息的储存、全息等领域。近年来,薄片激光器在军事领域也逐渐崭露头角,利用激光进行测距、制导等技术已经广泛应用。

1994 年,德国 Giesen 等人首次利用 Yb : YAG 晶体作为激光增益介质,设计了具有多通泵浦结构的二极管泵浦的 Yb : YAG 薄片激光器。此后,对 Yb : YAG 薄片激光器的研究发展迅速。2000 年,C. Stewen 等人利用 Yb : YAG 薄片激光器实现了功

率为 647 W 的连续激光,并在此基础上升级实验,利用四个薄片 Yb : YAG 获得了 1070 W 的功率输出^[28]。2003 年,瑞士联邦理工学院实现了利用 SESAM 进行锁模,采用图 4 所示实验装置获得了光束质量几乎接近衍射极限的脉冲宽度为 810 fs,输出激光功率 60 W,峰值功率高至 1.9 MW 的脉冲输出^[29]。2004 年,德国 Trumpf Laser 公司采用在一个谐振腔里放多个薄片的方式,即通过定标放大来提高激光的输出功率,实现了 9 kW 的连续激光输出。2006 年,瑞士联邦理工学院在前面工作的基础上仍采用 Yb : YAG 薄片增益介质得到了脉宽 800 fs,峰值功率高达 5.6 MW 的 1030 nm 激光^[30]。2010 年,Trumpf Laser 技术公司的薄片激光器可以产生的最大功率为 16 kW,发散角在 8mrad 之内,激光器功率稳定性大于 99%,足以满足工业需求。2011 年,中国工程物理研究所的王春华等采用 16 通泵浦系统获得 27 W 的连续激光,光 - 光转换效率为 38.8%^[31]。同年,德国 Quantenoptik 研究所实现了一台功率可调的利用克尔透镜锁模的 Yb : YAG 薄片振荡器^[32],实验中获得了平均功率 17 W,重复频率 40 MHz 的脉冲输出,光 - 光转换效率为 25%。2015 年,M. Hemmer 等人使用低温冷却的 Yb : YAG 薄片激光器,脉冲能量高达 160 mJ,得到了重复频率为 100 Hz 的优良激光束^[33]。

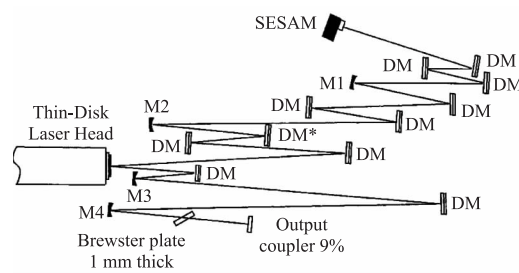


图 4 810 fs 脉冲的 Yb : YAG 薄片激光器实验装置

M1 - M4 - 球面曲面镜;DM - 色散镜

Fig. 4 Setup of the Yb : YAG thin-disk laser for the 810fs Pulses

M1 - M4 - spherically curved mirrors;DMs - dispersive mirrors

3.5 双波长 Yb : YAG 激光器

激光具有单色性,一台激光器通常情况下只输出单一波长的激光同时抑制其他波长。但在精密光谱分析、差分吸收激光雷达、激光医疗等在许多领域中需要能够同时输出两个甚至多个波长的激光器。此外,通过对多波长激光进行非线性混频,能够获得某些特殊波段的波长,这对非线性光学混频方面的研究也有着重要意义。全固态双波长激光器体积小,结构紧凑,覆盖波段大,已展现出广泛的应用

前景。

2006 年,Jun Dong 等研究人员在室温下实现了通过温度梯度技术生长的 Yb:YAG 晶体的高效双波长光学性能^[34],证明了最佳效率的激光抽运 Yb:YAG 晶体的波长为 1030 nm 和 1049 nm,并在 1030 nm 处实现了高达 68% 的斜度效率和 51% 以上的光-光转换率。实验表明,通过温度梯度技术生长的 Yb:YAG 晶体具有非常好的光学性能,是用于高功率双波长激光器的良好材料。2009 年, H. Yoshioka 等人设计了以 YAG 陶瓷作为主体材料的二极管泵浦掺镱飞秒激光器,成功地实现了在 1033.5 nm 和 1048.3 nm 波长处的被动模式锁定^[35]。这是第一个锁模 Yb:YAG 陶瓷激光器,并且是没有采用克尔透镜模式锁定的情况下二极管泵浦陶瓷激光器所获得的最短脉冲,但此种方案中两个波长的锁模不同步。2010 年, H. Yoshioka 等人对实验方案作出改进,成功实现了在激光器的 1033.6 nm 和 1047.6 nm 两个最强增益线上同时独立产生模式锁定^[36],此时在一个光束中可以观察到双波长模式锁定。结果表明,测量双波长锁模可以 1033.6 nm 和 1047.6 nm 之间独立实现,这也是掺镱固体激光器第一次实现双波长锁模。2011 年,哈尔滨工程大学延新杰使用 808 nm LD 作为泵浦源泵浦 Nd:YVO₄ 晶体,采用 Z 型腔,实现了 914 nm 基频光的有效振荡。再利用 Yb:YAG 晶体的 915 nm 的吸收谱线,使用 914 nm 的光泵浦 Yb³⁺ 掺杂浓度 8% 的 Yb:YAG 晶体实现了 1030 nm 的光起振^[37]。2013 年, Fengjiang Zhuang 等人提出连续波(CW)腔内倍频 Yb:YAG 激光器产生 12.4 W 的 1030 nm 和 5.4 W 的 515 nm 激光同时输出^[38]。该激光系统被设计用于光热共同路径干涉测量,以测量电介质和涂层中的可见光或红外光的线性吸收的空间分辨轮廓以及两者的组合的非线性吸收。2015 年, Yingnan Peng 等人设计了双波长克尔透镜锁模 Yb:YAG 薄盘激光器,实现了中心波长为 1031 nm 和 1049 nm 的稳定双波长同步锁模操作^[39]。总平均输出功率为 12.9 W,脉冲持续时间为 220 fs。这是首次采用克尔透镜模式锁定实现双波长锁模。2016 年, ZiYe Gao 等人采用图 5 装置实验验证了一种基于 Yb:YAG 陶瓷的二极管泵浦克尔透镜锁模飞秒激光器^[40],获得了具有 97 fs 持续时间, 2.8 nJ 脉冲能量的稳定激光脉冲,这是首次采用克尔透镜锁模操作的二极管泵浦 Yb:YAG 陶瓷激光器脉冲持续时间低于 100 fs。2017 年,庄凤江等人采用紧凑的平凹

腔结构, 940 nm 光纤耦合 LD 端面泵浦方式, Yb:YAG 作为激光晶体, 在输出耦合镜为 10%、15% 和 20% 条件下分别实现了单波长和双波长激光输出^[41]。

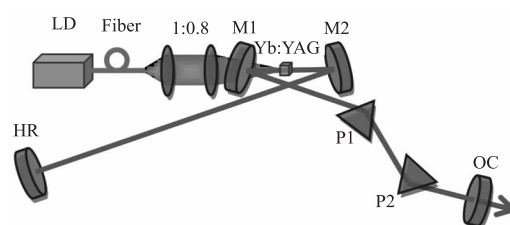


图5 克尔透镜锁模的二极管泵浦 Yb:YAG 陶瓷飞秒激光器
LD - 光纤耦合激光二极管; M1 和 M2 - ROC = 75 mm 的凹面镜;
HR - 平面高反射镜; P1 和 P2 - 一对 SF6 棱镜; OC - 输出耦合器。

Fig. 5 Schematic of the diode-pumped Kerr-lens mode-locked
Yb:YAG ceramic femtosecond laser.
LD - fiber-coupled laser diode;
M1 and M2 - concave mirrors with ROC of 75 mm;
HR - plane high reflection mirror;
P1 and P2 - a pair of SF6 prisms; OC - output coupler

4 总结与展望

在目前的激光二极管技术下, Yb:YAG 晶体因其优良的热力学和光谱学性质, 其全固化和超快激光性能, 已逐步成为固体激光器件的主要激活离子。许多著名研究机构都相继开展了对 Yb:YAG 的研究, 将其视作发展 1 μm 波段高功率、大能量固体激光器的一个重要途径。关于可用激光二极管直接泵浦的掺 Yb³⁺ 激光晶体以及全固态飞秒激光器的研究已经成为开发新一代高效率, 低成本, 结构紧凑激光器的热点。

Yb:YAG 激光器的一个主要发展方向是激光二极管泵浦的全固化高功率激光器。虽然 LD 抽运 Yb:YAG 晶体连续激光输出已经达到数千瓦水平, 但达到该目标需要解决高功率抽运下晶体的热效应、光束质量控制、谐振腔优化设计、新物理效应(如放大自发辐射、饱和色心)对激光性能的影响等一系列技术问题。Yb:YAG 激光器的另一个发展方向是实现超快飞秒激光输出, 但由于 Yb:YAG 晶体发射带宽相对较窄, 使得它与其他掺镱激光晶体相比, 难以成为实现超短脉冲激光的最佳选择。

长期以来, 科学家们一直坚持不懈的追求高效率、高功率、高质量连续/脉冲全固态激光器。光纤激光器和薄片激光器是固体激光器热管理技术史上的重大革新, 未来通过对晶体材料和实验结构的改进, 有望实现更高质量的高功率输出。此外, 双波长

激光器也为进一步的研究提供了新思路。随着高纯度和高质量 Yb : YAG 晶体的生长工艺不断改进, Yb : YAG 激光器的发展水平将也得到进一步的提高。

参考文献:

- [1] Johnson LF, Geusic JE, Van Uitert LG. Coherent oscillations from Tm^{3+} , Ho^{3+} , Yb^{3+} and Er^{3+} ions in YAG[J]. Appl. Phys. Lett, 1965, 7(5): 127 - 130.
- [2] A R Reinberg, Risenberg LA, Brown RM, et al. GaAs: Si LED pumped Yb : doped YAG laser[J]. Appl. Phys. Lett, 1971, 19(1): 11 - 13.
- [3] WEN Jiaojuan. Theoretical analysis on the thermal effects of laser medium [D]. Shanghai: Donghua University, 2008. (in Chinese)
温姣娟. 激光介质热效应的理论分析[D]. 上海: 东华大学, 2008.
- [4] XU Jun, XU Xiaodong, SU Liangbi. Yb doped laser crystal materials[M]. Shanghai: Shanghai Science Popularization Press, 2005. (in Chinese)
徐军, 徐晓东, 苏良碧. 掺镱激光晶体材料[M]. 上海: 上海科学普及出版社, 2005.
- [5] Dong J, Shirakawa A, Takaichi K, et al. All-ceramic passively Q-switched Yb : YAG /Cr/sup⁴⁺/ : YAG microchip laser [J]. Electronics Letters, 2006, 42 (20): 1154 - 1155.
- [6] WU Yusong, PAN Yubo, LI Jiang, et al. Fabrication and laser output of transparent Yb : YAG ceramic[J]. Journal of Inorganic Materials, 2007, 22 (6): 1086 - 1088. (in Chinese)
吴玉松, 潘裕柏, 李江, 等. Yb : YAG 透明陶瓷的制备和激光输出 [J]. 无机材料学报, 2007, 22 (6): 1086 - 1088.
- [7] XU Yi, YU Haiibo, WU Yusong, et al. Laser diode-pumped domestic Yb : YAG ceramic laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2007, 34(9): 1171 - 1173. (in Chinese)
许毅, 于海波, 吴玉松, 等. 激光二极管抽运的国产 Yb : YAG 陶瓷激光器[J]. 中国激光, 2007, 34(9): 1171 - 1173.
- [8] CHENG Ying, MA Jian, DONG Jun. Enhancement of Cr, Yb : YAG self-Q-switched microchip laser by bonding Yb: YAG ceramic [J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40 (1): 54 - 58. (in Chinese)
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): 54 - 58.
- [9] WANG Ke, ZHU Jiangfeng, GAO Ziye, et al. Continuous wave and wavelength tuning performances of diode-pumped Yb : YAG ceramic laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, (12): 23 - 27. (in Chinese)
汪珂, 朱江峰, 高子叶, 等. 二极管抽运 Yb : YAG 陶瓷连续激光器和波长调谐实验研究[J]. 中国激光, 2015, (12): 23 - 27.
- [10] YU Yang, ZHU Jiangfeng, et al. High power passively Q-switched laser of diode-pumped domestic Yb : YAG ceramic[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(10): 44 - 49. (in Chinese)
于洋, 朱江峰, 等. 二极管抽运国产 Yb : YAG 陶瓷高功率被动调 Q 激光器[J]. 中国激光, 2016, 43 (10): 44 - 49.
- [11] D Richardson, J Nilsson, W Clarkson. High power fiber lasers: current status and future perspectives[J]. Opt. Soc. Am. B, 2010, 27(11): 63 - 92.
- [12] E Snitzer, H Po, F Hakimi, et al. Double-clad offset core Nd fiber laser[C]. Optical Fiber Communication Conf, 1988, PD5: 533 - 536.
- [13] Y Jeong, J K Sahu, D N Payne, et al. Ytterbium-doped large-core fiber laser with 1kW of continuous-wave output power[J]. Electron. Lett, 2004, 40(8): 470 - 472.
- [14] Y Jeong, J Sahu, D Payne, et al. Ytterbium-doped large-core fiber laser with 1.36kW continuous-wave output power[J]. Opt. Express, 2004, 12(25): 6088 - 6092.
- [15] LOU Qihong, HE Bing, XUE Yuhao, et al. 1.75 kW domestic Yb-doped double clad fiber laser [J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36(5): 1277. (in Chinese)
楼祺洪, 何兵, 薛宇豪, 等. 1.75 kW 国产掺 Yb 双包层光纤激光器[J]. 中国激光, 2009, 36(5): 1277.
- [16] P Yan, S Yin, J He, et al. 1.1 kW Ytterbium Monolithic Fiber Laser With Assembled End-Pump Scheme to Couple High Brightness Single Emitters[J]. IEEE Photon. Technol. Lett, 2011, 23(11): 697 - 699.
- [17] YAN Ping, XIAO Qirong, et al. 1.6 kW all-fiber Yb-doped lasers [J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39 (4): 0416001. (in Chinese)
闫平, 肖起榕, 等. 1.6 kW 全光纤掺镱激光器[J]. 中国激光, 2012, 39(4): 0416001.
- [18] WANG Xiaolin, ZHOU Pu, SU Rongtao, et al. Current situation, tendency and challenge of coherent combining of high power fiber lasers [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(2): 0201001. (in Chinese)
王小林, 周朴, 粟荣涛, 等. 高功率光纤激光相干合成的现状、趋势与挑战 [J]. 中国激光, 2017, 44 (2): 0201001.
- [19] V Gapontsev, D Gapontsev, N Platonov, et al. 2 kW CW ytterbium fiber laser with record diffraction-limited brightness[C]. OSA/CLEO, 2005: 508.

- [20] E Stiles. New developments in IPG fiber laser technology [C]. Proceedings of the 5th International Workshop on Fiber Lasers, 2009.
- [21] Zervas M N, Codemard C A. High power fiber lasers: a review[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2014, 20(5): 219 – 241.
- [22] Fan T Y, Ochoa J. Tunable single-frequency Yb : YAG laser with 1W output power using twisted-mode technique [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1995, 7(10): 1137 – 1138.
- [23] Brauch U, Giesen A, Karszewski M, et al. Multiwatt diode-pumped Yb : YAG thin disk laser continuously tunable between 1018 and 1053 nm[J]. Optics Letters, 1995, 20(7): 713 – 715.
- [24] Saikawa J, Kurimura S, Pavel N, et al. Performance of widely tunable Yb : YAG microchip lasers[J]. Advanced Solid State Lasers, 2000, 34: 106 – 111.
- [25] ZHANG Lizhe, DAI Jianming, ZHANG Weili, et al. All-solid-state tunable Yb : YAG Laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2001, 28(10): 873 – 876. (in Chinese)
张丽哲, 戴建明, 张伟力, 等. 全固化可调谐 Yb : YAG 激光器[J]. 中国激光, 2001, 28(10): 873 – 876.
- [26] Bhandari R, Taira T. Widely tunable CW and Q-switched operation of thin-rod Yb : YAG laser[C]. Lasers and Electro-Optics, 2005, 1: 16 – 18.
- [27] Nakamura S, Yoshioka H, Yu M, et al. Efficient tunable Yb : YAG ceramic laser [J]. Optics Communications, 2008, 281(17): 4411 – 4414.
- [28] Stewen C, Contag K, Larinov M, et al. A 1 kW CW thin disk laser [J]. IEEE J. Quantum Electron, 2000, 6(4): 650 – 657.
- [29] E Innerhofer, T Südmeyer, et al. 60W average power in 810fs pulses from a thin-disk Yb : YAG laser[J]. Opt. Lett., 2003, 28(5): 367 – 369.
- [30] Sergio V. Marchese, Thomas Südmeyer, Matthias Golling, Rachel Grange and Ursula Keller. Pulse energy scaling to 5 μ J from a femtosecond thin disk laser[J]. Opt. Lett., 2006, 31(18): 2728 – 2730.
- [31] WANG Chunhua, WANG Weimin, et al. Design and experiment of multi-pass pump system for Yb : YAG thin-disk laser[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2011, 23(5): 1230 – 1232. (in Chinese)
- 王春华, 王卫民, 等. Yb : YAG 薄片激光器多通泵浦耦合系统设计与实验[J]. 强激光与粒子束, 2011, 23(5): 1230 – 1232.
- [32] O Pronin, J Brons, C Grasse, et al. High-power 200fs Kerr-lens mode-locked Yb : YAG thin disk oscillator[J]. Opt Lett., 2011, 36(24): 4746 – 4748.
- [33] Zapata L E, Lin H, Calendron A L, et al. Cryogenic Yb : YAG composite-thin-disk for high energy and average power amplifiers[J]. Optics Letters, 2015, 40(11): 2610 – 2613.
- [34] Dong J, Shirakawa A, Ueda K, et al. Efficient Dual-Wavelength Laser Performance of Yb : YAG Crystal Grown by Temperature Gradient Technique [C]. Advanced Solid-State Photonics, 2006.
- [35] Yoshioka H, Nakamura S, Ogawa T, et al. 233 fs mode-locked Yb : YAG ceramic laser[C]. Lasers & Electro Optics & The Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics, 2009. CLEO/PACIFIC RIM '09. Conference on. IEEE, 2009: 1 – 2.
- [36] Yoshioka H, Nakamura S, Ogawa T, et al. Dual-wavelength mode-locked Yb : YAG ceramic laser in single cavity [C]. Lasers and Electro-Optics, 2010: 1 – 2.
- [37] YAN Xinjie. Study on the intracavity-pumped quasi-three level blue laser based on sum-frequency mixing[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011. (in Chinese)
延新杰. 腔内泵浦准三能级和频蓝光激光器的研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
- [38] Zhuang F, Jungbluth B, Gronloh B, et al. Dual-wavelength, continuous-wave Yb : YAG laser for high-resolution photothermal common-path interferometry [J]. Appl Opt, 2013, 52(21): 5171 – 5177.
- [39] Peng Y, Zhang J, Li D, et al. High power dual-wavelength Kerr-lens mode-locked Yb : YAG thin disk laser[C]. Advanced Solid State Lasers, 2015: AM5A. 26.
- [40] Z Y Gao, J F Zhu, et al. Diode-pumped Kerr-lens mode-locked femtosecond Yb : YAG ceramic laser[J]. Chinese Physics B, 2016, 25(2): 186 – 189.
- [41] ZHUANG Fengjiang, LI Xiang, LIN Zhiyang. Theoretical and experimental investigation of dual-wavelength continuous-wave Yb : YAG laser [J]. Acta Photonica Sinica, 2017, 46(2): 0214002. (in Chinese)
庄凤江, 李享, 林志阳. 双波长 Yb : YAG 连续激光理论及实验研究[J]. 光子学报, 2017, 46(2): 0214002.