

基于掺镱块材料的超短脉冲激光放大器综述

赵智刚^{1,2,3*}, 丛振华^{1,2,3}, 刘兆军^{1,2,3**}

¹ 山东大学信息科学与工程学院, 山东 青岛 266237;

² 山东省激光技术与应用重点实验室, 山东 青岛 266237;

³ 山东大学激光与红外系统集成技术教育部重点实验室, 山东 青岛 266237

摘要 掺镱块状材料是产生高功率超短脉冲激光输出的一种有效技术途径, 具有造价低、易加工、易调节、可承受脉冲能量大等优势。该材料介于光纤、单晶光纤、板条、薄片之间, 基于块状材料的超短脉冲激光放大器逐渐成为超快激光领域的研究热点。在具体体现形式上, 主要有行波(单通、双通、四通)放大结构和再生放大结构; 在所使用的增益介质方面, 主要以 Yb:YAG 为主, 另外还有 Yb:KYW、Yb:KGW、Yb:CALGO、Yb:CaF₂、Yb:Lu₂O₃、Yb:Y₂O₃ 等。梳理和总结了目前已经公开报道的相关结果, 并对掺镱块材料超短脉冲激光放大器, 尤其在百瓦甚至千瓦量级的超短脉冲放大器上的潜在应用及未来发展趋势进行了探讨和展望。

关键词 激光器; 掺镱激光; 超快激光; 激光放大器

中图分类号 TN248.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.071605

Review on Ultrashort Pulse Laser Amplifiers Based on Bulk Yb-Doped Gain Media

Zhao Zhigang^{1,2,3*}, Cong Zhenhua^{1,2,3}, Liu Zhaojun^{1,2,3**}

¹ School of Information Science and Engineering, Shandong University, Qingdao, Shandong, 266237, China;

² Shandong Provincial Key Laboratory of Laser Technology and Application, Qingdao, Shandong, 266237, China;

³ Ministry of Education Key Laboratory of Laser and Infrared System Integration Technology, Shandong University, Qingdao, Shandong, 266237, China

Abstract Yb-doped bulk materials are becoming an effective technical way for delivering high power ultrashort pulse lasers. They are inexpensive and easy to be processed, adjusted, and resistant to higher pulse energy, all of which make bulk-material-based ultrashort pulse laser amplifier be a hot topic. Usually, there are two kinds of configuration for amplifiers, travelling-wave (single, double-pass, four-pass) amplifiers and regenerative amplifiers. The gain media are not limited to the well-known Yb:YAG, Yb:KGW, and Yb:KGW, such new candidates as Yb:CALGO, Yb:CaF₂, Yb:Lu₂O₃ and Yb:Y₂O₃ are also emerging. Efforts are paid to review currently reported representative results, to show the potential application of Yb-doped bulk materials as the base for generating ultrashort pulse lasers with average power from hundreds of to thousands of watts.

Key words lasers; Yb-doped laser; ultrafast laser; laser amplifier

OCIS codes 140.3460; 140.3615; 140.7090; 140.3280

1 引言

超短脉冲激光一般是指脉冲宽度在皮秒

(10⁻¹² s)和飞秒(10⁻¹⁵ s)量级上的脉冲激光光源, 具有极窄脉冲、极宽光谱、极高峰值功率等特点, 被誉为“最亮的光”、“最快的刀”、“最准的尺”。目前, 超

收稿日期: 2020-01-13; 修回日期: 2020-03-04; 录用日期: 2020-03-12

基金项目: 国家自然科学基金(11804192, 61475087)、教育部联合基金(6141A02022421, 6141A02022430)、山东省重点研发计划(2019JMRH0111)、山东省自然科学基金(ZR2019MF039)、山东大学卓越团队基金、山东大学基本科研业务费(2018JCG02, 2017JC023)、山东大学杰出中青年基金、山东大学齐鲁青年启动基金

* E-mail: zhigang@sdu.edu.cn; ** E-mail: zhaojunliu@sdu.edu.cn

短脉冲激光的研究已经有 40 余年的历史,在物理学、化学、材料、生物医学、通信工程等领域中都获得了广泛的应用。尤其是近些年来,随着德国“工业 4.0”和“中国制造 2025”等计划的实施,超短脉冲激光光源的输出功率不断提升、脉冲控制方式可实现任意操控,从而使得超短脉冲激光大大促进了工业超精密加工^[1-7](例如:脆性材料切割、超硬材料加工、太阳能电池加工、任意锥度异形孔加工、大深径比微孔加工、材料表面微结构加工、异种材料焊接等)和前沿科学研究^[8-12](高次谐波产生、阿秒光源生成、极紫外光学频率梳、基于二次光源的衍射成像、超精密测距等)的快速发展,这不仅有助于前沿物理学的发展,同时也带动了制造业的飞速发展。

钛宝石激光器是最为典型的超短脉冲激光器,自从 20 世纪 90 年代发明以来,就一直是超快激光领域的中流砥柱。然而,由于钛宝石晶体热效应严重、需要价格昂贵的绿光激光作为泵浦源、泵浦量子效率较低,因此重复频率和平均功率相对受限。近些年来,随着掺镱(Yb)激光增益介质技术的成熟,出现了基于各种形式掺镱材料的超短脉冲激光器,例如:掺镱光纤激光器、掺镱单晶光纤激光器、掺镱板条激光器、掺镱薄片激光器等。相比于钛宝石晶体,掺镱增益介质具有以下方面的突出优势:1)可用波长位于 940~980 nm 的高功率激光二极管(LD)直接泵浦,无需绿光激光泵浦,可大幅降低成本和操作难度;2)掺镱激光发射波长和泵浦波长差值较小,泵浦量子效率高,有利于高功率运转;3)发射光谱带宽虽然比钛宝石晶体的发射带宽窄,但足以支持 0.1~1 ps 量级的脉冲宽度。使用光纤、板条、薄片结构,目前均可实现平均功率超过 1 kW 的超短脉冲激光输出^[13-15]。然而,对于光纤放大器,由于光纤本身的掺杂芯径有限,因而在不引入明显非线性效应的前提下,激光输出脉冲能量受限;对于板条放大器,由于自身结构制约,通常输出光束具有明显的像散效应;对于薄片放大器,由于光斑直径可以很大,所以允许获得较大的脉冲能量,但是薄片激光结构异常复杂,成熟技术仍然只掌握在少数国外企业手中。单晶光纤(SCF)也称为纤维晶体或者晶体纤维,是将晶体材料生长成为纤维状的晶体,典型形态为直径在 0.1~1 mm 之间、长度在 40 mm 左右的细长棒状增益介质(有些情况下长度也可以达到米量级)。由于晶体光纤能够结合光纤的波导结构和传统棒状激光器两者的优点,因此近年来得到广泛的关注。2018~2019 年,来自北京理工大学、山东

大学晶体材料研究所、山东大学信息科学与工程学院的多个研究小组均对单晶光纤本身及基于单晶光纤的激光光源的发展做了综述性报道^[16-18]。

如果将上述的各种增益介质形态按照其通光截面从小到大排列,可以看到在整个链条“光纤→单晶光纤→板条→薄片”中,似乎在“单晶光纤”和“板条”中间缺失了传统的棒状材料。事实上,这样的棒状或片状材料在基于掺镱介质的锁模振荡器中应用非常多^[19],但是在放大器结构中却并没有像单晶光纤那样被广泛地使用。那么从“单晶光纤”放大器过渡到“传统棒状块材料”放大器,有什么样的劣势或者优势呢?就劣势而言:首先,最容易想到的就是由于材料径向变大,比表面积减小,导致晶体散热效率降低、激光热效应加重;其次,缺失了单晶光纤的波导结构对泵浦光的导引作用。而优势也很明显:首先,材料更容易加工,不易断裂;其次,降低了泵浦光、种子光的调节和耦合难度,减小了因泵浦耦合偏差而导致的晶体损伤概率。最近几年,人们在广泛使用单晶光纤超快放大器的同时,也在不断地对其重新审视,因此基于棒状掺镱材料的超短脉冲光源也得到了长足的发展。

本文结合作者近些年在掺镱单晶光纤放大器、棒状材料放大器等方面的工作,着重对基于块状掺镱材料的超短脉冲放大器方面的工作进行综述,并与单晶光纤放大器结果进行对比。综述了近几年使用掺镱块状材料(以 Yb:YAG 和 Yb:Y₂O₃ 等材料为主)作为超短脉冲行波放大器(包括单通、双通、四通等结构)的结果,以及使用掺镱块状材料作为超短脉冲再生放大器增益介质的结果(以 Yb:YAG、Yb:KYW、Yb:KGW、Yb:CaF₂、Yb:YLF、Yb:CALGO、Yb:Lu₂O₃、Yb:YVO₄、Yb:CaYAlO₄、Yb:LuAlO₃、Yb:YAB 等材料为主);同时,对高亮度激光泵浦技术进行探讨,讨论其在提升小信号增益和实现激光高效输出方面的优势,并对基于 Yb:YAG 棒状介质的侧面泵浦技术进行探讨,指出其在高功率超短脉冲放大器方面的潜在应用。

2 基于掺镱块材料的超短脉冲行波放大器

掺镱块状材料和单晶光纤在本质上并没有太大的区别,其主要区别在于增益介质本身是否对泵浦光存在导引机制,而信号光在两种结构下均为空间自由传播。需要指出的是,虽然严格意义上的单晶光纤指的是对泵浦光和信号光均有波导作用的光

纤,但是近些年比较流行的“单晶光纤放大器”所采用的“单晶光纤”却只对泵浦光具有一定的波导作用,而信号光在其中自由传播,其典型尺寸为 $\Phi 1\text{ mm}\times 40\text{ mm}$ 。此外,就泵浦导引作用而言,单晶光纤对泵浦光真正起到的导引程度还受到多种因素的影响,包括泵浦光的光斑大小、光束质量,单晶光纤的长度和直径等。因此,如果增益介质对泵浦光完全没有导引作用,则从“单晶光纤”放大器过渡到了“传统棒状块材料”放大器,泵浦光和信号光在其中都没有波导作用,全部为自由空间传输。

在从“单晶光纤”放大器到“传统棒状块材料”放大器的转变过程中,立陶宛的研究人员走在了前列。早在2017年,立陶宛物理科学与技术中心激光技术部固体激光实验室的Rodin等^[20],使用尺寸为 $\Phi 1\text{ mm}\times 40\text{ mm}$ 、掺杂浓度为1%的Yb:YAG单晶光纤和尺寸为 $2\text{ mm}\times 2\text{ mm}\times 20\text{ mm}$ 、掺杂浓度为2%的Yb:YAG棒对中心波长为1030 nm、平均功率为550 mW、重复频率为500 kHz的啁啾超快种子光源进行放大,在相同泵浦条件(波长为940 nm、泵浦功率为120 W)下通过双通放大结构获得了平均功率分别为29 W和39.5 W激光输出,其实验装

置图如图1所示。该文在文末提到“尽管泵浦光通过波导作用可以限制在单晶光纤当中,但是相较于传统的Yb:YAG棒,其结果并没有表现出明显的优势”,并且在他们2020年新发表的文章中也提到了类似的观点^[21]。2018年,他们还报道了基于尺寸为 $2\text{ mm}\times 2\text{ mm}\times 20\text{ mm}$ 、掺杂浓度为2%的Yb:YAG棒和尺寸为 $5\text{ mm}\times 5\text{ mm}\times 20\text{ mm}$ 、掺杂浓度为2%的Yb:YAG棒的超快激光放大器,通过采用脉冲泵浦的方式,获得了脉冲能量54 mJ、脉冲宽度1.2 ps、重复频率为100 Hz的超短脉冲激光^[22]。同年,来自立陶宛Ekspla公司的Veselis等^[23]使用长度为12 mm、掺杂浓度为3.6%的Yb:YAG棒,波长为940 nm、功率为120 W的泵浦光源,以及温控啁啾布拉格光栅(t-CFBG)和体布拉格光栅(CVBG)进行色散补偿,获得了平均功率为20 W、重复频率为200 kHz、脉冲宽度为764 fs的超短脉冲激光输出,其实验装置图如图2所示。在2019年的ASSL会议上,他们进一步报道了平均功率为40 W、重复频率为1 MHz、脉冲宽度为400 fs的超短脉冲激光放大器,所使用种子光的重复频率为1 MHz、平均功率为3 W^[24]。

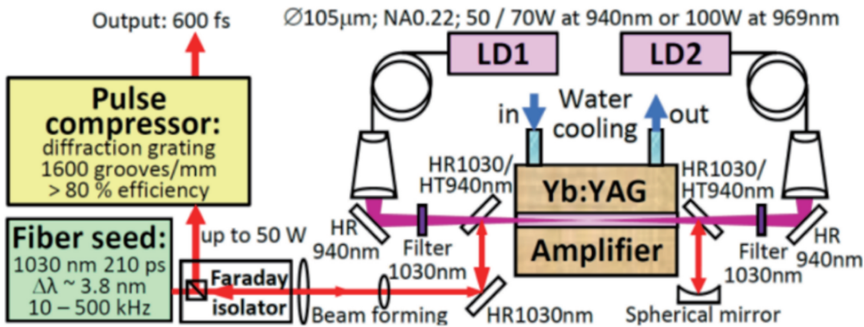


图1 双通Yb:YAG啁啾脉冲放大装置图^[20]

Fig. 1 Experimental setup for two-pass Yb:YAG chirped pulse amplification^[20]

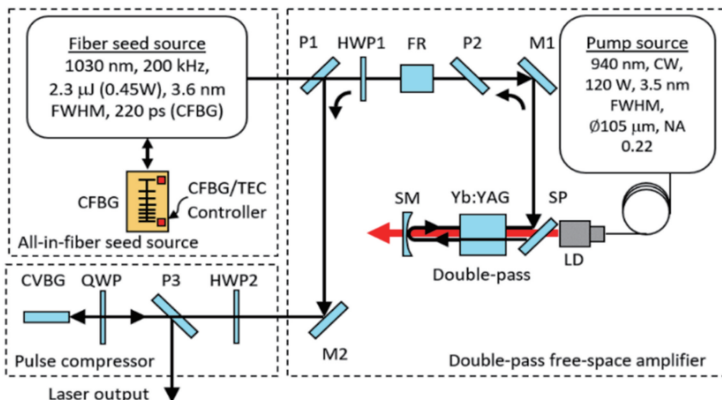
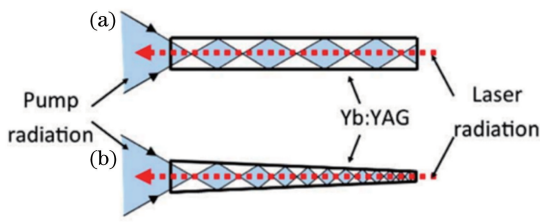


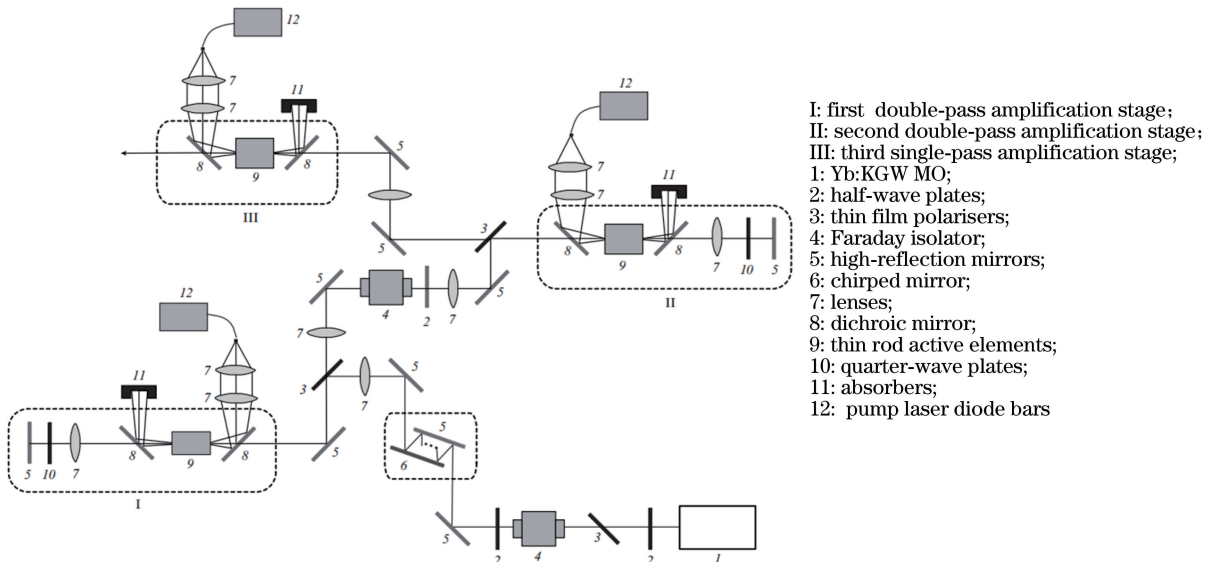
图2 双通Yb:YAG啁啾脉冲放大装置图^[23]

Fig. 2 Experimental setup for two-pass Yb:YAG chirped pulse amplification^[23]

图3 均匀细棒和锥度细棒示意图^[26]Fig. 3 Schematic diagram of uniform and tapered Yb:YAG rod^[26]

来自日本东京大学物性研究所的 Zhao 等^[25]在 2018 年的工作中也报道了类似的结果。他们使用日本神岛化学公司生产的三种尺寸和浓度的 Yb:YAG 陶瓷棒($\Phi 1\text{ mm} \times 40\text{ mm}$ 、1% 掺杂; $\Phi 1\text{ mm} \times 30\text{ mm}$ 、2% 掺杂; $\Phi 12\text{ mm} \times 30\text{ mm}$ 、2% 掺杂)与 Fibercryst 公司生产的 Yb:YAG 单晶光纤棒($\Phi 1\text{ mm} \times 40\text{ mm}$ 、1% 掺杂)进行比较,虽然他们使用的是纳秒种子光源,但是结果发现在相同的泵浦条件下(940 nm 激光二极管泵浦,泵浦功率为 110 W), $\Phi 12\text{ mm} \times 30\text{ mm}$ 、2% 掺杂的 Yb:YAG 陶瓷棒输出功率最高,其他三种 Yb:YAG 棒输出功率类似。这与 Rodin 等^[20-21]的实验结果有类似的趋势。

除了以上两种 Yb:YAG 晶体棒和 Yb:YAG 陶瓷棒,来自白俄罗斯的 Kuznetsov 等^[26]在 2016 年首次报道了锥形 Yb:YAG 晶体棒的概念(如图 3 所示)。通过数值模拟分析了泵浦光在均匀细棒和锥形细棒中分布的区别:在锥形细棒中,可形成多个高粒子数反转区域,因此有利于提升该类型放大器的增益^[27]。在实验上,他们通过使用掺杂为 1%、长度为 30 mm、粗端直径 1 mm、细端直径 0.3 mm 的锥形 Yb:YAG 晶体棒,在 130 W 泵浦功率下,使用单通放大结构就获得了近 25 W 的连续输出功率^[26],充分展示了锥形 Yb:YAG 晶体棒在功率放大方面的优势。2018 年,他们又和韩国电子技术研究所的 Yang 等^[28]合作,建立了超短激光脉冲在多级 Yb:YAG 棒状增益介质中放大的模型,并在实验上获得了脉冲宽度为 580 fs、重复频率为 80 MHz、平均输出功率大于 110 W 的超短脉冲激光。其中所使用的三级放大器分别是长度为 40 mm、掺杂浓度 1% 的锥形 Yb:YAG 细棒, $\Phi 1\text{ mm} \times 30\text{ mm}$ 、2% 掺杂的 Yb:YAG 晶体棒,和 $\Phi 1\text{ mm} \times 40\text{ mm}$ 的 Yb:YAG 模块(Fibercryst 公司 Taranis 模块),其实验装置图如图 4 所示。

图4 三级放大实验装置图^[28]Fig. 4 Experimental setup for three-stage of Yb:YAG amplifier^[28]

中国科学院西安光学精密机械研究所 Li 等^[29-31]在其一系列工作中,除了使用 Fibercryst 公司的 Taranis 模块,还发展了水冷式的 Yb:YAG 增益模块。在他们 2019 年的最新工作中^[31],使用了直接水冷式键合 Yb:YAG 晶体,尺寸为 $\Phi 3\text{ mm} \times (14+24+32)\text{ mm}$ 、掺杂 2%,其中 14 mm 和 32 mm 为非掺杂

YAG 部分、24 mm 为掺杂晶体部分。在输入种子功率为 7.4 W、泵浦功率为 135 W 的条件下,采用双通结构,得到了输出功率 38 W、重复频率为 250 kHz 的激光输出,通过使用体布拉格光栅进行后续压缩,得到了输出功率为 23.9 W、脉冲宽度为 985 fs 的超短脉冲激光,其实验装置如图 5 所示。

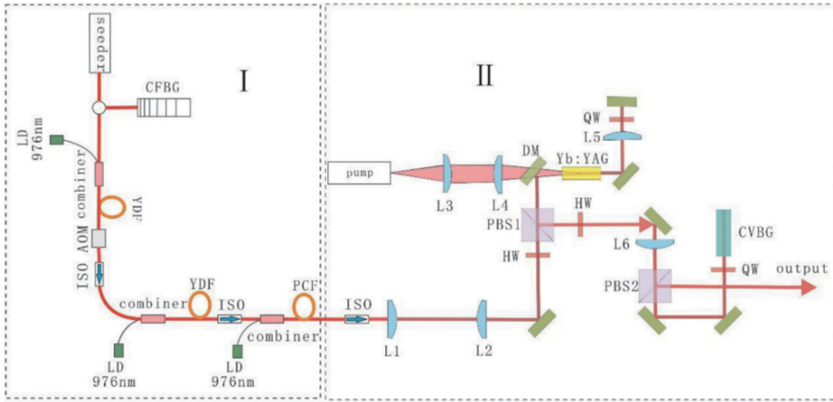


图 5 直接水冷式键合 Yb:YAG 晶体双通放大器^[31]

Fig. 5 Experimental setup for direct water-cooled bonded Yb:YAG amplifier^[31]

以上所述结果均基于 Yb:YAG 的棒状增益介质,这主要是由于 Yb:YAG 介质的单程增益相对较大,但是 Yb:YAG 的增益带宽相对较窄,可直接获得的脉冲宽度较宽,典型脉冲宽度在 0.6~2 ps 范围内。事实上,其他掺镱材料也可用来进行超短脉冲激光的放大。最近,来自韩国电子技术研究所的 Kim 等^[32]报道了基于日本神岛化学公司提供的尺寸为 $\Phi 1\text{ mm} \times 27\text{ mm}$ 、掺杂 0.5% 的 Yb:Y₂O₃ 陶瓷细棒的单通、双通和四通超短脉冲激光放大器。在最大泵浦功率 123.7 W 时,采用四通放大结构,获得了 8.1 W 的最高输出功率,其脉冲宽度为 239 fs、光谱带宽为 4.8 nm、中心波长为 1030.5 nm,其实验装置图如图 6 所示。该结果充分展示了 Yb:Y₂O₃ 陶瓷细棒放大器在高功率、超短脉冲放大方面的应用潜力,为进一步获得高功率超短脉冲激光提供了一种潜在的技术途径。

国和中国科学院西安光学精密机械研究所的研究工作。Kuznetsov 等^[33]使用四通放大结构,将 10 mW 的啁啾脉冲放大到 2.8 W,考虑光栅反射带宽之后,增益系数高于 30 dB;中国科学院西安光学精密机械研究所的 Li 等^[30],使用四通放大结构,将输出功率从 12 W 提高到 20 W。然而,也应该看到,四通放大器虽然使得单个增益模块具有更高的增益,但是考虑到晶体热透镜效应,其调节将变得更加复杂;另外,需要额外的光学器件(例如:波片、光学隔离器、偏振分束器等),因此不可避免地将增加系统的成本。

除此之外,2016 年,来自德国电子加速器 Kartner 小组的 Zapata 等^[34]结合低温冷却技术和四通放大技术,利用尺寸为 5 mm × 15 mm × 23 mm、掺杂 1% 的两块 Yb:YAG 晶体,并采用液氮将其冷却至 77 K,在泵浦光功率为 515 W 的条件下,将重复频率为 100 kHz、功率为 4 W 的种子激光放大到 250 W,提取效率高达 50%,对应单脉冲能量为 2.5 mJ、脉冲宽度为 20 ps,其实验装置如图 7 所示。该放大器可以作为近红外和中红外光参量啁

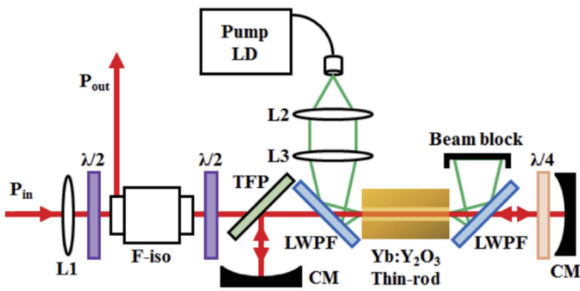


图 6 基于 Yb:Y₂O₃ 细棒的四通放大装置^[32]

Fig. 6 Experimental setup for four-pass thin-rod Yb:Y₂O₃ amplifier^[32]

另外值得一提的是,通过偏振技术实现的四通放大结构使得人们可以使用单个增益模块来获得更高的增益,并且在 Yb:YAG 细棒中也得到了发展。据我们所知,目前已经公开报道的主要有来自俄罗斯、韩

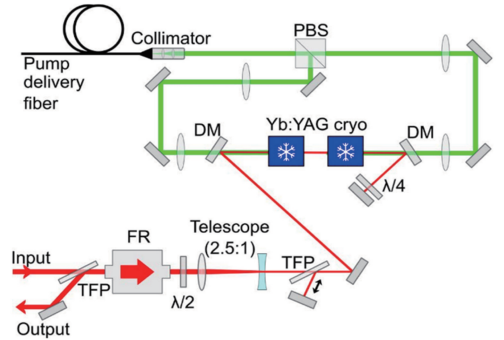


图 7 基于低温 Yb:YAG 块状材料的四通放大装置^[34]

Fig. 7 Experimental setup for four-pass bulk Yb:YAG amplifier^[34]

啉脉冲放大器的理想泵浦源,但是遗憾的是,由于低温冷却下 Yb:YAG 晶体的增益带宽变窄会限制最终获得的脉冲宽度。幸运的是,另外一种掺镱晶体 Yb:YLF 在低温冷却下具有较宽的增益带宽,沿着晶体 a 轴可达 10 nm,因此在他们 2019 年报道的最新工作中,便采用了 Yb:YLF 晶体。Cankaya 等^[35]基于低温冷却技术和两级完全相同的四通放大技术,在每一级中使用尺寸为 10 mm×15 mm×20 mm、掺杂 0.5% 的两块 Yb:YLF 晶体并将它们

冷却至液氮温度 77 K,最终获得了脉冲重复频率为 10 Hz、脉冲能量高达 190 mJ、脉冲宽度为 1.35 ps 的超短脉冲激光输出。这一脉冲宽度相比于使用低温 Yb:YAG 晶体获得的脉冲宽度缩短了 10 倍以上。同时他们还指出,可通过进一步改善种子激光的光谱宽度来匹配 Yb:YLF 晶体的增益带宽,进而获得更短脉冲宽度,比如 400 fs 左右。为了便于对比,将上述部分结果进行梳理,如表 1 所示,BC 表示压缩前, CW 表示连续波。

表 1 基于 Yb 块材料行波放大器结果汇总

Table 1 Summary of results of the Yb-bulk gain media based travelling wave amplifier

Gain medium	Dimension and doping concentration	Average power P/W	Repetition rate f/MHz	Pulse duration τ_p/ps	Year and Reference	Remarks
Yb:YAG	2 mm×2 mm×20 mm, 2%	39.5 (BC)	5×10^{-1}	0.60	2017, [20]	
Yb:YAG	5 mm×5 mm×20 mm, 2%	5.4	1×10^{-4}	1.20	2018, [22]	
Yb:YAG	Length=12 mm, 3.6%	20	2×10^{-1}	0.76	2018, [23]	
Yb:YAG	N/A	40	1	0.40	2019, [24]	
Yb:YAG	$\Phi 2 \times 30$ mm, 2%	39	1×10^{-2}	N/A	2018, [25]	Ceramic
Yb:YAG	$\Phi(0.3 \rightarrow 1) \times 30$ mm, 1%	25	N/A	CW	2016, [26]	Tapered
Yb:YAG	$\Phi 3 \times (14+24+32)$ mm, 2%	38 (BC)	0.25	0.99	2019, [31]	
Yb:Y ₂ O ₃	$\Phi 1 \times 27$ mm, 0.5%	8.1	80	0.24	2019, [32]	Ceramic
Yb:YAG	5 mm×15 mm×23 mm, 1%	250	0.1	20	2016, [34]	Cryogenic
Yb:YLF	10 mm×15 mm×20 mm, 0.5%	1.9	1×10^{-5}	1.35	2019, [35]	Cryogenic

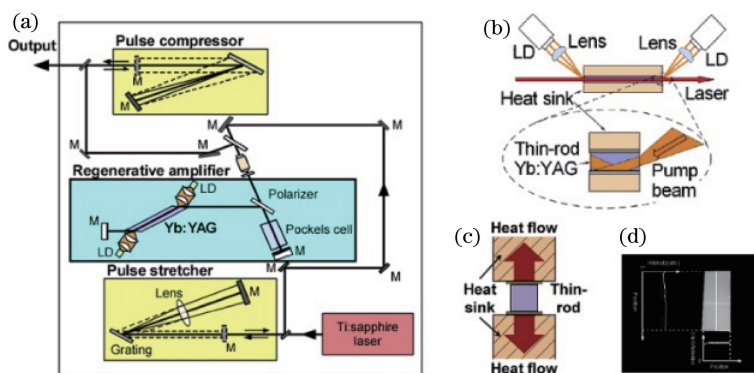
3 基于掺镱块材料的超短脉冲再生放大器

上一节中阐述的主要是基于掺镱增益介质的超短脉冲行波放大器,包括单通结构、双通结构、以及四通结构等。但是相比于掺钕激光增益介质,掺镱增益介质单程增益比较低,放大器效率都不是太高。为了进一步提升放大器的输出功率和能量提取效率,可以使用结构相对复杂的再生放大器。在再生放大器中,通过使用偏振控制技术,种子光被限制在谐振腔内多次通过增益介质抽取其中的增益,根据谐振腔长度、电光开关门选通时间等,可以对信号光在腔内的往返次数进行控制,典型数值可在几十到上百不等。最终,在适当的时刻,再次控制电光开关,将放大之后的激光输出到腔外,典型增益可达 30 dB~60 dB 之间。然而,正如前面提到的,在再生放大器中必须对脉冲进行时序控制、模式控制,并且还涉及到电光晶体上高压的使用,因此结构复杂、技术要求相对较高;而且受限于电光开关的重复频率,再生放大器的最高工作频率(1 MHz 量级)一般低于行波放大器的最高重复频率(无基本限制)。就基于掺镱块状增益介质的再生放大器而言,经过多年的发展,也

已经取得了不小的成绩,目前使用的晶体主要有 Yb:YAG、Yb:KYW、Yb:KGW、Yb:CaF₂、Yb:YLF、Yb:CALGO、Yb:Lu₂O₃、Yb:YVO₄、Yb:CaYAlO₄、Yb:LuAlO₃、Yb:YAB 等。

2008 年,日本大阪大学的 Sueda 等^[36],采用尺寸为 1 mm×1 mm×42 mm,掺杂原子数分数为 0.7% 的块状键合 Yb:YAG 陶瓷棒作为增益介质,对重复频率为 100 MHz、功率为 10 mW、脉冲宽度为 3.3 ps 的种子光进行啉啉再生放大,最终获得了平均功率为 10 W、重复频率为 100 kHz、脉冲宽度为 6.2 ps 的激光输出。2013 年,日本福井大学的 Matsubara 等^[37]报道了一个基于布儒斯特角切割的棒状 Yb:YAG 晶体的超快再生放大器,实验装置如图 8 所示。其晶体厚度小于 1 mm,长度为 52 mm,掺杂原子数分数为 0.5%。种子光采用的是钛宝石锁模激光器,其脉冲宽度为 150 fs,平均功率为 400 mW,重复频率为 84 MHz。最终种子光在再生放大器腔中经过 40 次往返放大,当吸收泵浦光功率为 170 W 时,获得了平均功率为 20 W、单脉冲能量为 200 μ J 的脉冲激光输出。

在 Yb:YAG 之外,Yb:KYW 和 Yb:KGW 是另外两种常用的性能较为相近的掺镱增益介质,与

图 8 基于 Yb:YAG 细棒的再生放大装置^[37]Fig. 8 Experimental setup for the Yb:YAG regenerative amplifier^[37]

Yb:YAG 相比,可以提供较短的脉冲宽度。2002 年,来自美国密歇根大学的 Liu 等^[38]首次报道了基于 Yb:KGW 晶体(长度为 4 mm、掺杂浓度为 10%)的啁啾脉冲再生放大器,在 1 kHz 的重复频率下,获得了脉冲能量为 65 μJ 、脉冲宽度为 460 fs 的超短脉冲激光输出;同年,他们也报道了基于 Yb:KGW 晶体(长度为 4.1 mm、掺杂浓度为 10%)的啁啾脉冲再生放大器,在 1 kHz 的重复频率下,获得了脉冲能量为 44 μJ 、脉冲宽度为 390 fs 的超短脉冲激光输出^[39]。2007 年,为了提升脉冲能量,日本原子能机构的 Ogawa 等^[40]报道了基于尺寸为 5 mm \times 5 mm \times 2 mm、掺杂浓度为 20%的 Yb:KYW 晶体的高能再生放大器,并结合低温冷却技术,在泵浦能量为 39 mJ 的情况下,获得了 5.5 mJ 的高脉冲能量输出,但重复频率仅为 10 Hz,因此平均功率仅为 0.055 W。2009 年,来自奥地利 High-Q 激光公司的 Calendron 等^[41]在再生放大器腔内使用了两块长度为 2 mm 的 Yb:KYW 晶体,并对它们分别泵浦来提高输出功率,结合 CVBG 技术,在重复频率为 100 kHz 时,获得了平均功率为 12 W、脉冲宽度约为 500 fs 的超短脉冲激光输出。2012 年,韩国电子技术研究所的 Kim 等^[42]报道了一个基于双 Yb:KYW 晶体的再生放大器,实验装置如图 9 所示。由于沿 Yb:KYW 晶体不同光轴方向的发射光谱特性不同,因此使用了两块正交放置的 Yb:KYW 晶体对信号光进行放大,来改善再生放大过程中的增益窄化效应以期获得更短的脉冲宽度,所用的晶体长度为 5 mm、掺杂原子数分数为 3%。最终获得了平均功率为 8 W、重复频率为 200 kHz、脉冲宽度为 181 fs 的超短脉冲激光输出。之后,在 2013 年,他们又使用基于 Yb:KGW 晶体(长度为 5 mm、掺杂浓度为 3%)的双晶体再生放大器,在重

复频率为 200 kHz 时,获得了输出功率 21 W(压缩前)、脉冲宽度为 200 fs 的超短脉冲激光输出^[43]。而在高脉冲能量领域,来自德国电子同步加速器研究所的 Calendron 等^[44]在 2014 年使用类似的双 Yb:KYW 晶体结构,晶体长度为 3 mm、掺杂浓度为 2%,在激光二极管高功率泵浦下,获得了脉冲重复频率为 1 kHz、压缩后脉冲能量高达 4.7 mJ、脉冲宽度为 650 fs 的超短脉冲激光输出,其实验装置如图 10 所示。

相比于以上三种 Yb 掺杂的晶体,Yb:CaF₂ 晶体具有更平滑宽广的发射带宽和较好的热导率,是一种极具潜力的超短脉冲激光晶体。2010 年,法国巴黎第十一大学的 Ricaud 等^[45]报道了一台使用长度为 5 mm、掺杂浓度为 2.6%的 Yb:CaF₂ 晶体再生放大器,在 0.5 kHz 重复频率下,获得了脉冲能量为 1.4 mJ(压缩前)、脉冲宽度为 178 fs 的超短脉冲激光输出;另外,重复频率也可在 0.1~10 kHz 之间调谐。2014 年,葡萄牙里斯本大学的 Joāo 等^[46]采用传统光栅和 CVBG 相结合的方式,通过搭建重复频率为 10 Hz 的 Yb:CaF₂(长度为 5 mm、掺杂原子数分数为 3%)晶体再生放大器,获得了脉冲能量为 2.81 mJ、脉冲宽度为 390 fs 的超短脉冲激光输出。2015 年,光谱物理公司的 Caracciolo 等^[47]报道了基于长度为 4 mm、掺杂浓度为 2.7%的 Yb:CaF₂ 晶体的高重复频率 500 kHz 再生放大器,获得了 8.5 W(压缩前)的输出功率,脉冲宽度为 313 fs。2016 年,法国的 Sevillano 等^[48]报道了一台使用高功率高光束质量 976 nm 光纤激光器泵浦的 Yb:CaF₂ 晶体再生放大器,由于泵浦光的高亮度,因此使用了长度达 20 mm 的 Yb:CaF₂ 晶体,在重复频率为 5 kHz 时,得到了输出功率 5 W(压缩前)、脉冲能量为 0.9 mJ、脉冲宽度为 130 fs 的超短脉冲激光输出。同年,奥

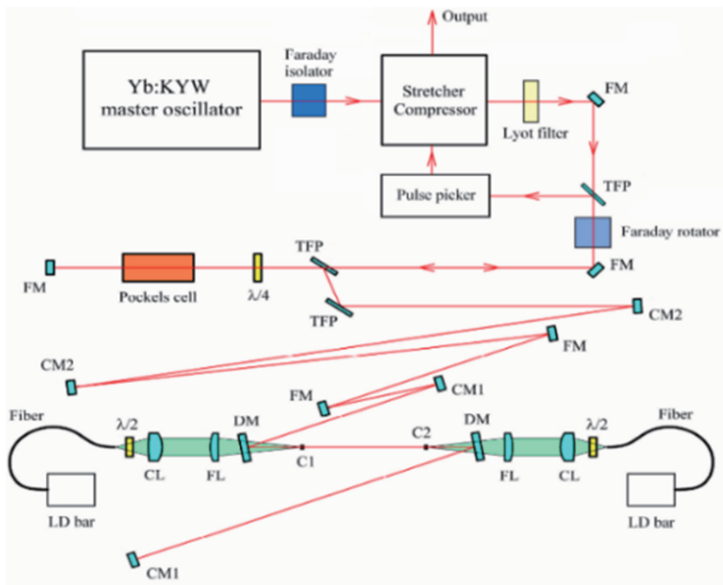


图 9 基于双 Yb:KYW 晶体的再生放大装置^[42]

Fig. 9 Experimental setup for the dual-Yb:KYW regenerative amplifier^[42]

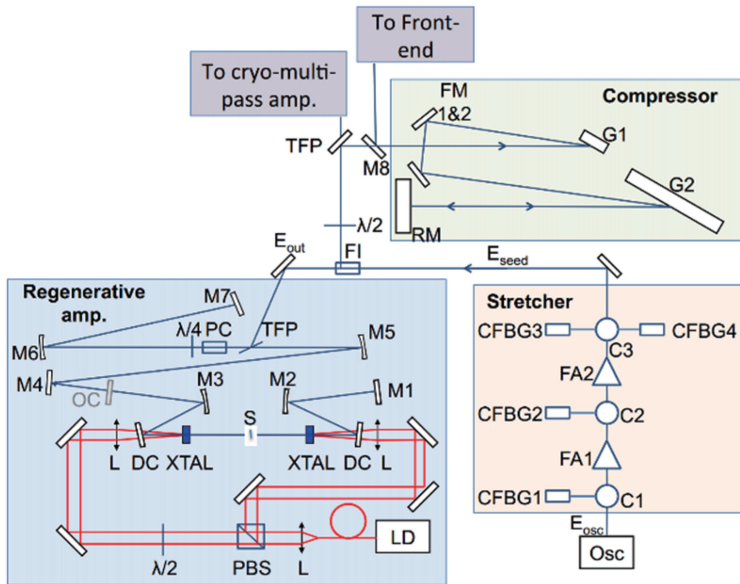


图 10 基于双 Yb:KYW 晶体的高能量再生放大装置^[44]

Fig. 10 Experimental setup for the dual-Yb:KYW high energy regenerative amplifier^[44]

地利的 Andriukaitis 等^[49]将 Yb:CaF₂ 晶体再生放大器和低温技术结合,获得了重复频率为 500 Hz、脉冲能量为 30 mJ、脉冲宽度为 200 fs 的超短脉冲激光。

Yb:YLF 晶体是另外一种在低温下具有良好性能的 Yb 掺杂晶体,可用于获得高脉冲能量的超短脉冲激光输出。在 2003 年,来自日本原子能研究所的 Kawanak 等^[50]使用低温冷却的 Yb:YLF 晶体(尺寸为 5 mm×5 mm×2 mm,掺杂原子数分数为 20%)再生放大器,获得了重复频率为 20 Hz、脉冲

能量为 30 mJ(压缩前)的激光输出,压缩后脉冲宽度为 795 fs。2020 年,德国电子加速器 Kartner 小组的 Demibras 等^[51],使用基于长度为 20 mm、掺杂浓度为 0.5%的 Yb:YLF 晶体的再生放大器,获得了重复频率为 3.5 kHz、脉冲能量为 20 mJ(压缩前)的激光输出,脉冲压缩后在 1 ps 量级。

此外,针对其他晶体(Yb:CALGO、Yb:Lu₂O₃)的再生放大器的研究也有报道,并且由于这些晶体的特性更适合高平均功率超短脉冲激光放大,因此具有广泛的工业应用前景。2013 年,来自意大利帕

维亚大学的 Caracciolo 等^[52]使用长度为 4 mm、掺杂浓度为 2% 的 Yb:CALGO 晶体再生放大器,在泵浦功率为 116 W 的条件下,获得了平均功率为 28 W、重复频率为 500 kHz、脉冲宽度为 217 fs 的超短脉冲激光。2016 年,Caracciolo 等^[53]又使用两块长度为 4 mm、掺杂浓度为 1.5% 的 Yb:Lu₂O₃ 晶体作为增益介质,将超短脉冲激光的平均输出功率提升到 42 W,对应激光重复频率为 500 kHz、脉冲宽度为 780 fs。但很遗憾,关于这两种 Yb:

CALGO、Yb:Lu₂O₃ 晶体再生放大器的具体装置结构,作者并没有在文章中给予披露。

除了以上相对比较常见的晶体以外,科研人员也在不断探索将更多的掺镱晶体材料用于超快再生放大器的研究。比如,来自白俄罗斯国立技术大学的 Rudenkov 等^[54]在 2015~2019 年间,分别将 Yb:YVO₄、Yb:CaYAlO₄、Yb:LuAlO₃、Yb:YAB 等几种晶体用于再生放大器的研究,其典型装置如图 11 所示。

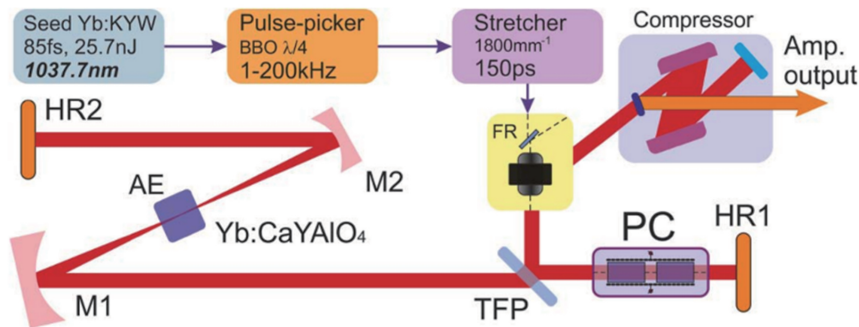


图 11 再生放大装置^[54]

Fig. 11 Experimental setup for the regenerative amplifier^[54]

2015 年,他们报道了基于 Yb:YVO₄ 晶体的再生放大器^[55],种子光为中心波长 1019.1 nm、脉冲宽度 120 fs、重复频率 70 MHz 的 Yb:YVO₄ 晶体锁模激光器。再生放大器中所用 Yb:YVO₄ 晶体尺寸为 4 mm×2 mm×5 mm、掺杂原子数分数为 2%。使用功率为 28 W、波长为 985 nm 的光纤耦合 LD 为泵浦源,最终压缩之后获得平均功率 4.2 W、重复频率 200 kHz、脉冲宽度为 200 fs、单脉冲能量为 21 μJ 的激光输出;当重复频率降至 25 kHz 时,最大单脉冲能量可以达到 140 μJ。2016 年^[54],他们报道了基于 Yb:CaYAlO₄ 晶体的再生放大器,晶体尺寸为 4 mm×1.5 mm×2 mm、掺杂原子数分数为 3.5%。使用如图 11 所示的实验装置,获得了平均功率 4.2 W、脉冲宽度 310 fs、重复频率 200 kHz 的 σ 偏振光;平均功率 3 W、脉冲宽度 190 fs、重复频率 200 kHz 的 π 偏振光。2017 年,他们将 Yb:LuAlO₃ 晶体用于再生放大器的研究^[56],晶体尺寸为 2 mm×5 mm×1.5 mm,掺杂原子数分数为 2%。使用与之前类似的实验装置,在 E//b 方向获得了平均功率 5 W、脉冲宽度 565 fs、重复频率 200 kHz 的超短脉冲激光输出;在 E//c 方向获得了平均功率 4.5 W、脉冲宽度 165 fs 的超短脉冲激光输出。2019 年^[57],该研究小组又将 Yb:YAB 应用于再生放大器当中,最终在 σ 偏振态下获得了重复频率为

100 kHz 时,最大平均输出功率为 4.6 W、脉冲宽度为 695 fs、单脉冲能量为 46 μJ 的超短脉冲激光输出。

为了便于对比,将上述部分结果进行梳理,如表 2 所示。综合以上各类掺镱块状晶体再生放大器的结果可以看出,虽然放大器的输出功率不是太高,但是再生放大器可以提供极高的小信号增益,因此十分适合作为多级超短脉冲激光放大器的前端。并且,考虑到目前绝大多数的工业超快激光加工的需求的话,平均功率在 20~50 W 的超快激光光源已经满足其要求。

4 掺镱增益介质的高亮度激光泵浦技术展望

绝大部分使用掺镱增益介质的超短脉冲激光放大器,其泵浦结构均为端面泵浦;对于典型的 Yb:YAG 介质,常用的泵浦源为光纤耦合输出的 LD,主要泵浦波长为 940 nm 和 969 nm。其中在 940 nm 附近 Yb:YAG 具有较宽的吸收带宽,因此 LD 无需进行波长锁定;而在 969 nm 附近,由于吸收带宽较窄,通常需要使用体光栅来对 LD 的波长进行锁定。另外一个重要的影响因素是 LD 的亮度,目前常规的商用 940 nm 和 969 nm 的 LD(输出功率标称 150 W),耦合输出光纤的芯径为 105 μm、数值孔径为 0.22,对应光束质量因子 M² 约为 40,

表 2 Yb 块材料再生放大器结果汇总

Table 2 Summary of the results of Yb-bulk materials based regenerative amplifier

Gain medium	Dimension and doping concentration	Average power P/W	Repetition rate f/MHz	Pulse duration τ_p/ps	Year and Reference	Remarks
Yb:YAG	1 mm×1 mm×42 mm, 0.7%	10	1×10^{-1}	6.2	2008, [36]	
Yb:YAG	Length=52 mm, 0.5%	20	1×10^{-1}	2	2013, [37]	
Yb:KYW	Length=4 mm, 10%	0.065	1×10^{-3}	0.46	2002, [38]	
Yb:KGW	Length=4.1 mm, 5%	0.044	1×10^{-3}	0.39	2002, [39]	
Yb:KYW	5 mm×5 mm×2 mm, 20%	0.055	1×10^{-5}	1	2007, [40]	Cryogenic
Yb:KYW	Length=2 mm, N/A	12	1×10^{-1}	0.50	2009, [41]	2 crystals
Yb:KYW	3 mm×3 mm×2 mm, 5%	8	2×10^{-1}	0.18	2012, [42]	2 crystals
Yb:KGW	Length=5 mm, 3%	21 (BC)	2×10^{-1}	0.2	2013, [43]	2 crystals
Yb:KYW	Length=3 mm, 2%	4.7	1×10^{-3}	0.65	2014, [44]	2 crystals
Yb:CaF ₂	Length=5 mm, 2.6%	0.7 (BC)	5×10^{-4}	0.178	2010, [45]	
Yb:CaF ₂	Length=5 mm, 3%	0.028 (BC)	1×10^{-5}	0.39	2014, [46]	
Yb:CaF ₂	Length=4 mm, 2.7%	8.5 (BC)	5×10^{-1}	0.313	2015, [47]	
Yb:CaF ₂	Length=20 mm	5 (BC)	5×10^{-3}	0.13	2016, [48]	Fiber laser pumping
Yb:CaF ₂	N/A	15 (BC)	5×10^{-2}	0.2	2016, [49]	Cryogenic
Yb:YLF	5×5×2 mm ³ , 20%	0.6	2×10^{-5}	0.795	2003, [50]	Cryogenic
Yb:YLF	Length=26 mm, 0.5%	70 (BC)	3.5×10^{-3}	<1	2020, [51]	Cryogenic
Yb:CALGO	Length=4 mm, 2%	28	5×10^{-1}	0.217	2013, [52]	
Yb:Lu ₂ O ₃	Length=4 mm, 1.5%	42	5×10^{-1}	0.78	2016, [53]	2 crystals
Yb:YVO ₄	4 mm×2 mm×5 mm, 2%	4.2	2×10^{-1}	0.2	2015, [55]	
Yb:CaYAlO ₄	4 mm×1.5 mm×2 mm, 3.5%	4.2 (σ) 3.0 (π)	2×10^{-1}	0.31 (σ) 0.19 (π)	2016, [54]	
Yb:LuAlO ₃	2 mm×5 mm×1.5 mm, 2%	5.0 ($//b$) 4.5 ($//b$)	2×10^{-1}	0.565 0.165	2017, [56]	
Yb:YAB	N/A	4.6	1×10^{-1}	0.695	2019, [57]	

远远大于衍射极限光束质量,因此对于较长的晶体而言,在有限的瑞利长度之内无法保证泵浦光和信号光在较长范围内完美重合。

为了获得更好的泵浦信号重合,提高锁模振荡器输出功率和超短脉冲放大器的输出功率和效率,高亮度 976 nm 激光泵浦源首先进入了人们的视野。2013 年, Machinet 等^[58]使用波长为 977 nm 的光纤激光器泵浦 Yb:CaF₂ 晶体,基于克尔透镜锁模技术,获得了输出功率高达 2.3 W、重复频率为 73 MHz、脉冲宽度为 68 fs 的超短脉冲激光输出。自此之后,使用高亮度光纤激光泵浦掺镱晶体的锁模激光振荡器,便成为了振荡器直接输出高功率锁模激光的一种有效途径。而高功率 976 nm 激光光源的制备也成为了一个新的研究方向,输出功率不断提升,尤其是最近来自美国克莱门森大学的 Li 等^[59]在 2019 年报道了基于光子禁带光纤的 978 nm 光纤激光器,实现了近衍射极限输出功率高达 151 W 的高亮度激光,是目前在 978 nm 波段输出的

最高激光功率。这无疑为高亮度激光泵浦掺镱晶体超短脉冲激光带来了新的技术增长空间。实际上,在 2015 年,来自法国的 Sevillano 等^[60]就曾使用输出功率为 40 W 的 976 nm 单模光纤激光器泵浦长度为 29 mm、掺杂原子数分数为 4.5% 的 Yb:CaF₂ 晶体单通放大器,对功率为 2.9 W、重复频率为 96 MHz、脉冲宽度为 70 fs 的种子光源进行放大,最终实现了 16.5 W 的输出功率,增益达到 5.7 倍,且输出脉冲的光谱带宽几乎没有任何损失,光光转换效率高达 34%。

而对于 Yb:YAG 晶体,由于其典型泵浦波长为 940 nm 和 969 nm,所以在很长一段时间内并没有出现比较合适的高功率激光泵浦源,因此相关方面的工作并没有报道。最近,来自俄罗斯的 Obronov 等^[61]报道了一台使用平均功率为 35 W、波长为 920 nm 的掺铈光纤激光器泵浦的 Yb:YAG 晶体棒($\Phi 1\text{ mm}\times 17\text{ mm}$ 、掺杂摩尔分数为 5%)放大器。当输入种子功率为 0.5 mW 时,获得的增益高达

40 dB;当输入种子功率为 1.4 W、泵浦功率为 28 W 时,得到的输出功率为 14 W,斜效率高达 50%,远远大于使用光纤耦合输出 LD 泵浦所获得的光光转换效率水平。从这些结果可以看到,虽然目前输出功率的绝对值还不是很高,但是该工作首次证实了高亮度 920 nm 激光泵浦 Yb:YAG 晶体实现高效激光输出的可行性,对于基于 Yb:YAG 晶体的超短脉冲放大器是一个非常好的“信号”。

因此,可以想象在不久的将来,一旦高功率高亮度 920 nm 激光器、高亮度 940 nm 激光器、高亮度 969 nm 窄带激光器以及高亮度 976 nm 激光器获得突破的话,基于 Yb:YAG 和其他掺镱增益介质的超短脉冲激光放大器性能一定会在输出功率和转换效率方面均得到更大程度提升。另外,如果我们仔细审视 Yb:YAG 晶体的吸收特性、掺杂浓度,并综合考虑上述 920 nm 泵浦的实验结果的话,波长从 910~970 nm 的高亮度激光泵浦源都将是非常好的泵浦光源。从目前的技术手段来看,除了通过掺 Yb 光纤和掺 Nd 光纤直接产生的方法之外,我们认为通过高功率窄线宽掺 Tm 光纤激光器结合倍频技术也是一个方向。由于高亮度激光泵浦技术可以产生很高的光光转换效率,因此激光增益介质的热透镜效应可以大大缓解从而有利于提高最终所能达到的激光输出功率。

5 甚高功率泵浦 Yb:YAG 棒状介质的启示

众所周知,Nd:YAG 晶体是最为常用的用于产生 1 μm 激光的增益介质,晶体性能非常优异。一方面,端面泵浦能够注入很高的泵浦功率;另一方

面,侧面泵浦也是最为常见的泵浦结构,可在有限的棒状晶体长度内从晶体侧面注入极高的泵浦功率,从而可以提供非常高的增益。但是,反观 Yb:YAG 晶体,极高端面泵浦功率的情况并不常见、侧面泵浦结构也少有问津,尤其是在近些年,几乎没有使用侧面泵浦 Yb:YAG 晶体的任何报道。

实际上,在 20 世纪末和 21 世纪初,美国劳伦斯利弗莫尔国家实验室、美国波音激光和电光系统公司、美国休斯研究实验室,都对高功率端面泵浦、侧面泵浦 Yb:YAG 晶体的激光器进行了不少的研究工作,并且取得了很好的结果。1998 年,美国劳伦斯利弗莫尔国家实验室的 Bibeau 等^[62]使用 LD 叠阵、透镜导管匀化等技术,对尺寸为 $\Phi 12\text{mm} \times (5+50+5)\text{mm}$ 、2% 掺杂的键合 Yb:YAG 晶体进行泵浦,获得了连续输出达 434 W 的激光功率。2000 年,美国劳伦斯利弗莫尔国家实验室的 Honea 等^[63]和美国波音激光和电光系统公司的 Avizonis 等联合报道了端面泵浦尺寸为 $\Phi 12\text{mm} \times 50\text{mm}$ 键合 Yb:YAG 晶体的谐振腔,在总泵浦功率为 3930 W 的条件下,获得了高达 1080 W 的输出功率。这两项结果均表明,即使是在室温条件下,Yb:YAG 晶体也同样具备甚高功率泵浦的潜力。2005 年,美国休斯研究实验室的 Bruesselbach 等^[64]使用两端键合了直径 6 mm 无掺杂 YAG 晶体、尺寸为 $\Phi 4\text{mm} \times 80\text{mm}$ 的 Yb:YAG 晶体,封装了侧面泵浦模块(如图 12 所示),在侧面泵浦功率为 9000 W 的条件下,获得了最高 2.65 kW 的输出功率;当泵浦功率为 6000 W 时,获得了光束质量 M^2 因子为 2.1 的 860 W 激光输出。

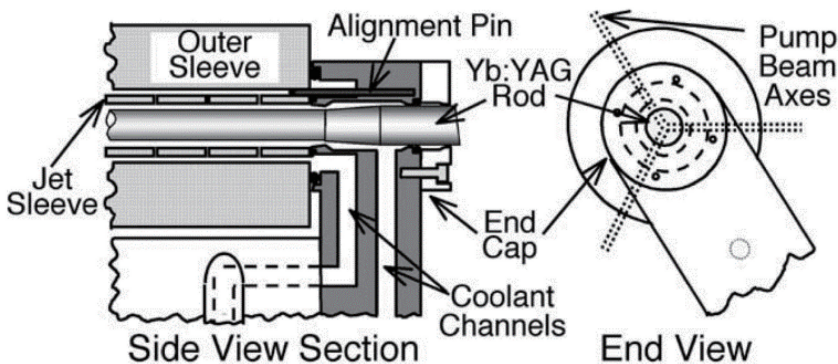


图 12 侧面泵浦 Yb:YAG 模块内部结构^[64]

Fig. 12 Diagram detailing laser head optical pumping and cooling^[64]

可以看到,虽然这些结果均是在连续运转或者调 Q 运转下获得的,但是如果将这样的方案用于超短脉冲激光的放大,是否能得到让人耳目一新的结

果呢?比如,用于产生千瓦量级的超短脉冲激光。我们也可以想象,这其中的主要困难仍然是来自于对晶体热效应的管理以及晶体热效应对输出激光光

束质量的影响。

未来可期,我们可以拭目以待。

6 结束语

掺镱增益介质是产生超短脉冲激光的重要途径,其中尤以 Yb:YAG 最为突出和成熟。除了光纤、单晶光纤、板条、薄片等常用形式外,基于掺镱块状材料的超短脉冲激光放大器具有造价低、易调节等突出优势,可用于百瓦级甚至千瓦级超短脉冲激光放大。本文综述了基于掺镱块状材料的超短脉冲行波放大器和再生放大器的部分具有代表性的结果,并指出高亮度激光泵浦技术、甚高功率端面泵浦和侧面泵浦技术在实现更高功率超短脉冲激光方面的应用潜力,其有望成为另外一种实现千瓦超短脉冲激光输出的更为经济的技术手段。

参 考 文 献

- [1] Xie X Z, Zhou C X, Wei X, et al. Laser machining of transparent brittle materials: from machining strategies to applications [J]. *Opto-Electronic Advances*, 2019, 2(1): 180017.
- [2] Dumitru G, Romano V, Weber H P, et al. Femtosecond ablation of ultrahard materials [J]. *Applied Physics A: Materials Science & Processing*, 2002, 74(6): 729-739.
- [3] Shin H, Kim D. Cutting thin glass by femtosecond laser ablation [J]. *Optics & Laser Technology*, 2018, 102: 1-11.
- [4] Xie Q, Li X W, Jiang L, et al. High-aspect-ratio, high-quality microdrilling by electron density control using a femtosecond laser Bessel beam[J]. *Applied Physics A*, 2016, 122(2): 136.
- [5] Huang H, Yang L M, Bai S, et al. Femtosecond fiber laser welding of dissimilar metals[J]. *Applied Optics*, 2014, 53(28): 6569-6578.
- [6] Lutey A H A, Gemini L, Romoli L, et al. Towards laser-textured antibacterial surfaces [J]. *Scientific Reports*, 2018, 8: 10112.
- [7] Vorobyev A Y, Guo C. Direct femtosecond laser surface nano/microstructuring and its applications[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2013, 7(3): 385-407.
- [8] Ozawa A, Zhao Z G, Kuwata-Gonokami M, et al. High average power coherent vuv generation at 10 MHz repetition frequency by intracavity high harmonic generation[J]. *Optics Express*, 2015, 23(12): 15107-15118.
- [9] Hentschel M, Kienberger R, Spielmann C, et al. Attosecond metrology [J]. *Nature*, 2001, 414(6863): 509-513.
- [10] Gohle C, Udem T, Herrmann M, et al. A frequency comb in the extreme ultraviolet [J]. *Nature*, 2005, 436(7048): 234.
- [11] Miao J, Ishikawa T, Robinson I K, et al. Beyond crystallography: Diffractive imaging using coherent X-ray light sources[J]. *Science*, 2015, 348(6234): 530-535.
- [12] Lee J, Han S, Lee K, et al. Absolute distance measurement by dual-comb interferometry with adjustable synthetic wavelength [J]. *Measurement Science and Technology*, 2013, 24(4): 045201.
- [13] Müller M, Klenke A, Steinkopff A, et al. 3.5 kW coherently combined ultrafast fiber laser[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(24): 6037-6040.
- [14] Russbuehdt P, Mans T, Weitenberg J, et al. Compact diode-pumped 1.1 kW Yb:YAG Innoslab femtosecond amplifier[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(24): 4169-4171.
- [15] Nubbemeyer T, Kaumanns M, Ueffing M, et al. 1 kW, 200 mJ picosecond thin-disk laser system[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(7): 1381-1384.
- [16] Wang Y L, Wang Q. Research progress in single-crystal fiber amplifiers[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(10): 100006.
王雅兰, 王庆. 单晶光纤放大器研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(10): 100006.
- [17] Wang T, Zhang J, Zhang N, et al. Research progress in preparation of single crystal fiber and fiber lasers[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(17): 170611.
王涛, 张健, 张娜, 等. 单晶光纤制备及单晶光纤激光器研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(17): 170611.
- [18] Liu Z J, Gao X B, Cong Z H, et al. Crystal fiber and crystal-derived fiber preparation and application: a review[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2019, 48(11): 1148003.
刘兆军, 高悉宝, 丛振华, 等. 晶体光纤及晶体衍生光纤制备与应用综述[J]. *光子学报*, 2019, 48(11): 1148003.
- [19] Zhu J F, Tian W L, Gao Z Y, et al. Diode-pumped all-solid-state femtosecond Yb laser oscillators [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(9): 0900001.
朱江峰, 田文龙, 高子叶, 等. 二极管抽运全固态飞秒 Yb 激光振荡器 [J]. *中国激光*, 2017, 44(9): 0900001.

- [20] Rodin A M, Zopelis E. Comparison of Yb : YAG single crystal fiber with larger aperture CPA pumped at 940 nm and 969 nm [C] // 2017 Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim (CLEO-PR). IEEE, 2017: 1-5.
- [21] MacKonis P, Rodin A M. Laser with 1.2 ps, 20 mJ pulses at 100 Hz based on CPA with a low doping level Yb : YAG rods for seeding and pumping of OPCPA[J]. Optics Express, 2020, 28(2): 1261.
- [22] Rodin A M, Mackonis P. 1 TW-class OPCPA pumped with fiber laser seeded two-cascaded Yb : YAG rod amplifier-compressor [C] // 2018 Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim (CLEO-PR). IEEE, 2018: 1-2.
- [23] Veselis L, Bartulevicius T, Madeikis K, et al. Compact 20 W femtosecond laser system based on fiber laser seeder, Yb:YAG rod amplifier and chirped volume Bragg grating compressor [J]. Optics Express, 2018, 26(24): 31873-31879.
- [24] Veselis L, Bartulevicius T, Madeikis K, et al. Generation of 40 W, 400 fs pulses at 1 MHz repetition rate from efficient, room temperature Yb : YAG double-pass amplifier seeded by fiber CPA system [C] // Frontiers in Optics + Laser Science APS/DLS, Washington, DC. Washington, D. C. : OSA, 2019.
- [25] Zhao Z G, Qu C, Igarashi H, et al. Watt-level 193 nm source generation based on compact collinear cascaded sum frequency mixing configuration [J]. Optics Express, 2018, 26(15): 19435-19444.
- [26] Kuznetsov I, Mukhin I, Palashov O, et al. Thin-tapered-rod Yb : YAG laser amplifier [J]. Optics Letters, 2016, 41(22): 5361-5364.
- [27] Lee B, Chizhov S A, Sall E G, et al. Laser amplification in Yb : YAG thin rods of different geometries: simulation and experiment [J]. Journal of the Optical Society of America B, 2018, 35(10): 2594-2599.
- [28] Yang J, Lee B, Kim J W, et al. Femtosecond laser system based on thin rod Yb : YAG active elements with an output power of 110 W [J]. Quantum Electronics, 2019, 49(12): 1168-1171.
- [29] Li F, Yang Z, Lv Z, et al. Hundred micro-joules level high power chirped pulse amplification of femtosecond laser based on single crystal fiber [J]. IEEE Photonics Journal, 2017, 9(6): 1-7.
- [30] Li F, Yang Z, Lv Z, et al. Direct amplification of high energy pulsed laser in fiber-single crystal fiber with high average power [J]. Crystals, 2019, 9(4): 216.
- [31] Wang N N, Wang X L, Zhang T, et al. 23.9 W, 985 fs chirped pulse amplification system based on Yb:YAG rod amplifier [J]. IEEE Photonics Journal, 2019, 11(4): 1-7.
- [32] Kim J W, Sall E, Lee B, et al. 8 W 240 fs diode-pumped Yb : Y₂O₃ ceramic thin-rod femtosecond amplifier [J]. Optics Express, 2019, 27(22): 31418-31424.
- [33] Kuznetsov I, Mukhin I, Palashov O, et al. Thin-rod Yb:YAG amplifiers for high average and peak power lasers [J]. Optics Letters, 2018, 43(16): 3941-3944.
- [34] Zapata L E, Reichert F, Hemmer M, et al. 250 W average power, 100 kHz repetition rate cryogenic Yb:YAG amplifier for OPCPA pumping [J]. Optics Letters, 2016, 41(3): 492-495.
- [35] Cankaya H, Demirbas U, Hua Y, et al. 190-mJ cryogenically-cooled Yb : YLF amplifier system at 1019.7 nm [J]. OSA Continuum, 2019, 2(12): 3547-3553.
- [36] Sueda K, Kawato S, Kobayashi T. LD pumped Yb : YAG regenerative amplifier for high average power short-pulse generation [J]. Laser Physics Letters, 2008, 5(4): 271-275.
- [37] Matsubara S, Tanaka M, Takama M, et al. A picosecond thin-rod Yb : YAG regenerative laser amplifier with the high average power of 20 W [J]. Laser Physics Letters, 2013, 10(5): 055810.
- [38] Liu H H, Nees J, Mourou G. Directly diode-pumped Yb:KY(WO₄)₂ regenerative amplifiers [J]. Optics Letters, 2002, 27(9): 722-724.
- [39] Liu H H, Nees J, Mourou G, et al. Yb : KGd(WO₄)₂ chirped-pulse regenerative amplifiers [J]. Optics Communications, 2002, 203: 315-321.
- [39] Liu H, Nees J, Mourou G, et al. Yb:KGd(WO₄)₂ chirped-pulse regenerative amplifiers [J]. Optics Communications, 2002, 203(3/4/5/6): 315-321.
- [40] Ogawa K, Akahane Y, Aoyama M, et al. Multi-millijoule, diode-pumped, cryogenically-cooled Yb : KY(WO₄)₂ chirped-pulse regenerative amplifier [J]. Optics Express, 2007, 15(14): 8598-8602.
- [41] Calendron A L, Wentsch K S, Meier J, et al. High power and high energy Yb : KYW regenerative amplifier using a chirped volume Bragg grating [C] // Conference on Lasers and Electro-Optics/ International Quantum Electronics Conference, Baltimore, Maryland. Washington, D. C. : OSA,

- 2009.
- [42] Kim G H, Yang J, Chizhov S A, et al. High average-power ultrafast CPA Yb:KYW laser system with dual-slab amplifier[J]. *Optics Express*, 2012, 20(4): 3434-3442.
- [43] Kim G H, Yang J, Chizhov S A, et al. A high brightness Q-switched oscillator and regenerative amplifier based on a dual-crystal Yb:KGW laser[J]. *Laser Physics Letters*, 2013, 10(12): 125004.
- [44] Calendron A L, Çankaya H, Kärtner F X. High-energy kHz Yb : KYW dual-crystal regenerative amplifier[J]. *Optics Express*, 2014, 22(20): 24752-24762.
- [45] Ricaud S, Druon F, Papadopoulos D N, et al. Short-pulse and high-repetition-rate diode-pumped Yb:CaF₂ regenerative amplifier[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(14): 2415-2417.
- [46] João C P, Pires H, Cardoso L, et al. Dispersion compensation by two-stage stretching in a sub-400 fs, 1.2 mJ Yb : CaF₂ amplifier [J]. *Optics Express*, 2014, 22(9): 10097-10104.
- [47] Caracciolo E, Memnitzer M, Guandalini A, et al. High energy, multiwatt, femtosecond, diode-pumped Yb : CaAlGdO₄ and Yb : CaF₂ regenerative amplifiers[J]. *Proceedings of SPIE*, 2015, 9342: 93421F.
- [48] Sevillano P, Camy P, Doualan J, et al. 130 fs - multiwatt Yb:CaF₂ regenerative amplifier pumped by a fiber laser [C] // *Lasers Congress 2016 (ASSL, LSC, LAC)*, Boston, Massachusetts. Washington, D. C. : OSA, 2016.
- [49] Andriukaitis G, Kaksis E, Flöry T, et al. Cryogenically cooled 30-mJ Yb : CaF₂ regenerative amplifier[C] // *Lasers Congress 2016 (ASSL, LSC, LAC)*, Boston, Massachusetts. Washington, D. C. : OSA, 2016.
- [50] Kawanaka J, Yamakawa K, Nishioka H, et al. 30-mJ, diode-pumped, chirped-pulse Yb : YLF regenerative amplifier[J]. *Optics Letters*, 2003, 28(21): 2121-2123.
- [51] Demirbas U, Cankaya H, Hua Y, et al. 20-mJ, sub-ps pulses at up to 70 W average power from a cryogenic Yb:YLF regenerative amplifier[J]. *Optics Express*, 2020, 28(2): 2466-2479.
- [52] Caracciolo E, Kemnitzer M, Guandalini A, et al. 28-W, 217 fs solid-state Yb : CaAlGdO₄ regenerative amplifiers[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(20): 4131-4133.
- [53] Caracciolo E, Pirzio F, Kemnitzer M, et al. 42 W femtosecond Yb : Lu₂O₃ regenerative amplifier [J]. *Optics Letters*, 2016, 41(15): 3395-3398.
- [54] Rudenkov A, Kisel V, Yasukevich A, et al. Yb³⁺ : CaYAlO₄-based chirped pulse regenerative amplifier [J]. *Optics Letters*, 2016, 41(10): 2249-2252.
- [55] Rudenkov A, Kisel V, Matrosov V, et al. 200 kHz 55 W Yb³⁺ : YVO₄-based chirped-pulse regenerative amplifier[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(14): 3352-3355.
- [56] Rudenkov A, Kisel V, Yasukevich A, et al. Yb³⁺ : LuAlO₃ crystal as a gain medium for efficient broadband chirped pulse regenerative amplification [J]. *Optics Letters*, 2017, 42(13): 2415-2418.
- [57] Rudenkov A S, Kisel V E, Gorbachenya K N, et al. Growth, spectroscopy and high power laser operation of Yb:YAl₃(BO₃)₄ crystal: Continuous-wave, mode-locking and chirped pulse regenerative amplification [J]. *Optical Materials*, 2019, 89: 261-267.
- [58] Machinet G, Sevillano P, Guichard F, et al. High-brightness fiber laser-pumped 68 fs-2.3 W Kerr-lens mode-locked Yb:CaF₂ oscillator[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(20): 4008-4010.
- [59] Li W S, Matniyaz T, Gafsi S, et al. 151 W monolithic diffraction-limited Yb-doped photonic bandgap fiber laser at ~978nm[J]. *Optics Express*, 2019, 27(18): 24972-24977.
- [60] Sevillano P, Camy P, Doualan J L, et al. High gain broadband Yb : CaF₂ booster amplifier pumped by a 976 nm high power fiber laser [C] // *Advanced Solid State Lasers*, Berlin. Washington, D. C. : OSA, 2015.
- [61] Obronov I V, Demkin A S, Myasnikov D V. Solid-state Yb : YAG amplifier pumped by a single-mode laser at 920 nm [J]. *Quantum Electronics*, 2018, 48(3): 212-214.
- [62] Bibeau C, Beach R J, Mitchell S C, et al. High-average-power 1- μ m performance and frequency conversion of a diode-end-pumped Yb:YAG laser[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1998, 34(10): 2010-2019.
- [63] Honea E C, Beach R J, Mitchell S C, et al. High-power dual-rod Yb : YAG laser [J]. *Optics Letters*, 2000, 25(11): 805-807.
- [64] Bruesselbach H, Sumida D S. A 2.65-kW Yb:YAG single-rod laser [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2005, 11(3): 600-603.