

引用格式: TIAN Wenlong, XU Rui, ZHU Jiangfeng, et al. Review of High-power Kerr-lens Mode-locked Yb-doped All-solid-state Lasers (Invited)[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(8):0850207

田文龙,徐瑞,朱江峰,等. 高功率克尔透镜锁模掺镱全固态激光器研究进展(特邀)[J]. 光子学报, 2021, 50(8):0850207

# 高功率克尔透镜锁模掺镱全固态激光器研究进展 (特邀)

田文龙<sup>1</sup>,徐瑞<sup>1</sup>,朱江峰<sup>1</sup>,魏志义<sup>2</sup>

(1 西安电子科技大学 物理与光电工程学院,西安 710071)

(2 中国科学院物理研究所 北京凝聚态物理国家研究中心,北京 100190)

**摘要:**高功率、窄脉宽的超快激光在基础科学研究、精密制造和生物医学等领域扮演着越来越重要的角色。在众多飞秒光源中,激光二极管泵浦的掺镱全固态飞秒激光器具有输出特性优异、结构紧凑、简单可靠、成本低廉等优点,成为超快激光领域的研究热点之一。特别是克尔透镜锁模的掺镱全固态飞秒激光器,有望兼备同时输出百瓦级平均功率、百飞秒级脉冲宽度的能力。本文总结了近年来克尔透镜锁模掺镱块材料全固态激光器在高功率窄脉冲输出方面的研究成果,并对实现百瓦级平均功率、十微焦级脉冲能量和高功率 GHz 重复频率运转给出了展望和方案设想。

**关键词:**超快激光;掺镱全固态激光器;克尔透镜锁模;高平均功率

中图分类号:TN216

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20215008.0850207

## Review of High-power Kerr-lens Mode-locked Yb-doped All-solid-state Lasers (Invited)

TIAN Wenlong<sup>1</sup>, XU Rui<sup>1</sup>, ZHU Jiangfeng<sup>1</sup>, WEI Zhiyi<sup>2</sup>

(1 School of Physics and Optoelectronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China)

(2 Beijing National Laboratory for Condensed Matter Physics and Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

**Abstract:** Ultrafast laser with high power and short pulse duration plays a more and more important role in basic scientific researches, precision machining and biomedicine etc. Among the various femtosecond light sources, the laser diode directly pumped Yb-doped all-solid-state bulk femtosecond laser has become one of the research hotspots in the ultrafast laser because of its advantages of compact structure, low cost, reliability and excellent output performance. In particular, the Kerr lens mode-locked Ytterbium-doped all-solid-state femtosecond laser is expected to deliver both an average power of one hundred watts and an pulse duration less than one hundred femtoseconds at the same time. This paper summarizes the research results of Kerr lens mode-locked ytterbium-doped bulky material all-solid-state lasers that generated short pulses with high average power in recent years, and looks forward to it. It also gives a prospect and plan for realizing the mode-locking operations with average power of one hundred watts, pulse energy of ten microjoules and high-power GHz repetition rate, respectively.

**基金项目:**国家自然科学基金(Nos. 61705174, 11774277, 61975071),科技部重点研发计划(No. 2017YFB0405202),陕西省自然科学基金研究计划(No.2019JCW-03),中央高校基本科研业务费(Nos. JB190501, ZD2006)

**第一作者:**田文龙(1990—),男,副教授,博士,主要研究方向为超快激光技术与太赫兹波。Email: wltian@xidian.edu.cn

**通讯作者:**朱江峰(1980—),男,教授,博士,主要研究方向为超快超强激光技术。Email: jzhu@xidian.edu.cn

魏志义(1963—),男,教授,博士,主要研究方向为超快超强激光技术、精密激光计测。Email: zywei@iphy.ac.cn

收稿日期:2021-05-30;录用日期:2021-06-30

<http://www.photon.ac.cn>

**Key words:** Ultrafast laser; Yb-doped All-solid-state laser; Kerr-lens Mode-locked; High average power  
**OCIS Codes:** 140.3480; 140.3580; 140.3615; 140.4050; 140.7090

## 0 引言

贝尔实验室的Knox教授说过：“普通激光不能干的工作，飞秒脉冲激光可以做；普通激光可以干的工作，飞秒激光能够做得更好”。与常规连续或纳秒激光相比，飞秒激光具有更高的峰值功率、更宽的光谱带宽以及更好的时间分辨能力，在前沿科学研究如X射线产生<sup>[1]</sup>、激发THz辐射<sup>[2-3]</sup>、中红外飞秒激光产生<sup>[4]</sup>以及激光精密微纳加工<sup>[5]</sup>等领域中发挥着重要的作用。自1974年第一台飞秒激光器问世以来，随着超快激光技术以及相关材料器件的成熟，飞秒激光朝着脉冲宽度越来越短、平均功率越来越高、聚焦强度越来越强、波长范围越来越广等方向迅速发展。在激光脉冲宽度方面，锁模技术的进步和宽带的增益介质如液体染料或固体钛宝石晶体的发现，使人们可以从锁模激光振荡器直接获得小于10 fs的超短脉冲输出<sup>[6-7]</sup>，结合基于固体材料<sup>[8]</sup>或空芯光纤<sup>[9]</sup>的非线性压缩技术或相干合成技术<sup>[10]</sup>，可将脉冲在腔外进一步压缩至单个甚至亚光学周期宽度。基于啁啾脉冲放大技术(Chirped Pulse Amplification, CPA)，飞秒激光系统的峰值功率已经超过拍瓦(PW)，达到10 PW量级，聚焦强度已经从 $10^{15}$  W/cm<sup>2</sup>发展到了 $10^{23}$  W/cm<sup>2</sup><sup>[11]</sup>，而且目前基于光参量啁啾脉冲放大技术的100 PW超强激光系统在上海已经开始建设。此外，利用非线性频率变换包括高次谐波产生技术已经在极紫外(Extreme Ultraviolet, XUV)到太赫兹(Terahertz, THz)波段产生了飞秒激光脉冲。在高平均功率方面的发展，飞秒激光器前后经历了三个阶段：第一个阶段是20世纪70~80年代的飞秒染料激光器，虽然输出脉冲宽度非常短，但平均功率只有毫瓦到百毫瓦量级。第二个阶段是20世纪90年代出现的飞秒钛宝石激光器，经过钛宝石激光器可以直接输出倍频程的光谱、周期量级的脉冲宽度，放大后峰值功率达到了10 PW，但其平均功率却一般不超过20 W。一方面是受到泵浦源的限制，目前钛宝石激光系统的泵浦源是倍频的Nd激光器，不仅体积庞大、价格昂贵，而且功率水平还受到Nd激光器功率和倍频效率的限制，因此，目前超快激光领域一个重要的研究热点是基于半导体激光器(Laser Diode, LD)直接泵浦的钛宝石激光系统，但仍处于起步阶段；另一方面钛宝石激光器的量子效率较低，高功率泵浦下的热效应对输出激光参数影响较大，因此在高重频放大时往往需要对其进行低温制冷。第三个阶段是LD泵浦的Yb飞秒激光器。Yb激光介质具有非常小的量子损耗，可以用高功率LD直接泵浦，结合优秀的热管理方案，比如板条激光器、薄片激光器或利用光纤合束技术，Yb飞秒激光器的平均功率达到了千瓦级甚至上万瓦级<sup>[12-13]</sup>。

2014年，FATTAHI H等对飞秒激光的进一步发展进行了展望<sup>[14]</sup>，他将前40年迅速发展的飞秒激光器划分为两代：第一代染料激光器，只能获得非常短的脉冲宽度；第二代为基于CPA技术的固体激光器，主要以钛宝石激光器为主，可以在获得短脉冲宽度的同时兼顾非常强的聚焦强度。而下一代——即第三代飞秒激光技术，将是基于高平均功率Yb飞秒激光器驱动的光参量啁啾脉冲放大(Optical Parametric Chirped Pulse Amplification, OPCPA)，可集高平均功率、窄脉冲宽度以及强聚焦强度等特点于一身。因此发展高平均功率Yb飞秒激光器具有重要意义，也是如今科研人员的一个重要课题。Yb飞秒激光器可以分为振荡器和放大器，课题组已对Yb飞秒放大器进行了详细的综述<sup>[15-16]</sup>，本文主要介绍高功率Yb飞秒振荡器，其中重点关注克尔透镜锁模的Yb块材料全固态飞秒激光器。首先简单介绍掺镱全固态飞秒激光器，然后详细总结了国内外在这方面的研究成果，最后提出了课题组对实现更高平均功率输出的方案设想，关于Yb薄片振荡器的优秀综述可参考<sup>[17]</sup>。

## 1 掺镱全固态飞秒激光器简介

Yb<sup>3+</sup>离子能级结构简单，仅存在<sup>2</sup>F<sub>7/2</sub>与<sup>2</sup>F<sub>5/2</sub>两个电子态，它们分别斯塔克分裂为4个和3个子能级，因此激光运转于准三能级系统，避免了包括上转换、激发态吸收、浓度淬灭等额外增加损耗、降低转换效率的不利过程。Yb<sup>3+</sup>的最佳泵浦吸收波长为940~980 nm，因此掺Yb增益晶体可以十分有效地利用价格低廉的以InGaAs作为衬底的高功率LD泵浦。同时，由于掺Yb晶体的发射波长(~1 030 nm)非常接近泵浦波长，意味着极低的量子损耗，可以减轻增益晶体在高功率运转下的热负荷。Yb掺杂的激光介质种类繁多，但是为

了获得窄脉宽、高功率的飞秒脉冲激光输出,大多选用高热导率、高发射带宽和高发射截面的晶体,如 Yb:KGW<sup>[18]</sup>、Yb:CaF<sub>2</sub><sup>[19]</sup>、Yb:CaGaAlO<sub>4</sub>(Yb:CGA)<sup>[20]</sup>和 Yb:CaYAlO<sub>4</sub>(Yb:CYA)<sup>[21]</sup>等。图 1 总结了不同掺 Yb 增益晶体的发射带宽以及热导率。可以看出 Yb:Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Yb:Sc<sub>2</sub>O<sub>3</sub>和 Yb:YAG 晶体具有较好的导热率,但发射光谱带宽较小,其中 Yb:YAG 晶体生长、加工技术最为成熟,因此被广泛应用于高功率飞秒激光器,尤其是薄片或板条激光器中,而倍半氧化物由于晶体的熔点非常高,在高质量生长方面难度较大,因此,国内正在大力发展掺镱倍半氧化物陶瓷材料。相比之下,氟化物晶体 Yb:CaF<sub>2</sub>、Yb:SrF<sub>2</sub>和铝酸盐晶体 Yb:CGA、Yb:CYA 具有更宽的光谱带宽,足以支持产生几个光学周期的超短脉冲<sup>[22-23]</sup>,但热导率略小。

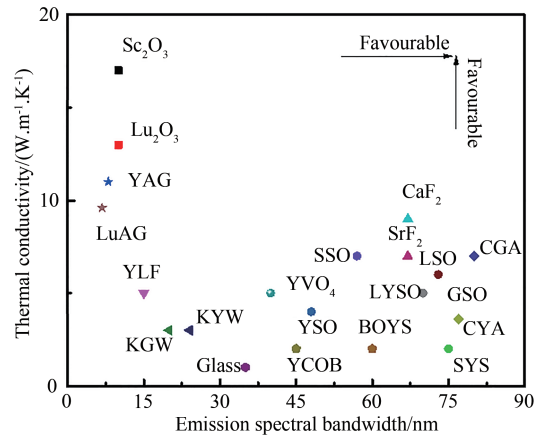


图 1 不同掺 Yb 增益介质的光谱带宽与热导率

Fig. 1 Emission spectral bandwidth and thermal conductivity of different Yb-doped gain medium

根据增益介质几何结构的不同,掺镱全固态激光器可以分为块材料激光器、薄片激光器<sup>[24]</sup>、板条激光器<sup>[25]</sup>以及光纤激光器<sup>[26]</sup>四种,如图 2 所示。由于有效的散热效果,薄片、板条和光纤结构的 Yb 飞秒放大器输出功率均已突破千瓦量级,基于相干合束技术,光纤放大器输出的平均功率最高已达 10.4 kW<sup>[13]</sup>。功率放大技术是人们追求更高平均功率的必要手段,但是也希望能够从结构简单的飞秒振荡器中直接输出尽量高的平均功率,以满足日益增长的需求。目前,从振荡器中直接获得高平均功率飞秒激光输出主要依靠薄片振荡器。其中,基于半导体可饱和吸收镜(Semiconductor Saturable Absorbance Mirror, SESAM)被动锁模的薄片振荡器,国际上最高锁模平均功率已经达到了 350 W,对应脉冲宽度为 940 fs,单脉冲能量为 39  $\mu$ J,重复频率为 8.88 MHz<sup>[12]</sup>;基于克尔透镜锁模(Kerr Lens Mode-locking, KLM)技术的薄片锁模振荡器,最高也已实现了 270 W 的平均功率输出,对应脉冲宽度为 330 fs,单脉冲能量为 14.4  $\mu$ J,重复频率为 18.8 MHz<sup>[27]</sup>。但薄片激光器泵浦结构复杂,难以获得高重复频率(如 GHz 以上)输出。而且常用的薄片晶体为 Yb:YAG,其发射带宽较小,难以获得高功率亚百飞秒脉冲。近年来,人们先后利用 Yb:Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub>和 Yb:CGA 晶体薄片获得了直接输出小于 100 fs 的克尔透镜锁模,但是由于高质量薄片本身的加工焊接难度较大,利用以上薄片获得亚百飞秒窄脉冲输出相应的平均功率仅为 1.6 W/35 fs<sup>[28]</sup>、5.1 W/62 fs<sup>[29]</sup>和 21 W/95 fs<sup>[30]</sup>。相比之下,虽然块材料飞秒激光器在热管理方面存在不足,但也缓解了对宽带增益介质加工质量的要求,目前基于克尔透镜锁模技术也已获得平均功率大于 10 W、脉冲宽度小于 100 fs 的输出<sup>[31]</sup>,其在兼顾高平均功率和窄脉冲宽度上的潜力正待进一步开发。

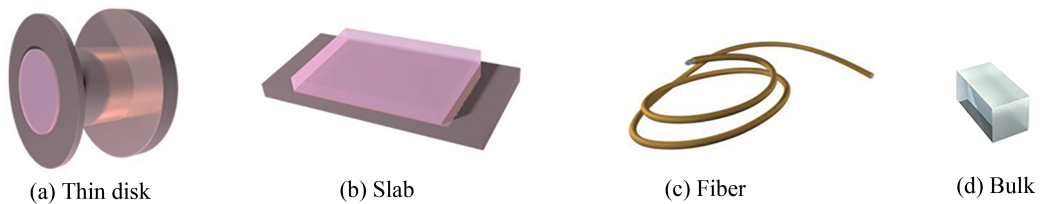


图 2 增益介质几何结构

Fig. 2 Geometry of gain medium



## 2 高功率克尔透镜锁模激光器研究进展

对于Yb固体激光器,克尔透镜锁模技术可以充分利用增益晶体宽发射光谱特性,是产生亚百飞秒窄脉冲输出的有效手段。但为了实现克尔透镜锁模,通常需要紧聚焦腔型使克尔介质(一般也是增益介质)处的激光光斑模式直径非常小以提供足够的自相位调制和自幅度调制,但高功率多模LD的光束质量很差,一方面无法聚焦到激光光斑模式大小导致泵浦一激光模式匹配较差,另一方面紧聚焦后瑞利长度变小,无法利用长晶体获得高平均功率输出,因此传统的克尔透镜锁模Yb固体激光器的输出功率仅为数十或者百毫瓦量级<sup>[32-33]</sup>。近年来,几种新方案的提出使克尔透镜锁模掺镱亚百飞秒全固态激光器实现了瓦级平均功率输出:第一种是在高功率多模LD泵浦下,借助SESAM器件启动锁模,而克尔透镜效应主要起到稳定与压缩脉冲的作用;第二种是把利用高功率高光束质量光纤激光器作为泵浦源;第三种则是通过引入双共焦腔将增益介质和克尔介质进行分离。表1总结对比了三种方案的特点,下面分别对基于这三种方案的高功率克尔透镜锁模激光器研究进展进行详细介绍。

表1 不同类型高功率克尔透镜锁模掺镱块材料激光器对比  
Table 1 Comparison of the different types of high-power Kerr-lens mode-locked Yb-doped bulk lasers

Type	SESAM assisted	Fiber laser pumped	LD pumped dual-confocal cavity
Pros	Self-starting	Short pulse duration High optical-optical efficiency	High average power Low cost
Cons	Output power is limited by the damage threshold of SESAM The home-made SESAM is not yet mature	Pump laser is high in cost and low in power not self-starting	Not self-starting

### 2.1 SESAM辅助的克尔透镜锁模激光器

SESAM辅助的克尔透镜锁模(KLM)又被称为KLM锁模,与纯SESAM被动锁模相比,这类锁模激光器能够输出更短的脉冲。2009年,日本电气通信大学的TOKURAKAWA M等凭借Yb:Sc<sub>2</sub>O<sub>3</sub>陶瓷增益介质实现了脉冲宽度小于60 fs的瓦级飞秒激光输出<sup>[34]</sup>,用于启动锁模的SESAM调制深度为1%,恢复时间为10 ps。2011年,他们又利用另一种倍半氧化物陶瓷Yb:Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub>实现了瓦级平均功率的亚百飞秒KLM锁模运转<sup>[35]</sup>。2013年,加拿大曼尼托巴大学的ZHAO Haitao等利用Yb:KGW晶体获得了功率和脉冲宽度分别为3 W、67 fs的锁模输出<sup>[36]</sup>。第二年,他们通过在腔内加入1:1的望远系统降低重复频率来提高峰值功率,获得了脉冲宽度85 fs、峰值功率1 MW的锁模结果<sup>[37]</sup>。2016年,该课题组的AKBARI R使用了恢复时间与带宽特性更好的QD-SESAM作为KLM锁模的启动器件,得到了90 fs、3.2 W的锁模结果<sup>[38]</sup>。2017年他又利用Yb:KGW晶体,获得了56 fs、1.95 W的KLM锁模输出<sup>[39]</sup>。2018年,加拿大曼尼托巴大学的SUJITH M等利用Yb:CGA晶体作为增益介质,实现了亚50 fs的KLM锁模<sup>[40]</sup>,其对应的1.7 MW的峰值功率为目前振荡器中使用Yb:CGA晶体获得的最高峰值功率。

尽管KLM锁模的掺镱全固态激光器已经实现了数瓦级的亚百飞秒脉冲输出,但是SESAM器件固有的损伤阈值限制了这类激光器输出功率的进一步提升。而且SESAM工艺较为复杂,国内尚不能实现批量国产化,也限制了此类激光器的广泛应用。摆脱SESAM器件,突破高功率纯克尔透镜锁模技术,成为了块材料激光器实现更高平均功率窄脉冲输出的关键。

### 2.2 光纤激光器泵浦的克尔透镜锁模激光器

目前掺镱光纤激光器可以在976~980 nm实现10 W量级的高功率输出<sup>[41]</sup>,而且具有非常优秀的光束质量和亮度,成为泵浦克尔透镜锁模掺镱激光器实现高平均功率窄脉冲输出的优质泵浦源,因此光纤激光器泵浦的克尔透镜锁模激光器得到广泛关注。2013年,法国波尔多大学的MACHINET G等首次报道了光纤激光器泵浦的克尔透镜锁模Yb:CaF<sub>2</sub>激光器<sup>[42]</sup>,平均功率为2.3 W的锁模结果让纯克尔透镜锁模掺镱全固态激光器的输出功率提高了一个数量级,同时这也是Yb:CaF<sub>2</sub>作为激光晶体的首次克尔透镜锁模运转。同年,他们通过优化腔内色散,使用更高功率的泵浦源和更高透过率的输出镜,将全固态瓦级飞秒激光的脉冲宽度带进亚50 fs领域<sup>[43]</sup>。2014年,基于光纤激光器泵浦的克尔透镜锁模Yb:CGA激光器,首次直接获得了



瓦级平均功率的亚 40 fs 超短脉冲输出<sup>[44]</sup>。

本课题组凭借早期对克尔透镜锁模技术的探索,在实现基于多种掺镱晶体的低功率克尔透镜锁模运转的经验积累下<sup>[45]</sup>,近两年在光纤激光器泵浦的高功率克尔透镜锁模掺镱全固态激光器研究中,也取得了一系列不错的研究成果<sup>[46-48]</sup>。2018年,基于新型的 Yb:YSO 晶体,在最高输出功率为 10 W、发射波长为 976 nm 的单模光纤激光器泵浦下,得到了平均功率为 2 W、脉冲宽度为 95 fs、重复频率为 137 MHz 的高功率克尔透镜锁模运转,对应的单脉冲能量为 14.8 nJ<sup>[46]</sup>,这是国际上首次利用正硅酸盐晶体实现瓦级亚百飞秒脉冲激光输出的工作。2019年,利用 Yb:CYA 作为增益介质,结合腔外压缩,获得了脉冲宽度为 36 fs、平均功率为 2 W 的锁模结果<sup>[47]</sup>,是目前掺镱全固态亚 40 fs 激光器输出的最高平均功率。振荡器光路如图 3(a)所示,当进行克尔透镜锁模时,图中的 SESAM 会被 GTI4 替代,通过优化其相对位置,得到了不同宽度的锁模光谱,如图 3(b)所示,图 3(c)为压缩后的脉冲自相关曲线。2021年,我们又突破了光纤激光器泵浦的高功率、高重频克尔透镜锁模技术,基于 Yb:KGW 晶体,得到了平均功率为 1.7 W、脉冲宽度为 145 fs 的克尔透镜锁模运转<sup>[48]</sup>,激光器整体腔长仅为 15 cm,对应重复频率为 2 GHz。实验装置与结果如图 4 所示,这是目前国际上输出功率最高的 GHz 重频克尔透镜锁模飞秒激光器。

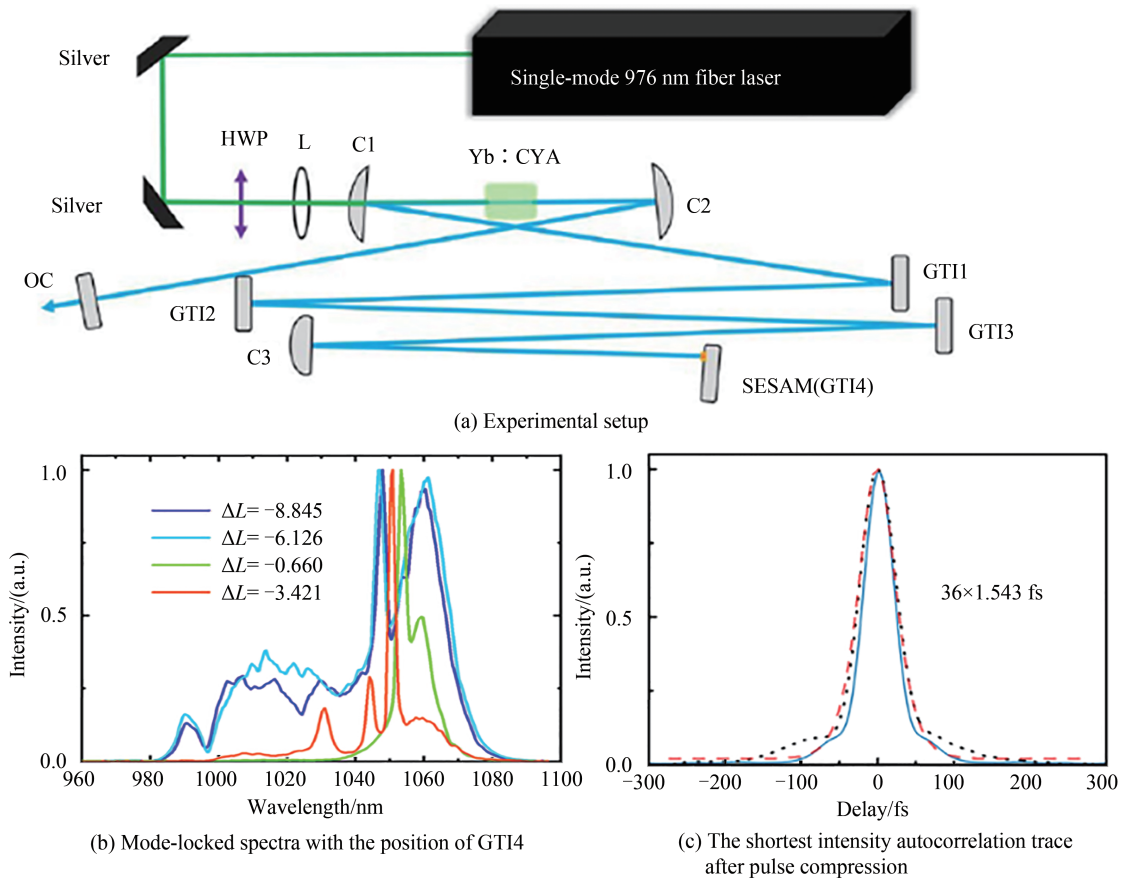
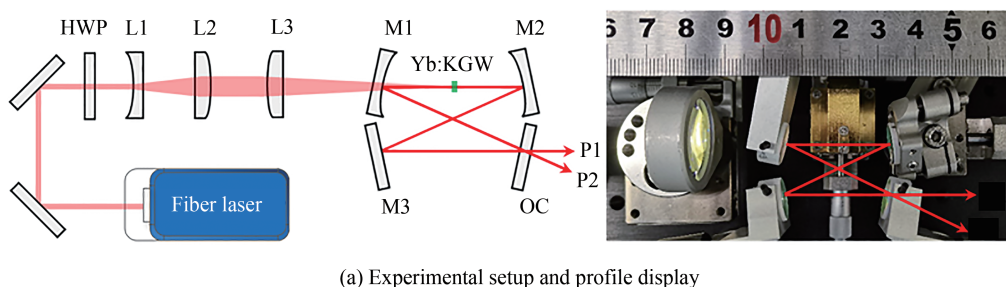
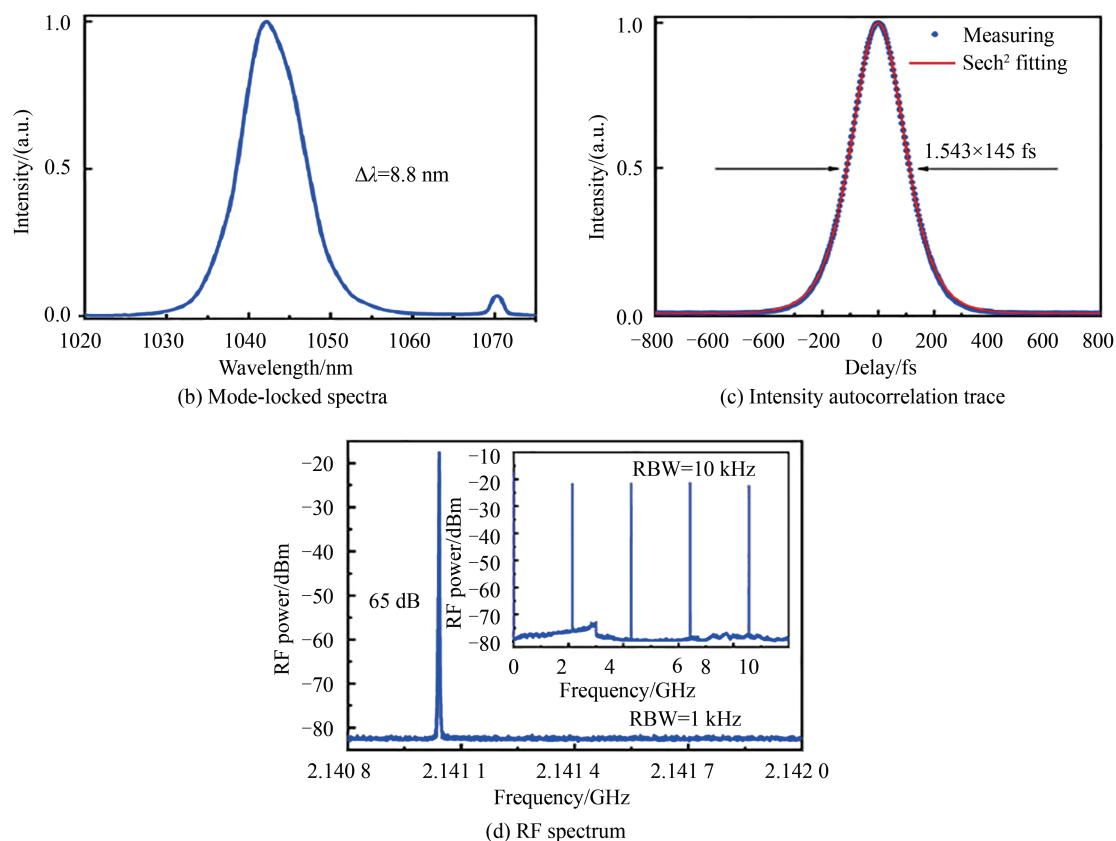


图3 单模光纤激光器泵浦的克尔透镜锁模 Yb:CYA 激光器<sup>[47]</sup>  
 Fig. 3 Experimental setup of the single-mode fiber-laser-pumped Kerr-lens-mode-locked Yb:CYA laser<sup>[47]</sup>



(a) Experimental setup and profile display

图4 高重复率克尔透镜锁模 Yb:KGW 激光器<sup>[48]</sup>Fig. 4 High repetition rate Kerr-lens mode-locked Yb:KGW laser<sup>[48]</sup>

### 2.3 LD泵浦的双共焦腔克尔透镜锁模激光器

光纤激光器泵浦的掺镱全固态激光器虽然已经实现了瓦级克尔透镜锁模运转,但由于光纤激光器的成本高昂,而且最大泵浦功率比较有限,其平均输出功率目前普遍局限在2~3 W。更高功率的克尔透镜锁模仍然需要利用多模LD进行泵浦。为了解决高功率多模LD无法有效泵浦克尔透镜锁模激光器的难题,受到薄片激光器和钛宝石激光器的启发<sup>[49-50]</sup>,并根据早期高功率LD泵浦的克尔透镜锁模实验探索<sup>[51]</sup>,课题组近年来发展了一种基于双共焦谐振腔的高功率克尔透镜锁模技术,通过将克尔介质和增益介质分离,使得高平均功率和窄脉冲宽度同时得到了保证。

2018年,基于Yb:CYA晶体的双共焦腔克尔透镜锁模振荡器获得了平均功率为1.5 W的激光输出<sup>[52]</sup>,相应的脉冲宽度为68 fs、单脉冲能量为30 nJ,如图5所示。此结果为当时国际上报道的输出单脉冲能量最高的Yb:CYA振荡器。2019年,通过优化晶体掺杂浓度、输出镜透过率、色散补偿量等参数,首次利用Yb:CYA晶体中实现了平均功率大于5 W的飞秒脉冲输出,对应的脉冲宽度为59 fs、峰值功率为1.85 MW<sup>[53]</sup>,这也是当时国际上直接输出峰值功率最高的亚百飞秒掺镱激光器。2021年,我们对双共焦腔进一步优化,使其结构更加紧凑,在34 W泵浦功率、利用20%的输出镜、腔内补充 $-5900 \text{ fs}^2$ 的群延迟色散时,得到了平均功率为10.4 W、脉冲宽度为98 fs的克尔透镜锁模稳定运转<sup>[31]</sup>。激光器光路图与输出表现如图6所示,锁模在1 h内的功率抖动小于0.3%,是国际上首次报道的10 W量级亚百飞秒克尔透镜锁模掺镱全固态块材料飞秒激光器。

除Yb:CYA晶体外,其他课题组利用Yb:KGW和Yb:CGA晶体也先后实现了基于双共焦腔结构的高功率克尔透镜锁模运转。2018年,加拿大曼尼托巴大学的AKBARI R利用一块1.6%掺杂、Ng切割的Yb:KGW晶体,实现了平均功率为4.2 W、脉冲宽度为69 fs的克尔透镜锁模运转<sup>[54]</sup>,不过此状态下脉冲激光伴有强烈的直流成分。2019年,中国原子能科学研究所的孟祥昊利用5%掺杂的Yb:KGW晶体,在透过率为2%的输出镜下,得到了平均功率为4.05 W、脉冲宽度为73 fs的锁模结果<sup>[55]</sup>。2020年,孟祥昊利用基于Yb:CGA晶体的双共焦谐振腔获得了平均功率为4.5 W,脉冲宽度为93 fs的克尔透镜锁模运转,在大于25 W泵浦功率下保持了优秀的输出激光光束质量<sup>[56]</sup>。

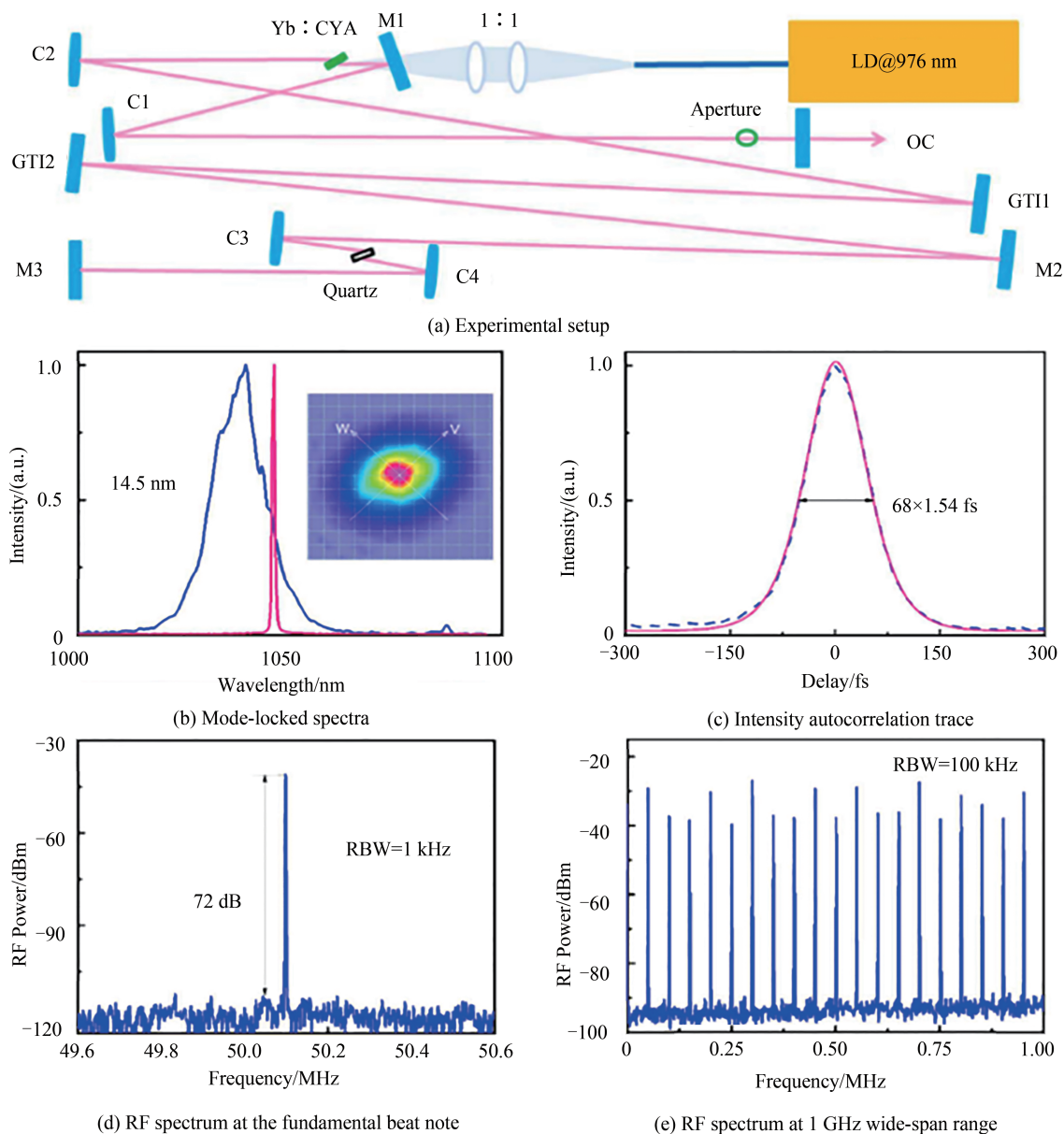


图5 多模LD泵浦的克尔透镜锁模Yb:CYA激光器<sup>[52]</sup>  
 Fig. 5 Multimode LD pumped Kerr-lens mode-locked Yb:CYA laser<sup>[52]</sup>

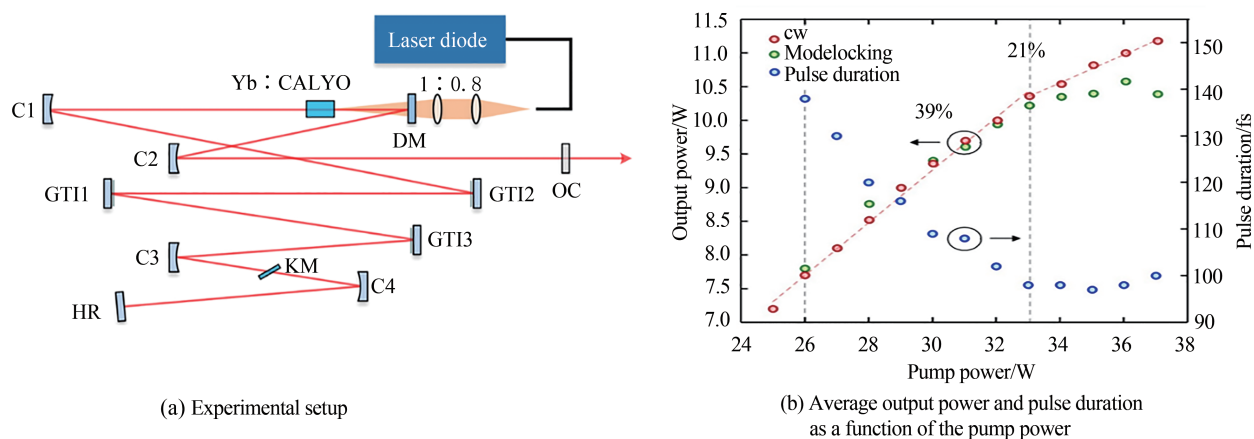


图6 高功率克尔透镜锁模的Yb:CALYO激光器<sup>[31]</sup>  
 Fig. 6 High-power Kerr-lens mode-locked Yb:CALYO laser<sup>[31]</sup>



### 3 讨论

与薄片、板条以及光纤结构的掺镱增益介质相比,块材料介质结构简单,便于生长加工,价格便宜,而且可选的种类多种多样(晶体、陶瓷、玻璃以及不同的基底材料),因此在飞秒激光器应用中具有很大的灵活性。如图7所示,基于多种掺镱块材料增益介质,人们采用克尔透镜锁模技术已经成功实现了直接输出瓦级平均功率、亚百飞秒脉冲宽度的飞秒振荡器,最高平均功率达到10 W,单脉冲能量在百纳焦量级。其中,基于双共焦腔结构的克尔透镜锁模技术一方面可以充分利用高功率LD直接泵浦,另一方面可以通过灵活调控自相位调制获得宽光谱输出(光谱带宽可以超过晶体的发射带宽),理论上输出功率仅受限于块材料激光器的热管理能力,因此在高功率、窄脉冲输出方面仍有极大的潜力。利用传统的水冷散热方式,块材料介质可承受的泵浦功率在百瓦量级(不发生明显的光束质量和稳定性的恶化),相应的锁模激光输出功率可达~30 W。从目前10 W平均功率输出提高到30 W,需要对双共焦克尔透镜锁模激光器进行如下改进:增加泵浦光斑半径避免泵浦功率密度过高引起的增益晶体物理和化学性质恶化;通过增加腔镜曲率半径、改变克尔透镜锁模工作的稳区位置对模式匹配进行优化;采用相应的色散管理来平衡由功率的提升而增强的自相位调制强度;采用更大透过率的OC以抑制高泵浦功率下脉冲中的连续直流成分等。

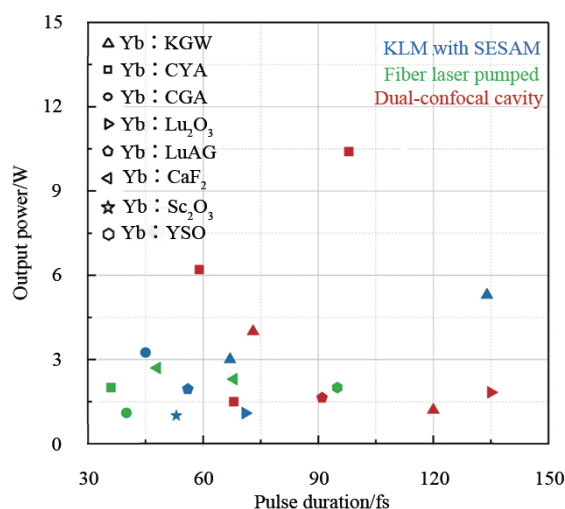


图7 高功率克尔透镜锁模Yb全固态激光器总结

Fig. 7 Summary of Kerr-lens mode-locked Yb all-solid-state lasers with high average power

更进一步,采用复杂的热管理方式,如TEC制冷或者液氮低温制冷,可大幅度提高块材料增益介质可承受的泵浦功率,从而使直接输出平均功率大于100 W的亚百飞秒克尔透镜锁模激光也成为可能。目前已经报道了基于低温制冷的全固态掺镱块材料500 W连续光输出结果<sup>[57]</sup>为此提供了参考。尽管采用这种热管理方式大大增加了块材料激光器的复杂度和成本,但仍然具有增益晶体参数选择的灵活性,较薄片和板条等结构,在产生高功率、窄脉冲方面具有优势。值得一提的是,掺镱增益介质的发射光谱特性和温度有关,也因材料而异,如Yb:YAG晶体的发射光谱带宽在低温下迅速变小<sup>[58]</sup>,而Yb,Nd:CaF<sub>2</sub>晶体的发射光谱带宽变化不大<sup>[59]</sup>,因此要基于低温制冷实现百瓦亚百飞秒的高功率克尔透镜锁模激光器,还需要对不同的增益介质低温下的发射特性进行系统分析,选择合适的增益介质,目前这方面的工作有待进一步开展。

通过降低振荡器的重复频率,可以有效提升单脉冲能量。通过在腔内插入保Q多通腔将谐振腔腔长拉伸至数十米,可以将重复频率降低到数MHz,通过腔倒空技术可以使重复频率降低至MHz以下,使相应的单脉冲能量提高1~2个数量级。该方案已经在早期的钛宝石激光器和现在的一些SESAM锁模的掺镱激光器中得到了应用<sup>[60-62]</sup>。将此方案应用到目前的高功率克尔透镜锁模全固态激光器中,有望得到MHz重复频率、10 μJ量级的亚百飞秒脉冲输出。聚焦后的峰值强度可以超过 $10^{14}$  W/cm<sup>2</sup>,足以开展高次谐波产生实验研究,不仅大大简化了高次谐波驱动源,而且兆赫兹重频也非常有利于缓解空间电荷效应,增加XUV光子通量,缩短信号采集时间并提高信噪比。图8和图9分别给出了一种基于高功率双端泵浦和低温制冷技术的百瓦平均功率克尔透镜激光器方案设想和基于多通腔和腔倒空技术的大能量克尔透镜锁模激光器方案设想。

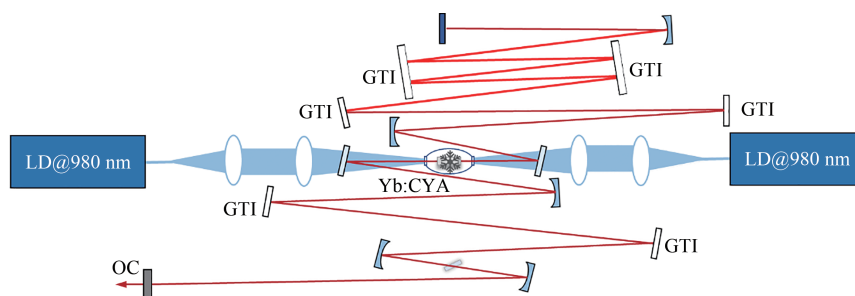


图8 利用双端高功率泵浦和低温制冷技术实现百瓦量级克尔透镜锁模激光器方案设计  
Fig. 8 Design of the hundred watts KLM laser based on dual-end high-power pumping and cryogenic cooling

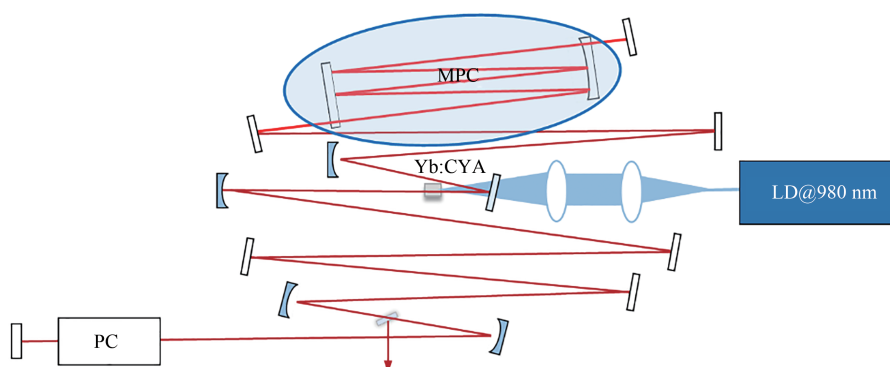


图9 基于腔倒空与多通腔的MHz、10 μJ量级大能量克尔透镜锁模激光器方案设计  
Fig. 9 Design of the MHz, 10-μJ KLM laser based on the cavity dumping and multi-pass cavity

另外,减小振荡器的腔长获得高功率、高重频(GHz以上)亚百飞秒激光脉冲对光学频率梳应用具有极大的吸引力,也是目前高功率掺镱全固态飞秒激光器的一个重要发展方向。目前LD泵浦的GHz重频克尔透镜锁模激光器的输出功率仍只有百毫瓦量级,相信利用如图10所示的双共焦腔结构,也可以在高平均功率方面得到突破,借助高功率、高重频克尔透镜锁模全固态飞秒激光器发展性能参数优异的极紫外光学频率梳或中红外光学频率梳,将在类氢或类氦原子体系的精密谱测量和分子指纹图谱光谱分析等前沿科学和先进应用研究中发挥重要作用。

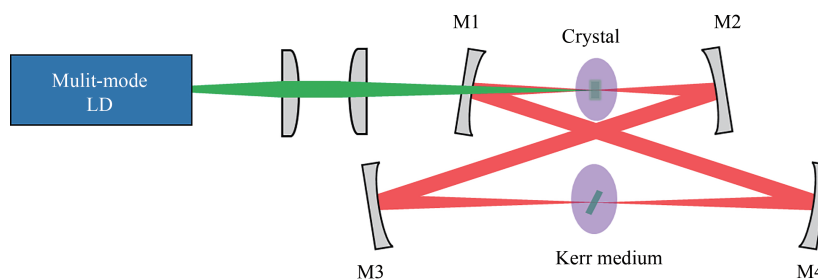


图10 LD泵浦GHz克尔透镜锁模掺镱全固态激光器方案设计  
Fig. 10 Design of the LD pumped GHz KLM Yb-doped all-solid-state laser

## 4 结论

本文对高功率克尔透镜锁模的掺镱全固态飞秒激光器进行了分类和总结,认为基于双共焦腔结构的高功率克尔透镜锁模技术目前还远没有得到充分开发,其能够支持的高功率输出理论上受限于热管理能力,因此尽管目前最高输出功率只有10 W,但从振荡器直接输出百瓦平均功率或十微焦量级单脉冲能量具有极大的可行性。

## 参考文献

- [1] PAUL P M, TOMA E S, BREGER P, et al. Observation of a train of attosecond pulses from high harmonic generation[J]. *Science*, 2001, 292(5522): 1689-1692.
- [2] TIAN Wenlong, CIRMI G, OLGUN H T, et al.  $\mu\text{J}$ -level multi-cycle terahertz generation in a periodically poled Rb:KTP crystal[J]. *Optics Letters*, 2021, 46(4): 741-744.
- [3] E Yiwen, ZHANG Liangliang, TCYPKIN Anton, et al. Broadband THz sources from gases to liquids[J]. *Ultrafast Science*, 2021, 2021: 9892763.
- [4] MOSES J, HUANG S W, HONG K H, et al. Highly stable ultrabroadband mid-IR optical parametric chirped-pulse amplifier optimized for superfluorescence suppression[J]. *Optics Letters*, 2009, 34(11): 1639-1641.
- [5] MOMMA C, NOLTE S, CHICHKOV B N, et al. Precise laser ablation with ultrashort pulses[J]. *Applied Surface Science*, 1997, 109: 15-19.
- [6] FORK R L, CRUZ C H B, BECKER P C, et al. Compression of optical pulses to six femtoseconds by using cubic phase compensation[J]. *Optics Letters*, 1987, 12(7): 483-485.
- [7] JUNG I D, KÄRTNER F X, MATUSCHEK N, et al. Semiconductor saturable absorber mirrors supporting sub-10-fs pulses[J]. *Applied Physics B*, 1997, 65(2): 137-150.
- [8] ZHAO Kun, XU Siyuan, JIANG Yujiao, et al. Research progress on octave supercontinuum generation in solid medium[J]. *Acta Physica Sinica*, 2018, 67(12): 78-85  
赵昆, 许思源, 江昱佼, 等. 基于固体介质的倍频程连续光谱产生的研究进展[J]. *物理学报*, 2018, 67(12): 78-85.
- [9] EMAURY F, SARACENO C J, DEBORD B, et al. Efficient spectral broadening in the 100-W average power regime using gas-filled kagome HC-PCF and pulse compression[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(24): 6843-6846.
- [10] WIRTH A, HASSAN M T, GRGURAŠ I, et al. Synthesized light transients[J]. *Science*, 2011, 334(6053): 195-200.
- [11] JIN W Y, YEONG G K, IL W C, et al. Realization of laser intensity over  $10^{23}\text{ W/cm}^2$ [J]. *Optica*, 2021, 8(5): 630-635.
- [12] SALTARELLI F, GRAUMANN I J, LANG L, et al. Power scaling of ultrafast oscillators: 350-W average-power sub-picosecond thin-disk laser[J]. *Optics Express*, 2019, 27(22): 31465-31474.
- [13] MÜLLER M, ALESHIRE C, KLENKE A, et al. 10.4 kW coherently combined ultrafast fiber laser[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(11): 3083-3086.
- [14] FATTAHI H, BARROS H G, GORJAN M, et al. Third-generation femtosecond technology[J]. *Optica*, 2014, 1(1): 45-63.
- [15] BAI Chuan, TIAN Wenlong, WANG Geyang, et al. Progress on Yb-doped all-solid-state femtosecond laser amplifier with high repetition rate[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(5): 0501011.  
白川, 田文龙, 王阁阳, 等. 高重复全固态掺镱飞秒激光放大器研究进展[J]. *中国激光*, 2021, 48(5): 0501011.
- [16] WANG Geyang, LV Renchong, XU Siyuan, et al. High repetition rate ultrafast laser technology for driving high-order harmonic generation[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2021, 66(8): 924-939.  
王阁阳, 吕仁冲, 许思源, 等. 高重复频率高次谐波驱动源技术[J]. *科学通报*, 2021, 66(8): 924-939.
- [17] SARACENO C J, SUTTER, D, METZGER T, et al. The amazing progress of high-power ultrafast thin-disk lasers[J]. *Journal of the European Optical Society Rapid Publications*, 2019, 15(1): 15.
- [18] LAGATSKY A A, PODLIPENSKY A V, HUBER G, et al. Pulsed laser operation of Yb-doped KY(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> and KGd(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>[J]. *Optics Letters*, 1997, 22(17): 1317-1319.
- [19] SIEBOLD M, BOCK S, SCHRAMM U, et al. Yb:CaF<sub>2</sub>-a new old laser crystal[J]. *Applied Physics B*, 2009, 97(2): 327-338.
- [20] ZAOUTER Y, DIDIERJEAN J, GEORGES P, et al. 47-fs diode-pumped Yb<sup>3+</sup>:CaGdAlO<sub>4</sub> laser[J]. *Optics Letters*, 2006, 31(1): 119-121.
- [21] LI Dongzhen, XU Xiaodong, ZHU Haomiao, et al. Characterization of laser crystal Yb:CaYAlO<sub>4</sub>[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2011, 28(7): 1650-1654.
- [22] GAO Ziyue, ZHU Jiangfeng, WANG Junli, et al. Generation of 33 fs pulses directly from a Kerr-lens mode-locked Yb:CaYAlO<sub>4</sub> laser[J]. *Photonics Research*, 2015, 3(6): 335-338.
- [23] MA Jie, YANG Fan, GAO Wenlan, et al. Sub-five-optical-cycle pulse generation from a Kerr-lens mode-locked Yb:CaYAlO<sub>4</sub> laser[J]. *Optics Letters*, 2021, 46(10): 2328-2331.
- [24] SARACENO C J, EMAURY F, SCHRIEBER C, et al. Toward millijoule-level high-power ultrafast thin-disk oscillators[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2015, 21(1): 106-123.
- [25] RUSSBUELDT 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.
- [26] ORTAÇ B, BAUMGARTL M, LIMPERT J, et al. Approaching microjoule-level pulse energy with modelocked femtosecond fiber lasers[J]. *Optics Letters*, 2009, 34(10): 1585-1587.
- [27] BRONS J, PERVAK V, FEDULOVA E, et al. Energy scaling of Kerr-lens mode-locked thin-disk oscillators[J].



- Optics Letters, 2014, 39(22): 6442-6445.
- [28] PARADIS C, MODSCHING N, WITTEWER V J, et al. Generation of 35-fs pulses from a Kerr lens mode-locked Yb: Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> thin-disk laser[J]. Optics Express, 2017, 25(13): 14918-14925.
- [29] DIEBOLD A, EMAURY F, SCHRIBER C, et al. SESAM mode-locked Yb:CaGdAlO<sub>4</sub> thin disk laser with 62 fs pulse generation[J]. Optics Letters, 2013, 38(19): 3842-3845.
- [30] MODSCHING N, DRS J, FISCHER J, Sub-100-fs Kerr lens mode-locked Yb: Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> thin-disk laser oscillator operating at 21 W average power[J]. Optics Express. 2019, 27(11): 16111-16120.
- [31] TIAN Wenlong, XU Rui, ZHENG Li, et al. 10-W-scale Kerr-lens mode-locked Yb: CALYO laser with sub-100-fs pulses[J]. Optics Letters, 2021, 46(6): 1297-1300.
- [32] TIAN Wenlong, WANG Zhaohua, WEI Long, et al. Diode-pumped Kerr-lens mode-locked Yb:LYSO laser with 61fs pulse duration[J]. Optics Express, 2014, 22(16): 19040-19046.
- [33] ZHANG Jinwei, HAN Hainian, TIAN Wenlong, et al. Diode-pumped 88-fs kerr-lens mode-locked Yb: Y<sub>3</sub>Ga<sub>5</sub>O<sub>12</sub> crystal laser[J]. Optics Express, 2013, 21(24): 29867 - 29873.
- [34] TOKURAKAWA M, SHIRAKAWA A, UEDA K, et al. Diode-pumped ultrashort-pulse generation based on Yb<sup>3+</sup>: Sc<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and Yb<sup>3+</sup>:Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ceramic multi-gain-media oscillator[J]. Optics Express, 2009, 17(5): 3353-3361.
- [35] TOKURAKAWA M, SHIRAKAWA A, UEDA K, et al. Ultrashort pulse generation from diode pumped mode-locked Yb<sup>3+</sup>:sesquioxide single crystal lasers[J]. Optics Express, 2011, 19(4): 2904-2909.
- [36] ZHAO Haitao, MAJOR A. Powerful 67 fs Kerr-lens mode-locked prismless Yb: KGW oscillator[J]. Optics Express, 2013, 21(26): 31846-31851.
- [37] ZHAO Haitao, MAJOR A. Megawatt peak power level sub-100 fs Yb: KGW oscillators [J]. Optics Express, 2014, 22(25): 30425-30431.
- [38] AKBARI R, ZHAO Haitao, FEDOROVA K A, et al. Quantum-dot saturable absorber and kerr lens mode-locked Yb: KGW Laser with >300 kW of peak power[J]. Optics Letters, 2016, 41(16): 3771-3774.
- [39] AKBARI R, FEDEROVA K A, RAFAILOV E U, et al. Diode-pumped ultrafast Yb: KGW laser with 56 fs pulses and multi-100 kW peak power based on SESAM and Kerr-lens mode locking[J]. Applied Physics B, 2017, 123(4): 123.
- [40] SUJITH M, ARKADY M. Diode-pumped 45fs Yb: CALGO laser oscillator with 1.7MW of peak power [J]. Optics Letters, 2018, 43(10): 2324-2327.
- [41] CHEN Maoni, CAO Jianqiu, HUANG Zhihe, et al. Research progress on continuous-wave fiber lasers operating around 980 nm[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(4): 0401013.  
陈毛妮, 曹涧秋, 黄值河, 等. 980 nm波段连续光纤激光器的研究进展[J]. 中国激光, 2021, 48(4): 0401013.
- [42] MACHINET G, SEVILLANO P, GUICHARD F, et al. High-brightness fiber laser-pumped 68 fs-2.3 W Kerr-lens mode-locked Yb:CaF<sub>2</sub> oscillator[J]. Optics Letters, 2013, 38(20): 4008-4010.
- [43] SÉVILLANO P, MACHINET G, DUBRASQUET R, et al. Sub-50 fs, Kerr-lens mode-locked Yb: CaF<sub>2</sub> laser oscillator delivering up to 2.7 W[C]. Advanced Solid-state Lasers Congress, 2013: AF3A.6.
- [44] SÉVILLANO P, GEORGES P, DRUON F, et al. 32-fs Kerr-lens mode-locked Yb: CaGdAlO<sub>4</sub> oscillator optically pumped by a bright fiber laser[J]. Optics Letters, 2014, 39(20): 6001-6004.
- [45] ZHU Jiangfeng, TIAN Wenlong, GAO Ziye, et al. Diode-pumped all-solid-state femtosecond Yb Laser oscillators[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 44(9): 0900001.  
朱江峰, 田文龙, 高子叶, 等. 二极管泵浦全固态飞秒Yb激光振荡器[J]. 中国激光, 2021, 44(9): 0900001.
- [46] TIAN Wenlong, ZHU Jiangfeng, PENG Yinnan, et al. High power sub 100-fs Kerr-lens mode-locked Yb: YSO laser pumped by single-mode fiber laser[J]. Optics Express, 2018, 26(5): 5962-5969.
- [47] TIAN Wenlong, WANG Geyang, ZHANG Dacheng, et al. Sub-40-fs high-power Yb: CALYO laser pumped by single-mode fiber laser[J]. High Power Laser Science and Engineering, 2019, 7(4): 50-54.
- [48] ZHENG Li, TIAN Wenlong, LIU Han, et al. 2-GHz watt-level Kerr-lens mode-locked Yb: KGW laser [J]. Optics Express, 2021, 29(9): 12950-12957.
- [49] ELL R, MORGNER U, KÄRTNER F X, et al. Generation of 5-fs pulses and octave-spanning spectra directly from a Ti: sapphire laser[J]. Optics Letters, 2001, 26(6): 373-375.
- [50] PRONIN O, BRONS J, GRASSE C, et al. High-power 200 fs Kerr-lens mode-locked Yb: YAG thin-disk oscillator[J]. Optics Letters, 2011, 36(24): 4746-4748.
- [51] ISHIKAWA T, EILANLOU A A, NABEKAWA Y, et al. Kerr lens mode-locked Yb: Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> bulk ceramic oscillator pumped by a multimode laser diode[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2015, 54(7): 072703.1-072703.8.
- [52] TIAN Wenlong, PENG Yinnan, ZHANG Zhiyue, et al. Diode-pumped power scalable Kerr-lens mode-locked Yb: CYA laser[J]. Photonics Research, 2018, 6(2): 127-131.
- [53] TIAN Wenlong, YU Chen, ZHU Jiangfeng, et al. Diode-pumped high-power sub-100 fs Kerr-lens mode-locked Yb: CaYAlO<sub>4</sub> laser with 1.85 MW peak power[J]. Optics Express, 2019, 27(15): 21448-21454.

- 
- [54] AKBARI R, MAJOR A. Kerr-lens mode locking of a diode-pumped Yb:KGW laser using an additional intracavity Kerr medium[J]. *Laser Physics Letters*, 2018, 15(8): 085001.
- [55] MENG Xianghao, LV Chong, LIU Qiushi, et al. Diode-pumped Yb:KGW laser with 73 fs pulse and 0.72 MW peak power based on Kerr-lens mode locking[J]. *Applied Physics B*, 2019, 125(9): 166.
- [56] MENG Xianghao, LV Chong, ZHAO Baozhen, et al. 93 fs pulses at watt-level powers from a diode pumped Yb:CaGdAlO<sub>4</sub> laser[J]. *Optics & Laser Technology*, 2020, 125: 106020.
- [57] KELLERT M, DEMIRBAS U, THESINGA J, et al. High power (>500W) cryogenically cooled Yb:YLF cw-oscillator operating at 995nm and 1019nm using E//c axis for lasing[J]. *Optics Express*, 2021, 29(8): 11674-11682.
- [58] DONG Jun, MICHAEL B, MAO Yanli, et al. Dependence of the Yb<sup>3+</sup> emission cross section and lifetime on temperature and concentration in yttrium aluminum garnet[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2003, 20(9): 1975-1979.
- [59] PUGŹLYS A, ANDRIUKAITIS G, SIDOROV D, et al. Spectroscopy and lasing of cryogenically cooled Yb, Na:CaF<sub>2</sub>[J]. *Applied Physics B*, 2009, 97: 339-350.
- [60] PALMER G, EMONS M, SIEGEL M, et al. Passively mode-locked and cavity-dumped Yb:KY(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> oscillator with positive dispersion[J]. *Optics Express*, 2007, 15(24): 16017-16021.
- [61] SIEGEL M, PFULLMANN N, PALMER G, et al. Microjoule pulse energy from a chirped-pulse Ti:sapphire oscillator with cavity dumping[J]. *Optics Letters*, 2009, 34(6): 740-742.
- [62] PALMER G, SCHULTZE M, EMONS M, et al. 12 MW peak power from a two-crystal Yb:KYW chirped-pulse oscillator with cavity-dumping[J]. *Optics Express*, 2010, 18(18): 19095-19100.