

# 二极管抽运全固态飞秒 Yb 激光振荡器

朱江峰<sup>1</sup>, 田文龙<sup>1</sup>, 高子叶<sup>1</sup>, 魏志义<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>西安电子科技大学物理与光电工程学院, 陕西 西安 710071;

<sup>2</sup>中国科学院物理研究所北京凝聚态物理国家实验室, 北京 100190

**摘要** 二极管抽运的全固态锁模 Yb 激光器能够在 1  $\mu\text{m}$  附近输出高平均功率窄脉冲宽度的飞秒激光, 在超快非线性频率变换、飞秒光学频率梳、超快光谱学等领域具有重要应用。利用被动锁模技术和克尔透镜锁模技术, 人们在一系列新型 Yb 掺杂激光介质中实现了飞秒锁模激光运转。介绍了近年来在二极管抽运全固态飞秒 Yb 激光器的研究进展, 并展望了进一步提高输出功率和缩短脉冲宽度的技术途径及发展前景。

**关键词** 激光器; 二极管抽运激光器; 全固态激光器; 被动锁模; 克尔透镜锁模; 飞秒激光

中图分类号 TN248

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0900001

## Diode-Pumped All-Solid-State Femtosecond Yb Laser Oscillators

Zhu Jiangfeng<sup>1</sup>, Tian Wenlong<sup>1</sup>, Gao Ziyue<sup>1</sup>, Wei Zhiyi<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>School of Physics and Optoelectronic Engineering, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China;

<sup>2</sup>Beijing National Laboratory for Condensed Matter Physics, Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

**Abstract** Diode-pumped all-solid-state mode-locked Yb lasers can generate femtosecond lasers with high average power and narrow pulse width in 1  $\mu\text{m}$  region. The lasers have important applications in such fields as ultrafast nonlinear frequency conversion, femtosecond optical frequency comb, and ultrafast spectroscopy. Using passive mode-locking and Kerr-lens mode-locking technologies, the femtosecond laser operation is realized in a series of novel Yb-doped laser mediums. In this paper, the progress of diode-pumped all-solid-state mode-locked femtosecond Yb lasers is reviewed. The technical approaches and development prospects of power scaling and pulse shortening are proposed as well.

**Key words** lasers; diode-pumped lasers; all-solid-state lasers; passive mode-locking; Kerr-lens mode-locking; femtosecond lasers

**OCIS codes** 140.3480; 140.3615; 140.4050; 140.7090

## 1 引言

由于具有皮秒或飞秒量级的时间尺度以及非常高的峰值功率, 超短脉冲激光在科研、工业、医疗、信息以及军事等领域扮演着重要的角色。尤其是近些年, 精密微纳加工、生物医学、科学研究以及超高速光通信等众多领域对高平均功率飞秒激光器的需求方兴未艾。1991 年出现的基于克尔透镜锁模(KLM)机制的飞秒钛宝石激光器<sup>[1]</sup>, 经过二十多年的发展, 已经成为当下最为成熟且应用最为广泛的超快激光光源。目前, 脉冲宽度从周期量级(约 5 fs)到百飞秒的飞秒钛宝石激光振荡器, 以及脉冲能量为 10 J 量级、峰值功率达百太瓦的钛宝石放大系统都已经商品化。但是, 对于飞秒钛宝石振荡器而言, 其本身仍存在一定的局限性: 1) 钛

收稿日期: 2017-04-10; 收到修改稿日期: 2017-04-20

基金项目: 国家自然科学基金(61205130)、科技部国家重大科学仪器设备开发专项(2012YQ120047)、科技部国家重点研发计划(2016YFB0402105)

作者简介: 朱江峰(1980—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事超快激光技术及应用方面的研究。

E-mail: jfzhu@xidian.edu.cn

\* 通信联系人。E-mail: zywei@iphy.ac.cn

宝石振荡器价格不菲,需要昂贵的倍频 Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器作为抽运源,而且其结构复杂,操作维护困难;2) 钛宝石晶体的吸收波长和发射波长一般为 532 nm 和 800 nm,相应的量子效率不到 70%;3) 由于钛离子上能级寿命(3.2 μs)较短,振荡器很难实现高功率运转。目前商用的飞秒钛宝石振荡器的最大输出功率只有 4 W 左右。以上因素大大限制了钛宝石激光器在众多领域的应用,促使人们寻求一种价格更为低廉,输出功率更高、结构更为紧凑的飞秒激光器。

近年来,二极管抽运的稀土离子镱(Yb<sup>3+</sup>)掺杂的全固态飞秒激光器得到了人们的广泛重视。Yb<sup>3+</sup> 具有以下优点:1) Yb<sup>3+</sup> 掺杂激光介质的吸收峰在 940~980 nm 之间,和铟砷化镓(InGaAs)激光二极管(LD)的发射波长一致。利用技术成熟的高功率 LD 直接抽运,不仅可以极大地降低成本,而且可以实现高功率输出。2) Yb<sup>3+</sup> 激光介质的发射波长在 1030 nm 附近,相应的量子效率高达 95%。而且 Yb<sup>3+</sup> 的能级结构非常简单,属准三能级结构,不存在激发态吸收以及上转换、交叉弛豫等效应,可以实现高效率、高功率激光输出。3) Yb<sup>3+</sup> 能级分裂使得 Yb<sup>3+</sup> 的发射谱带宽达几十纳米,支持小于 100 fs 的超短脉冲输出。基于以上优点,LD 抽运的全固态飞秒 Yb 激光器在输出功率、系统价格等方面有望成为钛宝石激光器的理想替代品。截至目前,人们已经成功生长/制备了多种掺 Yb 激光介质,并借助被动锁模技术或者 KLM 技术均实现了锁模激光输出。根据基质材料分类,这些掺 Yb 激光介质包括:石榴石(Yb:YAG<sup>[2-3]</sup>、Yb:YGG<sup>[4-5]</sup>)、钷酸盐(Yb:YVO<sub>4</sub><sup>[6]</sup>、Yb:LuVO<sub>4</sub><sup>[7]</sup>)、钨酸盐(Yb:KGW<sup>[8]</sup>、Yb:KYW<sup>[9]</sup>)、硼酸盐(Yb:BOYS<sup>[10]</sup>、Yb:GdCOB<sup>[11]</sup>)、硅酸盐(Yb:SYS<sup>[12]</sup>)、铝酸盐(Yb:CaGdAlO<sub>4</sub><sup>[13-14]</sup>、Yb:CaYAlO<sub>4</sub><sup>[15-16]</sup>)、倍半氧化物(Yb:Sc<sub>2</sub>O<sub>3</sub><sup>[17-18]</sup>、Yb:Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub><sup>[19]</sup>)、氟石(Yb:YLF<sup>[20]</sup>、Yb:CaF<sub>2</sub><sup>[21-22]</sup>)、氧化正硅酸盐(Yb:GSO<sup>[23]</sup>、Yb:YSO<sup>[24]</sup>)等。目前人们在若干 Yb<sup>3+</sup> 掺杂介质中实现了约 30 fs 的激光脉冲宽度<sup>[3,13,15-16,25]</sup>,已非常接近利用棱镜对色散补偿的 KLM 飞秒钛宝石振荡器的输出脉宽。采用薄片结构的 LD 抽运飞秒 Yb 振荡器可以输出百瓦级的飞秒激光<sup>[26-29]</sup>,远超钛宝石振荡器的平均输出功率,在激光加工、非线性光学、高次谐波产生等领域具有极大的优势。结合薄片放大技术、光参量啁啾脉冲放大技术和相干合成技术,有望产生高峰值功率(太瓦量级)、高平均功率(千瓦量级)、周期量级超短脉冲,因此全固态飞秒激光技术被称为第三代飞秒激光技术(3FST)<sup>[30]</sup>,可推动高次谐波产生到硬 X 射线波段,极大提高阿秒科学的研究水平。

本课题组与国内生长制备 Yb 激光介质的相关研究组多年合作,对 LD 抽运全固态飞秒 Yb 激光器进行了系统的研究,在若干新型 Yb<sup>3+</sup> 掺杂激光介质中实现了输出参数优异的结果。本文结合近年来本课题组的研究工作,对二极管抽运全固态飞秒 Yb 激光器的研究进展进行了介绍,并就进一步提高输出功率和缩短脉冲宽度的技术途径及发展前景进行了展望。

## 2 固体增益介质锁模基本原理与技术

### 2.1 锁 模

锁模是产生皮秒到飞秒量级超短激光脉冲的主要方法,按照锁模原理一般可以分为主动锁模、被动锁模、自锁模(即 KLM)和同步抽运锁模等。全固态锁模激光器主要采用被动锁模和 KLM 技术。

被动锁模类似于被动调 Q,它是利用光学材料的可饱和吸收性质实现的。在激光器内,当光强较弱时,可饱和吸收体的吸收损耗较大;而当光强很强的时候,由于饱和吸收的原因,可饱和吸收体的吸收损耗较小。这样,激光腔内低强度的光被可饱和吸收体吸收,而高强度的光被吸收的比例相对较小,经过往复通过吸收体,最终获得超短脉冲。由于稳定性好、参数灵活可变等优点,基于半导体量子阱材料的可饱和吸收体自 1992 年发明以来<sup>[31]</sup>,受到了人们广泛的关注,成为最流行的被动锁模器件之一。与 KLM 相比,半导体可饱和吸收镜(SESAM)锁模技术对谐振腔的要求不再那么苛刻,激光器的设计变得简单、灵活,并且可以实现自启动和长时间稳定锁模。通过设计 SESAM 的特征参数,如非饱和损耗、调制深度、饱和能流和弛豫时间等,人们已经在几乎所有全固态 Yb 激光器中实现了被动锁模。

除了 SESAM 被动锁模,人们也相继研究了多种新型材料的被动锁模性质,这些材料包括碳纳米管、石墨烯、二维材料如过渡金属硫化物、拓扑绝缘体、黑磷等。这些材料也具有独特的非线性可饱和吸收特性,在全固态锁模超快激光领域具有潜在应用。

尽管 SESAM 等可以方便地实现被动锁模激光,但是锁模激光输出参数严重依赖可饱和吸收体的性质,

例如可饱和吸收体较大的插入损耗限制了输出功率的提高、可饱和吸收体较长的恢复时间导致锁模脉冲宽度很难缩短、可饱和吸收体器件的稳定性和质量限制锁模的稳定性和输出参数等。全固态激光器中实现 KLM 可以避免被动锁模器件的限制,特别是 KLM 基于介质的三阶非线性克尔效应,一方面克尔效应响应时间极短,只有约 1 fs,另一方面由克尔效应引起的自相位调制效应能够有效激发新的锁模光谱,增加锁模带宽从而有利于实现更短脉冲宽度。所以在全固态 Yb 激光器中采用 KLM 技术是获得超短激光脉冲的有力手段。

## 2.2 色散补偿

色散补偿是获得傅里叶变换极限超短脉冲激光的关键所在。光脉冲通过色散介质时,会产生与频率相关的非线性相移,群速度延迟色散(GDD)及高阶色散会展宽超短脉冲的脉宽并改变脉冲形状,因此为了获得接近变换极限的脉冲宽度,需要对二阶色散甚至三阶以上的高阶色散进行补偿。常用的腔内色散补偿元件有棱镜对和 Gires-Tournois 干涉(GTI)镜等。棱镜对是最常用的色散补偿元件,其结构简单、使用灵活、色散可调。利用不同的材料和不同的棱镜对间隔,可以实现连续可变的、不同的 GDD 值。虽然棱镜对可以很方便地补偿腔内 GDD,但是棱镜本身会引入材料色散,特别是脉冲宽度很窄的时候,光谱宽度很宽,棱镜对有限的带宽不能在宽光谱范围内对各阶色散进行有效的补偿。GTI 镜也是一种常用的腔内色散补偿元件,具有占据空间小、色散设计灵活、损耗小等优点。GTI 镜可以提供很大的单次反射 GDD 量,但 GDD 量与补偿带宽成反比,且 GDD 值随波长有较大振荡。

## 3 LD 抽运被动锁模全固态飞秒 Yb 激光器

尽管人们已经从多种基质材料的 Yb<sup>3+</sup> 掺杂介质中实现了被动锁模激光运转,但是对优异激光参数的追求永不止步。人们期望输出更高的功率和更窄的脉冲宽度,而这主要取决于 Yb 激光介质的光学特性。为了实现高的输出功率,期望 Yb 介质的热导率高,吸收和发射截面大;为了输出窄的脉冲宽度,期望 Yb 介质的增益带宽足够宽,支持窄的傅里叶变换极限脉冲宽度。Yb:YAG 晶体的热学性质和光学性质都非常优异,是研究最早也是最成熟的 LD 抽运全固态 Yb 激光器之一<sup>[32]</sup>,高功率薄片激光器也主要采用 Yb:YAG 晶体,并已实现商业化。但 Yb:YAG 的发射带宽只有约 10 nm,一般情况下利用被动锁模技术只能得到几百飞秒的脉冲宽度<sup>[33-34]</sup>。因此人们研究各种掺杂基质的激光晶体,使之满足高功率全固态窄脉冲宽度飞秒激光器对激光晶体的要求:大的吸收和发射截面、小的斯托克斯位移、长的荧光寿命、宽的发射带宽、高的热力学性能及能够长成大尺寸高光学质量晶体。

Yb<sup>3+</sup> 掺杂的正硅酸盐晶体[(Re)<sub>2</sub>SiO<sub>5</sub>, Re=Gd, Lu, Y, Sc]是其中一个类型。由于 Yb<sup>3+</sup> 与基质晶体强的电子-声子耦合作用,激光下能级与基态能级有很大的能级分裂(约 1000 cm<sup>-1</sup>),远大于 Yb:YAG 的 612 cm<sup>-1</sup>,一方面可以减小下能级粒子数分布从而降低激光阈值,另一方面使得激光发射带宽加宽,有利于输出超短脉冲。此外,正硅酸盐晶体如 Yb:YSO、Yb:LSO 还具有非常好的热力学性能。5%(原子数分数)掺杂的 Yb:YSO 晶体和 Yb:LSO 晶体的热导率分别为 3.6 W·m<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup> 和 5.3 W·m<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>,均高于 Yb:KGW 晶体<sup>[35]</sup>。作为非常有潜力的新型激光晶体,国内外研究小组对这类晶体的被动锁模性质作了详细的研究。2006 年,Thibault 等<sup>[36]</sup>利用 SESAM 实现了被动锁模的 Yb:YSO 和 Yb:LSO 振荡器,均得到了大于 2.6 W 的飞秒脉冲输出,其相应的脉冲宽度分别为 198 fs 和 260 fs。利用碳纳米管可饱和吸收体被动锁模,Liu 等<sup>[37]</sup>在 Yb:YSO 振荡器中得到了 1.1 ps、1.1 W 的锁模输出参数。基于被动锁模的 Yb:SSO 振荡器也分别获得了皮秒和飞秒的锁模脉冲宽度<sup>[38-40]</sup>。Yb:GSO 晶体具有最大的下能级分裂(1067 cm<sup>-1</sup>),其吸收光谱和发射光之间的重叠很小,更多的辐射跃迁处于长波长区域,从而导致小的再吸收损耗。特别地,Yb:GSO 晶体在 1088 nm 附近具有最大的发射截面,而几乎没有再吸收损耗,因而可以形成准四能级运转,大大降低了抽运阈值。但是 Yb:GSO 晶体具有层状结构,易沿(100)面开裂,晶体生长和加工困难。人们结合 Yb:YSO 晶体出色的机械性能和 Yb:GSO 晶体优异的光学性能,成功生长了 Yb:(Gd<sub>1-x</sub>Y<sub>x</sub>)<sub>2</sub>SiO<sub>5</sub> (GYSO)混合晶体。Li 等<sup>[41]</sup>研究了 Yb:GYSO 晶体的连续光和被动锁模性质,得到了 2.46 ps 的脉冲宽度;Zhou 等<sup>[42]</sup>采用连续钛宝石激光抽运 Yb:GYSO 晶体,利用 SESAM 被动锁模得到了 210 fs 的脉冲宽度,平均功率为 300 mW。本课题组<sup>[43]</sup>详细研究了 Yb:GYSO 晶体的激光性能并且利用 LD 作为抽运源,首次实

现了被动锁模飞秒激光运转。

图 1 是利用 976 nm LD 抽运 Yb:GYSO 晶体研究连续激光输出和波长调谐性质的实验示意图。实验使用的 Yb:GYSO 晶体掺杂浓度为 5% (原子数分数), 截面尺寸为 6 mm × 5 mm, 厚 3 mm。抽运源为一个光纤耦合输出 LD (Jenoptik 公司, JOLD-7.5-BAFC-105), 额定输出功率为 7 W, 发射激光中心波长位于 976 nm, 与 Yb:GYSO 的吸收峰重合, 光纤的芯径为 50 μm, 数值孔径为 0.22。抽运激光经一聚焦耦合系统聚焦入射到激光晶体上。研究 Yb:GYSO 晶体连续激光输出性质采用 V 字型三镜腔, M1 为平面双色镜, 对 976 nm 光高透, 对 1020~1200 nm 光高反; M2 是曲率半径为 200 mm 的凹面镜; OC 是平面耦合输出镜。实验中, 使用了不同透过率  $T$  (0.8%、2.5%、10%) 的 OC 研究 Yb:GYSO 晶体的连续激光输出特性。另外, 为了研究 Yb:GYSO 晶体连续激光的波长调谐特性, 在输出端插入一个材料为 SF6 的三棱镜进行波长调谐, 通过微调三棱镜的角度或者 OC 的水平角度, 可以实现不同波长激光输出。

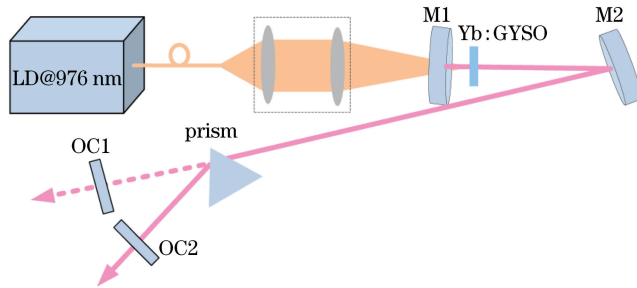


图 1 LD 抽运 Yb:GYSO 晶体连续光和波长调谐实验装置示意图

Fig. 1 Setup schematic of continuous wave and wavelength tuning of LD pumped Yb:GYSO crystal

使用不同透过率的耦合输出镜测得的连续激光输出功率曲线如图 2(a) 所示。在抽运功率为 5.6 W 时, 使用透过率为 10% 的耦合输出镜得到的连续光最大输出功率为 2.62 W, 此时激光的斜效率 ( $\eta$ ) 和光光效率分别为 71.0% 和 46.8%。对于透过率为 2.5% 和 0.8% 的耦合输出镜, 连续光的功率分别为 2.41 W 和 1.84 W, 对应的斜效率分别为 58.0% 和 47.4%, 光光效率分别为 43.0% 和 32.8%。在抽运功率超过 5.6 W 时, 激光功率降低, 发生功率饱和现象。图 2(b) 为连续激光波长调谐曲线。实验中使用较小透过率 (0.8%) 的耦合输出镜输出激光, 连续激光波长调谐范围为 1004~1110 nm, 达 106 nm。因此利用 LD 抽运 Yb:GYSO 晶体有望输出超短飞秒激光脉冲。此外, 在 1090 nm 附近激光输出功率最大, 与 Yb:GYSO 晶体的发射性质类似<sup>[44-45]</sup>。

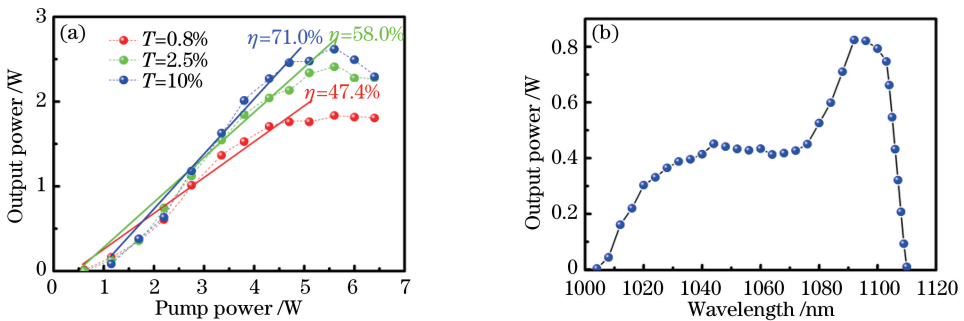


图 2 (a) 连续激光输出功率曲线; (b) 波长调谐曲线

Fig. 2 (a) Output power curves of continuous wave; (b) wavelength tuning curve

接下来开展 LD 抽运 Yb:GYSO 晶体被动锁模实验研究。针对聚焦耦合系统到焦点距离较短只有约 50 mm 的问题, 设计了改进的双凹面镜共聚焦腔型, 如图 3 所示。M2 和 M3 是一对曲率半径分别为 200 mm 和 300 mm 的凹面镜, 对 976 nm 光高透, 对 1020~1200 nm 光高反。M1 是平面双色介质镜, 参数如前所述。为了实现飞秒锁模运转, 一方面在腔内一臂插入一个 SESAM, 由曲率半径为 300 mm 的凹面镜 (M5) 将腔内激光聚焦到 SESAM 上。根据腔内激光功率密度, 设计 SESAM 参数为: 调制深度 0.4% (1064 nm)、饱和通量 90 μJ/cm<sup>2</sup>、弛豫时间 500 fs。另一方面在另一臂插入一对高色散 SF6 三棱镜, 用于补偿腔内色散。

实验优化后三棱镜对的顶角距离为 28 cm,引入约 $-250 \text{ fs}^2$ 的二阶色散。OC 的输出率设计为 0.8%。

通过优化谐振腔准直和色散补偿,实现了自启动被动锁模激光运转。抽运激光阈值为 1.4 W,当抽运激光为 2.8 W 时,输出 450 mW 的连续锁模激光。利用强度自相关仪测量锁模脉冲的脉冲宽度,如图 4 所示,假设激光脉冲为双曲正割形状,脉冲宽度为 324 fs。锁模激光光谱中心波长在 1091 nm,带宽为 4 nm。计算得到的锁模脉冲的时间带宽积为 0.327,接近傅里叶变换极限脉冲宽度。考虑到 Yb:GYSO 晶体具有 106 nm 的可发射激光波长范围,理论上可以支持更短的飞秒激光。本研究认为该技术限制脉冲宽度进一步缩短的原因主要有:1)LD 的光束质量较差,聚焦光斑较大,为了实现模式匹配,设计晶体中激光光斑也较大,从而使得晶体焦点处的激光峰值功率密度小,不足以激发非线性自相位调制效应;2)SESAM 的饱和能流较小,也限制了腔内激光功率密度。另外 SESAM 工作带宽窄,不足以支持更短脉冲输出。

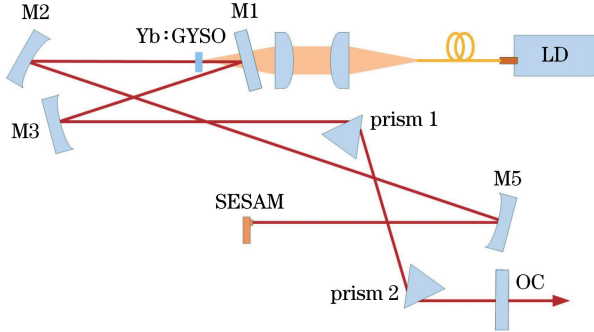


图 3 LD 抽运 Yb:GYSO 晶体被动锁模实验装置示意图  
Fig. 3 Setup schematic of LD pumped Yb:GYSO crystal passively mode-locking experiment

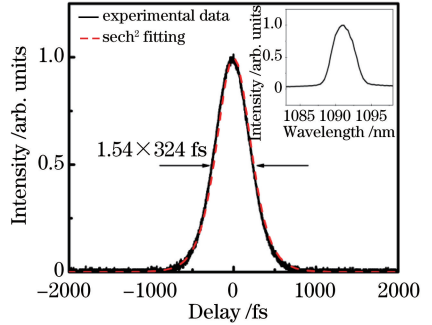


图 4 锁模脉冲干涉自相关曲线。插图锁模光谱  
Fig. 4 Autocorrelation curves of mode-locked pulses interference. The inset shows mode-locked spectrum

利用 LD 作为抽运源,通过 SESAM 被动锁模的方式,本课题组在一系列新型 Yb 掺杂激光晶体和陶瓷中实现了被动锁模运转。部分锁模激光参数总结在表 1 中。本课题组在若干种 Yb 激光介质中实现了被动锁模,脉冲宽度多为几百飞秒,输出平均功率为几百毫瓦。平均功率主要受限于 Yb 介质的热效应以及 SESAM 的饱和能流。通过改善激光晶体的散热,如采用三明治结构<sup>[34]</sup>、设计板条状晶体<sup>[54]</sup>或者双晶体结构<sup>[55]</sup>等,可以实现 10 W 级全固态飞秒激光输出。

表 1 被动锁模 Yb 激光振荡器输出特性

Table 1 Output characteristics of passively mode-locked Yb laser oscillators

Gain media	$P_{\text{pump}}/\lambda_{\text{pump}}$	$P_{\text{out}}/\text{mW}$	$\lambda_c/\Delta\lambda/\text{nm}$	$T/\text{fs}$	Reference
Yb:YAG ceramic	3.5 W@968 nm	1900	1048/3.4	418	[2]
	3.25 W@969 nm	1040	1049.5/0.3	10400	[46]
	2 W@976 nm Ti:S	300	1093/6.4	210	[42]
Yb:GYSO	2.8 W@976 nm	450	1091/4	324	[43]
	3.3 W @976 nm	558	1050/4	3500	[47]
Yb:YCOB	5 W@976 nm	430	1048/9.6	150	[48]
Yb:CGA	4 W@979 nm	300	1042.5/7.2	185	Unpublished
Yb:LSO	2 W@976 nm Ti:S	70	1047/-	3600	[49]
Yb:YSO	5 W @976 nm	144	1082/3.1	9300	[50]
Yb:LYSO	5.17 W@ 976 nm	3070	1035/4.3	297	[51]
Yb:YGG	7 W@970 nm	570	1045/5.8	245	[52]
Yb:(YLa) <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ceramic	4.5 W@976 nm	670	1075/4.6	357	[53]
Yb:LuAG ceramic	4.09 W@970 nm	532	1033.5/1.8	933	Unpublished

Ti:S indicates Ti:sapphire laser as the pump

## 4 KLM 全固态飞秒 Yb 激光器

如前所述,利用 SESAM 被动锁模技术可以很容易地在多种 Yb 激光介质中实现被动锁模,但是受限于

SESAM的可饱和参数,锁模脉冲宽度一般都比较宽。由于Yb介质的增益带宽支持小于100 fs的极限脉宽,因此需要寻找一种新的锁模方式,实现更短的脉冲宽度。

与钛宝石激光器的KLM类似,如果能在Yb激光中实现KLM,也可以通过晶体的克尔非线性效应激发更宽的锁模带宽,从而实现更短的脉冲宽度。众所周知,KLM飞秒钛宝石振荡器主要依靠软边光阑引入非线性损耗调制,这就要求晶体中抽运光的光斑尺寸小于锁模激光的光斑尺寸。但是对于LD抽运全固态Yb激光器,抽运源是光纤耦合的LD,目前商用的耦合光纤的芯径一般为100~200 μm,最小为50 μm,所以聚焦到晶体中心的抽运光束腰半径最小约为25 μm,而根据ABCD矩阵方程计算,对于曲率半径为75 mm的共焦谐振腔而言,激光束腰半径约为20 μm,小于抽运光光斑尺寸,所以很难实现软边光阑锁模。但是依然可以精密调节谐振腔的结构,使之满足KLM。由于克尔效应的存在,晶体本身即相当于一个动态变化的热透镜,其焦距依赖于光强,因此对于低功率密度的连续光和高功率密度的锁模激光而言,其热透镜焦距是不一样的,导致腔内激光模式不同。当谐振腔处于稳区边缘时,对连续光来说是非稳腔,损耗非常大,而对锁模脉冲而言依然是稳腔。这样,通过对谐振腔的调节,即可引入类似可饱和吸收的损耗调制,从而实现KLM。但是通过上述分析可以知道,对于LD抽运的全固态Yb振荡器,KLM的稳腔范围相比钛宝石激光器更小,而且由于谐振腔处于临界稳区,输出激光功率可能较小,稳定性受环境影响比较敏感。

为了实现LD抽运的KLM全固态Yb激光振荡器,实验中需要优化几个技术细节:1)抽运源使用小芯径耦合光纤,使抽运光焦点尺寸小,以利KLM;2)Yb激光介质选择高掺杂浓度、厚度不超过3 mm的介质,以减小材料色散;3)使用输出率小的耦合输出镜以提高腔内激光功率密度,增强克尔非线性效应。目前本课题组在多种Yb激光介质中都实现了LD抽运的KLM激光运转,绝大多数实验得到的锁模脉冲宽度都小于100 fs,充分证明了KLM技术在超短脉冲产生中的重要性和优势。特别是在Yb:CYA振荡器中直接输出了33 fs的超短脉冲,这是目前LD抽运KLM Yb振荡器的最短脉宽<sup>[16]</sup>。

LD抽运KLM Yb:CYA飞秒振荡器实验装置如图5所示。激光增益介质是掺杂浓度为2%(原子数分数)的Yb:CYA晶体,c轴切割,通光长度为2 mm,横截面尺寸为3 mm×3 mm,晶体表面未镀膜,以布儒斯特角放置,用铝箔包裹置于通水热沉上。抽运源与被动锁模Yb:GYSO振荡器所用抽运源相同,耦合光纤芯径为50 μm,以一个倍率为1:0.8的聚焦耦合系统聚焦到晶体中,形成半径约20 μm的聚焦焦斑(1/e<sup>2</sup>)。谐振腔采用X型紧聚焦腔型,两凹面镜M1、M2的曲率半径为75 mm,腔内插入一对SF6三棱镜补偿色散。输出耦合镜的透过率为0.5%。此谐振腔结构非常简单,没有使用SESAM等被动锁模器件,仅仅依靠微调谐振腔腔镜位置(主要是M2)使之工作在稳区边缘即可实现KLM。

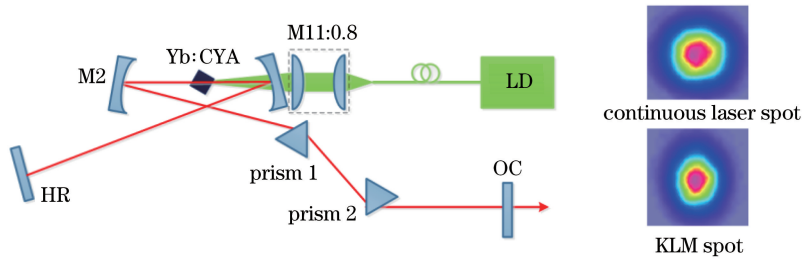


图5 LD抽运KLM Yb:CYA振荡器实验光路图

Fig. 5 Light path of LD pumped KLM Yb:CYA oscillator

实验中稳定锁模时的抽运功率最大为3.26 W,测试晶体吸收抽运激光约1.24 W,锁模输出激光功率为36 mW。通过优化三棱镜对的间距和插入量,在三棱镜对顶角距离为235 mm、插入量为5 mm时,获得了最短的脉冲宽度。强度自相关曲线如图6(a)所示,假设脉冲为双曲正割形状,脉冲宽度为33 fs。锁模光谱如图6(b)所示,整个光谱范围覆盖了1000~1100 nm,大于1100 nm部分由于光谱仪限制没有完全测量。光谱中心波长在1059 nm,半峰全宽约为49 nm。锁模脉冲的时间带宽积为0.433,稍微大于双曲正割脉冲傅里叶变换极限的0.315。脉冲啁啾主要源于三棱镜对引入的三阶色散以及6.35 mm厚的输出镜引入的材料色散。由于49 nm的锁模带宽理论上支持24 fs的极限脉宽,因此通过优化色散补偿可望在全固态Yb振荡器中实现小于30 fs的脉冲,进一步通过放大可以得到平均功率大于1 W、脉冲宽度约30 fs的超短激光脉

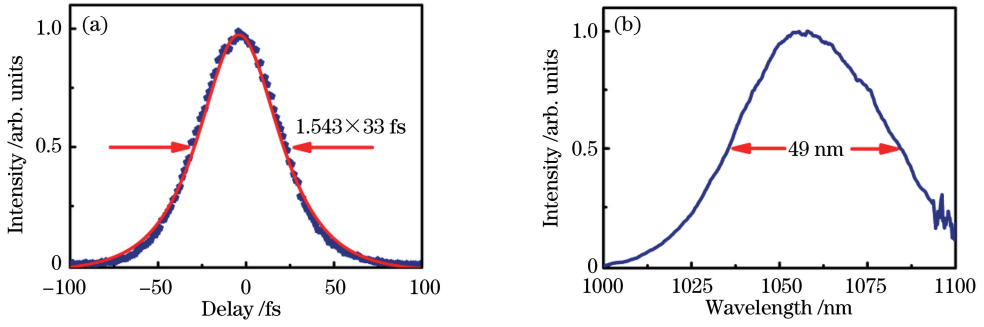


图6 (a) LD 抽运 KLM Yb:CYA 振荡器强度自相关曲线;(b)锁模光谱曲线

Fig. 6 (a) Intensity autocorrelation curves of the LD pumped KLM Yb:CYA oscillator; (b) mode-locked spectrum curve

冲。图 5 也给出了输出激光在连续光和锁模时的近场光斑模式,可以看出均工作在基横模模式下。

表 2 总结了 LD 抽运 KLM Yb 激光振荡器的输出参数。与 SESAM 被动锁模相比,KLM 技术可以更充分地利用 Yb 介质的增益带宽,实现更短的脉冲宽度。本课题组在多数 Yb 介质中都得到了小于 100 fs 的脉冲宽度,充分展示了该技术在输出极限脉冲宽度方面的优势和潜力。从表 2 中也可看出,输出激光平均功率多为数十毫瓦,这主要源于 KLM 对谐振腔的苛刻要求。从谐振腔的角度提高输出功率可以从以下几个方面着手:使用亮度更高的抽运源,选用增益带宽更宽、导热率更好的晶体,增加输出镜透过率并相应增大晶体中光斑尺寸。此外可以利用啁啾脉冲放大技术放大激光脉冲能量,相比于长脉冲种子,在提高脉冲峰值功率方面具有显著的优势。

表 2 KLM Yb 激光振荡器输出特性

Table 2 Output characteristics of KML Yb laser oscillators

Gain media	$P_{\text{pump}}/\lambda_{\text{pump}}$	$P_{\text{out}}/\text{mW}$	$\lambda_c/\Delta\lambda/\text{nm}$	$T/\text{fs}$	Reference
Yb:YCOB	3 W@976 nm	70	1043/19	73	[56]
Yb:LSO	5.3 W@976 nm	25	1052/22.5	54	[57]
Yb:LYSO	9 W@976 nm	40	1055/22	61	[58]
Yb:GSO	4.8 W@976 nm	85	1050/17.8	72	[59]
Yb:GYSO	5 W@976 nm	237	1094/10.1	141	[60]
		27	1054/23.5	55	
Yb:CGA	7 W@976 nm	66	tunable	60	[61]
Yb:CYA	3.26 W@976 nm	36	1059/49	33	[16]
Yb:YGG	3.9 W@970 nm	104	1042/16.8	88	[5]
Yb:(Y <sub>0.9</sub> La <sub>0.1</sub> ) <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ceramic	4 W@976 nm	80	1074.5/17	85	[62]
Yb:YAG ceramic	5.4 W@970 nm	320	1049/13	97	[63]
Yb:LuAG ceramic	5.75 W@970 nm	121	1053/14.1	98	[64]

另一方面,KLM 的输出参数与抽运 LD 的光束质量关系非常紧密,由于 LD 的光束质量很差, $M^2$  因子一般都在 20 以上,所以整个谐振腔设计都是为了匹配 LD 的输出参数如大聚焦光斑、短的瑞利长度等。近年来高功率 Yb 光纤激光器技术逐渐成熟,其光束质量非常优异, $M^2$  因子可以小于 1.1,利用 Yb 光纤激光器作为抽运源来研究全固态 KLM Yb 振荡器成为热点,可以输出瓦级平均功率的超短脉冲<sup>[13,65-66]</sup>。相比于 LD,Yb 光纤激光器作为抽运源更容易实现小于 30 fs 的锁模激光,但是高功率 97X nm Yb 光纤激光器技术难度大、成本高,限制了其在抽运全固态飞秒激光振荡器中的应用。

## 5 总结及展望

LD 抽运的全固态飞秒锁模 Yb 激光器是全固态激光领域的研究热点,基于各种新型 Yb 掺杂激光介质并结合先进锁模技术,人们在输出功率、脉冲宽度、重频频率、输出波长等方面都取得了优异的成果。结合近年来在 LD 抽运全固态飞秒 Yb 激光器方面的研究,总结了被动锁模和 KLM 的关键技术和研究进展。特别是系统掌握了 LD 抽运的 KLM 技术,在多数 Yb 激光介质中实现了亚百飞秒超短激光脉冲。LD 抽运的全

固态飞秒锁模 Yb 激光器将在现有技术基础上向更短的脉冲宽度、更高的输出功率和更高的重复频率等方向发展。通过进一步优化色散补偿,可实现高功率的亚 30 fs 脉冲,飞秒锁模 Yb 激光器将以价格低廉、结构紧凑等巨大优势与商用钛宝石激光器竞争;多吉赫兹重复频率飞秒 Yb 激光振荡器在飞秒激光频率梳研究中有重要应用;百/千瓦级飞秒 Yb 薄片激光器在高次谐波产生、非线性频率变换、精密激光加工等领域有独特优势;基于 LD 抽运的全固态 Yb 太瓦激光系统具有高平均功率、高重复频率的特点,在强场物理中有潜在价值。作为一种非常有竞争力的超快光源,LD 抽运的全固态飞秒 Yb 激光器将在许多领域发挥更加重要的作用。

**致谢** 感谢苏良碧、徐军、徐晓东、王继扬、张怀金、于浩海、李江、杨秋红、曹永革等教授提供的优质激光晶体和陶瓷。感谢与曾晓东教授的有益讨论。

### 参 考 文 献

- [1] Spence D E, Kean P N, Sibbett W. 60-fsec pulse generation from a self-mode-locked Ti:sapphire laser[J]. Optics Letters, 1991, 16(1): 42-44.
- [2] Zhou B B, Wei Z Y, Zou Y W, *et al.* High-efficiency diode-pumped femtosecond Yb:YAG ceramic laser[J]. Optics Letters, 2010, 35(3): 288-290.
- [3] Uemura S, Torizuka K, Sub-40-fs pulses from a diode-pumped Kerr-lens mode-locked Yb-doped yttrium aluminum garnet laser[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2011, 50(1): 010201.
- [4] Zhang Y D, Wei Z Y, Zhou B B, *et al.* Diode-pumped passively mode-locked Yb:Y<sub>3</sub>Ga<sub>5</sub>O<sub>12</sub> laser[J]. Optics Letters, 2009, 34(21): 3316-3318.
- [5] Zhang J W, Han H N, Tian W L, *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.
- [6] Lagatsky A A, Sarmani A R, Brown C T A, *et al.* Yb<sup>3+</sup>-doped YVO<sub>4</sub> crystal for efficient Kerr-lens mode locking in solid-state lasers[J]. Optics Letters, 2005, 30(1): 3234-3236.
- [7] Rivier S, Mateos X, Liu J, *et al.* Passively mode-locked Yb:LuVO<sub>4</sub> oscillator[J]. Optics Express, 2006, 14(24): 11668-11671.
- [8] Kisel V E, Rudenkov A S, Pavlyuk A A, *et al.* High-power, efficient, semiconductor saturable absorber mode-locked Yb:KGW bulk laser[J]. Optics Letters, 2015, 40(10): 2707-2710.
- [9] Yang H, Kim H, Shin J, *et al.* Gigahertz repetition rate, sub-femtosecond timing jitter optical pulse train directly generated from a mode-locked Yb:KYW laser[J]. Optics Letters, 2014, 39(1): 56-59.
- [10] Druon F, Chénais S, Raybaut P, *et al.* Diode-pumped Yb:Sr<sub>3</sub>Y(BO<sub>3</sub>)<sub>3</sub> femtosecond laser[J]. Optics Letters, 2002, 27(3): 197-199.
- [11] Druon F, Balembois F, Georges P, *et al.* Generation of 90-fs pulses from a mode-locked diode-pumped Yb<sup>3+</sup>:Ca<sub>4</sub>GdO(BO<sub>3</sub>)<sub>3</sub> laser[J]. Optics Letters, 2000, 25(6): 423-425.
- [12] Druon F, Balembois F, Georges P. Ultra-short-pulsed and highly-efficient diode-pumped Yb:SYS mode-locked oscillators[J]. Optics Express, 2004, 12(20): 5005-5012.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] Ma J, Huang H T, Ning K J, *et al.* Generation of 30 fs pulses from a diode-pumped graphene mode-locked Yb:CaYAlO<sub>4</sub> laser[J]. Optics Letters, 2016, 41(5): 890-893.
- [16] Gao Z Y, Zhu J F, Wang J L, *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.
- [17] Klopp P, Petrov V, Griebner U, *et al.* Highly efficient mode-locked Yb:Sc<sub>2</sub>O<sub>3</sub> laser[J]. Optics Letters, 2004, 29(4): 391-393.
- [18] Tokurakawa M, Shirakawa A, Ueda K, *et al.* Diode-pumped sub-100 fs Kerr-lens mode-locked Yb:Sc<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ceramic laser[J]. Optics Letters, 2007, 32(23): 3382-3384.
- [19] Parsonage T L, Beecher S J, Choudhary A, *et al.* Pulsed laser deposited diode-pumped 7.4 W Yb:Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> planar



- waveguide laser[J]. *Optics Express*, 2015, 23(25): 31691-31697.
- [20] Coluccelli N, Galzerano G, Bonelli L, *et al.* Diode-pumped passively mode-locked Yb:YLF laser[J]. *Optics Express*, 2008, 16(5): 2922-2927.
- [21] Pirzio F, Cafiso S D D D, Kemnitzer M, *et al.* 65-fs Yb:CaF<sub>2</sub> laser mode-locked by semiconductor saturable absorber mirror[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2015, 32(11): 2321-2325.
- [22] 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.
- [23] Li W X, Hao Q, Zhai H, *et al.* Diode-pumped Yb:GSO femtosecond laser[J]. *Optics Express*, 2007, 15(5): 2354-2359.
- [24] Tian W L, Wang Z H, Liu J X, *et al.* Dissipative soliton and synchronously dual-wavelength mode-locking Yb:YSO lasers[J]. *Optics Express*, 2015, 23(7): 8731-8739.
- [25] Yoshida A, Schmidt A, Petrov V, *et al.* Diode-pumped mode-locked Yb:YCOB laser generating 35 fs pulses[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(22): 4425-4427.
- [26] Baer C R E, Kränkel C, Saraceno C J, *et al.* Femtosecond thin-disk laser with 141 W of average power[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(13): 2302-2304.
- [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] Saraceno C J, Emaury F, Schriber C, *et al.* Ultrafast thin-disk laser with 80  $\mu$ J pulse energy and 242 W of average power[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(1): 9-12.
- [29] Saraceno C J, Emaury F, Heckl O H, *et al.* 275 W average output power from a femtosecond thin disk oscillator operated in a vacuum environment[J]. *Optics Express*, 2012, 20(21): 23535-23541.
- [30] Fattahi H, Barros H G, Gorjan M, *et al.* Third-generation femtosecond technology[J]. *Optica*, 2014, 1(1): 45-63.
- [31] Keller U, Miller D A B, Boyd G D, *et al.* Solid-state low-loss intracavity saturable absorber for Nd:YLF lasers: an antiresonant semiconductor Fabry-Perot saturable absorber[J]. *Optics Letters*, 1992, 17(7): 505-507.
- [32] Lacovara P, Choi H K, Wang C A, *et al.* Room-temperature diode-pumped Yb:YAG laser[J]. *Optics Letters*, 1991, 16(14): 1089-1091.
- [33] der Au J A, Schaer S F, Paschotta R, *et al.* High-power diode-pumped passively mode-locked Yb:YAG lasers[J]. *Optics Letters*, 1999, 24(18): 1281-1283.
- [34] Weitz M, Reuter S, Knappe R, *et al.* Passive mode-locked 21 W femtosecond Yb:YAG laser with 124 MHz repetition-rate[C]// Conference on Lasers and Electro-Optics. Optical Society of America, 2004: CTuCC1.
- [35] Jacquemet M, Jacquemet C, Janel N, *et al.* Efficient laser action of Yb:LSO and Yb:YSO oxyorthosilicates crystals under high-power diode-pumping[J]. *Applied Physics B*, 2005, 80(2): 171-176.
- [36] Thibault F, Pelenc D, Druon F, *et al.* Efficient diode-pumped Yb<sup>3+</sup>:Y<sub>2</sub>SiO<sub>5</sub> and Yb<sup>3+</sup>:Lu<sub>2</sub>SiO<sub>5</sub> high-power femtosecond laser operation[J]. *Optics Letters*, 2006, 31(10): 1555-1557.
- [37] Liu C, Wang Y, Liu J, *et al.* Ultrafast Yb:Y<sub>2</sub>SiO<sub>5</sub> laser investigation based on a carbon nanotube absorber[J]. *Applied Optics*, 2011, 50(19): 3229-3232.
- [38] Li J, Liang X, He J, *et al.* Diode pumped passively mode-locked Yb:SSO laser with 2.3 ps duration[J]. *Optics Express*, 2010, 18(17): 18354-18359.
- [39] Su L, Wang Y, Liu J, *et al.* Passively mode-locked Yb<sup>3+</sup>:Sc<sub>2</sub>SiO<sub>5</sub> laser with reflection-type single-walled carbon nanotube absorber[J]. *Applied Optics*, 2012, 51(9): 1283-1286.
- [40] Xu C, Tang D, Xu X, *et al.* Passive femtosecond mode-locking and cw laser performance of Yb<sup>3+</sup>:Sc<sub>2</sub>SiO<sub>5</sub>[J]. *Optics Express*, 2010, 18(16): 16739-16744.
- [41] Li W, Hao Q, Ding L, *et al.* Continuous-wave and passively mode-locked Yb:GYSO lasers pumped by diode lasers[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2008, 44(6): 567-572.
- [42] Zhou B, Wei Z, Zhang Y, *et al.* Generation of 210 fs laser pulses at 1093 nm by a self-starting mode-locked Yb:GYSO laser[J]. *Optics letters*, 2009, 34(1): 31-33.
- [43] Zhu J, Tian W, Wang J, *et al.* Diode-pumped passively mode-locked Yb:GYSO laser generating 324 fs pulses at 1091 nm[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(24): 5190-5192.
- [44] Du J, Liang X, Xu Y, *et al.* Tunable and efficient diode-pumped Yb<sup>3+</sup>:GYSO laser[J]. *Optics Express*, 2006, 14(8): 3333-3338.
- [45] Li W, Hao Q, Zhai H, *et al.* Low-threshold and continuously tunable Yb:Gd<sub>2</sub>SiO<sub>5</sub> laser[J]. *Applied Physics Letters*,

- 2006, 89(10): 101125.
- [46] Lü L, Wang Q, Zhu J, *et al.* Efficient mode-locked picosecond Yb:YAG ceramic laser[J]. Chinese Optics Letters, 2012, 10(s1): 11410.
- [47] Tian W, Zhu J, Wang Z, *et al.* Dissipative soliton operation in diode pumped ultrafast Yb:GdYSiO<sub>5</sub> oscillator[J]. Chinese Optics Letters, 2014, 12(3): 031401.
- [48] Gao Z Y, Zhu J F, Tian W L, *et al.* Diode-pumped self-starting mode-locked femtosecond Yb:YCa<sub>4</sub>O(BO<sub>3</sub>)<sub>3</sub> laser[J]. Chinese Physics B, 2014, 23(5): 054207.
- [49] Zhou Binbin, Zou Yuwan, Li Dehua, *et al.* Experimental study of continuous-wave mode-locked picosecond Yb:LSO laser[J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(7): 1806-1809.  
周斌斌, 邹育婉, 李德华, 等. 连续锁模皮秒 Yb:LSO 激光实验研究[J]. 中国激光, 2009, 36(7): 1806-1809.
- [50] Tian W, Wang Z, Liu J, *et al.* Dissipative soliton and synchronously dual-wavelength mode-locking Yb:YSO lasers [J]. Optics Express, 2015, 23(7): 8731-8739.
- [51] Tian W, Wang Z, Zhu J, *et al.* Highly efficient and high-power diode-pumped femtosecond Yb:LYSO laser[J]. Laser Physics Letters, 2017, 14(4): 045802
- [52] Zhang Y, Wei Z, Zhou B, *et al.* Diode-pumped passively mode-locked Yb:Y<sub>3</sub>Ga<sub>5</sub>O<sub>12</sub> laser[J]. Optics Letters, 2009, 34(21): 3316-3318.
- [53] Zhu J, Wang Z, Wang Q, *et al.* Diode-pumped passively mode-locked femtosecond Yb:(Y<sub>0.9</sub>La<sub>0.1</sub>)<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ceramic laser [J]. Chinese Optics Letters, 2012, 10(12): 121403.
- [54] Kisel V E, Rudenkov A S, Pavlyuk A A, *et al.* High-power, efficient, semiconductor saturable absorber mode-locked Yb:KGW bulk laser[J]. Optics Letters, 2015, 40(12): 2707-2710.
- [55] Steinmann A, Metzger B, Hegenbarth R, *et al.* Compact 7.4 W femtosecond oscillator for white-light generation and nonlinear microscopy[C]// CLEO: Science and Innovations. Optical Society of America, 2011: CThAA5.
- [56] Gao Z, Zhu J, Tian W, *et al.* Generation of 73 fs pulses from a diode pumped Kerr-lens mode-locked Yb:YCa<sub>4</sub>O(BO<sub>3</sub>)<sub>3</sub> laser[J]. Optics Letters, 2014, 39(20): 5870-5872.
- [57] Tian W L, Wang Z H, Zhu J F, *et al.* Generation of 54 fs laser pulses from a diode pumped Kerr-lens mode-locked Yb:LSO laser[J]. Chinese Physics Letters, 2015, 32(2): 024206.
- [58] Tian W, Wang Z, Wei L, *et al.* Diode-pumped Kerr-lens mode-locked Yb:LYSO laser with 61 fs pulse duration[J]. Optics Express, 2014, 22(16): 19040-19046.
- [59] Tian W, Wang Z, Zhu J, *et al.* Diode-pumped Kerr-lens mode-locked Yb:GSO laser generating 72 fs pulses[J]. Optics & Laser Technology, 2016, 79: 137-140.
- [60] Zhu J, Gao Z, Tian W, *et al.* Kerr-lens mode-locked femtosecond Yb:GdYSiO<sub>5</sub> laser directly pumped by a laser diode[J]. Applied Sciences, 2015, 5(4): 817-824.
- [61] Gao Z, Zhu J, Wang J, *et al.* Diode-pumped Kerr-lens mode-locked Yb:CaGdAlO<sub>4</sub> laser with tunable wavelength[J]. Laser Physics Letters, 2016, 13(1): 015302.
- [62] Gao Z, Zhu J, Zhang L, *et al.* Generation of 85 fs laser pulses from a diode-pumped Kerr-lens mode-locking Yb:(Y<sub>0.9</sub>La<sub>0.1</sub>)<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ceramic laser[J]. Laser Physics Letters, 2014, 11(11): 115302.
- [63] Gao Z, Zhu J, Wang K, *et al.* Diode-pumped Kerr-lens mode-locked femtosecond Yb:YAG ceramic laser[J]. Chinese Physics B, 2016, 25(2): 186-189.
- [64] Liu K, Zhu J, Li J, *et al.* Sub-100 fs pulse generation from a diode-pumped Kerr-lens mode-locked Yb:LuAG ceramic laser[C]// Advanced Solid State Lasers. Optical Society of America, 2016: JTh2A.3.
- [65] 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.
- [66] Sévillano P, Delagnes J C, Druon F, *et al.* Chirped pulse Yb:CALGO oscillator delivering sub-100 fs-4 Watts pulses [C]// The European Conference on Lasers and Electro-Optics. Optical Society of America, 2015: CA\_2\_3.