

2 μm 超短脉冲全固态掺铥振荡器研究进展 (特邀)

令维军, 王文婷

(天水师范学院 激光技术研究所, 甘肃 天水 741001)

摘要: 2 μm 激光处于水的吸收峰, 对人眼安全而且处于大气窗口波段, 在空间通讯、遥感探测、环境监测、激光制导、红外对抗、外科手术等领域具有重要的应用价值。随着各类掺铥和铥钬共掺激光介质的不断丰富及锁模技术不断发展, 2 μm 波段超短脉冲全固态振荡器成为最近几年激光技术的研究热点之一。文中系统分析了 2 μm 波段激光基质材料和锁模技术, 概括了近年来国内外 2 μm 超短脉冲全固态掺铥振荡器的最新进展, 并对代表性实验进行了分析介绍, 最后对 2 μm 波段超短脉冲全固态掺铥振荡器的发展前景做出总结与展望。

关键词: 2 μm 波段; 超短脉冲振荡器; 被动锁模; 克尔透镜锁模; 激光基质
中图分类号: TN248.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20210346

Research progress of 2 μm ultrashort pulse all solid state thulium doped oscillator (*Invited*)

Ling Weijun, Wang Wenting

(Institute of Laser Technology, Tianshui Normal University, Tianshui 741001, China)

Abstract: There is a absorption peak of water molecular and a transmission window of atmosphere in the 2 μm spectral range, which has important application in space communication, remote sensing detection, environmental monitoring, laser guidance, infrared countermeasure, surgical operation and so on. With the development of Tm-doped and Tm, Ho co-doped laser host materials and mode-locked technologies, ultrashort pulse all solid state oscillator at 2 μm has become one of the research hotspots of laser technology in recent years. In this paper, the Tm-doped laser host materials and the mode-locked technologies in the 2 μm spectral range were systematically analyzed, the latest development of ultrashort pulse all-solid-state Tm-doped oscillators at home and abroad was summarized, and the representative experiments were analyzed and introduced. Finally its development prospect was summarized.

Key words: 2 μm waveband; ultrashort pulse oscillators; passive mode-locked; Kerr lens mode-locked; laser host materials

收稿日期: 2021-05-28; 修订日期: 2021-07-17

基金项目: 国家自然科学基金 (11774257, 61564008); 国家重点研发计划 (2017YFB0405204); 甘肃省高等学校产业支撑计划项目 (2020C-23); 甘肃省重点研发计划项目 (21YFIGE300); 天水师范学院研究生创新引导项目 (TYCX2035)

作者简介: 令维军, 男, 教授, 博士, 主要从事超快激光技术方面的研究。

0 引言

1960年,第一台红宝石激光器问世之后,人们便打开了激光的大门。1962年,贝尔实验室的 L. F. Johnson 等人利用液氮制冷在掺铋晶体中首次获得了 $2\ \mu\text{m}$ 的激光输出^[1],但由于室温下获得激光运转较为困难,该方向的研究一直没有取得明显进展。尤其是 $2\ \mu\text{m}$ 超短激光脉冲的产生受限于 Tm^{3+} 小的受激发射截面导致的高运转阈值和空气中水蒸气对 $2\ \mu\text{m}$ 波段激光的吸收,使得锁模运转一直难以实现。直到 20 世纪 90 年代,随着光纤技术和锁模技术的发展, $2\ \mu\text{m}$ 激光脉冲首先在光纤振荡器中实现了锁模运转,随后在固体激光器中以其独特的优势和广泛的应用前景逐渐被激光研究者重视起来。 $2\ \mu\text{m}$ 波段超短激光脉冲具有超宽的中红外光谱,该波段正好处于生物分子吸收的“指纹”区域^[2],在精密时间分辨光谱学等领域应用广泛,借助脉冲放大技术通过载波包络相位控制,可以作为高效率阿秒脉冲产生驱动源和中红外光学频率梳,利用同步泵浦参量振荡技术可将光源波长扩展到 $3\sim 12\ \mu\text{m}$ 波段^[3]。文中主要介绍 $2\ \mu\text{m}$ 波段掺铋超短脉冲振荡器的最新研究进展。 $2\ \mu\text{m}$ 波段固体激光超短脉冲的产生方法主要有以下两种:一种是采用 $0.8\sim 1\ \mu\text{m}$ 超短激光脉冲作为泵浦源,通过同步泵浦参量振荡技术获得 $2\ \mu\text{m}$ 超短激光脉冲输出;另一种是利用掺 Ho^{3+} 、掺 Tm^{2+} 、掺 Cr^{2+} 等激光增益介质借助锁模技术直接产生^[4]。前者由于造价比较高、结构复杂且转换效率低逐渐被后者取代。最近 10 年随着锁模器件和激光材料研究的快速发展,借助锁模技术直接产生 $2\ \mu\text{m}$ 超短脉冲激光成为激光领域的热门研究方向。 $2\ \mu\text{m}$ 超短脉冲全固态振荡器目前主要朝着两个主流方向发展:(1)采用各种锁模元件和新型晶体结合使激光脉冲宽度不断缩短;(2)采用新的泵浦技术和新型晶体结合获得更高的激光输出功率。 $2\ \mu\text{m}$ 超短激光脉冲主流发展方向涉及到两个关键问题:锁模技术和激光增益基质。因此,论文通过 $2\ \mu\text{m}$ 波段锁模技术和 $2\ \mu\text{m}$ 波段激光增益介质两个方面来具体分析 $2\ \mu\text{m}$ 全固态超短脉冲振荡器的最新研究进展。

1 基于各种锁模技术的掺铋超短脉冲振荡器

1992年,Pinto 等人首次利用主动声光调制技术

在 $\text{Tm}:\text{YAG}$ 振荡器中实现了 $2\ \mu\text{m}$ 波段 $35\ \text{ps}$ 锁模脉冲输出^[5],开启了 $2\ \mu\text{m}$ 掺铋超短脉冲产生的研究热潮。但是,主动锁模受限于声光调制的响应时间和调制频率,只能得到皮秒量级超短脉冲,且调制器电路复杂,成本较高,所以主动锁模逐渐被被动锁模所替代。被动锁模基于可饱和吸收体的非线性光学可饱和和吸收效应,具有效率高、响应快、操作方便、容易实现的优点,并且可饱和吸收体价格相对低廉,大大降低了生产成本,是近年来 $2\ \mu\text{m}$ 超短激光脉冲产生的主要方式。克尔透镜锁模由于具有亚飞秒超快非线性响应速度成为产生更短周期量级激光脉冲的主要锁模方式。目前,基于可饱和吸收体被动锁模是 $2\ \mu\text{m}$ 超短脉冲产生的主要技术,按照文献报道频率依次有半导体可饱和吸收镜 (Semiconductor Saturable Absorber Mirror, SESAM)、碳纳米管 (Carbon Nanotubes, CNTs) 和氧化石墨烯 (Graphene Oxide, GO) 等。这里介绍几种常用锁模材料在 $2\ \mu\text{m}$ 掺铋全固态超短脉冲振荡器中的研究进展。

1.1 基于 SESAM 锁模的超短脉冲掺铋振荡器

$2\ \mu\text{m}$ 波段超短脉冲振荡器最常用的可饱和吸收体是 SESAM。SESAM 被动锁模激光谐振腔结构简单、操作方便、运行稳定,可商业化推广,目前已广泛用来产生皮秒和飞秒激光。1992年,U. Keller 团队首次将 SESAM 应用于被动锁模振荡器中^[6]。2010年,A. A. Lagatsky 等人首次利用 SESAM 在 $\text{Tm}:\text{Ho}:\text{NaY}(\text{WO}_4)_2$ 钨酸盐晶体中得到 $2\ \mu\text{m}$ 波段 $191\ \text{fs}$ 锁模脉冲,随后开启了利用 SESAM 实现 $2\ \mu\text{m}$ 锁模的研究高潮^[7]。2012年,上海交通大学马杰等人首次利用 LD 泵浦 $\text{Tm}:\text{CLNGG}$ 无序晶体实现了 $479\ \text{fs}$ 锁模运转^[8],其实验装置如图 1 所示,泵浦源为商用的 $790\ \text{nm}$ 铟钾砷激光二极管,锁模器件为 SESAM,实验结果如图 2 所示, $\text{Tm}:\text{CLNGG}$ 无序晶体振荡器输出脉宽为 $479\ \text{fs}$,重复频率为 $99\ \text{MHz}$,平均输出功率为 $288\ \text{mW}$ 。LD 泵浦大大降低了掺铋振荡器的价额,为 SESAM 锁模的 LD 泵浦全固态商业化 $2\ \mu\text{m}$ 超短脉冲振荡器提供了可行的技术方案。

2017年,Zhou 等人利用 $\text{Tm}:\text{CYA}$ 晶体作为增益介质结合 SESAM 锁模技术首次实现了瓦级的锁模振荡器的运转,平均输出功率高达 $1.35\ \text{W}$,是利用 SESAM 在块状晶体获得 $2\ \mu\text{m}$ 锁模激光的最高输出

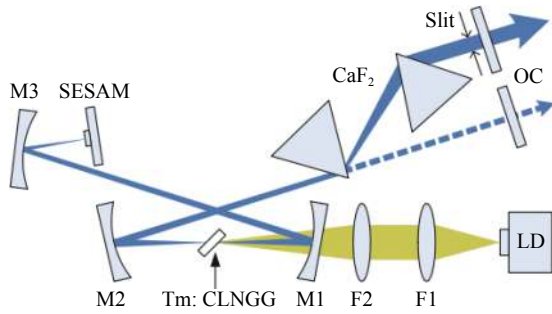


图 1 LD 泵浦 Tm: CLNGG 无序晶体实验装置图^[8]

Fig.1 Experimental setup of LD pumped Tm: CLNGG disordered crystal^[8]

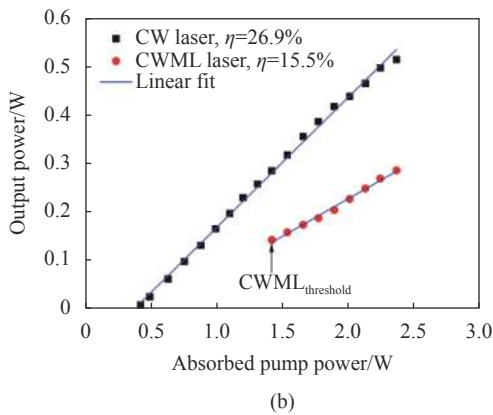
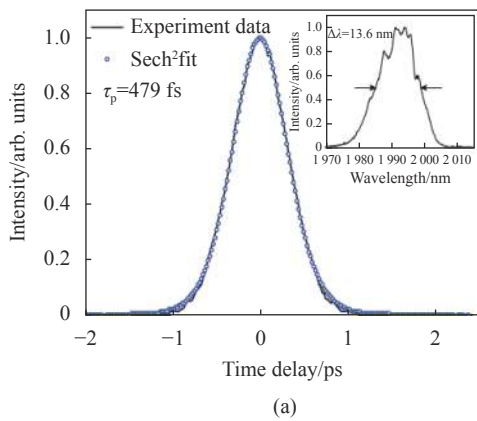


图 2 (a) 锁模脉冲的自相关曲线和光谱(插图)^[8]; (b) 不同运转模式下的输出功率与吸收泵功率关系^[8]

Fig.2 (a) Autocorrelation trace and optical spectrum (inset) of the mode-locked pulses^[8]; (b) Output power versus absorbed pump power in different operation regimes^[8]

功率^[9], 该结果表明 SESAM 可支持高功率锁模运转。2021 年, Wang 等人通过 SESAM 锁模方式在 Tm, Ho: CALO 振荡器中获得了 46 fs 的激光^[10], 这也是目前利用 SESAM 锁模获得的最短脉冲。尽管 SESAM 在 2 μm 波段固体激光锁模中有着较为广泛

的应用, 但是 SESAM 制备工艺复杂, 成本较高, 带宽有限, 从而限制了它的应用范围。表 1 概括了近五年来基于 SESAM 锁模的掺铥固体振荡器的研究进展。

表 1 基于 SESAM 锁模全固体掺铥振荡器总结

Tab.1 Summary of all solid state Tm-doped oscillators mode-locked by SESAMs

Laser medium	Average power/mW	Pulse width/fs	Ref.
Tm: CYA	1350	49000	[9]
Tm, Ho: CALO	121	46	[10]
Tm: LuAG	98	13600	[11]
Tm: YAP	730	1700	[12]
Tm, Ho: CALYO	27	87	[13]
Tm, Ho: CALGO	376	52	[14]
Tm, Ho: CNGG	36	73	[15]
Tm: LuYO ₃	133/51	59/54	[16]
Tm: LuAG	1210	38000	[17]
Tm: YLF	95	31000	[18]
Tm: YAG	150	30000	[19]
Tm: LuAG	232	2700	[20]
Tm: YLF	165	94000	[21]
Tm: CALGO	337	650	[22]
Tm: (Lu, Sc) ₂ O ₃	175/34	230/74	[23]

1.2 基于 CNTs 锁模的超短脉冲掺铥振荡器

碳纳米管是继 SESAM 后最早应用于锁模的新型可饱和吸收体材料, 具有制作成本低、响应时间短、工作波段范围广的特点。根据管壁的层数, 碳纳米管可以分为单壁碳纳米管 (Single-Walled Carbon Nanotubes, SWCNTs) 和多壁碳纳米管 (Multi-Walled Carbon Nanotubes, MWCNTs)。相对于双壁碳纳米管, 单壁碳纳米管的响应时间更快, 恢复时间更短, 调节波长更宽, 应用更为广泛。2009 年, Cho W B 等人首次利用 SWCNTs 作为锁模启动元件, 通过钛宝石振荡器泵浦 Tm: KLu(WO₄)₂ 晶体, 最终实现了输出功率为 240 mW, 脉宽为 9.7 ps 的脉冲输出^[24]。2012 年, 刘杰等人首次利用双壁碳纳米管在 2 μm 固体振荡器中实现锁模激光运转^[25]。2019 年, Zhao 等人基于 SWCNTs 在 Tm: LuYO₃ 陶瓷振荡器获得 2 μm 波段的激光, 脉宽为 57 fs^[26], 这也是目前利用 SWCNTs 锁模获得的最短脉冲。但是单壁碳纳米管也有缺点, 因其带宽受到其管径的限制, 会在腔内造成相当大的散射损

耗^[27]。表 2 概括了近五年来基于碳纳米管锁模的掺铥固体振荡器的研究进展。

表 2 基于 CNTs 锁模全固态掺铥振荡器总结

Tab.2 Summary of all solid state Tm-doped oscillators mode-locked by CNTs

Laser medium	Average power/mW	Pulse width/fs	Ref.
Tm: LuYO ₃	63	57	[26]
Tm, Ho: CLNGG	123	98	[28]
Tm: CNNGG	22	84	[29]
Tm, Ho: CNGG	67	76	[30]
Tm: CLNGG	54	78	[31]

1.3 基于 GO 锁模的超短脉冲掺铥振荡器

石墨烯是二维纳米结构碳材料,其损伤阈值比碳纳米管高,同时因为电阻率低、电子迁移率高、支持高功率运转、恢复时间短和饱和强度低等优点^[32],近年来在二维锁模材料中崭露头角。其吸收光谱覆盖 500~2000 nm,所以石墨烯可以运用在大部分脉冲振荡器中。2011 年, Liu 等人首次将氧化石墨烯 GO 作为可饱和吸收体在 Tm: YAP 振荡器中实现被动锁模^[33]。2019 年,笔者所在实验室首次采用 Tm: LuAG 在全固态振荡器中实现了瓦级调 Q 锁模,其中最高功率可达 1740 mW^[34]。2017 年, Wang Y 等人以 GO 作为可饱和吸收体在 Tm: MgWO₄ 振荡器得到锁模脉冲,脉冲宽度为 86 fs,这是目前为止基于 GO 可饱和吸收体获得的最短脉冲^[35]。目前,GO 作为可饱和吸收体已经广泛用于各种固体振荡器中,但是由于其非线性光学响应弱,调制深度浅,并且在制备中尺寸难以控制,无法进行大规模量产,进而限制了其在商业方面的应用。表 3 总结了近五年来基于石墨烯锁模的全固态掺铥振荡器的研究进展。

表 3 基于 GO 锁模全固态掺铥振荡器总结

Tab.3 Summary of all solid state Tm-doped oscillators mode-locked by GO

Laser medium	Average power/mW	Pulse width/fs	Ref.
Tm: LuAG	1740	923 800	[34]
Tm: MgW	39	86	[35]
Tm: YAP	256	35 000	[36]
Tm: YAG	158	2 800	[37]

1.4 基于其他二维锁模材料的掺铥振荡器

除以上锁模材料外,过渡金属硫化物、黑磷等材料近年来也用来产生 2 μm 超短脉冲。过渡金属硫化物具有损伤阈值高、非线性吸收特性好、宽带可调等优点,并且在近红外与中红外波段饱和特性优于石墨烯,弛豫时间在飞秒量级^[38]。2014 年, Xu 等人首次将过渡金属硫化物 MoS₂ 作为可饱和吸收体应用于超快固体振荡器^[39]。2020 年, Li 等人基于 MoS₂ 利用 LD 泵浦在 Tm: YAG 晶体上首次实现被动锁模,其中最窄脉冲宽度为 280 ps,最大平均输出功率为 0.2 W^[40]。过渡金属硫化物虽有很好的非线性特性,但制备较为复杂,限制了其应用。黑磷是一种具有恢复时间短、各向异性、大开关比和高承载流动性的纳米材料,与硫化物相比更容易得到。2015 年,山东大学 B. Zhang 等人首次将黑磷作为可饱和吸收体应用于固体振荡器中^[41]。2016 年, Xian 等人首次成功地将黑磷应用于固体振荡器产生 1053 nm 的飞秒脉冲,最高平均功率可达 0.82 W,相应脉宽为 272 fs^[42]。目前,利用黑磷作为锁模材料获得 2 μm 波段超短脉冲的报道主要集中在掺 Tm³⁺ 光纤振荡器中,关于黑磷锁模固体振荡器的报道甚少。这是由于黑磷在空气中容易被氧化,因此制备工艺还需要进一步改进。

1.5 基于克尔透镜锁模的超短脉冲掺铥振荡器

2 μm 超短脉冲固体激光研究在最近几年取得了丰硕的成果,其中获得更短的激光脉冲是主流研究方向,尤其是产生周期量级锁模脉冲是更具挑战性的课题。目前,实现亚 100 fs 脉冲输出均采用可饱和吸收体的被动锁模技术,锁模启动元件一般采用 SESAM、SWCNTs 和 GO 三种宽带可饱和吸收体,输出锁模脉冲受限于这些吸收体的非线性响应时间,这些吸收体的非线性响应时间为几十飞秒到亚皮秒之间^[43-44],因此基于可饱和吸收体的被动锁模技术限制了亚 50 fs 输出脉冲的产生,不再适合更短周期量级脉冲的产生。克尔透镜锁模非线性瞬态响应时间为亚飞秒 (<1 fs),且不受光谱带宽限制,利用克尔透镜自锁模技术是周期量级脉冲产生的最佳方案。但要实现 2 μm 波段的克尔透镜锁模,面临几方面的挑战:(1) 克尔透镜效应的大小与 ω^{-4} 成正比,其中 ω 是与激光波长平方根成正比的腔模半径。因此,波长越长,克尔效应越弱,相对于 800 nm 钛宝石和 1030 nm 掺铥振荡器克尔透镜

锁模, 2 μm 波段锁模克尔效应要弱很多^[45-46]。(2) 要实现自聚焦克尔透镜锁模运转, 腔内功率必须大于自聚焦临界功率^[47], 自聚焦临界功率正比于波长^[48], 相对于钛宝石和掺镱振荡器克尔透镜锁模, 2 μm 激光腔内自聚焦临界功率高出近一倍。基于以上原因, 目前 2 μm 波段仅有五例克尔透镜锁模报道, 第一例是日本电子通讯大学激光科学研究所利用 1.6 μm 同带泵浦技术在 Tm: Sc₂O₃ 中实现了克尔透镜锁模运转, 输出最短脉冲为 166 fs^[45]; 第二例是土耳其科萨大学激光研究组在腔内插入二级非线性系数很高的 ZnSe 晶体实现克尔透镜锁模, 输出脉冲宽度为 514 fs^[49]。第三例是马克斯-伯恩研究所借助 SWCNTs 辅助启动获得克尔透镜锁模, 在 Tm: MgWO₄ 中实现了锁模运转, 输出脉冲为 76 fs^[50]。第四例是日本电子通信大学激光科学研究所提出的一种基于 Tm: Lu₂O₃ 陶瓷和 Tm: Sc₂O₃ 单晶的组合增益介质克尔透镜锁模振荡器^[51]。其实验装置图如图 3 所示。实验结果如图 4 所示。在波长为 2.1 μm 的情况下, 获得了 41 fs 的脉冲输出, 平均输出功率为 42 mW, 对应的脉冲宽度不到 6 个光学周期, 这也是目前获得的 2 μm 波段的最

短脉冲。第五例是最近德国 Max-Born 非线性光学研究所利用掺钛蓝宝石激光器为泵浦源在倍半氧化物陶瓷 Tm: (Lu, Sc)₂O₃ 激光器中首次实现克尔透镜锁模, 输出脉冲宽度为 58 fs, 输出功率高达 220 mW^[52]。

截至目前为止, 还没有用常规泵浦源 790 LD 直接泵浦实现克尔透镜锁模的报道, 利用 790 nm LD 泵浦源通过纯克尔透镜锁模获得周期量级脉冲成了目前诱人的挑战和亟待解决的问题。

2 各种增益介质超短脉冲掺铥振荡器

激光介质的各种特性决定了锁模启动难易程度和更短脉冲的色散补偿。激光介质的输出光谱调谐越宽、光谱调制越小, 越容易补偿色散, 获得更短脉冲; 介质二阶非线性系数大小决定克尔透镜锁模启动的难易程度, 系数越大越是容易启动克尔透镜锁模运转; 激光介质热导率越大, 越支持更高功率的锁模运转。目前 2 μm 超短激光脉冲在多种掺铥和铥钽共掺的固体振荡器中已实现锁模运转, 并且通过色散补偿技术致力于更短脉冲产生研究。现阶段寻找光谱特性和导热特性等更优异的基质成为激光增益材料研究的重要方向, 平滑的宽带光谱特性支持更短的脉冲和更稳定的锁模运转, 高导热系数支持更高的锁模输出功率。根据激光介质分类, 笔者分别介绍各种掺铥和铥钽共掺增益介质的超短脉冲全固态振荡器最新研究现状。

2.1 单晶介质超短脉冲掺铥振荡器

单晶是实现 2 μm 波段脉冲激光最常见的增益介质, 由于其化学性质稳定、荧光谱线较窄, 发光效率高容易实现大功率运转, 被广泛用于连续和脉冲振荡器中, 近五年来单晶研究进展如表 4 所示。在石榴石晶体中常见的是镱铝石榴石 (LuAG)^[11] 和钇铝石榴石 (YAG)^[53], 目前可实现的最短脉宽分别是 13.6 ps 和 21.3 ps。在铝酸盐晶体中常见的介质是铝酸钇 (YAP)^[12,54] 和铝酸钇钙 (CaYAlO₄, CALYO)^[13], 目前可实现的最短脉冲分别为 1.7 ps 和 87 fs。在硅酸盐晶体中常见的介质是硅酸钇镱 (LuYSiO₅, LYSO)^[55], 输出的最短脉冲为 19.6 ps。在钨酸盐类激光介质中钨酸钇钾 (KY(WO₄)₂, KYW)^[56]、钨酸镱钾 (KLu(WO₄)₂, KLuW)^[57]、钨酸钇钠 (NaY(WO₄)₂, NYW)^[7]、钨酸镁 (MgWO₄)^[50] 较为常见, 目前达到的最短脉冲分别为:

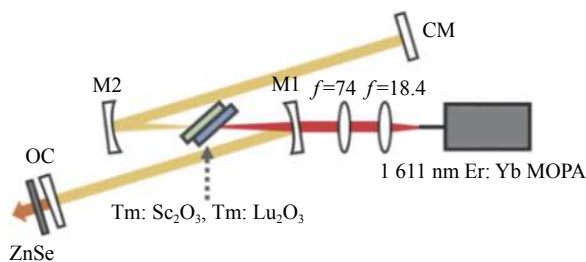


图 3 组合增益介质 KLM 振荡器的实验装置^[51]

Fig.3 experimental setup of KLM laser with combined gain medium^[51]

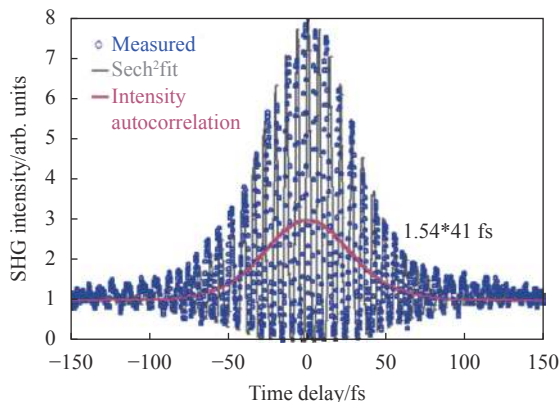


图 4 0.5%OC 压缩后的倍频强度自相关曲线^[51]

Fig.4 SHG intensity autocorrelation trace after compression with the 0.5% OC^[51]

549 fs、141 fs、191 fs 和 76 fs。无序晶体介质输出光谱均比较平滑易调制,色散补偿容易获得更短激光脉冲,其中铝酸钪钙 (CALGO)^[14]、钙铈钕镱晶体 (CLNGG)^[28]、钙铈镱晶体 (CNGG)^[15] 较为常见,输出最短脉冲分别为 52 fs、67 fs 和 73 fs。氟化物晶体中常见的晶体主要包括氟化钇锂 (LiYF₄, YLF)、氟化镱锂 (LiLuF₄, LLF)。2018 年,笔者所在实验室首次在 LLF 晶体中实现 2 μm 锁模^[58]。目前氟化物振荡器以 Tm:YLF^[49]、Tm, Ho:LiLuF₄^[59]、Tm:LLF^[58] 为代表,其中输出脉冲分别为 514 fs、4.7 ps 和 14 ps。表 4 总结了近五年单晶介质超短脉冲掺铥振荡器输出指标。

表 4 单晶介质超短脉冲全固态掺铥振荡器总结

Tab.4 Summary of ultrashort pulse all solid state Tm-doped oscillators with single crystal gain medium

Laser medium	Mode-locked device	Average power/mW	Pulse width/fs	Ref.
Tm: CYA	SESAM	1 350	49 000	[9]
Tm, Ho: CALO	SESAM	121	46	[10]
Tm: LuAG	SESAM	98	13 600	[11]
Tm: YAP	SESAM	730	1 700	[12]
Tm, Ho: CALYO	SESAM	27	87	[13]
Tm, Ho: CALGO	SESAM	376	52	[14]
Tm, Ho: CNGG	SESAM	36	73	[15]
Tm: LuAG	SESAM	1 210	38 000	[17]
Tm: YLF	SESAM	95	31 000	[18]
Tm: YLF	SESAM	165	94 000	[21]
Tm: CALGO	SESAM	337	650	[22]
Tm, Ho: CLNGG	SWCNTs	123	98	[28]
Tm: CNNGG	SWCNTs	22	84	[29]
Tm, Ho: CNGG	SWCNTs	67	76	[30]
Tm: CLNGG	SWCNTs	54	78	[31]
Tm: MgW	Graphene	39	86	[35]
Tm: YAP	Graphene	256	35 000	[36]
Tm: YAG	MoS ₂	200	280 000	[40]
Tm: Sc ₂ O ₃	KLM	440	166	[45]
Tm: YLF	KLM	14.4	514	[49]
Tm: MgW	KLM	100	89	[50]

2.2 玻璃介质超短脉冲掺铥振荡器

玻璃虽然热导率比激光晶体低,但是玻璃具有各向同性^[60]、介稳性、熔点不固定、性质变化的可逆性和连续性^[61]的特点,并且玻璃容易制备,容易加工,

可调谐范围宽,在 2 μm 波段脉冲激光产生中具有明显的优势。1964 年,干福熹等人在掺铈的硅酸盐玻璃中得到激光的输出^[62]。但是硅酸盐玻璃声子能量太高使能级之间无辐射跃迁几率上升导致中红外光消失,所以硅酸盐玻璃不适合作为 2 μm 波段脉冲激光的增益介质^[63]。研究表明:碲酸盐玻璃在所有氧化物中其声子能量最低,稀土粒子溶解能力强,因此碲酸盐玻璃基质是一种很有潜力的中红外激光基质材料^[64]。2010 年, F Fusariy 等人在 Tm: GPNG 和 Tm, Ho: TZN 增益介质中实现锁模运转,脉冲宽度分别为 410 fs 和 630 fs^[65]。由于玻璃导热性差,易脆裂等特性限制了 2 μm 波段的锁模应用,研发适合固体振荡器的玻璃基质是亟待解决的问题。

2.3 陶瓷介质超短脉冲掺铥振荡器

自 1964 年世界上第一台陶瓷振荡器问世^[66]后,陶瓷便进入了大家的视野。激光陶瓷的光学性质和激光晶体的类似,但是陶瓷还具有制备工艺简单、容易获取、成本低和热导率高的优点,在 2 μm 波段固体超快激光中有着广阔的应用前景,近五年来 2 μm 波段陶瓷固体振荡器研究进展如表 5 所示。常见的激光陶瓷基质有 YAG 陶瓷^[67]和氧化物陶瓷,氧化物陶瓷介质包括 LuYO₃^[16]、Lu₂O₃^[68]和倍半氧化物键合陶瓷 Tm: (Lu, Sc)₂O₃^[52]。其中 YAG 陶瓷最短脉冲输出为 2.1 ps,氧化物陶瓷最短脉冲输出为 54 fs、180 fs 和 58 fs。氧化物陶瓷介质具有优异的热传导性能和机械性能,并且 1 980 nm 以上具有十分宽的增益带宽,避免了水分子 Q 调制对锁模的影响,适合于高功率锁模运转,同时具有很高的二阶非线性系数(是 YAG 介

表 5 各种陶瓷介质超短脉冲全固态掺铥振荡器总结

Tab.5 Summary of ultrashort pulse all solid state Tm-doped oscillators with ceramic gain medium

Laser medium	Mode-locked device	Average power/mW	Pulse width/fs	Ref.
Tm: LuYO ₃	SESAM	133/51	59/54	[16]
Tm: YAG	SESAM	150	30 000	[19]
Tm: LuAG	SESAM	232	2 700	[20]
Tm: (Lu, Sc) ₂ O ₃	SESAM	175/34	230/74	[23]
Tm: LuYO ₃	SWCNTs	63	57	[26]
Tm: YAG	Graphene	158	2 800	[37]
Tm: (Lu, Sc) ₂ O ₃	KLM	220	58	[52]

质的 2 倍)^[69], 具有很强的克尔效应和自相位调制, 是克尔透镜锁模最具潜力的首选材料。表 5 总结了各种掺铥陶瓷固体振荡器的最短脉冲输出指标。

3 2 μm 高功率超短脉冲掺铥振荡器

2 μm 全固态超短脉冲掺铥振荡器发展的另一个趋势是更高的输出功率, 尤其是瓦级输出功率。优异的光束质量和高的输出功率十分适合作为 3~8 μm 超短脉冲激光产生的泵浦源。2017 年, Zhou 等人基于 SESAM 锁模技术在 Tm: CYA 振荡器上首次实现了瓦级的锁模振荡器的运转, 平均输出功率高达 1.35 W^[9]。实验所用 Z 型激光腔由四个反射镜构成, 泵浦源为 790 nm LD, 实验装置如图 5 所示。

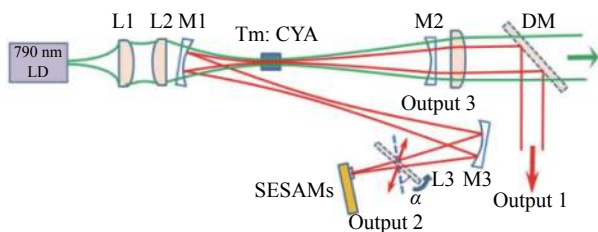


图 5 Tm: CYA 振荡器的实验装置图^[9]

Fig.5 Experimental setup of Tm: CYA oscillator^[9]

实验稳定的锁模波长可以从 1 874~1 973 nm 调谐, 可调谐的波长范围可达 100 nm, 最大输出功率高达 1.35 W。可调谐锁模 Tm: CYA 振荡器在不同输出镜下的输出功率如图 6 所示。

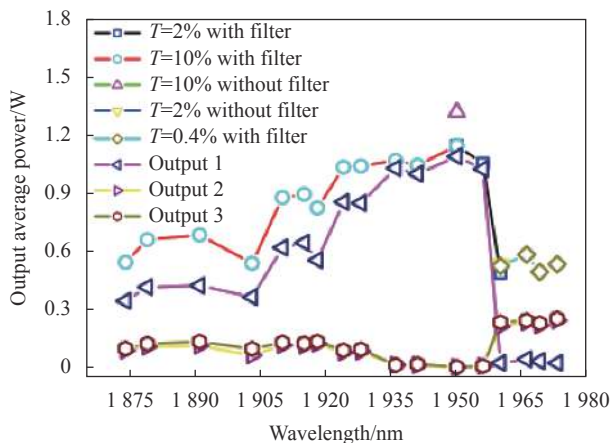


图 6 Tm: CYA 振荡器的输出功率^[9]

Fig.6 Output power of Tm: CYA oscillator^[9]

表 6 总结了最近几年输出功率大于 500 mW 全固态振荡器的具体指标。在以下基质中, 无论单晶还是

陶瓷介质, 石榴石晶体 (LuAG) 和铝酸盐晶体 (CYA) 均具有高功率输出, 主要是这两种晶体均具备大的增益发射截面和高的热导率, 十分适合高功率输出。由于玻璃热导率不高, 加上热膨胀时易于脆裂, 所以不适合高功率超短激光脉冲输出, 目前该类超短脉冲全固态振荡器最高输出功率均在 100 mW 以下。

表 6 功率高于 500 mW 的超短脉冲全固态掺铥振荡器总结

Tab.6 Summary of ultra short pulse all solid state Tm-doped oscillators with output power higher than 500 mW

Gain medium type	Laser medium	Average power/mW	Pulse width/fs	Ref.
Single crystal	Tm: CYA	1350	49000	[9]
	Tm: YAP	730	1700	[12]
	Tm: KYW	549	549	[56]
	Tm: LuAG	1210	38000	[17]
Ceramics	Tm: LuAG	1740	923000	[34]
	Tm: Lu ₂ O ₃	750	382	[68]

4 总结与展望

该文主要综述了 2 μm 超短脉冲全固态掺铥振荡器的研究现状, 主要从激光锁模元件和掺杂 Tm³⁺(或 Tm³⁺, Ho³⁺共掺) 基质材料出发研究了 2 μm 波段超短脉冲振荡器最新研究进展, 并结合介质发射截面和热导率对高功率振荡器进行了总结。

在被动锁模方面, 主要论述了基于 SESAM、碳纳米管、二维材料等材料的被动锁模技术和基于固体材料克尔透镜效应的克尔透镜锁模技术。SESAM 是产生 2 μm 波段脉冲激光的常用锁模元件, 它的脉冲宽度可以达到飞秒量级, 并且锁模运行稳定, 适合商业化应用。但是 SESAM 制备成本比较高, 并且可调谐范围窄, 没有国产化产品, 一定程度限制了其应用。二维材料具有优秀的光学和电学特性, 相对于 SESAM 拥有更快的响应速度, 支持更宽的光谱带宽。常用来锁模的材料主要有: 碳纳米管、石墨烯、过渡金属硫化物和黑磷等。目前, 很多二维材料已经实现了 2 μm 波段脉冲激光锁模运转, 二维材料与固体振荡器相结合, 为 2 μm 波段激光发展带来了新的机遇。研究新

型二维材料,提高二维材料损伤阈值,制备性能稳定的二维材料成为亟需解决的问题。进一步缩短脉冲宽度是 2 μm 激光发展的主要趋势,目前 2 μm 锁模脉冲还未突破 40 fs 大关,这主要受限于被动锁模非线性响应时间,克尔透镜锁模非线性瞬态响应时间极短,且不受光谱带宽限制,利用克尔透镜自锁模技术,是目前突破 40 fs 脉宽瓶颈,产生周期量级脉冲的最佳方案,未来克尔透镜锁模在周期量级 2 μm 脉冲产生中将发挥巨大的作用。

在基于掺铥介质的克尔透镜锁模方面,2 μm 锁模振荡器普遍采用钛宝石振荡器或者 790 nm 半导体振荡器(LD)作为泵浦源,但到目前为止还没有常规泵浦得到克尔透镜锁模的报道,虽然目前已采用 1611 nm 光纤激光器和钛宝石激光器作为泵浦源实现克尔透镜锁模运转,但钛宝石激光器结构复杂,价格昂贵;1611 nm 光纤激光器虽然比钛宝石价格便宜,但相对 790 nm LD 依然存在价格高、结构庞大等缺点,790 nm LD 泵浦的克尔透镜锁模振荡器将大大降低 2 μm 超短脉冲激光器的市场价格,这将是 2 μm 超短脉冲掺

铥振荡器发展的一个重要趋势。2 μm 波段掺铥振荡器可以实现周期量级脉冲和高的光束质量,使其比 2 μm 光纤振荡器更有竞争力。在所有的激光增益介质中,氧化物基质具有很高的二阶非线性系数,具有很强的克尔效应和自相位调制,同时降低了克尔透镜锁模的自聚焦临界功率,因此最易实现克尔透镜锁模运转,同时强的自相位调制拓宽了光谱,有利于获得周期量级脉冲,直接通过克尔透镜锁模获周期量级脉冲是亟需解决的问题。

在基于各种掺铥增益介质超短脉冲振荡器研究方面,人们已经发现和研制出各种 Tm³⁺和 Tm³⁺、Ho³⁺共掺离子掺杂的激光基质,如图 7 所示,有些基质在高功率方面表现不俗,有些基质在超短脉冲方面表现突出。掺杂 Tm³⁺、Ho³⁺基质材料主要有单晶、陶瓷和玻璃。单晶主要分为石榴石晶体、硅酸盐晶体、铝酸盐晶体、氟化物晶体、钨酸盐晶体和无序晶体等。其中传统的激光晶体例如 YAG、CYA、LuAG 等,这些晶体制备工艺成熟,其光学性能、化学性质比较优秀,具有高激光转换效率,可以用来获得大功率超快激

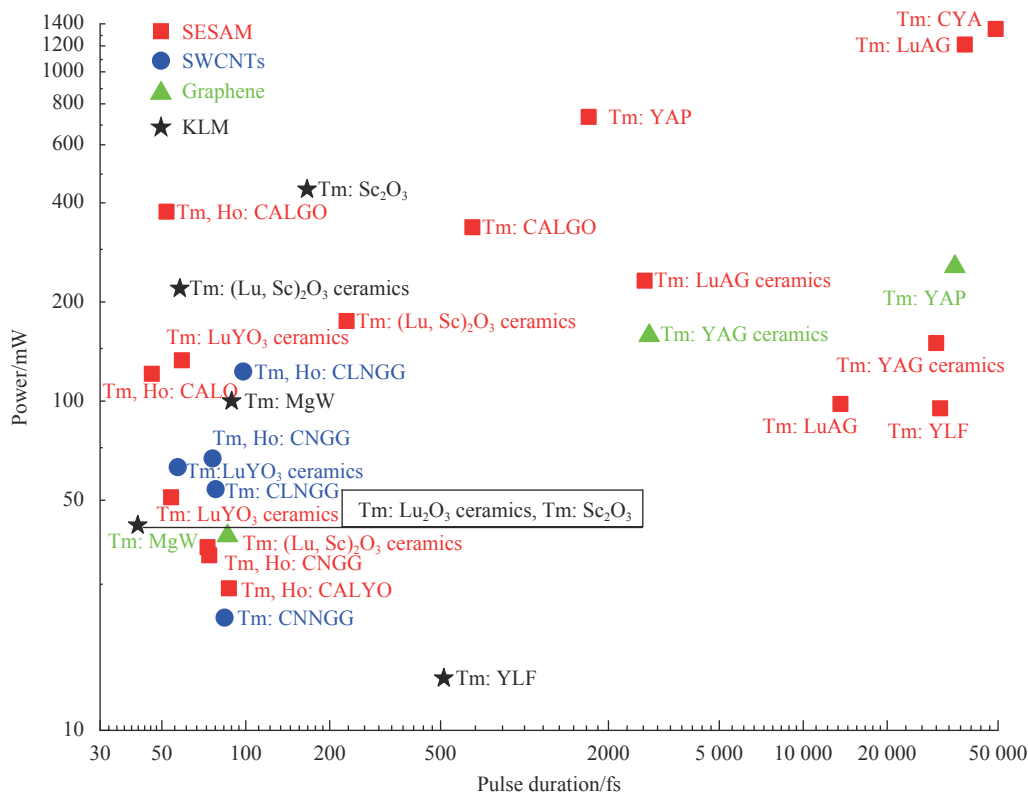


图 7 2 μm 超短脉冲全固态掺铥振荡器研究总结

Fig.7 Research summary of 2 μm ultrashort pulse all solid state Tm-doped oscillator

光。无序介质受激发射面大,调谐范围广,均匀增宽机制使输出光谱平滑无调制,易于补偿色散得到更短的脉冲,其光谱输出均支持 200 fs 以下的飞秒脉冲产生。这类介质吸收光谱和发射光谱较宽,适合 LD 泵浦。陶瓷材料近年来的发展迅猛,在超短脉冲产生方面具有后来居上的势头。陶瓷基质具有较好的光学激光性质和高的热导率,可高浓度掺杂的优点,是未来固体振荡器理想的增益介质。目前进一步提高陶瓷烧制工艺,获得高质量高性能陶瓷是面临的问题。2 μm 超短激光脉冲另一个发展趋势是获得瓦级运转的高功率超短脉冲振荡器,近年来氧化物陶瓷因其出色的散热性和高的非线性特性,将会成为产生高功率周期量级 2 μm 波段激光的重要候选基质。这类基质热学性能比较好,超快激光性能优越,是一种潜在的超快激光增益介质,但是它的熔点比较高,难以获得大尺寸限制了其应用,提高氧化物制备工艺,获得大尺寸陶瓷是亟待解决的问题。在玻璃基质方面研究相对较少,但是玻璃具有良好的成型能力、热稳定性和光谱特性,在 2 μm 波段脉冲激光获取中也发挥了巨大的作用。大量科学研究表明:碲钨酸盐玻璃是一种潜在的高效中红外激光玻璃基质^[70],是玻璃基质中重要的研究对象,在未来 2 μm 波段固体激光中有着潜在的应用前景。

在 2 μm 超短激光脉冲产生方面,德国 Max-Born 非线性光学研究所处于国际领先水平,其研究小组分别在陶瓷氧化物介质 LuYO_3 ^[26] 和无序介质 Calcium Aluminate^[10] 中实现目前国际上最短的锁模脉冲,其脉冲宽度已经达到亚 50 fs,进入了 6 个光学周期以内;国内上海交通大学、山东大学、中国科学院物理研究所、西安电子科技大学、山东师范大学、哈尔滨工业大学、天水师范学院等在 2 μm 固体激光锁模方面也取得了丰硕的成果,上海交通大学谢国强组首次在国际上实现了 790 nm LD 抽运的 2 μm 固体激光锁模飞秒输出^[8],与价格高昂的掺钛蓝宝石振荡器泵浦源相比,该方案大大降低了 2 μm 超短脉冲光源的成本,为发展商业化、小型化、高效率的 2 μm 超快光源提供了可行的方案。基于 LD 泵浦的高功率周期量级 2 μm 波段超短脉冲的产生将是激光技术最终追求的指标,也是目前面临的挑战性问题。

参考文献:

- [1] Johnson F L. Optical maser characteristics of rare-earth ions in crystals [J]. *Journal of Applied Physics*, 1963, 34(4): 897-909.
- [2] Sorokin E, Sorokina I T, Mandon J, et al. Sensitive multiplex spectroscopy in the molecular fingerprint 2.4 μm region with a Cr^{2+} : ZnSe femtosecond laser [J]. *Optics Express*, 2007, 15(25): 16540-16545.
- [3] Mairesse Y, de Bohan A, Frasninski L J, et al. Optimization of attosecond pulse generation [J]. *Physical Review Letters*, 2004, 93(16): 163901.
- [4] Zhang J, Mak K F, Pronin O. Kerr-lens mode-locked 2 μm thin-disk lasers [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2018, 24(5): 1-11.
- [5] Pinto J F, Esterowitz L, Rosenblatt G H. Continuous wave mode-locked 2 μm Tm: YAG laser [J]. *Optics Letters*, 1992, 17(10): 731-732.
- [6] 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 Letter*, 1992, 17(7): 505-507.
- [7] Lagatsky A A, Han X, Serrano M D, et al. Femtosecond (191 fs) $\text{NaY}(\text{WO}_4)_2$ Tm, Ho-codoped laser at 2060 nm [J]. *Optics Letters*, 2010, 35(18): 3027-3029.
- [8] Ma J, Xie G Q, Gao W L, et al. Diode pumped mode-locked femtosecond Tm: CLNGG disordered crystal laser [J]. *Optics Letters*, 2012, 37(8): 1376-1378.
- [9] Zhou W, Xu X, Xu R, et al. Watt-level broadly wavelength tunable mode locked solid-state laser in the 2 μm water absorption region [J]. *Photonics Research*, 2017, 5(6): 583-587.
- [10] Wang L, Chen W, Zhao Y, et al. Sub-50 fs pulse generation from a SESAM mode-locked Tm, Ho-codoped calcium aluminate laser [J]. *Optics Letters*, 2021, 46(11): 2642.
- [11] Luan C, Yang K, Zhao J, et al. Diode-pumped mode locked Tm: LuAG laser at 2 μm based on GaSb SESAM [J]. *Optics Letters*, 2017, 42(4): 839-842.
- [12] Zhang H L, Huang J Y, Zhou C, et al. 2 μm -band Tm: YAP Crystal semiconductor saturable absorption mirror CW mode-locked laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(5): 0505003. (in Chinese)
- [13] Zhao Y, Wang Y, Zhang X, et al. 87 fs mode locked Tm, Ho: CaYAlO_4 laser at 2043 nm [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(4): 915-918.
- [14] Wang Y, Zhao Y, Loiko P, et al. 52 fs SESAM mode hocked Tm, Ho: CALGO laser[C]//Advanced Solid State Lasers, 2019.

- [15] Wang Y C, Zhao Y G, Pan Z B, et al. 73 fs SESAM mode-locked Tm, Ho: CNGG laser at 2061 nm[C]//Solid State Lasers Technology and Devices, 2020.
- [16] Chen W, Mero M, Wang Y, et al. SESAM mode-locked Tm: LuYO₃ ceramic laser generating 54-fs pulses at 2048 nm [J]. *Applied Optics*, 2020, 59(33): 10493.
- [17] Feng T, Yang K, Zhao J, et al. 1.21 W passively mode-locked Tm: LuAG laser [J]. *Optics Express*, 2015, 23(9): 11819-11824.
- [18] Tyazhev A, Soulard R, Godin T, et al. Passively mode locked diode pumped Tm³⁺: YLF laser emitting at 1.91 μm using a GaAs-based SESAM [J]. *Laser Physics Letters*, 2018, 15: 045807.
- [19] Gluth A, Wang Y, Petrov V, et al. GaSb based SESAM mode-locked Tm: YAG ceramic laser at 2 μm [J]. *Optics Express*, 2015, 23(2): 1361-1369.
- [20] Wang Y, Lan R, Mateos X, et al. Thulium doped LuAG ceramics for passively mode locked lasers [J]. *Optics Express*, 2017, 25(6): 7084-7091.
- [21] Soulard R, Tyazhev A, Doualan J, et al. 2.3 μm Tm³⁺: YLF mode locked laser [J]. *Optics Letters*, 2017, 42(18): 3534-3536.
- [22] Wang Y, Xie G, Xu X, et al. SESAM mode locked Tm: CALGO laser at 2 μm [J]. *Optical Materials Express*, 2016, 6(1): 131-136.
- [23] Wang Y, Wei J, Loiko P, et al. Sub-10 optical-cycle passively mode-locked Tm: (Lu_{2/3}Sc_{1/3})₂O₃ ceramic laser at 2 μm [J]. *Optics Express*, 2018, 26(8): 10299.
- [24] Cho W B, Schmidt A, Yim J H, et al. Passive mode-locking of a Tm-doped bulk laser near 2 microm using a carbon nanotube saturable absorber [J]. *Optics Letters*, 2009, 17(13): 11007-11012.
- [25] Qu Z, Wang Y, Liu J, et al. Passively mode locked 2-μm Tm: YAP laser with a double-wall carbon nanotube absorber [J]. *Chinese Physics B*, 2012, 21(6): 064211.
- [26] Zhao Y G, Li W, Wang Y C, et al. SWCNT-SA mode-locked Tm: LuYO₃ ceramic laser delivering 8-optical-cycle pulses at 2 μm [J]. *Optics Letters*, 2020, 45(2): 459.
- [27] Schmidt A, Rivier S, Steinmeyer G, et al. Passive mode locking of Yb: KLuW using a single walled carbon nanotube saturable absorber [J]. *Optics Letters*, 2008, 33(7): 729-731.
- [28] Zhao Y G, Wang Y C, Chen W D, et al. 67 fs pulse generate-on from a mode-locked Tm, Ho: CLNGG laser at 2083 nm [J]. *Optics Express*, 2019, 27(3): 1922.
- [29] Pan Z, Wang Y, Zhao Y, et al. Generation of 84-fs pulses from a mode-locked Tm: CNNGG disordered garnet crystal laser [J]. *Photonics Research*, 2018, 6(8): 800-804.
- [30] Pan Z, Wang Y, Zhao Y, et al. Sub-80 fs mode locked Tm, Ho codoped disordered garnet crystal oscillator operating at 2081 nm [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(20): 5154-5157.
- [31] Wang Y, Zhao Y, Pan Z, et al. 78 fs SWCNT SA mode- locked Tm: CLNGG disordered garnet crystal laser at 2017 nm [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(17): 4268-4271.
- [32] Breusing M, Ropers C, Elsaesser T, et al. Ultrafast carrier dynamics in graphite [J]. *Physical Review Letters*, 2009, 102(8): 086809.
- [33] Liu J, Wang Y G, Qu Z S, et al. Graphene oxide absorber for 2 μm passive mode - locking Tm: YAlO₃ laser [J]. *Laser Physics Letters*, 2011, 9(1): 15-19.
- [34] Sun R, Chen C, Ling W, et al. Watt-level passively Q-switched mode-locked Tm: LuAG laser with graphene oxide saturable absorber [J]. *Acta Physica Sinica*, 2019, 68(10): 104207. (in Chinese)
- [35] Wang Y, Chen W, Mero M, et al. Sub-100 fs Tm: MgWO₄ laser at 2017 nm mode locked by a graphene saturable absorber [J]. *Optics Letters*, 2017, 16(42): 3076-3079.
- [36] Wan H, Cai W, Wang F. et al. et al. High-quality monolayer graphene for bulk laser mode-locking near 2 μm [J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2016, 48(11): 1-8.
- [37] Ma J, Xie G Q, Zhang J, et al. Passively mode-locked Tm: YAG ceramic laser based on graphene [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2015, 21(1): 160-165.
- [38] Wang K P, Wang J, Fan J T, et al. Ultrafast saturable absorption of two dimensional MoS₂ nanosheets [J]. *ACS Nano*, 2013, 7(10): 9260-9267.
- [39] Xu B, Cheng Y J, Wang Y, et al. Passively Q-switched Nd: YAlO₃ nanosecond laser using MoS₂ as saturable absorber [J]. *Optics Express*, 2014, 22(23): 28934-28940.
- [40] Li L J, Zhou L, Li T X, et al. Passive mode- locking operation of a diode pumped Tm: YAG laser with a MoS₂ saturable absorber [J]. *Optics and Laser Technology*, 2020, 124: 105986.
- [41] Zhang B, Lou F, Zhao R, et al. Exfoliated layers of black phosphorus as saturable absorber for ultrafast solid-state laser [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(16): 3691-3694.
- [42] Su X, Wang Y, Zhang B, et al. Femtosecond solid-state laser based on a few-layered black phosphorus saturable absorber [J]. *Optics Letters*, 2016, 41(9): 1945-1948.
- [43] Predan F, Ohlmann J, Mrabet S, et al. Hall characterization of epitaxial GaSb and AlGaAsSb layers using p-n junctions on GaSb substrates [J]. *Journal of Crystal Growth*, 2018, 496(8): 36-42.
- [44] Kumar R, Sahoo S, Joanni E, et al. A review on synthesis of

- graphene, h-BN and MoS₂ for energy storage applications: Recent progress and perspectives [J]. *Nano Research*, 2019, 12(11): 2655-2694.
- [45] Kränkel C, Fujita E, Tokurakawa M. Kerr-lens mode-locked Tm³⁺: Sc₂O₃ single-crystal laser in-band pumped by an Er: Yb fiber mopa at 1611 nm [J]. *Optics Letters*, 2017, 42(16): 3185.
- [46] Haus H A, Fujimoto J G, Ippen E P. Analytic theory of additive pulse and Kerr lens mode locking [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1992, 28(10): 2086-2096.
- [47] Huang D, Ulman M, Acioli L H, et al. Self-focusing-induced saturable loss for laser mode locking [J]. *Optics Letters*, 1992, 17(7): 511.
- [48] Senatsky Y, Shirakawa A, Sato Y, et al. Nonlinear refractive index of ceramic laser media and perspectives of their usage in a high - power laser - driver [J]. *Laser Physics Letters*, 2004, 1(10): 500-506.
- [49] Canbaz F, Yorulmaz I, Sennaroglu A. Kerr-lens mode-locked 2.3- μm Tm³⁺: YLF laser as a source of femtosecond pulses in the mid-infrared [J]. *Optics Letters*, 2017, 42(19): 3964.
- [50] Wang L, Chen W D, Zhao Y G, et al. Single-walled carbon-nanotube saturable absorber assisted Kerr-lens mode-locked Tm: MgWO₄ laser [J]. *Optics Letters*, 2020, 45(22): 6142-6145.
- [51] Suzuki A, Kränkel C, Tokurakwa M. Sub-6 optical-cycle Kerr-lens mode-locked Tm: Lu₂O₃ and Tm: Sc₂O₃ combined gain media laser at 2.1 μm [J]. *Optics Express*, 2021, 29(13): 19465-19471.
- [52] Zhao Y, Wang L, Chen W, et al. Kerr-lens mode-locked Tm-doped sesquioxide ceramic laser [J]. *Optics Letters*, 2021, 46(14): 3428-3431.
- [53] Yang K, Heinecke D, Paajaste J, et al. Mode-locking of 2 μm Tm, Ho: YAG laser with GaInAs and GaSb-based SESAMs [J]. *Optics Express*, 2013, 21(4): 4311-4318.
- [54] Yang K J, Heinecke D C, Kolbl C, et al. Mode locked Tm, Ho: YAP laser around 2.1 μm [J]. *Optics Express*, 2013, 21(2): 1574-1580.
- [55] Yang K J, Bromberger H, Heinecke D, et al. Efficient continuous wave and passively mode-locked Tm-doped crystalline silicate laser [J]. *Optics Express*, 2012, 20(17): 18630-18635.
- [56] Lagatsky A A, Calvez S, Gupta J A, et al. Broadly tunable femtosecond mode locking in a Tm: KYW laser near 2 μm [J]. *Optics Express*, 2011, 19(10): 9995-10000.
- [57] Schmidt A, Sun Y C, Yeom D I, et al. Femtosecond pulses near 2 μm from a Tm: KLuW laser mode locked by a single walled carbon nanotube saturable absorber [J]. *Applied Physics Express*, 2012, 5(9): 2704.
- [58] Ling W J, Xia T, Dong Z, et al. 1.91 μm Passively continuous-wave mode-locked Tm: LiLuF₄ laser [J]. *Optics & Laser Technology*, 2018, 108: 364-367.
- [59] Ling W J, Xia T, Dong Z, et al. Passively mode-locked Tm, Ho: LLF laser at 1895 nm [J]. *Journal of Optics*, 2019, 48(2): 209-213.
- [60] Cheng S J. Design and fluorescence properties of rare earth doped fluoride glass ceramics [D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2015: 1-3. (in Chinese)
- [61] Nikov R, Nedyalkov N, Koleva M, et al. Femtosecond laser modification of the optical properties of glass containing noble-metal nanoparticles [J]. *Journal of Physics Conference Series*, 2020, 1492: 012058.
- [62] Gan F X, Jiang Z H, Cai Y S. Research on Nd³⁺ activated inorganic glass state acceptor laser emitter working material [J]. *Science Bulletin*, 1964, 1: 54-57. (in Chinese)
- [63] Dai S X, Peng B, Wang X. 4.3-5 μm progress in the research of sulfur based glass materials with m medium infrared light emission [C]//National Special Glass Conference of Special Glass Branch of China Silicate Society, 2008. (in Chinese)
- [64] Zhang Y, Xia L, Shen X, et al. Broadband mid-infrared emission in Dy³⁺/Er³⁺ co-doped tellurite glass [J]. *Journal of Luminescence*, 2021, 236(11): 118078.
- [65] Fusari F, Lagatsky A A, Jose G, et al. Femtosecond mode-locked Tm³⁺ and Tm³⁺-Ho³⁺ doped 2 μm glass lasers [J]. *Optics Express*, 2010, 18(21): 22090-22098.
- [66] Hatch S E, Parsons W F, Weagley R J. Hot-pressed polycrystalline CaF₂ Dy²⁺ laser [J]. *Applied Physics Letters*, 1964, 5(8): 153-154.
- [67] Wang Y C, Lan R J, Mateos X, et al. Broadly tunable mode-locked Ho: YAG ceramic laser around 2.1 μm [J]. *Optics Express*, 2016, 24(16): 18003-18012.
- [68] Lagatsky A A, Antipov O L, Sibbett W. Broadly tunable femtosecond Tm: Lu₂O₃ ceramic laser operating around 2070 nm [J]. *Optics Express*, 2012, 20(17): 19349-19354.
- [69] Gaumé R, Viana B, Vivien D, et al. A simple model for the prediction of thermal conductivity in pure and doped insulating crystals [J]. *Laser Physics Letters*, 2003, 87(3): 1355-1357.
- [70] Lin A X, Rysanyanskiy A, Toulouse J. Fabrication and characterization of a water-free mid-infrared fluoro tellurite glass [J]. *Optics Letters*, 2011, 36(5): 740-742.