中国光学（中英文） Chinese Optics 核心期刊

2 μm波段固体激光器被动锁模技术研究进展

段小明 赵禹淇 吴佳泽

Research progress on passive mode-locking technology of 2 μm band solid-state lasers

DUAN Xiao-ming, ZHAO Yu-qi, WU Jia-ze

引用本文:
段小明，赵禹淇，吴佳泽. 2 μm波段固体激光器被动锁模技术研究进展[J]. 中国光学，2026，19(6)：1-24. doi: 10.3724/CO.2026-0090
DUAN Xiao-ming, ZHAO Yu-qi, WU Jia-ze. Research progress on passive mode-locking technology of 2 m band solid-state lasers[J]. *Chinese Optics*, 2026, 19(6): 1-24. doi: 10.3724/CO.2026-0090

在线阅读 View online: https://doi.org/10.3724/CO.2026-0090

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

同带泵浦的Tm:CYA调Q锁模激光器

Tm:CYA Q-switched mode-locked laser realized by tandem-pumping

中国光学（中英文）. 2024, 17(4): 764 https://doi.org/10.37188/CO.2023-0162

饱和吸收体恢复时间对正交偏振耗散孤子的影响

Influence of SA recovery time on orthogonally polarized dissipative solitons

中国光学（中英文）. 2024, 17(3): 714 https://doi.org/10.37188/CO.EN-2023-0032

基于声光锁模全固态660 nm激光器

All-solid-state acousto-optic mode-locked laser operating at 660 nm

中国光学（中英文）. 2024, 17(1): 238 https://doi.org/10.37188/CO.EN-2023-0013

角度复用的光学加密超表面的超快激光嵌套加工方法研究

Angle-multiplexed optically encrypted metasurfaces fabricated by ultrafast laser induced spatially selective-modified nanograting structures

中国光学（中英文）. 2023, 16(4): 889 https://doi.org/10.37188/CO.2022-0228

可提升被动锁模光纤激光器计算效率的分步傅里叶全局误差局部能量法

SSFM-global-error-local-energy method for improving computational efficiency of passively mode-locked fiber laser

中国光学（中英文）. 2023, 16(3): 733 https://doi.org/10.37188/CO.EN.2022-0016

2-μm MOPA结构全光纤激光器输出特性研究

Output characteristics of an all-fiber laser with a 2-μm MOPA structure

中国光学（中英文）. 2023, 16(2): 399 https://doi.org/10.37188/CO.2022-0191

文章编号 2097-1842(2026)06-0001-24

2 μm 波段固体激光器被动锁模技术研究进展

段小明[1,2*], 赵禹淇[1,2], 吴佳泽[1]
（1. 哈尔滨工业大学 激光空间信息全国重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001;
2. 哈尔滨工业大学 郑州高等研究院, 河南 郑州 450000）

摘要: 2 μm 波段超短脉冲激光凭借其人眼安全性、处于大气传输窗口等独特优势, 在国防、医疗、通信及科研等领域展现出巨大的应用价值。被动锁模技术作为产生此类超短脉冲的核心手段, 已成为固体激光器领域的研究热点。本文系统综述了 2 μm 波段被动锁模固体激光器的最新研究进展。首先, 阐述了被动锁模的基本原理, 分析了包括克尔透镜锁模等多种锁模方案的物理机制, 并介绍了 Tm^{3+}、Ho^{3+}及其共掺体系作为增益介质的能级动力学特性。随后, 重点围绕克尔透镜锁模、半导体可饱和吸收镜锁模以及低维纳米材料锁模三大主流技术路线展开详细论述。本文对不同锁模方案的性能及实现方法进行了比较, 总结了各类被动锁模激光器的研究成果, 同时对 2 μm 波段被动锁模固体激光器的未来发展进行了讨论与展望。

关 键 词: 2 微米激光; 被动锁模; 固体激光器; 超快激光
中图分类号: TN248.1 **文献标志码:** A **doi:** 10.3724/CO.2026-0090 **CSTR:** 32171.14.CO.2026-0090

Research progress on passive mode-locking technology of 2 μm band solid-state lasers

DUAN Xiao-ming[1,2*], ZHAO Yu-qi[1,2], WU Jia-ze[1]
（1. *National Key Laboratory of Laser Spatial Information*, *Harbin Institute of Technology*, *Harbin* 150001, *China*;
2. *Zhengzhou Advanced Research Institute*, *Harbin Institute of Technology*, *Zhengzhou* 450000, *China*）
* *Corresponding author*, *E-mail*: *xmduan@hit.edu.cn*

Abstract: Ultra-short pulse lasers operating in the 2 μm band boast unique merits such as eye safety and compatibility with atmospheric transmission windows, endowing them with immense application value in national defense, medical treatment, communication, scientific research and other fields. As a core method to generate such ultra-short pulses, passive mode-locking technology has become a research hotspot in the field of solid-state lasers. This paper systematically reviews the latest research advances in 2 μm-band passively mode-locked solid-state lasers. Firstly, it elaborates on the fundamental principle of passive mode locking, analyzes the physical mechanisms of diverse mode-locking schemes including Kerr lens mode locking (KLM), and introduces the energy level dynamic characteristics of Tm^{3+}, Ho^{3+} and their co-doped systems as

收稿日期: xxxx-xx-xx; **修订日期:** xxxx-xx-xx
基金项目: 黑龙江省重点研发计划项目（No. SC2022ZX07D0009）; 河南省重点研发专项（No. 241111212600）
Supported by Heilongjiang provincial key Research and Development Program (No. SC2022ZX07D0009); Henan provincial key R & D special Project (No. 241111212600)

gain media. Afterwards, three mainstream technical routes, namely Kerr lens mode locking, semiconductor saturable absorber mirror mode locking and low-dimensional nanomaterial mode locking, are discussed in detail as the key focus. This paper compares the performance and implementation approaches of different mode-locking schemes, summarizes the research achievements of various passively mode-locked lasers, and meanwhile discusses and prospects the future development of 2 μm-band passively mode-locked solid-state lasers.

Key words: 2 μm laser; passive mode-locking; solid-state laser; ultrafast laser

1 引 言

2 μm 波段激光兼具人眼安全、大气传输损耗低以及与水分子和多种气体吸收谱线匹配等优势，在激光雷达、环境监测、生物医疗、非线性频率转换及新型光通信等领域展现出广阔的应用前景[1–7]。同时，Tm^{3+}、Ho^{3+}等稀土离子增益介质在该波段具有较宽的增益带宽，为超短脉冲激光产生提供了良好的物理基础，2 μm 波段已成为超快激光研究的重要方向之一。

在众多激光输出形式中，锁模技术能够产生飞秒至皮秒量级超短脉冲，具有高峰值功率、高重复频率和宽光谱带宽等特点[8–12]。基于锁模技术获得的 2 μm 超短脉冲激光在中红外超连续谱产生、非线性频率转换、高精度光谱测量以及超快科学研究等领域具有重要应用价值[13–18]。随着相关应用对脉冲能量、峰值功率及抗光损伤等要求的不断提高，高性能 2 μm 锁模激光器逐渐成为研究热点。

目前，2 μm 波段锁模激光器主要包括光纤锁模激光器和固体锁模激光器两类。相比光纤激光器，固体激光器采用块状增益介质，能够承受更高的泵浦功率密度，具有更高的单脉冲能量和峰值功率输出能力。同时，其增益介质种类丰富、谐振腔设计灵活、色散调控相对简单，更有利于获得高品质超短脉冲输出[19-20]。因此在 2 μm 波段，固体锁模激光器在高能量超快激光领域具有独特优势。

根据锁模机制的不同，固体锁模激光器主要分为主动锁模和被动锁模两类。主动锁模受调制器带宽限制，通常输出脉宽处于皮秒量级。与主动锁模相比，被动锁模利用可饱和吸收效应或克尔非线性效应实现纵模自组织锁定，无需外部调制信号，能够产生飞秒甚至数十飞秒级别的超短脉冲，因此已成为 2 μm 波段超快固体激光器的主流技术路线[21-22]。围绕高损伤阈值可饱和吸收体、新型宽带增益介质和先进色散管理技术进行协同优化，是进一步提升 2 μm 波段超短脉冲性能的重要途径，也是近年来该领域研究的重点。

因此，本文围绕 2 μm 波段被动锁模固体激光器的发展现状，介绍了被动锁模基本原理及Tm^{3+}、Ho^{3+}等典型增益离子的特性，重点综述克尔透镜锁模（KLM）、半导体可饱和吸收镜（SESAM）及各类新型可饱和吸收体锁模技术的研究进展，并对其性能特点、关键技术及未来发展趋势进行分析，以期为 2 μm 波段高性能超快固体激光器的研究与应用提供参考。

2 2 μm 被动锁模固体激光器基本原理

2.1 被动锁模技术

锁模技术是使激光器腔内大量独立振荡的纵模实现相干叠加，从而输出脉冲宽度较窄、峰值功率较高的超短脉冲激光。目前用于 2 μm 固体激光器的锁模技术主要包括主动锁模技术和被动锁模技术，其中被动锁模技术无需主动调制，只需要在谐振腔中添加可饱和吸收体（Saturable absorber, SA）等器件，即可实现激光器的自锁模，大大简化了操作过程[23-24]。目前为止，常用的被动锁模方式有两类：利用非线性克尔效应实现的克尔透镜锁模（Kerr-Lens mode locking, KLM）、利用可饱和吸收体非线性机制实现的锁模。

2.1.1 克尔透镜锁模

克尔透镜锁模是飞秒固体激光器中最重要的被动锁模技术之一。20 世纪 90 年代初，Spence 等人在 Ti:sapphire 激光器中实现了 KLM，证明了

仅依赖增益介质本征克尔非线性即可获得稳定飞秒脉冲输出[25]。在此之后, Haus 等人建立并完善了被动锁模理论体系, 为 KLM 激光器的设计与优化奠定了理论基础[26]。由于不需要额外引入可饱和吸收体, KLM 逐渐成为获得超短脉冲的重要技术路线。

KLM 的工作机理基于增益介质中的光学克尔效应。当高斯光束在介质中传播时, 光束中心区域的光强高于边缘区域, 而介质折射率随光强增加而增大, 因此中心区域将产生更大的折射率变化。强度依赖的折射率分布会导致光束发生自聚焦效应, 其作用可等效为一个焦距随光强变化的“克尔透镜”。在谐振腔中引入光阑或利用腔镜孔径限制后, 高强度脉冲由于受到更强的自聚焦作用而具有更低的腔内损耗, 低强度连续光则损耗较大。经过多次往返振荡后, 低强度成分被抑制, 腔内高强度脉冲得到持续增强, 从而形成一种与光强相关的自振幅调制机制, 实现各纵模之间的相位锁定并产生稳定超短脉冲[27]。

与传统可饱和吸收体锁模相比, KLM 完全依赖材料本征非线性效应, 不引入额外吸收损耗, 具有较高的损伤阈值和极宽的工作带宽, 能够支持飞秒甚至数十飞秒脉冲的产生。同时, 其工作波长不受可饱和吸收体带隙限制, 具有良好的波长适应性。然而, KLM 对谐振腔稳定区位置、模式匹配以及腔内非线性效应的要求较高, 通常需要精确的腔体设计和调节, 工程实现难度相对较大。

2.1.2　可饱和吸收体

可饱和吸收体是被动锁模应用中最常用的器件, 其利用可饱和吸收体的光强吸收特性产生超窄脉冲。目前的可饱和吸收体的选择有很多种, 它们大致可以分为两类, 一类是不同材质的半导体可饱和吸收镜(Semiconductor saturable absorber mirror, SESAM), 另一类是低维材料构成的可饱和吸收体。

2.1.2.1　半导体可饱和吸收镜

在 2 μm 波段被动锁模固体激光器的技术演进中, 基于半导体可饱和吸收镜的被动锁模方案有着重要的地位。20 世纪 90 年代, Keller 等提出了半导体可饱和吸收镜的概念[28]。该技术的核心思想在于将一种具备非线性吸收特性的半导体多层膜结构作为谐振腔的反射镜, 实现可设计的调制深度、恢复时间和饱和通量等关键参数, 显著提高了锁模激光器的自启动能力和运行稳定性[29-30]。经过 30 余年的发展, SESAM 已成为固体超快激光器领域最成熟、应用最广泛的被动锁模技术之一[31-32]。

SESAM 锁模的核心机制是利用其反射率随入射光强增加而增大的可饱和吸收效应实现纵模间的自动相位锁定。当激光器连续振荡建立后, 腔内会存在微弱的强度起伏。其中, 高强度光成分能够使 SESAM 吸收层发生饱和, 从而降低吸收损耗并提高反射率, 而低强度连续光及噪声成分仍受到较大的吸收损耗。在此基础上, 高强度光脉冲在往返传播过程中不断获得增益, 而弱光成分逐渐被抑制, 最终形成稳定的超短脉冲输出。

图 1 给出了典型 SESAM 锁模激光器的结构示意图。以 X 型四镜腔为例, 传统端镜被 SESAM 替代, 并利用啁啾镜将腔内光束聚焦至 SESAM 表面形成较小的束腰。当光脉冲入射到 SESAM 时, 脉冲峰值部分优先使吸收层达到饱和状态, 而脉冲前后沿以及背景噪声由于光强较低仍被吸收。随着光脉冲在谐振腔内不断往返传播, 高强度部分持续增强, 低强度部分逐渐被抑制, 从而实现稳定锁模运转[33]。

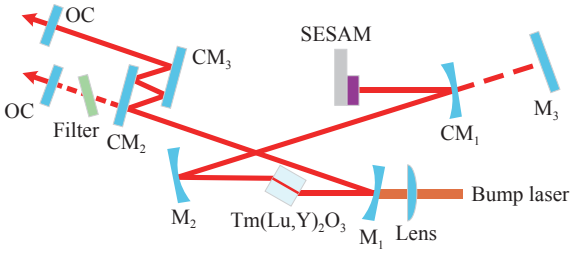

图 1　SESAM 锁模光路示意图[33]

Fig. 1　Schematic diagram of SESAM mode-locked optical path[33]

对于 2 μm 波段发射截面较小、上能级寿命较长的 Tm^{3+}或 Tm^{3+}/Ho^{3+}共掺激光介质, SESAM 参数设计对锁模稳定性具有重要影响。为了抑制长寿命增益介质产生的 Q 开关不稳定性, 并实现稳定连续波锁模, SESAM 通常需要具备适中的调制深度、较低的饱和通量以及较快的恢复时间[34-35]。同时, 在高功率运行条件下还需兼顾较高的抗光损伤能力。然而调制深度、饱和通量和损伤阈值之间往往存在相互制约关系, 例如增加量子阱层数虽可提高调制深度, 却可能引发热积

累并降低损伤阈值，而提高损伤阈值又可能降低非线性调制能力。因此，SESAM 设计通常需要在锁模稳定性与功率扩展能力之间进行综合优化。

相比 KLM，SESAM 具有自启动能力强、参数可设计性高、腔体调节简单和运行稳定等优势，因此已成为 2 μm 波段固体超快激光器最成熟、应用最广泛的被动锁模方案之一。

2.1.2.2 低维材料可饱和吸收体

随着半导体可饱和吸收镜在制备复杂度、工作带宽及成本等方面的局限逐渐显现，研究人员开始探索基于纳米材料的新型可饱和吸收体[36]。自 21 世纪初以来，随着纳米材料制备技术的发展，低维材料逐渐被引入超快光子学领域[37]。碳纳米管、石墨烯以及过渡金属硫族化合物（Transition metal dichalcogenides, TMDs）等低维材料凭借宽带可饱和吸收特性、超快载流子动力学以及制备工艺简单等优势，逐渐成为超快光子学领域的重要研究方向[38]。

2009 年，Hasan 等将碳纳米管用于飞秒激光器锁模，证明了低维材料作为宽带可饱和吸收体的可行性[39]。Bonaccorso 系统总结了石墨烯在超快光子学中的应用潜力，推动了石墨烯可饱和吸收体的发展[40]。2012 年以后，过渡金属硫族化合物等新型二维材料相继被引入超快激光领域，进一步拓展了低维材料可饱和吸收体的研究体系[41]，并形成了以碳纳米管、石墨烯和过渡金属硫族化合物为代表的低维可饱和吸收体体系。

低维材料实现锁模的本质均基于可饱和吸收效应。当入射光强较低时，材料对光具有较强吸收。随着光强增加，载流子占据相关能级并产生泡利阻塞效应，使吸收逐渐饱和，材料透过率增加，从而形成强度相关损耗调制。由于载流子弛豫过程通常处于亚皮秒至皮秒量级，能够快速响应腔内光强变化，为飞秒脉冲建立提供条件。

根据层数的不同，碳纳米管可划分为单壁碳纳米管（Single-walled carbon nanotube, SWCNT）、双壁碳纳米管（Double-Walled carbon nanotube, DWCNT）和多壁碳纳米管（Multi-Walled carbon nanotube, MWCNT），其中单壁碳纳米管具有快速可饱和吸收特性、超快响应能力、可通过管径与手性实现吸收波段调控和可覆盖近红外至中红外波段等特点，成为应用最广泛的碳纳米管可饱和吸收体[42]。

石墨烯是一种由单层碳原子构成的二维材料，零带隙线性色散关系赋予其从可见光到中红外波段的超宽带可饱和吸收特性[43]。相比碳纳米管需要通过管径调控工作波长，石墨烯几乎不受波长限制，具有更好的通用性和波长适应能力[44]。

过渡金属硫化物的通用化学式为 MX_2，其中 M 为过渡金属原子，例如 W、Mo、Re 等。X 为硫族原子，例如 S、Se 等。单层或少层 TMDs 通常具有直接带隙结构，兼具较大的非线性吸收系数和良好的化学稳定性[45]。目前应用于 2 μm 波段固体激光器的 TMDs 主要包括二硫化钼[46–48]（MoS_2）、二硫化钨[49-50]（WS_2）、二硒化铼[51]（$ReSe_2$）、二硫化铌[52]（NbS_2）等材料。

可饱和吸收体自身的非线性参数也是决定被动锁模性能的重要因素。其中，饱和光强决定材料达到吸收饱和所需的阈值，调制深度影响锁模启动能力和脉冲形成过程，非饱和损耗直接关系激光器效率，而恢复时间和损伤阈值则对锁模稳定性及高功率运行能力具有重要影响。

总体而言，低维材料的发展推动了被动锁模技术由依赖特定半导体结构向宽带、低成本和易制备方向演进。碳纳米管率先验证了纳米材料用于超快锁模的可行性，石墨烯凭借超宽带吸收特性进一步提升了材料通用性，TMDs 则通过可调带隙和丰富的能带结构拓展了新型可饱和吸收材料的设计空间。上述研究为 2 μm 波段超快固体激光器的发展提供了重要的材料基础。

2.2 2 μm 固体激光器激活离子

2 微米波段被动锁模固体激光器关于激活离子的选择主要有 3 种：单掺 Tm^{3+}、单掺 Ho^{3+}和 Tm^{3+}、Ho^{3+}共掺。3 种方案在能级结构、泵浦方式、锁模性能上各有优劣。下面将逐个介绍这 3 种掺杂方式及其能级动力学过程。

铥离子能级结构如图 2(a)(彩图见期刊电子版)所示，为准三能级系统。在 790 nm 附近泵浦光的作用下，基态能级 $^3H_6$ 上的粒子被激发到激发态 $^3H_4$ 能级，再从 $^3H_4$ 快速无辐射跃迁（Non-radiative relaxation, NR）到 $^3F_4$ 能级，最后由 $^3F_4$ 能级向下跃迁到基态能级 $^3H_6$ 产生 1.9~2.0 μm 激光。同时，当 Tm^{3+}掺杂浓度较高（>4 at.%），相邻 Tm^{3+}间会发生交叉弛豫（Cross relaxation, CR）过程，即

$^3H_4+{}^3H_6={}^3F_4+{}^3F_4$。该过程将一个泵浦光子转化为两个$^3F_4$能级的粒子, 将理论量子效率提升为200%[53]。然而Tm^{3+}的发射截面较小, 且上能级寿命较短, 限制了其储能能力。此外, 单掺Tm^{3+}激光器的发射波长多处于 2 μm 以下, 易受大气中水蒸气吸收的影响。

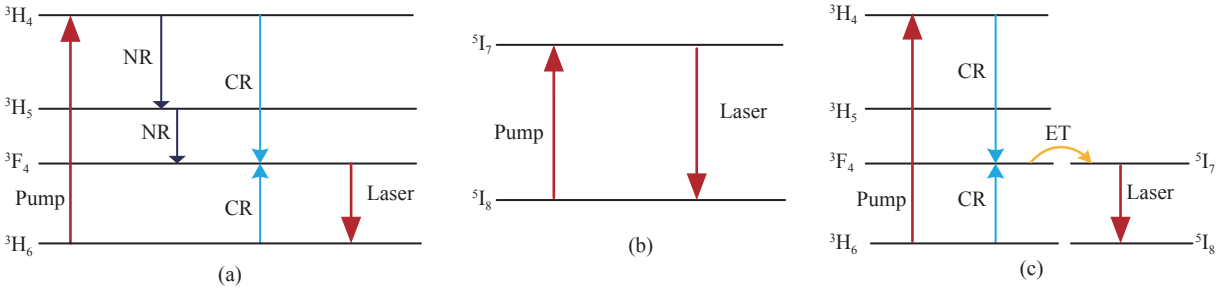

图 2　(a)Tm^{3+}能级结构, (b)Ho^{3+}能级结构, (c)Tm^{3+}、Ho^{3+}共掺能级结构

Fig. 2　Energy level structures of (a) Tm^{3+}, (b) Ho^{3+} and (c) Tm^{3+} and Ho^{3+} co-doping

Ho^{3+}离子的能级结构如图 2(b)(彩图见期刊电子版)所示, 属于准二能级系统, 其激光发射对应于$^5I_7\rightarrow{}^5I_8$跃迁。在 1.9 μm 附近泵浦光作用下, 基态$^5I_8$上的粒子被激发至上激光能级$^5I_7$, 随后跃迁回基态并产生约 2.05~2.12 μm 激光[54]。相比Tm^{3+}, Ho^{3+}具有更大的发射截面(约为Tm^{3+}的 5 倍)和更长的上能级荧光寿命, 有利于能量存储以及高能量、窄脉宽锁模脉冲的产生[55]。此外, 其发射波长位于 2 μm 以上, 可有效避开大气水蒸气的强吸收区域, 更容易实现稳定锁模运转。然而, 单掺Ho^{3+}激光器缺乏高效成熟的直接泵浦源, 通常需要Tm^{3+}激光器或Tm^{3+}光纤激光器完成泵浦, 导致系统结构较为复杂且成本较高。

为解决单掺Ho^{3+}的泵浦难题并综合两者的优势, Tm^{3+}、Ho^{3+}共掺方案应运而生。其能级动力学过程如图 2(c)(彩图见期刊电子版)所示。Tm^{3+}吸收 790 nm 泵浦光, 从$^3H_6$跃迁至$^3F_4$, 通过交叉弛豫过程产生两个$^3F_4$能级粒子。在此之后, Tm^{3+}的$^3F_4$能级与Ho^{3+}的$^5I_8$能级之间发生高效的共振能量转移(Energy transfer, ET): $Tm^{3+}(^3F_4)+Ho^{3+}(^5I_8)=Tm^{3+}(^3H_6)+Ho^{3+}(^5I_7)$,

将能量传递给Ho^{3+}的上激光能级。最终, Ho^{3+}通过$^5I_7$到$^5I_8$跃迁发射 2 μm 激光。Tm^{3+}、Ho^{3+}共掺方案具备以下优势: (1)泵浦源可采用廉价高功率的 790 nm 激光二极管, 避免水吸收; (2)发射波长通过Ho^{3+}的贡献自然红移至 2 μm 以上; (3)利用Ho^{3+}的大发射截面和长上能级寿命, 有利于获得高能量、窄脉宽的锁模脉冲; (4)共掺晶体的增益谱是Tm^{3+}和Ho^{3+}发射谱的叠加, 可有效展宽增益带宽, 为超短脉冲产生提供更宽的光谱支撑。

为了更加直观地比较 3 种典型激活离子的特点, 表 1 总结了Tm^{3+}、Ho^{3+}以及Tm^{3+}/Ho^{3+}共掺体系的主要性能参数。总体而言, Tm^{3+}体系具有成熟的 790 nm 泵浦方案和较宽的增益带宽, 适合获得超短脉冲输出; Ho^{3+}体系则凭借较大的发射截面和较长的上能级寿命, 更有利于实现高能量锁模运转; Tm^{3+}/Ho^{3+}共掺体系结合了Tm^{3+}高效吸收泵浦光和Ho^{3+}优异激光性能的优势, 近年来已成为 2 μm 高性能固体锁模激光器的重要研究方向。

表 1　2 μm 固体激光器典型激活粒子性能比较

Tab. 1　Comparison of typical activated particle performance for 2 μm solid-state lasers

主要参数	Tm^{3+}	Ho^{3+}	Tm^{3+}/Ho^{3+}共掺
主要泵浦波长/nm	785~800	1 900~1 950	785~900
激光跃迁	$^3F_4\rightarrow{}^3H_6$	$^5I_7\rightarrow{}^5I_8$	Ho^{3+}:$^5I_7\rightarrow{}^5I_8$
典型发射峰/nm	1 900~2 050	2 050~2 120	2 050~2 100
量子效率	180%~200%	90%~100%	150%~200%
发射截面/($10^{-21}cm^2$)	0.18~6	2.7~14.3	与Ho^{3+}接近
上能级寿命	百微秒级	毫秒级	毫秒级

3 2 μm 被动锁模固体激光器研究进展

自第一台 2 μm 波段被动锁模固体激光器问世以来，该领域围绕锁模机制、增益介质、谐振腔设计及可饱和吸收体等方向不断发展，实现了脉冲宽度持续压缩、平均功率不断提升、并逐步推动工程化应用。目前 2 μm 波段被动锁模固体激光器已形成克尔透镜锁模、半导体可饱和吸收镜锁模、低维纳米材料可饱和吸收体锁模 3 条主流技术路线。三者在锁模启动、脉冲宽度、输出功率、稳定性与工程适用性上各有优势，共同支撑该波段超快激光的性能升级与应用拓展。

3.1 克尔透镜锁模

克尔透镜锁模凭借其响应速度快、宽光谱带宽、无线性损耗以及高损伤阈值等优势，成为实现固体激光器被动锁模的重要技术路线。克尔透镜锁模对谐振腔稳定区、腔模匹配以及热效应控制均具有较高的要求，通常需要采用高光束质量的光纤激光器或单模半导体激光器作为泵浦源，且很难实现自启动，使其在实际使用中受到了很多限制[56]。2 μm 波段增益介质普遍具有较小的非线性折射率，导致克尔自聚焦效应相对有限，进一步增加了 KLM 实现的难度，直到 2017 年，2 μm 波段固体激光器才首次实现 KLM 运行。表 2 汇总了近十年来 2 μm 波段 KLM 固体激光器的代表性研究进展。

表 2 近十年 2 μm 波段克尔透镜锁模固体激光器输出性能比较

Tab. 2 Comparison of output performances of 2 μm KLM solid-state lasers over the past decade

年份	锁模方式	激光晶体	平均功率	脉宽	中心波长	参考文献
2017	KLM	Ho:YAG	20 W	220 fs	2090 nm	[57]
2017	KLM	Tm:Sc_2O_3	0.44 W	166 fs	2124 nm	[56]
	KLM	Tm:Sc_2O_3	1 W	298 fs	2124 nm	[56]
2020	KLM	Tm:Sc_2O_3	0.13 W	72 fs	2108 nm	[58]
2020	KLM+SWCNT	Tm:MgWO4	0.10 W	89 fs	2037 nm	[59]
				76 fs	2037 nm	[59]
2021	KLM	Tm:$(Lu,Sc)_2O_3$	0.22 W	58 fs	2081 nm	[60]
2021	KLM	Tm:$(Lu,Sc)_2O_3$	0.04 W	41 fs	2100 nm	[61]
			0.32 W	73 fs	2100 nm	[61]
			0.05 W	60 fs	2100 nm	[62]
2023	KLM	Tm:$YScO_3$	0.13 W	49 fs	2100 nm	[63]
2024	KLM	Ho:CALGO	1.69 W	92 fs	2100 nm	[64]
2024	KLM	Tm,Ho:$Ca(Gd,Lu)AlO_4$	0.09 W	79 fs	2074 nm	[65]
2025	KLM	Tm,Ho:$Ca(Gd,Y)AlO_4$	0.20 W	145 fs	2088 nm	[66]
2025	KLM	Ho:CALYO	0.81 W	177 fs	2100 nm	[67]
			0.18 W	166 fs	2100 nm	[67]

由表 2 可知，随着宽带增益介质和色散管理技术的发展，最短脉宽已由 2017 年的 166 fs 压缩至 41 fs，目前最高平均输出功率达到 1.69 W。

2017 年，KLM 在 2 μm 波段固体激光器中得到实现，Zhang 等在 Ho 薄片激光器中引入克尔介质，得到脉冲宽度 220 fs 的脉冲输出[57]。同

年, Masaki 等则在 Tm:Sc_2O_3 单晶激光器中实现 166 fs 脉冲输出, 验证了 KLM 在掺 Tm 体系中的应用潜力[56]。

随着谐振腔设计和色散管理技术的发展, KLM 脉宽迅速向亚 100 fs 压缩。2020 年, Suzuki 等采用高 Q 值四镜腔结构, 在 Tm:Sc_2O_3 激光器中获得 72 fs 脉冲输出[58]。同年, Wang 等人将 KLM 拓展至掺 Tm 钨酸盐晶体, 并引入了如图 3 所示的 SWCNT 辅助启动机制, 实现了 76 fs 脉冲输出[59]。该机制利用可饱和吸收体辅助建立锁模, 再由克尔效应主导脉冲演化, 为改善 KLM 自启动性能提供了新的思路。

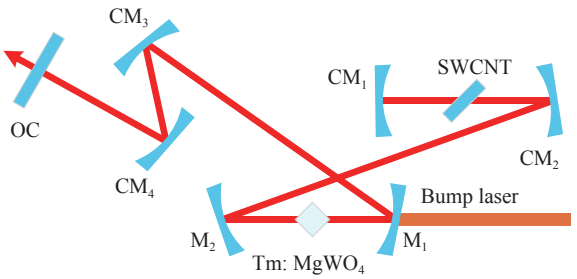

图 3　SWCNT 辅助克尔透镜锁模光路示意图[59]

Fig. 3　Schematic diagram of SWCNT-assisted kerr-lens mode-locked optical path[59]

2021 年后, 研究重点逐渐转向增益带宽拓展与功率提升上。Zhao 等人通过构建“混合”倍半氧化物陶瓷 Tm:$(Lu,Sc)_2O_3$ 以及 Tm:Lu_2O_3 陶瓷与 Tm:Sc_2O_3 组合增益介质, 获得了更平滑、更宽泛的增益谱, 并分别实现了 58 fs、220 mW 和 41 fs、42 mW 的脉冲输出[60–62]。其中 41 fs 刷新了当时 2 μm 波段掺 Tm 固体激光器最短脉宽纪录, 也是目前采用克尔透镜锁模所得到的最短脉冲宽度, 展现了 KLM 在超短脉冲产生方面的优势。随后, Suzuki 等进一步优化增益介质, 采用 Tm:$YScO_3$ 激光器产生了 49 fs 脉冲[63]。

Ho 掺杂及 Tm/Ho 共掺体系也开始成为 KLM 研究的重要方向。2024 年, Yao 等人利用宽带 Ho:CALGO 晶体, 和如图 4 所示高重复频率环形腔设计, 实现了 1.69 W 平均功率下 92 fs 的脉冲输出。这是基于 Ho 掺杂的激光器首次实现亚 100 fs 脉冲, 并创造了 2 μm 波段 KLM 激光器的最高平均功率纪录[64]。

在此之后, 基于 $CaGdAlO_4$ 及其混晶体系的 Tm、Ho 激光器相继实现 KLM 运转, Zeng 等人通过掺杂 Lu 离子在 2073.6 nm 处获得了 79 fs 脉冲[65]。2025 年, Lin 等人用 Y 离子替代 Lu 离子在 2087.8 nm 处获得了 145 fs 脉冲, 平均功率 203 mW[66]。

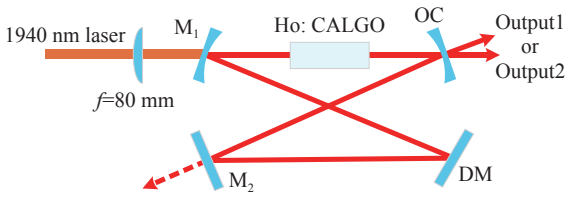

图 4　Ho:CALGO 激光器环形腔光路示意图[64]

Fig. 4　Schematic diagram of Ho:CALGO laser ring cavity optical path[64]

综上所述, 克尔透镜锁模凭借其高峰值功率和超短脉冲输出的显著优势, 已成为 2 μm 波段固体激光器锁模的重要技术路径。从现有研究结果来看, KLM 始终保持着 2 μm 波段最短脉宽纪录。与此同时, KLM 能够充分利用增益介质的全部发射带宽, 更容易获得接近极限的超短脉冲。然而, KLM 对腔稳定区位置、腔模尺寸及热透镜效应极为敏感, 通常需要精确调节腔镜位置才能实现稳定锁模, 且自启动能力较差。尽管其在极短脉冲输出方面具有优势, 但工程实现难度明显高于基于可饱和吸收体的锁模方案。未来, 随着新型增益介质的开发和色散管理技术的进一步优化, KLM 有望推动 2 μm 波段固体激光器向更窄脉宽、更高功率以及更稳定运转的方向持续发展。

3.2　半导体可饱和吸收镜锁模

近十年来, 基于半导体可饱和吸收镜的被动锁模技术在 2 μm 波段固体激光器中得到了广泛研究。表 3 汇总了 2 μm 波段 SESAM 锁模固体激光器输出性能。可以看出, SESAM 锁模目前能实现的 2 μm 波段最短 26 fs 脉冲, 采用 Ho:CALGO 同时实现了 8.7 W 平均输出功率, 为目前 SESAM 锁模的最高功率纪录。得益于可设计的调制深度、恢复时间和饱和通量等参数, SESAM 能够实现较好的自启动特性和运行稳定性, 已发展为 2 μm 波段超快固体激光器的重要锁模方案之一。近些年研究工作主要围绕增益介质选择、SESAM 结构优化以及腔内色散管理等方面展开。

表 3　近十年 2 μm 波段 SESAM 锁模固体激光器输出性能比较

Tab. 3　Comparison of output performances of 2 μm SESAM mode-locked solid-state lasers over the past decade

年份	锁模方式	激光晶体	平均功率	脉宽	中心波长	参考文献
2016	GaSb-SESAM	Ho:YAG	10 mW	2.1 ps	2090 nm	[68]
2017	GaInSb-SESAM	Tm:$KY(WO_4)_2$	202 mW	3 ps	2032 nm	[69]
2017	GaSb-SESAM	Tm:LuAG	98 mW	13.6 ps	2024 nm	[70]
2017	SESAM	Tm:YLF	165 mW	94 ps	2300 nm	[71]
2017	SESAM	Tm:LuAG	232 mW	2.7 ps	2022 nm	[72]
2017	SESAM	Tm:CYA	1350 mW	49 ps	1900 nm	[73]
2018	SESAM	Tm:$LiLuF_4$	200 mW	14 ps	1914 nm	[74]
2018	SESAM	Tm:YLF	95 mW	31 ps	1910 nm	[75]
2018	SESAM	Tm:LuScO	175 mW	230 fs	2057 nm	[76]
			-	63 fs	2057 nm	[76]
2018	GaSb-SESAM	Tm,Ho:CALYO	27 mW	87 fs	2060 nm	[77]
2019	SESAM	Tm:$LuYO_3$	121 mW	41 ps	2061 nm	[78]
2019	SESAM	Tm:CaF_2	132 mW	＞15.1 ps	1887 nm	[79]
2019	SESAM	Tm:YAP	166 mW	16.8 ps	1986 nm、1989 nm	[80]
2019	SESAM	Tm:YLF	1040 mW	107 ps	1830 nm	[81]
2020	SESAM	Tm,Ho:$LiLuF_4$	350 mW	12 ps	1895 nm	[82]
2020	SESAM	Tm:YAG	117 mW	47.9 ps	2012 nm	[83]
2020	GaSb-SESAM	Tm:$LuYO_3$	133 mW	59 fs	2050 nm	[33]
			51 mW	54 fs		[33]
2021	SESAM	Tm:CALGO	328 mW	33.2 ps	1968 nm	[84]
2021	SESAM	Tm:$(Lu,Sc)_2O_3$	114 mW	58 fs	2080 nm	[85]
2021	SESAM	Tm,Ho:$Ca(Gd,Lu)AlO_4$	121 mW	46 fs	2033 nm	[86]
2022	SESAM	Tm:Sc_2SiO_5	207 mW	16.5 ps	1968 nm	[87]
2022	GaSb-SESAM	Tm,Ho:CALGO	376 mW	52 fs	2015 nm	[88]
2022	SESAM	Ho:CALGO	8700 mW	369 fs	2100 nm	[89]
2022	SESAM	Tm:$(Lu,Sc)_2O_3$	1020 mW	280 fs	2060 nm	[90]
			300 mW	66 fs	2076 nm	[90]
2022	SESAM	Tm:Y_2O_3	260 mW	75 fs	2060 nm	[91]
2022	SESAM	Tm,Ho:GAGG	33 mW	10.8 ps	2090 nm	[92]
			66 mW	16.6 ps	2090 nm	[92]
2023	SESAM	Tm,Ho:CALYGO	-	50 fs	2078 nm	[93]
2023	SESAM	Tm:$GdScO_3$	188 mW	44 fs	2042 nm	[94]
2024	SESAM	Tm,Ho:CALYLO	228 mW	68 fs	2050 nm	[95]
			-	58 fs	-	[95]
2024	SESAM	Tm,Ho:$GdScO_3$	70 mW	72 fs	2078 nm	[96]
2024	GaSb-SESAM	Tm,Ho:CLNGG	120 mW	88 fs	2090 nm	[97]

续表 3

年份	锁模方式	激光晶体	平均功率	脉宽	中心波长	参考文献
2025	SESAM	Tm,Ho:CALYGLO	56 mW	43 fs	2080 nm	[98]
2025	SESAM	Tm:YLF	1520 mW	1.7 ps	-	[99]
2025	SESAM	Tm:CYLA	443 mW	202 fs	1980 nm	[100]
2025	SESAM	$Tm:GdScO_3$	-	26 fs	2050 nm	[101]
2026	SESAM	$Tm:CaF_2$	171 mW	3.7 ps	1886 nm	[102]
		$Tm,Gd:CaF_2$	-	1.7 ps	1886 nm	[102]

3.2.1　石榴石与氟化物晶体

在石榴石晶体方面, 2017 年, 山东大学将 GaSb 基 SESAM 应用于 Tm:LuAG 晶体的被动锁模中。该 SESAM 采用具有亚皮秒、快恢复时间的 GaInSb/GaSb 量子阱。通过设计五镜腔, 实现了 13.6 ps 的脉冲, 中心波长为 2024 nm, 平均输出功率为 98 mW。结果表明, GaSb 基 SESAM 能够较好地覆盖 2 μm 波段工作范围, 其快速恢复特性有利于抑制 Q 开关不稳定并支持连续波锁模运行, 为后续 GaSb 体系 SESAM 在 2 μm 超快激光中的应用提供了实验依据[70]。同年, Tm:LuAG 陶瓷的 SESAM 锁模也被报道, 使用近表面 GaSb 基 SESAM, 通过优化量子阱数目, 实现了 2.7~3.8 ps 的脉冲, 最高平均功率为 270 mW, 展示了陶瓷材料在 2 μm 锁模中的潜力[72]。

在氟化物晶体方面, 2018 年, Tyazhev 等人采用 GaAs-SESAM 实现了二极管泵浦的 Tm:YLF 激光器被动锁模, 如图 5 所示。输出波长为 1.91 μm, 脉宽为 31 ps, 平均功率为 95 mW[75]。该工作在氟化物晶体中利用 GaAs 基 SESAM 获得稳定锁模, 尽管脉宽较长, 但证明了在 1.9 μm 附近通过优化腔型和使用氟化钙(CaF_2)棱镜进行补偿色散, 可以维持稳定连续波锁模。天水师范学院在 2020 年报道了 $Tm,Ho:LiLuF_4$ 晶体的 SESAM 锁模, 通过采用五镜腔和低至 1.03 W 的锁模阈值, 获得了 12 ps 脉冲、350 mW 平均功率[82]。

可以看出, 锁模性能更多受限于增益介质带宽和腔内色散控制能力, 而非 SESAM 本身。石榴石和氟化物晶体普遍具有较好的热学性能和较成熟的制备工艺, 有利于实现稳定连续波锁模, 但其相对有限的增益带宽限制了脉宽的进一步压缩。这一时期的研究主要聚焦在于验证 GaSb 基 SESAM 在 2 μm 波段的适用性, 并建立稳定锁模运行条件。随着后续宽带增益介质和色散补偿技术的发展, SESAM 锁模研究开始由皮秒脉冲向飞秒脉冲演进。

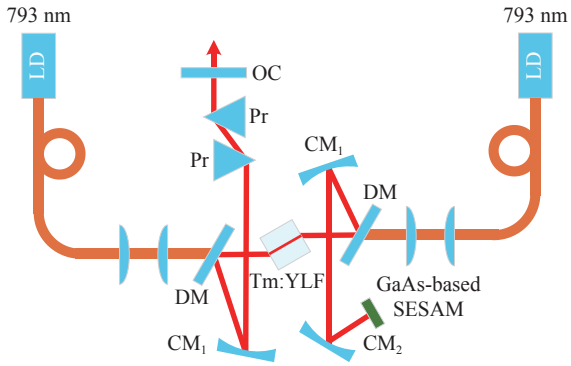

图 5　Tm:YLF 锁模激光器光路示意图[75]

Fig. 5　Schematic diagram of Tm:YLF mode-locked laser optical path[75]

3.2.2　钙铝石晶体

具有 K_2NiF_4 型结构的钙铝石晶体因其结构无序导致的非均匀展宽发射谱, 被广泛用于 2 μm 波段超短脉冲激光研究。2018 年, Zhao 等人在 Tm, $Ho:CaYAlO_4$ 晶体中实现了亚 100 fs 的 SESAM 锁模, 采用 GaSb 基 SESAM 和啁啾镜进行色散补偿, 在 1.86 m 腔长下获得了 87 fs 脉冲, 平均功率为 27 mW[77]。结果表明 Tm、Ho 共掺能够通过增益谱叠加拓宽有效发射带宽, 同时将激光波长扩展至 2 μm 以上。

2022 年, Wang 等人在 $Tm,Ho:CaGdAlO_4$(CALGO)晶体中通过优化输出耦合率和腔内色散, 将脉宽进一步压缩至 52 fs, 平均功率提升至 376 mW[88]。这主要得益于 CALGO 更高的热导率和更平滑的 σ 偏振增益谱, 为脉冲压缩和功率提升提供了有利条件。同年, Yao 等人在 Ho:CALGO 激光器中实现了飞秒脉宽下 8.7 W 的平均功率, 是目前采用 SESAM 锁模得到的最高

平均功率[89]。

为进一步拓宽增益带宽，研究者采用离子混晶策略构建组分无序体系。2021 年，Wang 等人在 Tm,Ho:Ca(Gd,Lu)AlO_4（CALGLO）晶体中获得 69 fs 脉冲，并通过增加啁啾镜反射次数和硫化锌（ZnS）片腔外压缩，将脉冲缩短至 46 fs[86]。Ding 等人在 Tm,Ho:$CaY_{0.9}Gd_{0.1}AlO_4$（CALYGO）晶体中获得 50 fs 脉冲[93]。2024 年，另一混晶 Tm,Ho:$CaYLuAlO_4$（CALYLO）也被报道，在 σ 偏振下实现了 58 fs 脉冲，平均功率为 178 mW，并得到 267 nm 的调谐范围[96]。这些结果表明，通过引入 Gd、Lu 等离子形成组分无序，可进一步增强非均匀展宽效应，从而支持更宽的锁模光谱。

综合现有研究可知，钙铝石晶体体系中锁模性能的提升主要来源于增益带宽的持续拓宽以及色散管理的不断优化。CALYO、CALGO 及其混晶体系通过结构无序和组分无序引入更强的非均匀展宽，为超宽光谱形成提供了增益基础。同时，啁啾镜补偿和偏振优化有效降低了色散对脉冲压缩的限制，使得钙铝石体系成为目前 2 μm 波段 SESAM 锁模实现超短脉冲输出的重要增益介质。

3.2.3 倍半氧化物晶体

倍半氧化物（Lu_2O_3、Y_2O_3、Sc_2O_3 及其混晶）兼具高热导率和较宽的发射谱，是 2 μm 波段 SESAM 锁模的重要增益介质。通过引入不同稀土离子或调控晶格组分形成混晶或混陶瓷，可进一步增强晶场无序度，从而拓宽增益带宽。

2019 年，Zhang 等人制备了 Tm:$LuYO_3$ 混合倍半氧化物陶瓷，利用其较大的发射截面和较长的上能级寿命，研究人员实现了 Tm:$LuYO_3$ 陶瓷的 SESAM 锁模运转，获得 41 ps 脉冲输出，验证了 $LuYO_3$ 混合倍半氧化物作为 2 μm 锁模增益介质的可行性[78]。

2020 年，Zhao 等人采用 Tm:$LuYO_3$ 混陶瓷，结合 GaSb 基 SESAM 和啁啾镜色散补偿，通过优化输出耦合率并利用 ZnS 进行腔外压缩，获得了 54 fs 脉冲，平均功率为 51 mW[33]。2022 年，同一团队在 Tm:Y_2O_3 陶瓷中引入 1 627 nm 光纤激光器同带泵浦方案，获得 75 fs 脉冲，平均功率 260 mW，且调谐范围达 318 nm 如图 6 所示[91]。相比传统 796 nm 泵浦，同带泵浦降低了量子亏损，有利于提高转换效率并减轻热负荷。

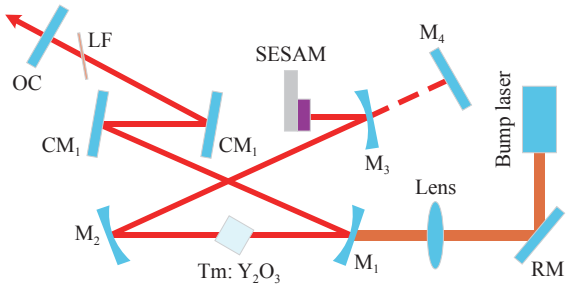

图 6 Tm 光纤同带泵浦 SESAM 锁模激光器光路示意图[91]

Fig. 6 Schematic diagram of optical path for Tm fiber band-shared pumped SESAM mode-locked laser[91]

2022 年，Zhang 等人在 Tm:$(Lu,Sc)_2O_3$ 混陶瓷中实现了 1.02 W 平均功率、280 fs 的脉冲输出，在进一步优化后将脉宽压缩至 66 fs[90]，将 SESAM 锁模的 Tm 陶瓷激光器的平均功率突破至瓦级水平。混晶倍半氧化物不仅能够保持较宽的增益带宽，同时具备良好的热管理能力，适用于高功率飞秒激光输出。

与钙铝石晶体相比，倍半氧化物体系更加突出高热导率与机械稳定性的优势。混晶结构带来的增益谱展宽保证了飞秒脉冲输出，而优异的热学性能进一步支撑了瓦级平均功率运行，因此成为近年来 2 μm 波段高功率飞秒 SESAM 锁模的重要增益介质。

3.2.4 钙钛矿晶体

除钙铝石和倍半氧化物外，钙钛矿晶体近年来逐渐受到关注，其特殊的晶格位点能够引起显著的晶场非均匀展宽。2023 年，江苏师范大学的 Zhang 等人报道了 Tm:$GdScO_3$ 晶体的 SESAM 锁模激光器，在偏振 E//b 和 1.5% 输出耦合条件下获得了 44 fs 脉冲，中心波长为 2 042 nm，平均功率为 188 mW。结果表明，$GdScO_3$ 的增益带宽较宽，能够支持超短脉冲的产生。2024 年，同一课题组进一步研究了 Tm, Ho:$GdScO_3$ 晶体，在 E//b 偏振下获得 72 fs 脉冲。虽然脉宽有所增加，但 Ho 共掺将中心波长红移至 2078 nm，有利于降低水吸收的影响[96]。

2025 年，Zhang 等人提出通过提升晶体工作温度，增强电子—声子耦合作用和热致均匀展宽，从而进一步拓宽锁模光谱，如图 7 所示。在 Tm:$GdScO_3$ 晶体中心温度为 368 K 时，利用 0.5% 输出耦合镜和啁啾镜色散补偿获得了 26 fs 脉冲输出，中心波长为 2 084 nm[101]，这是迄今为止采用 SESAM 锁模得到的最短脉冲。上述研究表明通

过调控晶格振动过程可以进一步拓展有效增益带宽, 为突破稀土离子激光器脉宽限制提供了新的思路。

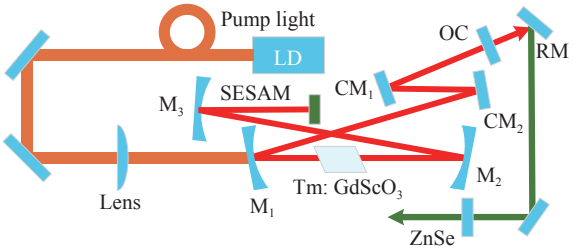

图 7　$Tm:GdScO_3$ 激光器 SESAM 锁模激光器光路示意图[101]

Fig. 7　Schematic diagram of optical path for $Tm:GdScO_3$ SESAM mode-locked laser[101]

近年来出现的 $GdScO_3$ 钙钛矿晶体为 2 μm 波段 SESAM 锁模提供了新的增益介质选择。$GdScO_3$ 表明除传统的组分设计外, 调控晶格动力学过程同样能够拓展有效增益带宽, 为获得更短飞秒脉冲提供了新的研究方向。

近 10 年来, SESAM 锁模 2 μm 固体激光器的发展主要依赖于宽带增益介质、GaSb 基 SESAM 及精确色散管理技术的协同优化。其中, 无序晶体、混晶和钙钛矿等新型增益介质不断拓宽有效增益带宽, GaSb 基 SESAM 改善了 2 μm 波段能带匹配, 而啁啾镜等色散补偿技术则进一步提升了飞秒脉冲压缩能力。未来, 高功率飞秒输出、低损耗 SESAM 设计以及新型宽带增益介质仍将是重要的发展方向。

3.3　低维材料

在 2 μm 波段被动锁模固体激光器的技术演进中, 可饱和吸收体是决定锁模启动、脉冲宽度与输出稳定性的核心元件。传统半导体可饱和吸收镜虽成熟可靠, 但存在制备工艺复杂、工作波段受限、成本较高、损伤阈值与调制深度难以兼顾等问题。近 10 余年来, 以碳纳米管、石墨烯、过渡金属硫族化合物为代表的低维纳米材料, 凭借超宽吸收带宽、超快载流子弛豫、高调制深度、制备简便、成本低廉、易集成等独特优势, 已成为 SESAM 的重要补充方案, 推动 2 μm 波段被动锁模固体激光器向短脉宽、更高功率和更高稳定性方向发展[103]。

3.3.1　碳纳米管

碳纳米管是继半导体可饱和吸收镜之后, 最早被成功应用于 2 μm 波段被动锁模的新型可饱和吸收材料。凭借其低饱和光强、制备工艺简便等优势, 碳纳米管可饱和吸收体迅速成为该领域的研究热点, 为后续石墨烯、过渡金属硫族化合物等各类低维材料的发展奠定了基础。表 4 汇总了近年来 2 μm 波段采用碳纳米管进行锁模的固体激光器的性能。可见, SWCNT 锁模脉宽已压缩至 57 fs, 最高平均输出功率达 375 mW, 说明碳纳米管已具备接近 SESAM 的超快性能, 但高功率能力仍不足。

2009 年, 德国马克思·波恩研究所的 Cho 等人将 SWCNT 可饱和吸收体应用于稀土掺杂固体激光器的被动锁模, 实现了 $Tm:KLu(WO_4)_2$ 激光器的稳定自启动锁模, 开启了碳纳米管在 2 μm 波段锁模研究的序幕[42]。2012 年, Schmidt 团队利用掺铥倍半氧化物在高掺杂浓度下仍保持高热导率的优势, 对 $Tm:Lu_2O_3$ 锁模激光器进行研究, 成功获得了 175 fs 的脉冲输出, 这是 2 μm 波段固体激光器首次基于 SWCNT 锁模实现飞秒级别的脉冲[104]。同年, Schmidt 等人引入 $Tm:KLu(WO_4)_2$ 晶体, 产生了 141 fs 的飞秒激光脉冲, 刷新了当时 2 μm 波段脉冲激光器的最短脉宽纪录[105]。

2014 年, Aleksandrov 等人延续了钨酸镥钾晶体的研究思路, 引入 Tm、Ho 共掺杂机制以提高受激辐射截面, 基于 SWCNT 实现了 $Tm,Ho:KLu(WO_4)_2$ 激光器的被动锁模, 获得 2.8 ps、91 mW 的脉冲输出[108]。由于 $Tm,Ho:KLu(WO_4)_2$ 的发射截面约为 $Tm:Lu_2O_3$ 和 $Tm:KLu(WO_4)_2$ 的 5 倍, 需要 SWCNT 具备更高的调制深度才能支持飞秒脉冲的产生, 因此未能得到飞秒输出。

2018 年, 马克思波恩研究所的 Pan 为降低晶体生长温度并促进 Tm 离子的掺入, 在 Tm:CNGG 中引入 Na 离子, 获得了 Tm:CNNGG 无序石榴石晶体。将该晶体用于锁模激光器, 以 SWCNT 为可饱和吸收体, 并采用啁啾镜进行色散补偿, 得到了 84 fs 的脉冲输出, 这是 2 μm 波段基于石榴石晶体的首个亚 100 fs 激光结果[110]。同年, Wang 等人采用 Tm:CLNGG 晶体, 通过 SWCNT 锁模和啁啾镜色散管理, 将脉宽进一步压缩至 78 fs, 平均功率为 54 mW, 在 2 μm 波段固体激光器中实现了小于 80 fs 的脉冲输出[111]。同年 10 月, Pan 等人进一步采用 CNGG 作为基质, 利用其优异的光谱带宽与热学性能, 并引入 Tm、Ho 共掺杂模式, 以 SWCNT 为可饱和吸收体, 经外腔压缩后获得了 76 fs 的激光脉冲[112]。

表 4 2 μm 波段碳纳米管锁模固体激光器输出性能比较

Tab. 4 Comparison of output performances of carbon nanotube mode-locked solid-state lasers in 2 μm band

年份	研究单位	锁模方式	激光晶体	平均功率	脉宽	中心波长	参考文献
2009	德国马克思玻恩研究所	SWCNT	Tm:$KLu(WO_4)_2$	240 mW	10 ps	1950 nm	[42]
2011	德国马克思玻恩研究所	SWCNT	Tm:YLF	55 mW	19 ps	1888 nm	[106]
2012	德国马克思玻恩研究所	SWCNT	Tm:Lu_2O_3	36 mW	175 fs	2070 nm	[104]
2012	德国马克思玻恩研究所	SWCNT	Tm:$KLu(WO_4)_2$	26 mW	141 fs	2037 nm	[105]
2012	山东师范大学	DWCNT	Tm:YAP	375 mW	41 ps	2023 nm	[107]
2014	德国马克思玻恩研究所	SWCNT	Tm,Ho:$KLu(WO_4)_2$	91 mW	2.8 ps	2059 nm	[108]
2018	天水师范学院激光技术研究所	SWCNT	Tm,Ho:$LiLuF_4$	154 mW	663 ps	1895 nm	[109]
2018	中国工程物理研究院	SWCNT	Tm:CNNGG	22 mW	84 fs	2018 nm	[110]
2018	江苏师范大学	SWCNT	Tm:CLNGG	54 mW	78 fs	2017 nm	[111]
2018	中国工程物理研究院	SWCNT	Tm,Ho:CNGG	67 mW	76 fs	2081 nm	[112]
2019	江苏师范大学	SWCNT	Tm,Ho:CLNGG	123 mW	98 fs	2083 nm	[113]
					67 fs	2083 nm	[113]
2020	中国科学院上海陶瓷研究所	SWCNT	Tm:$LuYO_3$	210 mW	57 fs	2045 nm	[114]
2020	陕西科技大学	DWCNT	Tm,Ho:$CaYAlO_4$	64 mW	799.2 ps	2085 nm	[115]
2021	福建物质结构研究所	SWCNT	Tm:CLTGG	28 mW	69 fs	2010 nm	[116]
2021	德国马克思玻恩研究所	SWCNT	Tm,Ho:LCLNGG	63 mW	63 fs	2073 nm	[117]
				121 mW	96 fs	2068 nm	[117]

2019 年，Zhao 等人采用 SWCNT 对 Tm,Ho:CLNGG 激光器进行被动锁模，并在啁啾镜色散补偿下获得 98 fs 脉冲输出。在此基础上，引入一块延迟色散的 ZnS 薄片作为腔外压缩元件，将脉冲进一步压缩至 67 fs[113]。2020 年，Zhao 等人采用 SWCNT 实现了 Tm:$LuYO_3$ 混陶瓷激光器的被动锁模，同样通过 ZnS 镜片进行外部色散管理，装置图如图 8 所示。最终实现脉宽短至 57 fs、近乎无啁啾的脉冲，刷新了当时铥掺杂固体激光器的最短脉宽纪录和 SWCNT 锁模的最短脉宽纪录[114]。

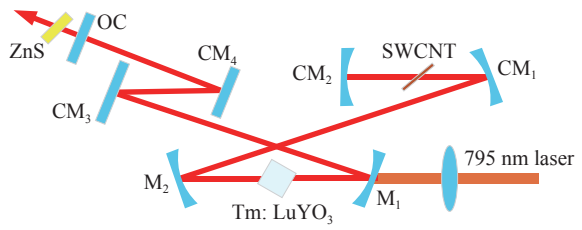

图 8 SWCNT-SA 锁模 Tm:$LuYO_3$ 激光器光路示意图[114]

Fig. 8 Schematic diagram of optical path of SWCNT-SA mode-locked Tm:$LuYO_3$ laser[114]

2021 年，Wang 等人报道了 Tm:CLTGG 晶体的 SWCNT 锁模，实现亚 100 fs 运转，获得 69 fs 脉冲输出[118]。同年，Pan 等人采用 Tm,Ho:LCLNGG 作为增益介质，以 SWCNT 为可饱和吸收体，获得 63 fs、63 mW 的脉冲输出，以及 96 fs、121 mW 的高功率输出，进一步拓展了碳纳米管锁模的增益介质适配范围[117]。

综上所述，近年来碳纳米管锁模 2 μm 固体激光器已实现由皮秒向数十飞秒脉冲的演进。其性能提升得益于宽带增益介质的发展、Tm/Ho 共掺策略对发射谱的优化以及啁啾镜、ZnS 等色散补偿技术的持续优化。与 SESAM 相比，单壁碳纳米管具有超宽工作带宽、亚皮秒级恢复时间和制备工艺简单等优势，能够适配不同增益介质并降低系统复杂度，成为 2 μm 波段超快激光研究的重要技术路线。然而，其调制深度和损伤阈值相对有限，非饱和损耗较大，在高功率扩展和极短脉冲压缩方面仍存在一定制约。碳纳米管锁模验证了宽带低维材料在 2 μm 超快激光领域的应用

潜力。

3.3.2　石墨烯

石墨烯是一种单原子层二维碳材料, 具有线性能带结构、超快载流子弛豫时间、低饱和通量以及宽带可饱和吸收等特性, 是 2 μm 波段重要的被动锁模材料之一。早期石墨烯锁模激光器的研究主要集中在 1~1.5 μm 波段, 直至 2009 年才使用石墨烯实现固体激光器的锁模[119]。表 5 汇总了近年来 2 μm 波段石墨烯及氧化石墨烯锁模固体激光器的典型性能。可以看到, 单层石墨烯锁模目前得到的最短脉宽为 70 fs, 通过氧化石墨烯锁模得到了最高平均输出功率达到 1.74 W。

表 5　2 μm 波段石墨烯锁模固体激光器输出性能比较

Tab. 5　Comparison of output performance of graphene mode-locked solid-state lasers in 2 μm band

年份	研究单位	锁模方式	激光晶体	平均功率	脉宽	中心波长	参考文献
2012	山东师范大学	氧化石墨烯	Tm:YAP	268 mW	<10 ps	2023 nm	[120]
2012	上海交通大学	石墨烯	Tm:CLNGG	60 mW	729 fs	2018 nm	[121]
2012	圣安德鲁斯大学	石墨烯	Tm:Lu_2O_3	270 mW	410 fs	2067 nm	[122]
2015	上海交通大学	石墨烯-金膜	Tm:YAG	158 mW	2.8 ps	2016 nm	[123]
2016	山东师范大学	石墨烯	Tm:YAP	256 mW	>100 ps	1989 nm	[124]
2017	马克思玻恩研究所	石墨烯	Tm:$MgWO_4$	-	86 fs	2017 nm	[125]
2018	天水师范学院	氧化石墨烯	Tm,Ho:$LiLuF_4$	-	924 ps	1890 nm	[126]
2019	宝鸡文理学院	氧化石墨烯	Tm:LuAG	1740 mW	-	2023 nm	[127]
2019	马克思玻恩研究所	石墨烯	Tm,Ho:CLNGG	69 mW	70 fs	2093 nm	[128]
2020	天水师范学院	氧化石墨烯	Tm,Ho:$CaYAlO_4$	213 mW	524.8 ps	2089 nm	[129]
2020	诺曼底大学	石墨烯	Tm,Ho:YLF	40 mW	5.2 ps	2051 nm	[130]
2021	天水师范学院	氧化石墨烯	Tm,Ho:LLF	1052 mW	955 ps	1895 nm	[131]

2012 年是石墨烯在 2 μm 波段锁模研究的起步之年。山东师范大学的 Liu 等人将氧化石墨烯作为可饱和吸收体应用于二极管泵浦的 Tm:YAP 激光器, 获得了亚 10 ps、268 mW 的脉冲输出, 中心波长为 2 023 nm, 证实了氧化石墨烯在 2 μm 波段锁模的可行性[120]。然而, 由于未进行腔内色散补偿, 脉宽仍处于皮秒量级, 且氧化石墨烯为绝缘体, 表面存在大量缺陷和带隙态, 其宽带可调谐性远不及本征石墨烯。同年, 上海交通大学的 Ma 等人采用化学气相沉积法(Chemical vapor deposition, CVD)制备的高质量、大面积石墨烯, 将其转移到高反平面镜上制成石墨烯可饱和吸收镜(Graphene saturable absorber mirror, GSAM), 并在 Tm:CLNGG 晶体中实现了锁模, 通过插入 CaF_2 棱镜对进行色散补偿, 在 2 μm 波段获得了 729 fs 的飞秒脉冲, 平均输出功率为 60.2 mW[121]。几乎同时, Lagatsky 等人利用单层石墨烯作为可饱和吸收体, 在 Tm:Lu_2O_3 陶瓷激光器中实现了 410 fs、270 mW 的脉冲输出[122]。与多层石墨烯相比, 单层石墨烯在更低的激发强度下即可达到吸收饱和, 有利于降低锁模阈值, 这也是其脉宽能够显著窄于此前报道的原因。不过, 410 fs 仍较同期 SESAM 锁模的固体激光器的脉宽长, 说明石墨烯的调制深度和损伤阈值在 2 μm 波段仍需优化。

2015 年, 上海交通大学的 Ma 等人对 GSAM 进行了改进, 在金膜反射镜上转移 CVD 生长的双层石墨烯, 利用金膜的 p 型掺杂效应显著降低了石墨烯的光吸收, 从而提高了反射镜的损伤阈值。在 Tm:YAG 陶瓷激光器中, 采用该石墨烯-金膜可饱和吸收镜实现了稳定的连续波锁模, 获得 2.8 ps、158 mW 的脉冲输出[123]。2016 年, Wan 等人采用高质量单层石墨烯在 Tm:YAP 激光器中实现了连续波锁模, 获得 256 mW 平均功率, 但脉宽估算超过 100 ps, 同样受限于色散管理不足[124]。

2017 年, 德国马克斯·伯恩研究所的 Wang 等人选用新型单斜晶系 Tm:$MgWO_4$ 晶体作为增益介质。该晶体具有极宽的吸收和发射谱线, 且热

导率高达 8.7 W/m·K，远优于传统的钨酸盐晶体。同时，采用双层石墨烯作为可饱和吸收体，并利用 5 片啁啾镜进行精细的色散管理，最终在 2 017 nm 中心波长处获得了 86 fs 的脉冲输出，在 2 μm 波段实现了基于石墨烯锁模的亚 100 fs 激光[125]。这说明宽带增益介质、石墨烯可饱和吸收体与精确色散管理的协同优化，是实现超短飞秒脉冲输出的关键。

2018 年~2019 年，氧化石墨烯在调 Q 锁模（Q-switched mode-locking，QML）高功率输出方面展现出优势。天水师范学院的令维军等人采用 Tm,Ho:$LiLuF_4$ 晶体和氧化石墨烯，在低阈值谐振腔设计下实现了调 Q 锁模，获得 245 mW 平均功率，脉宽约 924 ps[126]。2019 年，同课题组的孙锐等人利用氧化石墨烯在 Tm:LuAG 激光器中实现了瓦级被动调 Q 锁模运转，在 3% 输出耦合镜下，最大输出功率达到 1 740 mW，中心波长为 2 023 nm，单脉冲能量为 16.7 nJ。这是 2 μm 波段石墨烯锁模激光器首次达到瓦级功率水平[127]。虽然脉宽仍为皮秒量级，但实现瓦级平均功率表明氧化石墨烯更适合高功率锁模运行。2020 年，该课题组进一步在 Tm,Ho:$CaYAlO_4$ 晶体中实现氧化石墨烯调 Q 锁模，获得 213 mW、525 ps 的脉冲[129]。2021 年，袁振等人采用透过率为 9% 的输出耦合镜和优化的大腔模设计，在 Tm,Ho:LLF 激光器中以氧化石墨烯为可饱和吸收体，实现了平均单脉冲能量为 19.77 nJ 的调 Q 锁模输出，这是 2 μm 波段锁模激光器中迄今报道的最高单脉冲能量纪录[131]。

在飞秒脉宽的进一步压缩方面，2019 年马克斯·玻恩研究所的 Zhao 等人报道了图 9 所示双层石墨烯锁模的 Tm,Ho:CLNGG 激光器。该晶体为无序石榴石结构，具有宽而平滑的增益谱，而双层石墨烯相比单层具有更高的调制深度和更宽的调制带宽。通过优化啁啾镜数量并在腔外采用 ZnS 板进行线性啁啾补偿，最终在 2 093 nm 中心波长处获得了 70 fs 的脉冲[128]，这是迄今为止 2 μm 波段基于石墨烯锁模的固体激光器所取得的最短脉宽。该结果表明，多层石墨烯与宽谱无序晶体的结合是进一步压缩脉宽的有效途径。

此外，2020 年巴黎大学的 Paris 等人报道了首例二极管泵浦的 Tm,Ho:$LiYF_4$ 被动锁模激光器，其采用单层石墨烯作为可饱和吸收体，在反射式结构中实现了 5.2 ps、40 mW 的连续波锁模输出[130]。虽然脉宽较长，但该工作展示了氟化物晶体中石墨烯锁模的可行性。

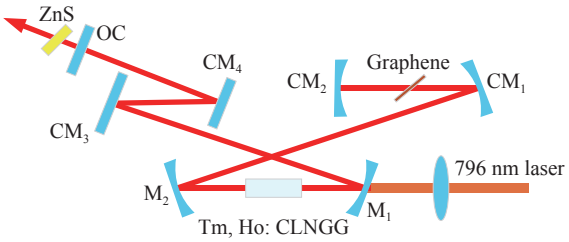

图 9 双层石墨烯锁模 Tm,Ho:CLNGG 激光器光路示意图[128]

Fig. 9 Schematic diagram of optical path for double-layer graphene mode locked Tm,Ho:CLNGG laser[128]

从相关研究进展可以看出，石墨烯体系发展方向逐渐形成两类：本征石墨烯主要用于连续波锁模和飞秒脉冲产生，而氧化石墨烯则更多应用于高功率调 Q 锁模和高脉冲能量输出。这种差异源于两者电子结构和非线性吸收特性的不同。本征石墨烯保留了零带隙能带结构，能够提供宽带超快可饱和吸收。氧化石墨烯中的缺陷态和含氧官能团则有助于提高热稳定性和损伤阈值，更适合高能量运行条件。

石墨烯锁模性能的提升不仅依赖于可饱和吸收体本身的优化，更得益于宽带增益介质和色散补偿技术的发展。石墨烯的宽带吸收特性能够充分发挥 Tm 及 Tm、Ho 掺杂宽谱增益介质的优势，使脉宽由早期皮秒量级逐步压缩至 70 fs。与碳纳米管相比，石墨烯具有更好的波长适应性。但其调制深度较低、非饱和损耗较大，在极限脉宽压缩和高功率扩展方面仍存在一定限制。因此石墨烯更适合作为兼顾宽带工作能力、器件简单和成本优势的通用型锁模材料。

3.3.3 过渡金属硫族化合物

过渡金属硫族化合物因具有层状结构、可调带隙、较强非线性响应以及宽带可饱和吸收特性，被广泛研究用于 2 μm 波段被动锁模激光器[132]。与 SESAM 相比，TMDs 通常具有制备工艺简单、成本较低和工作波段覆盖范围宽等优势。MoS_2、WS_2、$ReSe_2$ 和 NbS_2 等材料相继被应用于 2 μm 波段固体激光器，实现了调 Q 锁模或连续波锁模输出。表 6 汇总了近年来基于 TMDs 的 2 μm 波段锁模固体激光器的典型性能。由表 6 可以看到，当前 TMDs 锁模仍以皮秒输出为主，最短脉宽仍明显高于 SESAM 和 KLM。

表 6　2 μm 波段过渡金属硫族化合物锁模固体激光器输出性能

Tab. 6　Comparison of output performances of 2 μm TMD mode-locked solid-state lasers

年份	锁模方式	激光晶体	平均功率	脉宽	中心波长	参考文献
2015	MoS_2	Tm:CLNGG	60 mW	-	1977 nm	[48]
2015	MoS_2	Tm:LLF	-	-	-	[47]
2017	WS_2	Tm,Ho:LLF	156 mW	300 μs	-	[50]
2020	MoS_2	Tm,Ho:$CaYAlO_4$	216 mW	-	2089 nm	[133]
2020	MoS_2	Tm:CYA	1150 mW	-	1863 nm、1877 nm	[134]
2020	MoS_2	Tm:YAG	200 mw	280 ps	2014 nm	[135]
2021	$ReSe_2$	Tm:YAG	320 mW	580.5 ps	2013 nm	[136]
2023	$PtTe_2$	Tm:YAP	540 mW	670.8 ps	1986 nm	[137]
2026	NbS_2	Tm:YAP	749 mW	872.2 ps	1935 nm	[52]

2015 年, 上海交通大学的 Kong 等人将 MoS_2 作为可饱和吸收体应用于 Tm:CLNGG 激光器中, 实现了被动调 Q 锁模运转, 证明了少层 MoS_2 在 2 μm 波段作为可饱和吸收体的可行性[48]。同年, 同一研究团队的 Xiao 等人将 MoS_2 用于 Tm:LLF 激光器, 同样实现调 Q 锁模, 进一步拓展了 MoS_2 的增益介质适配范围[47]。2017 年, 天水师范学院的令维军等人以聚乙烯醇(Polyvinyl alcohol, PVA)为基质制备了 WS_2 可饱和吸收体, 在 Tm,Ho:LLF 激光器中实现了被动调 Q 锁模, 获得 156 mW 平均输出功率, 估算脉宽约为 878 ps[50]。该工作验证了 WS_2 在 2 μm 波段固体激光器中的锁模潜力。

2020 年, TMDs 锁模研究在功率提升和连续波锁模两方面取得了重要进展。天水师范学院的 Yuan 等人采用 MoS_2 在 Tm,Ho:$CaYAlO_4$ 晶体上实现被动调 Q 锁模, 得到 216 mW 输出功率[133]。同年, 同一课题组的 Chen 等人利用 MoS_2 在 Tm:CYA 激光器中实现了瓦级被动调 Q 锁模输出, 最大平均功率达到 1.15 W, 该工作将 TMDs 锁模 2 μm 固体激光器的平均输出功率提升至瓦级水平, 表明 MoS_2 在高功率脉冲激光器中的应用潜力[134]。同年, 哈尔滨理工大学的 Li 等人将 MoS_2 应用于 Tm:YAG 激光器并实现了连续波锁模运转, 激光器结构如图 10 所示。最终实现连续波锁模, 获得了 280 ps 脉宽和 0.2 W 平均输出功率[135]。与调 Q 锁模相比, 连续波锁模需要更高的腔内功率密度和更精细的色散管理。

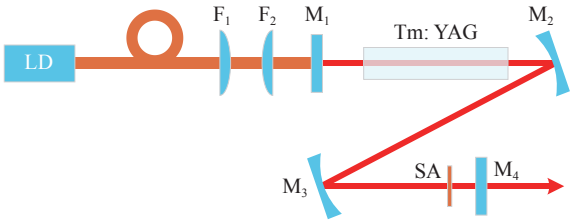

图 10　MoS_2 锁模 Tm:YAG 激光器光路示意图[135]

Fig. 10　Schematic diagram of MoS_2 mode-Locked Tm:YAG laser optical path[135]

2021 年, 哈尔滨理工大学的 Zhou 等人报道了基于 $ReSe_2$ 可饱和吸收体的 Tm:YAG 激光器连续锁模运转。$ReSe_2$ 具有与 MoS_2、WS_2 不同的能带结构, 其在 2 μm 波段表现出良好的非线性吸收特性。最终在 1.5% 输出耦合镜下获得 320 mW 平均功率、580.5 ps 脉宽的脉冲输出, 中心波长为 2012.6 nm[51]。次年, Yang 等人将半金属性二碲化铂($PtTe_2$)纳米片作为可饱和吸收体应用于 Tm^{3+}掺杂固体激光器, 实现了 670.8 ps 的被动锁模脉冲输出[137]。非线性光学测试表明, $PtTe_2$ 在 2 μm 波段具有 8.2% 的调制深度、3.72 MW/cm^2 的饱和光强和 9.8% 的非饱和损耗, 表现出良好的可饱和吸收特性。

2026 年, 哈尔滨师范大学的 Han 等人将 NbS_2 可饱和吸收体应用于 Tm:YAP 激光器, 成功实现了连续波锁模, 获得 0.749 W 平均功率、872.2 ps 脉宽的脉冲输出, 中心波长为 1 935 nm[52]。NbS_2 具有金属导电特性和较快的载流子响应速度, 其连续波锁模结果进一步丰富了 TMDs 可饱和吸收体的材料体系。

与碳纳米管和石墨烯相比，TMDs 在 2 μm 波段表现出不同的发展特点。碳纳米管和石墨烯凭借超快恢复时间和宽带可饱和吸收特性，已实现数十飞秒脉冲输出。而目前多数 TMDs 锁模激光器仍以调 Q 锁模或百皮秒量级连续波锁模为主。主要原因在于调制深度、饱和吸收效率以及载流子恢复动力学尚未达到支持超短飞秒脉冲形成的最佳状态。

未来研究重点将逐渐由材料筛选转向非线性调制机制优化，通过缺陷工程、层数调控、结构设计及改善载流子动力学特性，从而提升调制能力并降低非饱和损耗。随着材料性能的进一步优化，TMDs 有望推动 2 μm 波段固体激光器由高功率皮秒输出向高功率飞秒输出发展。

3.3.4 其他可饱和吸收体

除碳纳米管、石墨烯和 TMDs 外，近年来多种新型可饱和吸收也被用于 2 μm 波段固体激光器，以期在调制深度、损伤阈值、稳定性及成本等方面获得更优的综合性能。表 7 汇总了近年来基于这类其他可饱和吸收体的 2 μm 波段锁模固体激光器的性能。总体来看其他新型可饱和吸收体目前主要处于探索阶段，输出性能整体接近 TMDs 体系，但尚未达到 SESAM 和 KLM 的综合性能水平。

表 7 2 μm 波段其他可饱和吸收体锁模固体激光器输出性能比较

Tab. 7 Comparison of output performances of 2 μm solid-state lasers mode-locked with other saturable absorbers

年份	锁模材料	激光晶体	平均功率	脉宽	中心波长	参考文献
2017	Cr:ZnS	Tm,Ho:LLF	145 mW	682 ps	2053 nm	[138]
2019	BN	Tm:YAP	880 mW	478.8 ps	1937 nm	[139]
2022	ZIF-8	Tm:YAP	912 mW	737 ps	1935 nm	[140]
2023	PZT	Tm:YAP	297 mW	820.7 ps	1936 nm	[141]
2023	$ZrTe_5$	Tm:YAG	767 mW	4.8 ps	2014 nm	[142]
2023	Nb_2AlC	Tm:YLF	379 mW	200 ps	1872 nm	[143]
2023	NiCo-LDH	Tm:YAG	278 mW	221 ps	2012 nm	[144]
2025	Mo_2TiAlC_2	Tm:YAP	620 mW	989.5 ps	1937 nm	[145]
2026	BiOBr	Tm:YLF	590 mW	702 ps	1999 nm	[146]

2019 年，哈尔滨工业大学的 Li 等人将氮化硼（BN）纳米片作为可饱和吸收体应用于 Tm:YAP 激光器中，实现了稳定的调 Q 锁模运转。该工作通过超声热解法制备 BN 纳米片，并旋涂于 CaF_2 反射镜上，获得了 880 mW 平均输出功率、478.83 ps 脉宽的脉冲输出[139]。BN 材料优异的热稳定性和化学稳定性表明其具有应用于 2 μm 波段锁模激光器的潜力。

2022 年，哈尔滨师范大学的 Gao 等人将研究视角拓展至金属有机框架（Metal-organic frameworks, MOFs）和钙钛矿材料。他们采用沸石咪唑酯骨架-8（Zeolitic imidazolate framework-8, ZIF-8）作为可饱和吸收体，在 Tm:YAP 激光器中实现了调 Q 锁模，获得 912 mW 平均输出功率、737 ps 脉宽、97.98 MHz 重复频率的脉冲输出，中心波长为 1 935.0 nm[140]。次年，该团队还采用锆钛酸铅（Lead zirconate titanate, PZT）钙钛矿材料作为可饱和吸收体，在 Tm:YAP 激光器中实现了 820.73 ps 脉宽、0.297 W 平均功率的脉冲输出[141]。PZT 的钙钛矿结构赋予了其较高的介电常数和良好的非线性光学特性。上述研究表明，MOFs 和钙钛矿材料同样能够在 2 μm 波段表现出可饱和吸收特性，进一步丰富了可饱和吸收体的材料类型。

2023 年，多种新型无机材料被成功应用于 2 μm 锁模激光器。哈尔滨理工大学的 Hu 等人采用 Nb_2AlC 层状三元碳化物和氮化物（$M_{n+1}AX_n$ phases, MAX）相材料作为可饱和吸收体，在 Tm:YLF 激光器中实现了 200 ps 脉宽、0.379 W 平均功率的脉冲输出[143]。同年，中国科学院上海光学精密机械研究所的研究人员将镍钴层状双金属氢氧化物（Ni-Co layered double hydroxide, NiCo-LDH）应用于 Tm:YAG 陶瓷激光器，实现了 221 ps 脉

宽、278 mW 平均功率的调 Q 锁模输出[144]。

2023 年, Cai 等人采用过渡金属五碲化物($ZrTe_5$)作为可饱和吸收镜, 如图 11 所示。在 Tm:YAG 陶瓷激光器中实现了 767 mW 平均功率、4.8 ps 脉宽的连续波锁模输出, 中心波长为 2 014 nm[142], 获得了目前其他新型可饱和吸收体中较短的连续波锁模脉宽。这主要得益于 $ZrTe_5$ 较快的载流子弛豫过程和较高的损伤阈值。

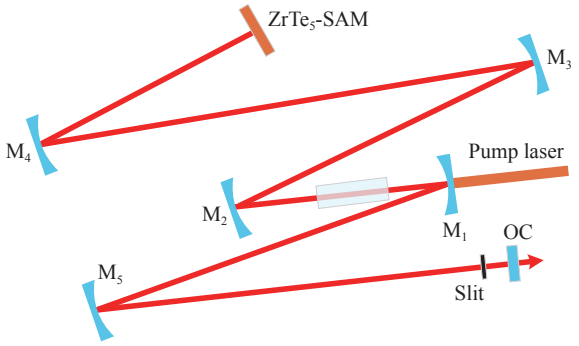

图 11　$ZrTe_5$-SA Tm:YAG 陶瓷激光器光路示意图[142]

Fig. 11　Schematic diagram of optical path of $ZrTe_5$-SA Tm:YAG ceramic laser[142]

2025 年, 新疆师范大学的 Wang 等人将另一种 MAX 相材料 Mo_2TiAlC_2 应用于 Tm:YAP 激光器, 实现了 989.5 ps 脉宽、620 mW 平均功率的调 Q 锁模输出[145]。

2026 年, 山东师范大学的 Wang 等人报道了一种基于缺陷工程调控的新型可饱和吸收体氧空位调控的溴氧化铋(BiOBr)。通过溶剂热法控制反应时间, 在 BiOBr 中引入不同浓度的氧空位。通过氧空位的引入在禁带中形成了中间能级, 有效降低了光学带隙。将 BiOBr 集成到 Tm:YLF 激光器中, 实现了 702 ps 脉宽、0.59 W 平均功率的调 Q 锁模输出[146]。该研究将缺陷工程引入 2 μm 波段可饱和吸收体设计, 通过调控氧空位浓度实现非线性光学特性的优化, 表明能带结构调控是提升可饱和吸收性能的有效途径之一。

从现有研究可以看出, 除碳基材料和 TMDs 之外, 新型可饱和吸收体正呈现出明显的多元化发展趋势。与早期主要依赖材料本征非线性不同, 新型可饱和吸收体的发展逐渐由材料发现转向性能设计。例如, BiOBr 中的氧空位工程通过构建中间能级拓宽了光谱响应范围, LDHs 材料则利用其特殊层状结构增强光与物质相互作用。

这类新型可饱和吸收体尚未实现与 SESAM、碳纳米管及石墨烯相当的超短脉冲输出性能, 多数研究仍以调 Q 锁模运行为主。它们普遍具有良好的热稳定性、环境稳定性以及潜在的高损伤阈值, 在高功率脉冲激光器和特殊应用环境中展现出一定优势。未来, 随着缺陷工程、异质结构设计和能带调控等方法的进一步发展, 新型可饱和吸收体有望在非线性响应强度、损伤阈值和工作带宽之间实现更优平衡, 为 2 μm 波段超快固体激光器提供新的材料体系。

4　结　论

本文系统综述了 2 μm 波段被动锁模固体激光器的发展历程及研究现状, 重点分析了 KLM、SESAM 以及低维材料等典型锁模技术的发展特点及性能演进规律。近年来, 随着宽带增益介质、新型可饱和吸收体及精密色散管理技术的发展, 2 μm 波段超快固体激光器在脉宽、平均功率及运行稳定性等方面均取得了显著进展, 已逐步成为中红外超快激光的重要研究方向。

不同锁模技术已形成各自的应用定位。KLM 适用于极限飞秒脉冲产生; SESAM 在高稳定性和工程化方面优势明显; 低维材料具有宽带吸收、制备简单和成本低等特点, 在宽波段超快激光器中具有广阔的发展前景, 但在输出功率和长期稳定性方面仍有待进一步提升。

近年来, 2 μm 波段锁模激光器的发展呈现出三个显著趋势: 一是增益介质由传统石榴石向混晶、无序晶体和倍半氧化物发展, 以获得更宽的增益带宽; 二是锁模机制逐渐由单纯追求锁模实现转向兼顾超短脉宽、高平均功率及长期稳定运行; 三是色散补偿、高效泵浦和热管理逐渐成为决定器件性能的重要因素, 性能提升越来越依赖系统整体优化, 而非单一材料改进。

尽管 2 μm 波段被动锁模固体激光器已取得显著进展, 但距离高性能工程化应用仍存在若干关键问题。首先, 超短脉宽与高平均功率之间仍存在一定矛盾, 高功率运行条件下的热效应和非线性效应限制了飞秒脉冲进一步压缩; 其次, SESAM 在 2 μm 波段仍受到材料带隙和损伤阈值限制, 低维材料则普遍存在调制深度较低、器件一致性不足等问题; 此外, 多数研究仍停留在实验室

验证阶段，距离高可靠性工程应用还有一定差距。

未来，2 μm 波段被动锁模固体激光器的发展预计将围绕以下几个方面展开：(1)开发兼具宽增益带宽和优异热学性能的新型增益介质；(2)设计高损伤阈值、宽带响应的新型可饱和吸收体；(3)进一步优化色散管理、热管理及谐振腔设计，实现更短脉宽与更高平均功率的协同提升；(4)推动锁模器件集成化、小型化和长期稳定运行，加快其在激光医疗、激光雷达、中红外光源及精密加工等领域的实际应用。

参考文献：

[1] SINGH U N, WALSH B M, YU J R, *et al*.. Twenty years of Tm: Ho: YLF and LuLiF laser development for global wind and carbon dioxide active remote sensing[J]. *Optical Materials Express*, 2015, 5(4): 827.

[2] REN X Y, DAI H, LI D T, *et al*.. Mid-infrared electro-optic dual-comb spectroscopy with feedforward frequency stepping[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(3): 776.

[3] ZHOU J, JIANG J Y, ZHOU Y Q, *et al*.. A novel ultrafast laser ablation fracture polishing method to simultaneously smoothing and improving the surface quality of Al_2O_3 ceramics with high roughness[J]. *Optics & Laser Technology*, 2023, 165: 109594.

[4] LEAHY-HOPPA M R, MIRAGLIOTTA J, OSIANDER R, *et al*.. Ultrafast laser-based spectroscopy and sensing: applications in LIBS, CARS, and THz spectroscopy[J]. *Sensors*, 2010, 10(5): 4342-4372.

[5] MA Y, LI S, ZHANG W H, *et al*.. Theoretical ranging performance model and range walk error correction for photon-counting lidars with multiple detectors[J]. *Optics Express*, 2018, 26(12): 15924.

[6] WALSH B M, LEE H R, BARNES N P. Mid infrared lasers for remote sensing applications[J]. *Journal of Luminescence*, 2016, 169: 400-405.

[7] SONG X ZH, ZHU Q, KANG H, *et al*.. Research progress on multi-dimensional manipulation of 2 μm solid-state lasers[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2025, 46(8): 1468-1484.

[8] WANG Y Y, ZHANG N, DING H, *et al*.. Recent progress in sub - 100 fs mode - locked bulk lasers near 2 μm[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2026, 20(6): e00111.

[9] WU Q, PENG L X, HUANG ZH H, *et al*. . Advancements in ultrafast photonics: confluence of nonlinear optics and intelligent strategies[J]. *Light: Science & Applications*, 2025, 14(1): 97.

[10] YANG Q F, HU Y W, TORRES-COMPANY V, *et al*.. Efficient microresonator frequency combs[J]. *eLight*, 2024, 4(1): 18.

[11] RAZEGHI M, BAI Y B, WANG F H. High-power, high-wall-plug-efficiency quantum cascade lasers with high-brightness in continuous wave operation at 3~300μm[J]. *Light: Science & Applications*, 2025, 14(1): 252.

[12] YAO B CH, WANG W T, XIE Z D, *et al*.. Interdisciplinary advances in microcombs: bridging physics and information technology[J]. *eLight*, 2024, 4(1): 19.

[13] WEI X B, LIU ZH Y, ZHANG S, *et al*.. Low-threshold mid-infrared ZGP optical parametric oscillator pumped by wavelength-selectable Tm: YLF laser at 1.93 μm[J]. *Applied Physics B*, 2023, 129(11): 174.

[14] GUO L, YANG Y L, ZHAO SH ZH, *et al*.. Room temperature watt-level 3.87 μm MgO: PPLN optical parametric oscillator under pumping with a Tm: YAP laser[J]. *Optics Express*, 2020, 28(22): 32916.

[15] WU N Q, ZHAI ZH Y, CUI Y H, *et al*.. Study on the processing characteristics of carbon fiber-reinforced plastics by ultra-short pulse laser[J]. *AIP Advances*, 2024, 14(8): 085001.

[16] CAMPARGUE A, MIKHAILENKO S N, VASILCHENKO S, *et al*.. The absorption spectrum of water vapor in the 2.2 μm transparency window: high sensitivity measurements and spectroscopic database[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2017, 189: 407-416.

[17] SMOLSKI V O, YANG H, GORELOV S D, *et al*.. Coherence properties of a 26–75 μm frequency comb produced as a subharmonic of a Tm-fiber laser[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(7): 1388.

[18] ZHANG D X, HUANG X, YANG X M, *et al*.. Selective tumor ablation via femtosecond laser resonant with collagen[J]. *Optica*, 2025, 12(10): 1578.

[19] WU Q, ZHAO G, WU H B, *et al*.. Open-ended exploration of ultrashort pulse lasers: an innovative design strategy for devices based on 2D materials[J]. *Photonics Research*, 2023, 11(7): 1238.

[20] CAO X, ZHU Q, XIAN A H, *et al*.. Ultrafast Tm: $CaYAlO_4$ laser with pulse regulation and saturation parameters

evolution in the 2 μm water absorption band[J]. *Optics & Laser Technology*, 2022, 152: 108096.

[21] XIAO Y H, MU Y L, YANG L L, *et al*.. A ps level actively mode-locked Ho: Sc_2SiO_5 laser at 2112.1 nm resonantly-pumped by Tm fiber laser[J]. *Laser Physics*, 2018, 28(1): 015801.

[22] CHEN Y, WANG R X, YAO B Q, *et al*.. Acousto-optic mode-locked Tm: LuAG laser with nearly diffraction-limited beam[J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2019, 51(11): 353.

[23] WANG Y CH, XIE G Q, XU X D, *et al*. . SESAM mode-locked Tm: CALGO laser at 2 μm[C]. *Proceedings of the Advanced Solid State Lasers*, Optica Publishing Group, 2015: AW1A. 2.

[24] KONG L C, QIN ZH P, XIE G Q, *et al*.. Dual-wavelength synchronous operation of a mode-locked 2-μm Tm: $CaYAlO_4$ laser[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(3): 356.

[25] 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.

[26] HAUS H A. Mode-locking of lasers[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2000, 6(6): 1173-1185.

[27] KELLER U. Recent developments in compact ultrafast lasers[J]. *Nature*, 2003, 424(6950): 831-838.

[28] 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.

[29] HOU J, ZHANG B T, SU X C, *et al*.. High efficient mode-locked Tm: YAP laser emitting at 1938nm by SESAM[J]. *Optics Communications*, 2015, 347: 88-91.

[30] GLUTH A, WANG Y CH, PETROV V, *et al*.. GaSb-based SESAM mode-locked Tm: YAG ceramic laser at 2 μm[J]. *Optics Express*, 2015, 23(2): 1361.

[31] KELLER U, WEINGARTEN K J, KARTNER F X, *et al*.. Semiconductor saturable absorber mirrors (SESAM's) for femtosecond to nanosecond pulse generation in solid-state lasers[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 1996, 2(3): 435-453.

[32] KELLER U. Ultrafast solid-state lasers[C]. *Proceedings of 2000 Conference on Lasers and Electro-Optics Europe*, IEEE, 2000: 1.

[33] ZHAO Y G, WANG L, CHEN W D, *et al*.. SESAM mode-locked Tm: $LuYO_3$ ceramic laser generating 54-fs pulses at 2048 nm[J]. *Applied Optics*, 2020, 59(33): 10493.

[34] FENG T, YANG K, ZHAO J, *et al*.. 121 W passively mode-locked Tm: LuAG laser[J]. *Optics Express*, 2015, 23(9): 11819.

[35] ALEKSANDROV V, GLUTH A, PETROV V, *et al*.. Mode-locked Tm, Ho: $KLu(WO_4)_2$ laser at 2060 nm using InGaSb-based SESAMs[J]. *Optics Express*, 2015, 23(4): 4614.

[36] LAU K Y, HOU D. Recent research and advances of material-based saturable absorber in mode-locked fiber laser[J]. *Optics & Laser Technology*, 2021, 137: 106826.

[37] SET S Y, YAGUCHI H, TANAKA Y, *et al*.. Laser mode locking using a saturable absorber incorporating carbon nanotubes[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2004, 22(1): 51-56.

[38] DVORETSKIY D A, SAZONKIN S G, OREKHOV I O, *et al*.. Femtosecond Er-doped all-fiber laser with high-density well-aligned carbon-nanotube-based thin-film saturable absorber[J]. *Nanomaterials*, 2022, 12(21): 3864.

[39] HASAN T, SUN ZH P, WANG F Q, *et al*.. Nanotube–polymer composites for ultrafast photonics[J]. *Advanced Materials*, 2009, 21(38-39): 3874-3899.

[40] BONACCORSO F, SUN Z, HASAN T, *et al*.. Graphene photonics and optoelectronics[J]. *Nature Photonics*, 2010, 4(9): 611-622.

[41] WANG Q H, KALANTAR-ZADEH K, KIS A, *et al*.. Electronics and optoelectronics of two-dimensional transition metal dichalcogenides[J]. *Nature Nanotechnology*, 2012, 7(11): 699-712.

[42] CHO W B, SCHMIDT A, YIM J H, *et al*.. Passive mode-locking of a Tm-doped bulk laser near 2 μm using a carbon nanotube saturable absorber[J]. *Optics Express*, 2009, 17(13): 11007.

[43] JO S G, RAMKUMAR R, LEE J W. Recent advances in laser - induced graphene - based materials for energy storage and conversion[J]. *ChemSusChem*, 2024, 17(5): e202301146.

[44] SUN ZH P, HASAN T, TORRISI F, *et al*.. Graphene mode-locked ultrafast laser[J]. *ACS Nano*, 2010, 4(2): 803-810.

[45] CHHOWALLA M, SHIN H S, EDA G, *et al*.. The chemistry of two-dimensional layered transition metal

dichalcogenide nanosheets[J]. *Nature Chemistry*, 2013, 5(4): 263-275.

[46] WANG K P, WANG J, FAN J T, *et al*.. Ultrafast saturable absorption of two-dimensional MoS_2 nanosheets[J]. *ACS Nano*, 2013, 7(10): 9260-9267.

[47] ZOU X, LENG Y X, LI Y Y, *et al*.. Passively Q-switched mode-locked Tm: LLF laser with a MoS_2 saturable absorber[J]. *Chinese Optics Letters*, 2015, 13(8): 081405.

[48] KONG L C, XIE G Q, YUAN P, *et al*.. Passive Q-switching and Q-switched mode-locking operations of 2 μm Tm: CLNGG laser with MoS_2 saturable absorber mirror[J]. *Photonics Research*, 2015, 3(2): A47.

[49] WANG X, WANG Y G, DUAN L N, *et al*.. Passively Q-switched nd: YAG laser via a WS_2 saturable absorber[J]. *Optics Communications*, 2016, 367: 234-238.

[50] 令维军, 夏涛, 董忠, 等. 基于 WS_2 可饱和吸收体的调 *Q* 锁模 Tm, Ho: LLF 激光器[J]. 物理学报, 2017, 66(11): 114207.
LING W J, XIA T, DONG ZH, *et al*.. Passively *Q*-switched mode-locked Tm, Ho: LLF laser with a WS_2 saturable absorber[J]. *Acta Physica Sinica*, 2017, 66(11): 114207. (in Chinese).

[51] ZHOU L, DUAN X M, XIE W Q, *et al*.. Optical and laser performances of a layered $ReSe_2$ saturable absorber for a 2-μm solid laser[J]. *Optics & Laser Technology*, 2021, 135: 106685.

[52] HAN Y X, WANG H L, LI H P, *et al*.. Passive Q-switched and passive mode-locked Tm: YAP lasers based on NbS_2 nanosheets as saturable absorber[J]. *Optical Materials*, 2026, 172: 117804.

[53] 毛佳佳, 胡平, 周雪, 等. Tm^{3+}/Ho^{3+}离子掺杂中红外超快激光技术研究进展 (特邀)[J]. 红外与激光工程, 2021, 50(8): 20210436.
MAO J J, HU P, ZHOU X, *et al*.. Research development on Tm^{3+}/Ho^{3+} ions doped mid-infrared ultrafast lasers (Invited)[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(8): 20210436. (in Chinese).

[54] SCHOLLE K, LAMRINI S, KOOPMANN P, *et al*. . 2 μm laser sources and their possible applications[M]//PAL B. Frontiers in Guided Wave Optics and Optoelectronics. London: IntechOpen, 2010.

[55] WU CH T, JIANG Y, DAI T Y, *et al*.. Research progress of 2 μm Ho-doped solid-state laser[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2018, 39(11): 1584-1597.

[56] TOKURAKAWA M, FUJITA E, KRÄNKEL C. Kerr-lens mode-locked Tm^{3+}: Sc_2O_3 single-crystal laser in-band pumped by an Er: Yb fiber MOPA at 1611 nm[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(16): 3185.

[57] ZHANG J W, MAK K F, GRÖBMEYER S, *et al*. . Generation of 220 fs, 20 W pulses at 2 μm from Kerr-lens mode-locked Ho: YAG thin-disk oscillator[C]. *Proceedings of the Conference on Lasers and Electro-Optics*, Optica Publishing Group, 2017: SM1I. 6.

[58] SUZUKI A, KRÄNKEL C, TOKURAKAWA M. High quality-factor Kerr-lens mode-locked Tm: Sc_2O_3 single crystal laser with anomalous spectral broadening[J]. *Applied Physics Express*, 2020, 13(5): 052007.

[59] WANG L, CHEN W D, ZHAO Y G, *et al*.. Single-walled carbon-nanotube saturable absorber assisted Kerr-lens mode-locked Tm: $MgWO_4$ laser[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(22): 6142.

[60] ZHAO Y G, WANG L, CHEN W D, *et al*.. Kerr-lens mode-locked Tm-doped sesquioxide ceramic laser[J]. *Optics Letters*, 2021, 46(14): 3428.

[61] SUZUKI A, KRÄNKEL C, TOKURAKAWA M. Sub-6 optical-cycle Kerr-lens mode-locked Tm: Lu_2O_3 and Tm: Sc_2O_3 combined gain media laser at 2.1 μm[J]. *Optics Express*, 2021, 29(13): 19465.

[62] SUZUKI A, KRÄNKEL C, TOKURAKAWA M. Combined gain media 60 fs Kerr-lens mode-locked laser based on Tm: Lu_2O_3 and Tm: Sc_2O_3[C]. *Proceedings of the Conference on Lasers and Electro-Optics*, Optica Publishing Group, 2021: SF2M. 6.

[63] SUZUKI A, KALUSNIAK S, GANSCHOW S, *et al*.. Kerr-lens mode-locked 49-fs Tm^{3+}: $YScO_3$ single-crystal laser at 2.1 μm[J]. *Optics Letters*, 2023, 48(16): 4221.

[64] YAO W CH, KHALILI M, WANG Y CH, *et al*.. GHz repetition rate, sub-100-fs Ho: CALGO laser at 2.1 μm with watt-level average power[J]. *Optics Letters*, 2024, 49(6): 1591.

[65] ZENG H J, XUE W Z, MURRAY R T, *et al*.. In-band pumped Kerr-lens mode-locked Tm, Ho-codoped calcium aluminate laser[J]. *Optics Express*, 2024, 32(9): 16083.

[66] LIN ZH L, CHEN W D, GRIEBNER U, *et al*. . Kerr-lens mode-locked Tm, Ho: Ca(Gd, Y)AlO_4 laser[J]. *Proceedings of SPIE*, 2025, PC13341: PC133410K.

[67] WANG J, YAO W CH, LIU J, *et al*.. Kerr-lens mode-locked Ho: CALYO laser at 2.1 μm[J]. *Optics Express*, 2025, 33(8): 18017.

[68] WANG Y CH, 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.

[69] GAPONENKO M, WITTWER V J, HÄRKÖNEN A, *et al*.. Diode-pumped Tm: $KY(WO_4)_2$ laser passively modelocked with a GaSb-SESAM[J]. *Optics Express*, 2017, 25(21): 25760.

[70] 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.

[71] SOULARD R, TYAZHEV A, DOUALAN J L, *et al*.. 2.3 μm Tm^{3+}: YLF mode-locked laser[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(18): 3534-3536.

[72] WANG Y CH, LAN R J, MATEOS X, *et al*.. Thulium doped LuAG ceramics for passively mode locked lasers[J]. *Optics Express*, 2017, 25(6): 7084-7091.

[73] ZHOU W, XU X D, 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.

[74] LING W J, XIA T, DONG ZH, *et al*.. 1.91 μm Passively continuous-wave mode-locked Tm: $LiLuF_4$ laser[J]. *Optics & Laser Technology*, 2018, 108: 364-367.

[75] TYAZHEV A, SOULARD R, GODIN T, *et al*.. Passively mode-locked diode-pumped Tm^{3+}: YLF laser emitting at 1.91 μm using a GaAs-based SESAM[J]. *Laser Physics Letters*, 2018, 15(4): 045807.

[76] WANG Y CH, JING W, LOIKO P, *et al*.. Sub-10 optical-cycle passively mode-locked Tm: $(Lu_{2/3}Sc_{1/3})_2O_3$ ceramic laser at 2 μm[J]. *Optics Express*, 2018, 26(8): 10299-10304.

[77] ZHAO Y G, WANG Y CH, ZHANG X ZH, *et al*.. 87 fs mode-locked Tm, Ho: $CaYAlO_4$ laser at ~2043 nm[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(4): 915-918.

[78] LI D ZH, KONG L CH, XU X D, *et al*.. Spectroscopy and mode-locking laser operation of Tm: $LuYO_3$ mixed sesquioxide ceramic[J]. *Optics Express*, 2019, 27(17): 24416-24425.

[79] LIU J J, ZHANG CH, ZHANG ZH, *et al*.. 1886-nm mode-locked and wavelength tunable Tm-doped CaF_2 lasers[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(1): 134-137.

[80] LIU X Y, LI X W, ZHAO SH ZH, *et al*.. Dual-wavelength synchronously mode-locked Tm-doped bulk laser with terahertz frequency beating[J]. *Chinese Optics Letters*, 2019, 17(9): 091401.

[81] NA Q X, HUANG ZH Y, HE M M, *et al*.. Watt-level passively mode-locked Tm: YLF laser at 1.83 μm[J]. *Optics Express*, 2019, 27(24): 35230-35237.

[82] LING W J, XIA T, SUN R, *et al*.. Low threshold, high efficiency passively mode-locked picosecond Tm, Ho: $LiLuF_4$ laser[J]. *Frontiers in Physics*, 2020, 7: 216.

[83] SHEN Y J, HAN X H, LI L J, *et al*.. Continuous-wave mode-locked Tm: YAG laser with GaAs-based SESAM[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2020, 111: 103539.

[84] GUO L, YANG Y L, ZHAO SH ZH, *et al*.. Diode-pumped SESAM mode-locked low-repetition-rate Tm: CALGO picosecond laser at 1968 nm[J]. *Optics & Laser Technology*, 2021, 142: 107195.

[85] WANG L, CHEN W D, ZHAO Y G, *et al*.. Power-scalable sub-100-fs Tm laser at 2.08 μm[J]. *High Power Laser Science and Engineering*, 2021, 9: e50.

[86] WANG L, CHEN W D, ZHAO Y G, *et al*.. Sub-50 fs pulse generation from a SESAM mode-locked Tm, Ho-codoped calcium aluminate laser[J]. *Optics Letters*, 2021, 46(11): 2642-2645.

[87] HAO Q Q, WANG Q G, ZHENG L H, *et al*.. Diode-pumped SESAM mode-locked Tm: Sc_2SiO_5 laser[J]. *Optics Letters*, 2022, 47(17): 4495-4498.

[88] WANG Y CH, LOIKO P, ZHAO Y G, *et al*.. Polarized spectroscopy and SESAM mode-locking of Tm, Ho: CALGO[J]. *Optics Express*, 2022, 30(5): 7883-7893.

[89] YAO W CH, WANG Y CH, TOMILOV S, *et al*. . High-power femtosecond Ho: CALGO laser at 2.1 μm[C]. *Proceedings of the Optica Advanced Photonics Congress 2022*, Optica Publishing Group, 2022: AW5A. 3.

[90] ZHANG N, WANG ZH X, LIU SH D, *et al*.. Watt-level femtosecond Tm-doped "mixed" sesquioxide ceramic laser in-band pumped by a Raman fiber laser at 1627 nm[J]. *Optics Express*, 2022, 30(13): 23978-23985.

[91] ZHANG N, LIU SH D, WANG ZH X, *et al*.. SESAM mode-locked Tm: Y_2O_3 ceramic laser[J]. *Optics Express*, 2022,

30(16): 29531-29538.

[92] ZHAO Y T, LI Y, ZHAO SH ZH, *et al*.. Diode-pumped Tm^{3+}, Ho^{3+} co-doped GAGG mode-locking laser near the 2.1μm wavelength region[J]. *Optics Express*, 2022, 30(8): 13890-13897.

[93] DING H, LIU J, WANG Y Y, *et al*.. Mode-locking of a Tm, Ho: CALYGO laser delivering 50 fs pulses at 2.08 μm[J]. *Optics Letters*, 2023, 48(23): 6267-6270.

[94] ZHANG N, SONG Q S, ZHOU J J, *et al*.. 44-fs pulse generation at 2.05 μm from a SESAM mode-locked Tm: $GdScO_3$ laser[J]. *Optics Letters*, 2023, 48(2): 510-513.

[95] LIU SH D, WANG P F, LI K, *et al*.. Sub-60-fs mode-locked Tm, Ho: $CaYLuAlO_4$ laser at 2.05 μm[J]. *Optics Express*, 2024, 32(5): 7513-7519.

[96] LIU J, ZHANG N, SONG Q S, *et al*.. Tunable and mode-locked Tm, Ho: $GdScO_3$ laser[J]. *Optics Letters*, 2024, 49(8): 2145-2148.

[97] SUZUKI A, WANG Y CH, TOMILOV S, *et al*.. Diode-pumped 88 fs SESAM mode-locked Tm, Ho: CLNGG laser at 2090 nm[J]. *Applied Physics Express*, 2024, 17(4): 042002.

[98] ZHANG N, LIU J, DING H, *et al*.. 43 fs pulse generation from a SESAM mode-locked Tm, Ho: CALYGLO laser[J]. *Optics Letters*, 2025, 50(20): 6277-6280.

[99] MENG Z Q, LIU J L, ZHANG J, *et al*.. Based on SESAM 2μm band Tm: YLF continuous-wave mode-locked laser[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2025, 150: 106033.

[100] YANG J F, QIU X, YUAN SH CH, *et al*.. SESAM mode-locked “mixed” Tm: $CaYLuAlO_4$ laser generating 202 fs pulses at 1980 nm[J]. *Optics & Laser Technology*, 2025, 192: 113416.

[101] ZHANG N, WANG Y Y, DING H, *et al*.. Direct generation of 3.5 optical-cycle pulses from a rare-earth laser[J]. *Optics Letters*, 2025, 50(10): 3150-3153.

[102] TONG X, ZHANG ZH, FANG L ZH, *et al*.. Enhanced performance of a passively mode-locked Tm, Gd: CaF_2 laser versus Tm: CaF_2 around 1.9 μm[J]. *Optics Express*, 2026, 34(5): 9166-9175.

[103] SHAKATY A A, HMOOD J K, MAHDI B R, *et al*.. Q-switched erbium-doped fiber laser based on nanodiamond saturable absorber[J]. *Optics & Laser Technology*, 2022, 146: 107569.

[104] SCHMIDT A, KOOPMANN P, HUBER G, *et al*.. 175 fs Tm: Lu_2O_3 laser at 2.07 μm mode-locked using single-walled carbon nanotubes[J]. *Optics Express*, 2012, 20(5): 5313-5318.

[105] SCHMIDT A, CHOI S Y, YEOM D I, *et al*.. Femtosecond pulses near 2μm from a Tm: KLuW laser mode-locked by a single-walled carbon nanotube saturable absorber[J]. *Applied Physics Express*, 2012, 5(9): 092704.

[106] SCHMIDT A, PARISI D, VERONESI S, *et al*. . Passive mode-locking of a Tm: YLF laser[C]. *Proceedings of the CLEO: 2011 - Laser Science to Photonic Applications*, IEEE, 2011: 1-2.

[107] QU Z S, WANG Y G, 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.

[108] ALEKSANDROV V, GLUTH A, PETROV V, *et al*.. Tm, Ho: $KLu(WO_4)_2$ laser mode-locked near 2 μm by single-walled carbon nanotubes[J]. *Optics Express*, 2014, 22(22): 26872-26877.

[109] 令维军, 夏涛, 董忠, 等. 基于单壁碳纳米管调 *Q* 锁模低阈值 Tm, Ho: $LiLuF_4$ 激光器[J]. 物理学报, 2018, 67(1): 014201.
LING W J, XIA T, DONG ZH, *et al*.. Passively *Q*-switched mode-locked low threshold Tm, Ho: LLF laser with an single walled carbon nanotubes saturable absorber[J]. *Acta Physica Sinica*, 2018, 67(1): 014201. (in Chinese).

[110] PAN ZH B, WANG Y CH, ZHAO Y G, *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.

[111] WANG Y CH, ZHAO Y G, PAN ZH B, *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.

[112] PAN ZH B, WANG Y CH, ZHAO Y G, *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.

[113] ZHAO Y G, WANG Y CH, CHEN W D, *et al*.. 67-fs pulse generation from a mode-locked Tm, Ho: CLNGG laser at 2083 nm[J]. *Optics Express*, 2019, 27(3): 1922-1928.

[114] ZHAO Y G, WANG L, WANG Y CH, *et al*.. SWCNT-SA mode-locked Tm: $LuYO_3$ ceramic laser delivering 8-optical-cycle pulses at 2.05 μm[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(2): 459-462.

[115] ZHANG Y N, LING W J, QIAO D, *et al*.. Passively Q-switched mode-locked Tm, Ho: $CaYAlO_4$ laser based on double-walled carbon nanotube saturable absorber[J]. *Frontiers in Physics*, 2020, 8: 86.

[116] WANG L, CHEN W D, PAN ZH B, *et al*.. Sub-100 fs mode-locked Tm: CLTGG laser[J]. *Optics Express*, 2021, 29(20): 31137-31144.

[117] PAN ZH B, WANG L, BAE J E, *et al*.. SWCNT-SA mode-locked Tm, Ho: LCLNGG laser[J]. *Optics Express*, 2021, 29(24): 40323-40332.

[118] WANG L, CHEN W D, PAN ZH B, *et al*. . Single-walled carbon nanotube saturable-absorber mode-locked Tm: CLTGG laser[C]. *Proceedings of the Laser Congress 2021 (ASSL, LAC)*, Optica Publishing Group, 2021: ATu2A. 8.

[119] BAO Q L, ZHANG H, WANG Y, *et al*.. Atomic - layer graphene as a saturable absorber for ultrafast pulsed lasers[J]. *Advanced Functional Materials*, 2009, 19(19): 3077-3083.

[120] LIU J, WANG Y G, QU Z S, *et al*.. Graphene oxide absorber for 2 μm passive mode-locking Tm: $YAlO_3$ laser[J]. *Laser Physics Letters*, 2012, 9(1): 15-19.

[121] MA J, XIE G Q, LV P, *et al*.. Graphene mode-locked femtosecond laser at 2 μm wavelength[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(11): 2085-2087.

[122] LAGATSKY A A, SUN Z, KULMALA T S, *et al*.. 2 μm solid-state laser mode-locked by single-layer graphene[J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 102(1): 013113.

[123] 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): 50-55.

[124] WAN H L, CAI W, WANG F, *et al*.. High-quality monolayer graphene for bulk laser mode-locking near 2 μm[J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2016, 48(1): 11.

[125] WANG Y CH, CHEN W D, MERO M, *et al*.. Sub-100 fs Tm: $MgWO_4$ laser at 2017 nm mode locked by a graphene saturable absorber[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(16): 3076-3079.

[126] 令维军, 夏涛, 董忠, 等. 基于氧化石墨烯可饱和吸收体的低阈值被动调 *Q* 锁模 Tm, Ho: $LiLuF_4$ 激光器[J]. 中国激光, 2018, 45(3): 0301001.
LING W J, XIA T, DONG ZH, *et al*.. Passively *Q*-switched mode-locked low threshold Tm, Ho: $LiLuF_4$ laser with a graphene oxide saturable absorber[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(3): 0301001. (in Chinese).

[127] 孙锐, 陈晨, 令维军, 等. 基于氧化石墨烯的瓦级调 *Q* 锁模 Tm: LuAG 激光器[J]. 物理学报, 2019, 68(10): 104207.
SUN R, CHEN CH, LING W J, *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).

[128] ZHAO Y G, CHEN W D, WANG L, *et al*.. Graphene mode-locked Tm, Ho-codoped crystalline garnet laser producing 70-fs pulses near 2.1μm[J]. *OSA Continuum*, 2019, 2(9): 2593.

[129] 孙锐, 令维军, 陈晨, 等. 2 089 nm 调 *Q* 锁模 Tm, Ho: $CaYAlO_4$ 激光器[J]. 发光学报, 2020, 41(3): 301-307.
SUN R, LING W J, CHEN CH, *et al*.. Passively *Q*-switched mode-locked Tm, Ho: $CaYAlO_4$ laser operating at 2 089 nm[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2020, 41(3): 301-307. (in Chinese).

[130] PARIS M, TYAZHEV A, LOIKO P, *et al*.. Passively mode-locked diode-pumped Tm, Ho: $LiYF_4$ laser[J]. *Laser Physics Letters*, 2020, 17(4): 045801.

[131] 袁振, 令维军, 陈晨, 等. 高单脉冲能量被动调 Q 锁模 Tm, Ho: LLF 激光器[J]. 红外与激光工程, 2021, 50(8): 202103.
YUAN ZH, LING W J, CHEN CH, *et al*.. High single pulse energy passively Q-switched mode-locked Tm, Ho: LLF laser[J]. *Laser Physics Letters*, 2021, 50(8): 202103. (in Chinese).

[132] HU ZH W, HU X X, HE P F, *et al*.. NbS_2-nanosheet-based saturable absorber for 1.5 μm and 2 μm ultrafast fiber lasers[J]. *Photonics and Nanostructures-Fundamentals and Applications*, 2023, 54: 101117.

[133] YUAN ZH, LING W J, SUN R, *et al*.. Passively Q-switched mode-locked Tm, Ho: $CaYAlO_4$ laser at 2089 nm[J]. *Proceedings of SPIE*, 2020, 11717: 117171G.

[134] CHEN CH, LING W J, SUN R, *et al*.. Watt-level dual-wavelength Q-switched mode-locked all-solid-state Tm: CYA laser[J]. *Frontiers in Physics*, 2020, 7: 252.

[135] LI L J, ZHOU L, LI T X, *et al*.. Passive mode-locking operation of a diode-pumped Tm: YAG laser with a MoS_2 saturable absorber[J]. *Optics & Laser Technology*, 2020, 124: 105986.

[136] ZHOU L, DUAN X M, XIE W Q, *et al*. . Optical and laser performances of a layered $ReSe_2$ saturable absorber for a 2-

μm solid laser[J]. *Optics & Laser Technology*, 2021, 135: 106685. **(查阅网上资料, 本条文献与第 51 条文献重复, 请确认)**.

[137] YANG Y H, LIU H, GAO Q, *et al*.. Semi-metallic $PtTe_2$ nanosheets are used as saturable absorbers to generate passive mode-locked pulse laser in the 2 μm band[J]. *Optical Materials*, 2024, 156: 115951.

[138] ZHANG X L, LUO Y, WANG T H, *et al*.. Cr: ZnS saturable absorber passively *Q*-switched mode-locking Tm, Ho: LLF laser[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(11): 2973-2977.

[139] LI L J, YANG X N, ZHOU L, *et al*.. BN as a saturable absorber for a passively mode-locked 2 μm solid-state laser[J]. *Physica Status Solidi (RRL)-Rapid Research Letters*, 2019, 13(3): 1800482.

[140] GAO Q, MA X ZH, ZHANG W SH, *et al*.. A passively mode-locked of Tm: YAP laser with a zeolitic imidazolate frameworks-8 (ZIF-8) saturable absorber[J]. *Optik*, 2022, 271: 170133.

[141] GAO Q, YANG X N, LI SH CH, *et al*.. $Pb(Zr_x, Ti_{1-x})O_3$ perovskite material for passively ultrafast pulse generation in a Tm: YAP laser[J]. *Optics & Laser Technology*, 2023, 157: 108707.

[142] CAI E L, QI CH, HU X H, *et al*.. Zirconium pentatelluride as saturable absorber for 2 μm ultrafast solid-state laser[J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2023, 11(11): 3812-3817.

[143] HU Y Y, YANG W L, QI T Q, *et al*.. Nb_2AlC as saturable absorber for a passively mode-locked operation of Tm: YLF laser[J]. *Optics & Laser Technology*, 2023, 161: 109116.

[144] WANG M J, XU Y, YU ZH ZH, *et al*.. Nickel–cobalt layered double hydroxide saturable absorber for a mid-infrared 2 μm Tm: YAG ceramic mode-locked laser[J]. *Applied Physics B*, 2023, 129(7): 104.

[145] WANG CH, CHEN T J, MENG ZH, *et al*.. Passively mode-locked Tm: YAP laser utilizing a Mo_2TiAlC_2 MAX phase saturable absorber for modulation[J]. *Photonics*, 2025, 12(6): 610.

[146] WANG X, GUO L C, SHENG J P, *et al*.. 2 μm Tm: YLF pulsed laser based on an oxygen-vacancy-engineered BiOBr saturable absorber[J]. *Optical Materials*, 2026, 169: 117705.

作者简介：



段小明（1981—），男，黑龙江哈尔滨人，博士，教授，博士生导师。2007 年、2012 年于哈尔滨工业大学分别获得硕士学位和博士学位，主要从事中长波红外固体激光产生、调控及应用方面的研究工作。E-mail: xmduan@hit.edu.cn



吴佳泽（1993—），男，吉林长春人，哈尔滨工业大学航天学院副研究员，硕士生导师，2025 年于哈尔滨工业大学获得博士学位，研究方向为窄线宽固体激光技术、相干探测激光雷达技术、差分吸收雷达光源技术、中红外固体激光技术等。E-mail: wujiaze@hit.edu.cn



赵禹淇（2001—），男，吉林长春人，本科学历，2024 年于哈尔滨工业大学获得学士学位，现为哈尔滨工业大学在读研究生，研究方向为中红外固体激光技术。E-mail: 16844849@qq.com