

激光与光电子学进展

半导体可饱和吸收镜锁模激光器研究进展

黄婷^{1,2}, 林楠^{1*}, 张秋月^{1,2}, 何天将^{1,2}, 熊聪¹, 仲莉^{1,2}, 刘素平¹, 马骁宇^{1,2}¹中国科学院半导体研究所光电子器件国家工程研究中心, 北京 100083;²中国科学院大学材料科学与光电技术学院, 北京 100049

摘要 半导体可饱和吸收镜 (SESAM) 作为超快激光技术中最常用的被动锁模器件, 由于可自启动、插入损耗小、集成度高和设计灵活等优点, 具有广泛的应用范围和极佳的商业前景。本文主要介绍 SESAM 的锁模原理和发展现状, 对目前 SESAM 的外延结构、生长方式和参数性能进行总结归纳, 详尽描述其在固体激光器、半导体激光器和光纤激光器的锁模最新进展, 并指出各类锁模激光器的性能特点和未来发展方向。

关键词 半导体可饱和吸收镜; 被动锁模; 激光器; 超快激光

中图分类号 TN248

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP231330

Progress in Semiconductor Saturable Absorption Mirror Mode-Locked Laser

Huang Ting^{1,2}, Lin Nan^{1*}, Zhang Qiuyue^{1,2}, He Tianjiang^{1,2}, Xiong Cong¹, Zhong Li^{1,2},
Liu Suping¹, Ma Xiaoyu^{1,2}¹National Engineering Research Center for Optoelectronic Devices, Institute of Semiconductor,
Chinese Academy of Science, Beijing 100083, China;²College of Materials Science and Opto-Electronic Technology, University of Chinese
Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Semiconductor saturable absorption mirror (SESAM) is the most commonly-used passive mode-locking device in ultrafast laser technology. Owing to its advantages of self-starting, low insertion loss, high integration, and flexible design, SESAM has a wide range of applications and excellent commercial prospects. This study introduces the mode-locking principle and current development status of SESAM and summarizes the current epitaxial structure, growth mode, and parameter performance of SESAM. It also provides a detailed description of its latest progress in mode-locking in solid-state, semiconductor, and fiber lasers. Moreover, the performance characteristics and future-development direction of various types of mode-locked lasers are presented.

Key words semiconductor saturable absorption mirror; passive mode-locking; laser; ultrafast laser

1 引言

近年来,随着超短脉冲激光器的迅速发展,ps和fs激光器凭借其短脉冲宽度、高峰值功率和宽光谱等优势已广泛应用于光纤通信、高精度加工、激光测距、生物学、医学等诸多领域^[1]。锁模技术是获得超短脉冲的主要方式之一,自1992年Keller等^[2]发明半导体可饱和吸收镜 (SESAM) 以来,SESAM作为锁模器件已经成功应用于光纤激光器^[3]、固体激光器^[2]和半导体垂直外腔表面发射激光器^[4],并基于此获得不同特点的

超短脉冲。其中,SESAM锁模光纤激光器脉冲宽度小,锁模固体激光器峰值功率高,锁模半导体垂直外腔表面发射激光器重复频率和输出功率高。

自20世纪90年代SESAM锁模和克尔透镜锁模 (KLM)面世以来,被动锁模技术取得了关键性突破,打破了超短脉冲依赖于染料激光器和主动锁模激光器的技术困境。1991年,Spence等^[5]首次报道了钛蓝宝石激光器利用克尔效应产生60 fs的超短脉冲激光输出,从此克尔透镜锁模进入人们的研究视野。KLM可以在没有任何外部脉冲压缩的情况下将激光脉冲锁模

收稿日期: 2023-05-18; 修回日期: 2023-07-06; 录用日期: 2023-07-24; 网络首发日期: 2023-08-07

通信作者: *linnan@semi.ac.cn

至几 fs 范围,然而,KLM 锁模过程存在不能自启动的缺点,而且需要关键的空腔对准来获得稳定的脉冲,因此 KLM 与腔体匹配的问题限制了激光输出功率和效率的提升。除了 SESAM 外,石墨烯和碳纳米管也可作为新型锁模器件,具有非线性吸收特性。与 SESAM 相比,碳纳米管可饱和吸收体更容易制备,更抗损伤,但是需通过调节纳米管直径来得到不同的工作波长,而且存在宽谱调谐差的问题。石墨烯可饱和吸收体光谱工作范围宽,损伤阈值高,但还需解决性能可控差的问题,且目前难以实现商品化。

SESAM 具有可自启动、插入损耗小、集成度高、设计灵活和支持全固态激光技术等优点,成为各类激光器的首选锁模器件,因此,大量基于 SESAM 被动锁模的各种类型激光器的研究成果被报道。首先阐述 SESAM 锁模原理,其次总结归纳 SESAM 的发展现状,最后总结和分析其应用于各类激光器中所呈现的结构、生长方式和参数性能。

2 SESAM 的锁模原理

SESAM 由布拉格反射镜和半导体可饱和吸收体结合而成,一般以高反射率的布拉格反射镜作为底部反射镜,布拉格反射镜上面外延生长半导体材料或者量子阱结构作为吸收层,顶部生长高反射率介质膜或

直接将半导体-空气界面作为顶部反射镜。高反射率的反射镜可以在工作中减少非线性损耗,并充当谐振腔的全反镜。当 SESAM 工作时,可饱和吸收体吸收激光的光子能量,发生如图 1(a) 所示的载流子跃迁,价带中的载流子被激发至导带,并在不同能量激光下表现出不同的饱和状态:当弱能量激光辐射 SESAM 时,难以使 SESAM 达到饱和,从而产生较大损耗;而当强能量激光辐射 SESAM 时,SESAM 中的可饱和吸收材料的载流子发生跃迁,基态和激发态的载流子达到平衡,吸收达到饱和,强能量激光损耗较小。图 1(a) 的双时间吸收效应分别发生在激发过程的百 fs 时间内,能带中的载流子热化导致吸收的部分恢复,在几 ps 到几 ns 的时间内,载流子通过复合和俘获回到价带,可饱和吸收体再次恢复吸收特性,开始新一轮的可饱和吸收过程^[6]。在 SESAM 被动锁模激光器的谐振腔内,SESAM 使谐振腔内原本强度起伏不定的自发辐射激光经过相同的增益和相差悬殊的损耗后,强能量激光形成稳定振荡,弱能量激光衰减殆尽,形成如图 1(b) 所示的周期为 $2L/c$ (L 为谐振腔长度) 的超短脉冲激光。SESAM 内的高激发能级寿命和激光工作物质中的纵向弛豫时间共同决定了 SESAM 的自启动锁模特性,并通过 SESAM 的恢复时间对激光脉冲进行选择以达到整形目的^[7]。

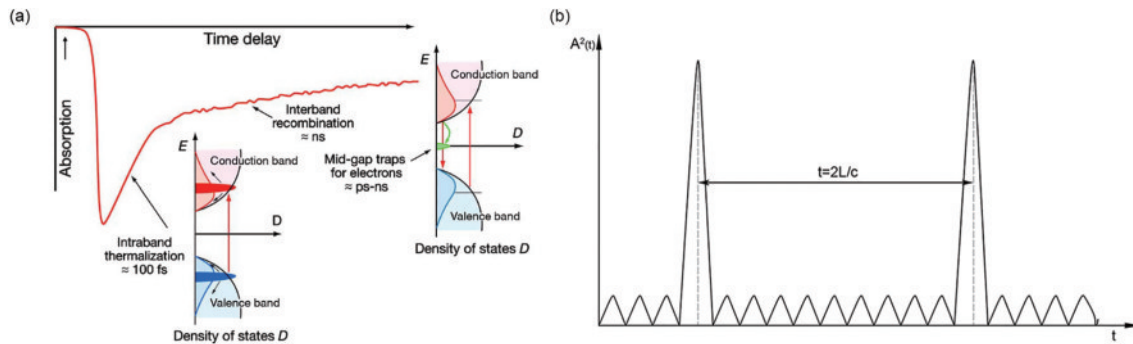


图 1 SESAM 锁模原理图^[6]。(a) 双时间吸收效应; (b) SESAM 锁模激光器脉冲

Fig. 1 Principle diagram of SESAM mode-locking^[6]. (a) Bitemporal absorption response; (b) pulse of SESAM mode-locking laser

SESAM 的宏观参数包含调制深度、饱和通量、饱和强度和、非饱和损耗和恢复时间,这些性能参数直接影响其锁模能力和应用范围^[8]。调制深度反映可饱和吸收体被强激光脉冲漂白的能力,高调制深度的 SESAM 更容易锁模和产生短的脉冲,但也将带来过大的非饱和损耗;饱和通量可用来表征 SESAM 实现锁模时所需的脉冲通量,过高的饱和通量会使入射通量接近损伤阈值从而发生光学损伤,过低的饱和通量则容易发生多脉冲现象;非饱和损耗主要来源包括底部反射镜没有对光全反射而对入射光能量的吸收和透射损耗、样品表面不平整引起的散射损耗以及缺陷、杂质等引起的其他吸收损耗,非饱和损耗不仅会降低激光器的效率还会引起 SESAM 的损伤;恢复时间受可饱和吸收体的双时间吸收效应影响,决定超短脉冲激

光的脉冲宽度。调制深度、饱和通量和饱和强度这三个宏观参数不仅取决于制备 SESAM 的材料性质还取决于器件的结构设计,因此可通过调节半导体材料、改变生长方式和结构类型等途径对 SESAM 进行灵活设计以满足不同激光器的需求。

3 SESAM 的研究现状

自 SESAM 成功锁模以来,人们对 SESAM 进行了理论完善和结构创新,分别从器件的底部反射镜、吸收层和顶部反射镜的材料、生长方式等方面进行新尝试,并采取衬底去除技术优化散热,以此提升 SESAM 性能和与激光器的适配性。

理论研究方面,1993 年, Keller 等^[9]报道了 SESAM 的双时间吸收效应,分析了生长温度对载流子的双时

间吸收寿命的影响,载流子发生带间复合的时间常数随着生长温度的降低而降低,并研究了其对连续锁模 Nd:YLF 和 Nd:YAG 激光器的自启动和调 Q 动力学,载流子寿命越长,调 Q 越难抑制。该理论通过调整 SESAM 的载流子寿命和顶部反射器的方式优化 SESAM 的自启动性能,抑制连续波锁模固体激光器的调 Q,以实现更稳定的锁模。1995 年, Kärtner 等^[10]系统地建立了固体激光器动力学的基本模型,并推导出固体激光器在调 Q、调 Q 锁模和稳定锁模不同工作状态的边界条件,研究表明可以通过低温生长可饱和吸收材料得到一个抑制调 Q、完全自启动锁模、恢复时间快速的 SESAM。动态理论的完善为开发和设计稳定、紧凑的超短脉冲固体激光提供了有效理论指导。

在底部反射材料方面,1996 年, Fluck 等^[11]采用银镜作为 SESAM 的底部反射镜。利用宽反射带的银镜代替折射率小的 AlAs/AlGaAs 布拉格反射镜,并将制得的 SESAM 作为锁模自启动机制的关键器件,在钛宝石激光器中获得短至 10 fs 的激光脉冲。银镜作为底部反射材料提供了良好的散热,提高了器件的抗损伤能力。2002 年,张志刚等^[12]利用金膜作为底部反射镜制作出宽带低损耗的 SESAM,并成功用于钛宝石飞秒脉冲激光器的自启动锁模。金属膜相对于半导体的布拉格反射镜具有反射率高、带宽宽等优点,但其与后续生长的半导体材料的兼容性较差。

顶部反射镜决定了穿透和漂白可饱和吸收体的光量,对饱和通量和调制深度等特性参数也有一定影响。可以通过改变顶部反射镜的反射率调节 SESAM 的精细度,甚至用增透膜代替反射镜即顶部反射率为 0,得到无谐振 SESAM,通过调节反射镜厚度可以改变 SESAM 内部场强分布,从而设计出不同结构类型的 SESAM^[13]。1996 年, Fluck 等^[14]报道了用于被动锁模激光器的高精细度和低精细度两种 SESAM:高精细

度 SESAM 载流子寿命为 9.5 ps,最大调制深度为 0.2%,饱和通量为 30 mJ/cm²;低精细度 SESAM 载流子寿命为 4 ps,最大调制深度为 2%,饱和通量为 0.4 mJ/cm²,低精细度 SESAM 由于更高的调制深度可获得更短的脉冲。1997 年, Jung 等^[15]采用 Al₂O₃ 增透膜取代顶部反射镜得到无谐振型 SESAM,得到调制深度为 4.9%、饱和通量为 18 μJ/cm² 的 SESAM。顶部反射镜反射率为 0 的无谐振型 SESAM 内部存在更大的场强,因此调制深度更大。实验结果表明,顶部反射镜的反射率越大, SESAM 的调制深度越小。2004 年, Grange 等^[16]报道了以 GaInNAs 材料为吸收区材料的 SESAM,可以自启动被动锁模 1.3 μm 的 Nd:YLF 激光器,获得亚 10 ps 的激光脉冲。对比如图 2(a)、(b) 所示的反谐振型和谐振型两种类型 SESAM 的电场分布和非线性反射率可知,谐振型和反谐振型 SESAM 的饱和通量分别为 1.5 μJ/cm² 和 11.2 μJ/cm²,调制深度分别为 3.9% 和 0.6%,非饱和损耗分别为 0.3% 和 0.04%。研究表明,在 SESAM 的结构设计中,可根据可饱和吸收材料在结构层中的具体位置进行优化,谐振设计的吸收区靠近入射表面,量子阱吸收区的内部场强明显增加,反射率在吸收波长处明显下降,这是由于更高场强量子阱吸收区发生更大吸收和损耗^[13]。2005 年, Spühler^[17]将图 2(a) 中谐振结构的 SESAM 命名为低场强谐振型 SESAM (LOFERS),并报道了一种介于经典反谐振 SESAM 结构和 LOFERS 结构之间的增强型 SESAM,即在 SESAM 表面沉积 1/4 波长厚度的 SiO₂ (折射率低于 DBR 中低折射率材料),这类新型 SESAM 可有效降低饱和通量,更适用于高重复频率的被动锁模,如图 2(c) 所示。总之,不同的 SESAM 结构可以明显地改变吸收区的内部场强分布,对 SESAM 的调制深度和饱和通量有明显影响,是调节这两种参数的常用方式。

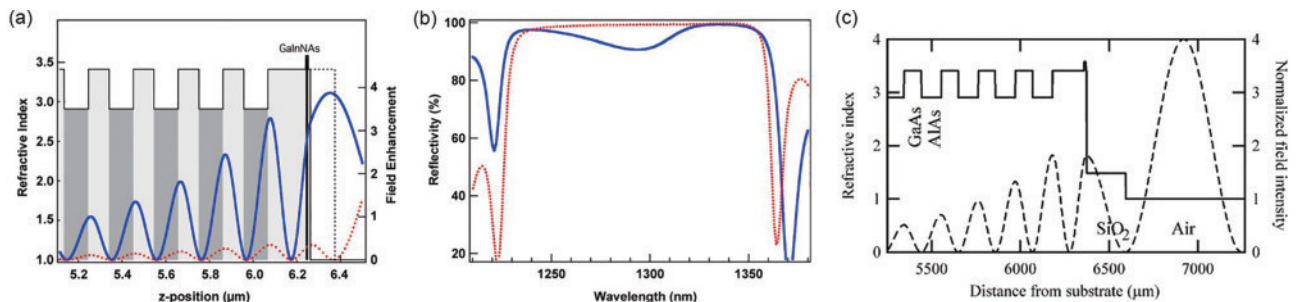


图 2 各类 SESAM 结构对比^[13,17]。(a) 谐振型(实线)和反谐振型(虚线)结构图;(b) 谐振型(实线)和反谐振型(虚线)反射率图;(c) 增强型 SESAM 结构图

Fig. 2 Comparison of SESAM structures^[13,17]. (a) The structure diagrams of resonance (solid line) and anti-resonance (dashed line); (b) the reflectance diagrams of resonance (solid line) and anti-resonance (dashed line); (c) the structure diagrams of enhanced SESAM

1997 年, Fluck 等^[18]采用 SiO₂/HfO₂ 作为 SESAM 的高反射膜,在激光波长处反射率为 50%,该 SESAM

的恢复时间大于 300 ps,饱和通量为 670 μJ/cm²,调制深度为 7%,非饱和损耗为 10%。2008 年, Marchese

等^[19]报道了由电子束蒸发沉积的两对交替生长的 SiO₂/Ta₂O₅ 顶部反射镜,顶部反射镜将该 SESAM 内部的光场强度降低到未沉积顶部反射镜时的 30%,从而增加 SESAM 的饱和通量。该 SESAM 的饱和通量约为 115 μJ/cm²,调制深度约为 0.6%,非饱和损耗小于 0.1%,恢复时间为 48.5 ps。2011 年, Saraceno 等^[20]系统地研究了应用于高功率激光器的 SESAM 的寿命与损伤,报道了不同顶部反射镜 SESAM 的非线性反射率和寿命,没有顶部反射镜的 SESAM (NTC) 为一个标准的 3QWs 反谐振 SESAM,具有初

始的饱和通量和基于 3QWs 吸收层的高调制深度,在该类标准 SESAM 上分别沉积 3 种不同的顶部反射镜,1/4 波长 GaAs/AlAs 半导体材料 (SCTC) 和 2 对及 3 对 1/4 波长 SiO₂/Si₃N₄ 介质膜材料 (DTC2 和 DTC3),各类 SESAM 的宏观参数如表 1 所示。实验数据表明,介质膜层数较多的 SESAM 样品具有更高的损伤阈值和更长的寿命。顶部反射镜作为光进入 SESAM 的重要部分,对控制光通量和影响器件的寿命有重大意义,合理的介质膜设计可以有效改变器件性能参数。

表 1 不同 SESAM 的非线性参数、实测损伤阈值 F_d 和相应的饱和参数 S ^[20]

Table 1 Nonlinear parameters of the different tested SESAMs, measured damage thresholds F_d and corresponding saturation parameter S ^[20]

SESAM	Saturation fluence $F_{sat} / (\mu\text{J}/\text{cm}^2)$	Modulation depth $\Delta R / \%$	Nonsaturable loss $\Delta R_{ns} / \%$	Inverse saturable absorption $F_2 / (\mu\text{J}/\text{cm}^2)$	Damage fluence $F_d / (\text{mJ}/\text{cm}^2)$	Corresponding saturation parameter S
NTC	72	2.05	0.04	3200	32.6	452
SCTC	279	0.52	0.01	5523	44.1	157
DTC2	168	0.71	0.02	31700	122	726
DTC3	247	0.43	0.04	346000	>210	>850

在吸收层方面,量子阱的材料直接影响 SESAM 的吸收波长,且量子阱的数量、生长温度和生长方式都会影响 SESAM 的性能参数。2008 年, Marchese 等^[19]报道了基于 SESAM 被动锁模 Yb:YAG 薄片激光器,采用双量子阱结构即两个 7 nm 厚的 InGaAs 量子阱嵌入 GaAs 中,通过增加吸收区量子阱数量增大器件对光的吸收从而增大器件的调制深度,以实现稳定锁模。2012 年, Saraceno 等^[21]进一步研究了 250~385 °C 之间的不同低温条件下生长的 SESAM 量子阱,并评估了生长温度对样品非饱和损耗、损伤阈值和恢复时间的影响,低温生长会增加材料内部缺陷,从而形成电子和空穴的复合中心,可以有效降低恢复时间,但过多的缺陷会导致材料恶化,增大器件的非饱和损耗和降低损伤阈值。2016 年, Alfieri 等^[22]报道了使用 MOCVD 生长的 SESAM 吸收区,与之前 MBE 的外延方式相比会引入更多的量子阱缺陷从而具有更快的恢复机制,同时采用低双光子吸收系数 (TPA) 的应变材料对量子阱进行应变补偿,可以保证较低的表面缺陷密度,维持低的非饱和损耗。利用该优势生长出大数量应变补偿量子阱^[23],可得到更高调制深度、低饱和通量和高损伤

阈值的 SESAM,如表 2 所示,其中:1×3 SQW 表示 1 个波腹处有 3 个应变补偿量子阱;6×1 SCQW 表示 6 个波腹处分别存在 1 个应变补偿量子阱;8×1 SCQW 表示 8 个波腹处分别存在 1 个应变补偿量子阱;4×2 SCQW 表示 4 个波腹处分别存在 2 个应变补偿量子阱。目前可以通过改变量子阱数量、生长温度和生长方式的方法定性地改变 SESAM 宏观参数,指导 SESAM 制备。除了传统的量子阱吸收区,低饱和通量的量子点吸收区也为 SESAM 的非线性吸收提供了新方向^[24]。动态增益饱和和锁模要求 SESAM 的饱和强度必须大于激光器的增益强度^[25],但增益结构和 SESAM 的吸收区通常基于相同材料体系的量子阱,为了实现稳定锁模,则要求 SESAM 的吸收区模式面积大于增益区,而低饱和通量的量子点 SESAM (QD-SESAM) 放宽了模式尺寸要求,为 SESAM 和 VECSEL 集成提供可能性,成功制得锁模集成外腔表面发射激光器^[26],且利用 QD-SESAM 锁模得到目前输出功率最大的半导体锁模激光器^[27]。QD-SESAM 虽然有更好的设计灵活性,但是恢复时间较长,且稳定性差,逐渐被低温生长的量子阱结构取代。2020 年,

表 2 非线性参数、损伤阈值和恢复时间^[22]

Table 2 Measured nonlinear parameters, damage threshold, and recovery time^[22]

SESAM	Saturation fluence $F_{sat} / (\mu\text{J}/\text{cm}^2)$	Modulation depth $\Delta R / \%$	Nonsaturable loss $\Delta R_{ns} / \%$	Inverse saturable absorption $F_2 / (\mu\text{J}/\text{cm}^2)$	Reflectivity rollover fluence $F_0 / (\mu\text{J}/\text{cm}^2)$	Damage fluence $F_d / (\mu\text{J}/\text{cm}^2)$	Recovery time $\tau_{1/e} / \text{ps}$
1×3 SQW	120	1.1	0.10	6.0	3.9	64	67
6×1 SCQW	174	1.0	0.14	10	5.8	112	15
8×1 SCQW	334	1.3	0.14	9.0	8.2	108	17
4×2 SCQW	246	1.2	0.18	9.2	7.0	88	12

Finke 等^[28]报道了一个具有高质量 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ 量子点的反谐振 SESAM, 其展示的温度稳定性表明 QD-SESAM 仍然具有开发潜力。

在衬底去除方面, 为了提高 SESAM 的损伤阈值, 提升器件的散热性能, 2015 年, Diebold 等^[29]报道了用于 kW 超快激光的 SESAM, 采用不同的衬底去除技术, 在不改变器件非线性性能的前提下, 得到更好的散热性能和表面质量。次年, Diebold 等^[30]比较了标准 SESAM 样品和采用不同封装技术去除衬底后的 SESAM 样品的温升、热透镜和表面变形。热效应都与吸收功率呈线性比例, 封装技术可影响 SESAM 的温升强度和热透镜, 衬底去除可有效增强器件的导热, 提升 SESAM 的散热和损伤阈值。

在众多实验的验证下, SESAM 的锁模理论得到完善, 器件的性能也得到明显的改善, 简便实用的 SESAM 已成为最具商业价值的锁模器件。SESAM 技术的完善对促进超短脉冲固体、半导体和光纤激光器的发展具有重要意义, 从而进一步推动超快激光领域的进程。

4 SESAM 锁模激光器的研究进展

4.1 SESAM 锁模固体激光器

固体激光器由于能量大、峰值功率高、结构紧凑、牢固耐用等优点, 广泛应用于工业、医疗、科研等方面, 固体激光器具有接近量子噪声极限的性能, 适用于稳定性要求高的应用。固体激光器被动锁模要求 SESAM 具有高饱和通量、低调制深度和高损伤阈值。自 SESAM 研制以来, 锁模固体激光器一直是超短脉冲激光领域的研究重点, 文献^[31]对早期锁模固体激光器的性能进行了详细展示, 本文主要综述近期发展的薄盘激光振荡器(TDL)。

传统固体激光器沿着垂直光轴的横向进行热传递, 会因温度升高而引发热透镜效应导致光束质量变差、能量损失增大, 而薄盘式固体激光器可沿平行于光轴的方向进行散热, 达到消除晶体热透镜效应的目的, 可用于高功率激光领域。文献^[32]综述了 2012 年之前的被动锁模 TDL, 本文着重综述近期发展, 并在表 3 中给出了参数概述。2000 年, der Au 等^[33]首次使用

表 3 近年 SESAM 锁模薄盘激光器的发展
Table 3 Development of recent SESAM mode-locked thin disk lasers

Year	Reference	Gain material	Wavelength / nm	Pulse width / fs	Average power / W	Repetition rate / MHz	Peak power / W	Energy / μJ
2000	[33]	Yb:YAG	1030	730	16.2	34.6	57.5	0.47
2003	[34]	Yb:YAG	1030	810	60	34.3	1.9×10^6	1.75
2012	[35]	Yb:LuScO ₃	1040	96	5.1	77.5		
2012	[41]	Yb:YAG	1030	583	25.6×10^{-3}	16.3	275	16.9
2012	[42]	Yb:YAG	1030	1100	35×10^{-3}	3.5	145	41
2012	[43]	Yb:SSO	1036	298	3.5×10^{-3}	27	27.8	1
2012	[44]	Yb:CALGO	1043	300	3.8×10^{-3}	21	28	1.3
				197	4×10^{-3}	21	20	0.9
				135	0.2×10^{-3}	45	1.3	0.03
2012	[45]	Yb:CALGO	1050	94	12.5	80	1.5×10^6	0.15
2013	[36]	Yb:CALGO	1051	62	5.1	65	44×10^6	0.08
2014	[37]	Yb:Lu ₂ O ₃ /Yb:Sc ₂ O ₃	1038	103	1.4	41.7		
2014	[38]	Yb:YAG	1030	1070	242	3.0	66×10^6	80
2017	[46]	Yb:Lu ₂ O ₃		498	58	11.2	9.2×10^6	
				260	16	47.2	100×10^6	
2018	[47]	Yb:YAG	1030	580	120	13.4	13.6	9
2018	[48]	Yb:YAG	1030	970	125	78	1.45×10^6	1.6
2018	[49]	Yb:YAG	1030	780	210	10.9	54×10^6	19
2019	[39]	Yb:YAG	1030	940	350	8.9	37×10^6	39
2020	[40]	Ho:YAG	2090	371	3.66	24	96	0.15
2021	[50]	Ho:YAG	2050	1660	40.5	52.2	209	0.78×10^6
2022	[51]	Ho:YAG	2100	1130	50	23.6	1.9×10^6	2.11

SESAM 锁模 TDL, 使用低精细度 SESAM 锁模 Yb:YAG 薄盘激光器, 诠释了全固体飞秒激光器的概念。2003 年, Innerhofer 等^[34]报道了 SESAM 被动锁模二极管泵浦的 TDL, 将薄盘减至 100 μm , 平均功率提升到 60 W。2012 年和 2013 年, Keller 团队^[35-36]均做出了低于 100 fs 的锁模 TDL 的超短脉冲, 通过宽增益谱增益介质和短恢复时间 SESAM 相结合, 报道了目前 SESAM 锁模 TDL 的最短脉冲宽度。2014 年, Schriber 等^[37]首次报道了 SESAM 锁模双增益介质的 TDL, 双增益材料可达到比单一材料更宽的带宽, 该方法为百 fs 量级的薄盘激光器实现高功率输出提供了新途径。2013 年, Saraceno 等^[38]使用高损伤阈值、低损耗 SESAM 锁模 TDL, 可产生 80 μJ 的脉冲能量。2019 年, Saltarelli 等^[39]报道的 SESAM 锁模 TDL 的最高平均输出功率为 350 W, 是超快薄盘振荡器功率走向千瓦里程碑的重要一步。随着 SESAM 锁模技术的成熟, 激光波长逐步向长波长的新领域发展^[40]。

固态激光器的性能在脉冲持续时间、平均功率、脉冲能量和脉冲重复率方面提高了几个数量级, 对 SESAM 的性能参数提出不同的要求。目前, SESAM 锁模 TDL 的输出功率大, 要求 SESAM 具有大的饱和通量和高的抗损伤阈值, 如何在维持短脉冲的前提下进一步提高 SESAM 的抗损伤能力是对 SESAM 锁模 TDL 的考验。新一代 SESAM 将成为超快固态激光振荡器进一步实现峰值功率缩放的关键推动者。

4.2 SESAM 锁模垂直外腔面发射激光器

SESAM 和垂直外腔面发射激光器 (VECSEL) 相结合, 可得到功率高、光束质量好、基横模近衍射极限圆形光束和无调 Q 不稳定性的优质连续稳定锁模以及输出重复频率达数 GHz 的 ps 脉冲。高平均功率 (高达瓦特范围) 和高重复频率 (数十千兆赫) 的被动锁模 VECSEL 满足光学时钟和通信领域的应用要求^[52]。SESAM 和 VECSEL 有相同的半导体制造技术和生产设备, 同时半导体激光器功率高, 支持光泵浦和电泵浦, 可以通过带隙工程灵活控制发射波长, 允许晶圆制造, 也可以进一步将增益层和吸收层的外延结构高度集成, 高度紧凑和简单的外延结构, 适用于低成本晶圆大规模生产。

2000 年, Häring 等^[41]首次报道了 SESAM 被动锁模二极管泵浦的 VECSEL, SESAM 和 VECSEL 的结合给激光锁模提供了新方向。VECSEL 大的增益界面可以抑制调 Q 的不稳定, 从而得到紧凑而高效的高功率输出源和衍射极限的光束, 具有极佳的应用价值。2002 年, Garnache 等^[53]采用金属有机物化学气相沉积 (MOCVD) 在 735 $^{\circ}\text{C}$ 的温度下生长短恢复时间的 SESAM, 得到了首个 fs 量级的 SESAM 锁模二极管泵浦的 VECSEL。2004 年, Lorensen 等^[52]将 QD-SESAM 集成到 VECSEL 的增益结构中, 量子点可饱和吸收区和 VECSEL 增益区有相同的模式面积即“1:1

锁模”, QD-SESAM 首次使用相同的增益和吸收模式区域实现稳定锁模, 证明了 SESAM 和 VECSEL 集成的可行性。2006 年, Lorensen 等^[54]采用单层量子点的低饱和通量 SESAM 锁模 VECSEL, 将增益结构焊接至易散热的金刚石散热器上, 使输出功率最大化, 重复频率达到 50 GHz。基于 VECSEL 的超稳定千兆赫兹频率梳对促进包括高精度光学频率计量和光谱学、生物学成像、光学相干层析成像和高速异步光学采样在内的几种光学测量技术趋于成熟起着重要作用。2008 年, Hoffmann 等^[55]首次采用 QD-SESAM 成功锁模垂直外腔表面发射激光器 (QD-VECSEL), 比标准量子阱 SESAM 具有更大的设计自由度, 通过去除衬底优化 VECSEL 结构的散热性能, 进一步提高激光器的平均功率。2011 年, Klopp 等^[56]利用降低泵浦功率和提高 SESAM 温度的方式, 在单脉冲条件下实现了小于 110 fs 的脉冲。同年, Hoffmann 等^[57]首次实现了输出功率大于 1 W 的 fs 量级锁模, VECSEL 和 SESAM 分别采用量子点材料作为有源区和吸收层, 优化器件结构, 实现低的群延迟色散 (GDD) 和吸收区快速恢复。量子点虽然饱和通量低, 更易锁模, 但是其较长的恢复时间将限制脉冲宽度, 而低温生长的量子阱结构具有快的恢复时间和低的饱和通量。2012 年, Scheller 等^[58]报道了平均功率高达 5.1 W 的 fs 脉冲, 通过 MOCVD 生长 VECSEL 并进行散热优化, 使器件适用于大功率输出。2013 年, Wilcox 等^[59]报道了一种去除衬底的近反谐振型量子阱 SESAM, 利用半导体表面的快速载流子重组和光学斯塔克效应实现峰值功率达到 4.35 kW 的高峰值功率 fs 量级锁模。2016 年, Waldburger 等^[60]通过对 VECSEL 内量子阱位置和表面涂层的设计, 在 SESAM 锁模 VECSEL 中产生高平均功率和短至 100 fs 以下的脉冲, 是目前已报道被动锁模半导体激光器的最短脉冲宽度。

表 4 展示了 SESAM 锁模光泵浦-VECSEL (OP-VECSEL) 的部分重要参数。为了实现稳定的锁模, 通常采用折叠光路, 目前应用较多的腔形结构有 V 形和 Z 形, Z 形参数更好控制, 通过改变臂长几乎可以独立地调整增益和吸收区的模式半径, 但 V 形结构更简单, 也满足谐振腔稳定锁模的需求, 所以往往以 V 形腔为主。

2007 年, Maas 等^[26]在增益区和吸收区采用不同的生长温度, 实现了低缺陷和高光学增益, 成功将增益层和吸收层集成, 制得锁模集成外腔表面发射激光器 (MIXSEL)。MIXSEL 概念的简单性使千兆赫兹重复频率的超快激光器更紧凑、更坚固、更经济, 从而降低超快激光技术的应用成本。在 MIXSEL 的发展历程中, 其结构和理论得到逐步完善, 性能也飞速提升, 在表 5 中对 MIXSEL 各类参数进行了简要总结。

2010 年, Rudin 等^[27]使用 MIXSEL 实现高功率超短脉冲输出, 在反谐振结构中使用优化量子点吸收区,

表 4 SESAM 锁模 VECSEL 的发展
Table 4 Development of SESAM mode-locked VECSEL

Reference	Gain material	Wavelength /nm	Pulse width /fs	Average power /mW	Repetition rate / GHz	Peak power / W	Cavity type
[4]	QW(InGaAs)	1030	22×10^3	21.6	4.4	0.2	V
[53]	QW(InGaAs)	1040	477	100	1.21	152.5	Z
[54]	QD(InAs)	958	3.3×10^3	102	50	0.54	V
[55]	QD(InAs)	1060	18×10^3	27.4	2.57	0.52	V
[56]	QWs(InGaAs)	1030	107	3	5.1	4.8	V
[56]	QD(InAs)	970	784	1×10^3	5.4	217.4	V
[58]	QW(InGaAs)	1030	682	5.1×10^3	1.7	3.85×10^3	V
[59]	QWs(InGaAs)	1013	400	3.3×10^3	1.67	4.35×10^3	V
[60]	QW(InGaAs)	1034	96	100	1.6	560	V

表 5 MIXSEL 的发展
Table 5 Development of MIXSEL

Reference	Gain material	Wavelength /nm	Pulse width /fs	Average power /mW	Repetition rate /GHz	Peak power /W
[26]	QD(InAs)	953	35×10^3	40	2.8	0.36
[27]	QD(InAs)	959	28×10^3	6.4×10^3	2.47	80.2
[61]	QW(InGaAs)	968	620	101	4.8	29.9
[62]	QW(InGaAs)	964	570	127	101.2	1.9
[63]	QW(InGaAs)	1040	253	235	2.9	240
[63]	QW(InGaAs)	1040	279	310	10	97
[65]	SQW(InGaAs)	1084	184	115	4.33	127
[64]	SQW(InGaAs)	1033	144	30	2.73	70

并通过去除晶圆衬底和将 8 μm 厚的 MIXSEL 直接安装到金刚石散热器上的热管理方式,实现 6.4 W 的超短脉冲输出,只有两个组件的简单直腔激光器产生了高于任何其他模型锁模半导体激光器的平均功率。2013 年, Mangold 等^[61]报道了第 1 个飞秒 MIXSEL,利用低温生长的单量子阱具有低饱和通量和快速恢复动力学的特性得到 fs 量级 MIXSEL。次年, Mangold 等^[62]报道了重复频率达到 100 GHz 以上的 MIXSEL,此为锁模半导体激光器的最高脉冲重复频率。实验利用单个低温生长的量子阱实现低饱和通量和短恢复时间的饱和吸收,同时采用低 GDD 的宽带增透界面进行色散优化。通过机械地改变线性直腔和输出耦合器的腔长,可支持从 ≈ 5 GHz 到 > 100 GHz 的脉冲重复频率缩放。2015 年, Mangold 等^[63]报道了迄今为止最高峰值功率 240 W 的 MIXSEL,峰值功率首次可与传统的 SESAM 锁模 VECSEL 相媲美。同时在 10 GHz 脉冲重复频率下,获得平均输出功率为 310 mW 的脉冲,这是目前飞秒 MIXSEL 中最高输出功率,通过不同生长温度和生长方式生长外延片各结构、优化外延片散热和更精准的色散控制等方式实现高功率输出。首次对应变补偿的 MIXSEL 在不同的散热器温度、泵浦功率和外延均匀性进行更详细的参数研究,详细地讨论了如何平衡量子阱增益区和量子阱吸收区之间的临界温度以及吸收器和外延生长质量对器件效率的影

响,为今后 MIXSEL 的优化提供有效指导。2018 年, Alfieri 等^[64]报道 150 fs 以下脉冲激光,通过优化多对介质涂层、应变补偿大带隙 $\text{AlAs}_x\text{P}_{1-x}$ 材料、非周期 InGaAs 量子阱增益结构和热管理的方式获得了该脉冲宽度新纪录。

除了以上的腔体结构,新的锁模结构被提出——环形腔中的碰撞脉冲锁模,利用这种腔体几何结构,两个反向传播脉冲可在 SESAM 上同步,使吸收器同时达到饱和,从而最大限度地减少能量损失。该结构与标准的 V 形腔相比,可以提高锁模稳定性,并提供更高的输出功率。2016 年, Laurain 等^[66]将半导体增益介质和 SESAM 放置在环形腔中,实现了 195 fs 的脉冲持续时间。每个输出光束的平均功率为 225 mW,重复频率为 2.2 GHz,峰值功率为 460 W。2017 年, Laurain 等^[67]报道了碰撞脉冲锁模 VECSEL,脉冲持续时间短至 128 fs,每束平均功率为 90 mW,重复频率为 3.27 GHz,VECSEL 采用双涂层介质获得宽的光谱带宽以支持更短脉冲。2018 年, Laurain 等^[68]通过模拟系统对器件进行数值优化,再次报道了脉冲持续时间为 95 fs 的碰撞锁模脉冲,在 2.2 GHz 重复频率下,实现了每束输出功率为 90 mW 的稳定碰撞脉冲锁模。

除了传统的光泵浦机制和器件结构,泵浦机制也可采用电泵浦,器件结构也做出了膜系结构创新。电泵浦 VECSEL^[69](EP-VECSEL)是一种高功率、高亮

度的半导体激光源,生产成本低,易于组装和集成到光电器件中。2003年,Jasim等^[70]报道了SESAM锁模的EP-VECSEL,通过内腔锁模在980 nm处得到脉冲宽度为57 ps、平均输出功率为40 mW、重复频率为1.1 GHz的脉冲。这一报道引发了人们对不同激光设计的进一步研究和脉冲参数改进^[71-73]。2014年,Zaugg等^[74]在不同的腔结构中,报道了各类参数的最优数据,即最短的脉冲宽度(2.5 ps)、最高的脉冲平均输出功率(53.2 mW)、最高重复频率(18.2 GHz)和最高峰值功率(4.7 W)。2019年,Chichkov等^[75]报道了无SESAM和其他反馈介质仍可实现自启动ps脉冲输出的EP-VECSEL,为未来EP-VECSEL的设计打开了新局面。同时电泵浦技术和MIXSEL结构的结合也是未来研究的新方向,该结构将使激光器锁模结构进一步集成,这种潜力也使该激光技术更具吸引力。

在器件膜系结构方面,为了避免有源区因为吸收多余泵浦热量而受到影响,Kahle等^[76]提出了一种薄膜外腔表面反射激光器(MECSEL)。MECSEL无需生长DBR,由金刚石散热器夹着有源区组成,因此其在材料和组分的选择上有更大的自由度,可以有效扩大波长设计范围。2023年,Ćutuk等^[77]提出一种新的可饱和吸收装置,将可饱和吸收区从衬底中分离并放置在介质端镜上,得到一种不受DBR反射率限制的薄膜可饱和吸收镜(MESAM)。与SESAM锁模VECSEL类似,MESAM在红光发射的VECSEL中实现了稳定锁模,泵浦功率为4.25 W,脉冲持续时间为3.06 ps,重复频率为812 MHz。

超快垂直外腔面发射激光器参数性能逐渐成熟,脉冲持续时间已降低到100 fs以下,重复频率已达到百GHz,峰值功率水平已在kW量级。巨大的波长灵活性和紧凑的设计相比于其他类型超快激光器具有明显生产优势,锁模半导体盘激光器的千兆赫兹工作状态使它们非常有希望成为具有大梳齿间距和高功率单模^[62]的紧凑频率梳的来源,适用于诸如计量^[78-79]、超稳定光学时钟^[80]和光谱学^[81]等应用。目前的研究除了在保持低的脉冲弛豫时间下增加器件的功率,平衡增益材料和SESAM之间的相互作用之外,还必须关注增益和吸收材料的性能。未来设计在于提高效率,减少热副作用并提高这些设备的可靠性,同时提升各类新结构的参数。

4.3 SESAM 锁模光纤激光器

超快光纤激光器因其具有良好的空间光束质量、紧凑性和易用性的优势,广泛应用于眼科、微机械加工、医学成像和精密计量等各个领域^[82-86]。相对于传统固体激光器,光纤激光器具有效率高、可靠性高和占地面积小的优点。

对于不同的激光波长,各种半导体材料应用范围不同^[87]。0.9~1 μm的激光,SESAM采用InGaAs作为量子阱,GaAs/AlAs为布拉格反射镜,应用于锁模

掺镱(Yb)和钕(Nd)的光纤激光器^[88-89];1~1.3 μm波长范围,SESAM采用GaInNAs作为量子阱,GaAs/AlAs为布拉格反射镜,锁模掺铋(Bi)激光器^[90-91];波长1.5 μm及以上的激光器,通常使用InGaAs/InP布拉格反射镜和InGaAs量子阱制成SESAM,应用于锁模掺铒(Er)和铥(Tm)激光器^[92-94];波长2 μm以上激光器,SESAM采用GaInSb量子阱和AlAsSb/GaSb布拉格反射镜,锁模掺铥(Tm)和铟(Ho)光纤激光器^[95]。SESAM的材料范围从GaN基材料到GaInAsSb基材料,在选择激光发射波长方面提供了很大的灵活性^[31]。

1993年,Ober等^[96]首次报道了反谐振SESAM锁模二极管泵浦Nd光纤激光器,脉冲持续时间低至260 fs,实验中腔体设计比较复杂,需要与群延迟色散线和透镜等结构结合。1996年,Sharp等^[94]采用MOCVD生长SESAM,通过与激光器输出耦合器制成单片的方式,实现掺Tm光纤激光器的耦合,获得脉冲宽度为190 fs、重复频率为50 MHz、脉冲能量为20 pJ的超短脉冲激光。2004年,Herda等^[97]采用MBE生长的SESAM被动锁模掺Yb光纤激光器,在1036 nm处获得重复频率为80 MHz、脉冲宽度为11 ps的短脉冲激光,使用高调制深度SESAM和无色散补偿激光可以得到更紧凑稳定的锁模激光器,得到更简单的锁模光纤激光。同年,Okhotnikov等^[83]利用近谐振SESAM在短光纤腔内实现激光器的稳定锁模,研究表明,近谐振SESAM尤其适用于掺Yb光纤激光器。2006年,Herda等^[98]采用QD-SESAM锁模掺Yb光纤激光器,高调制深度的QD-SESAM可实现快恢复时间,在1042 nm处获得平均功率为5 mW、脉冲宽度为2.8 ps的超短脉冲输出。同年,Suomalainen等^[99]利用晶格失配引入非辐射复合中心来减少SESAM的恢复时间,并采用SESAM作为掺Yb光纤激光腔中的端镜,在1060 nm处获得2.3 ps的锁模脉冲输出。2013年,Kim等^[100]采用MOCVD生长的量子阱SESAM锁模掺Yb激光器,获得760 ps的脉冲。2022年,林楠等^[101]采用MOCVD生长应变补偿量子阱结构的SESAM,成功锁模掺Yb光纤激光器并获得18.3 ps和9.6 ps的激光脉冲输出。

除了以上报道的自制SESAM锁模光纤激光器,还有较多商业SESAM锁模光纤激光器,如表6所示。2009年,Tian等^[102]通过激光腔的全正色散结构获得4.3 nJ的高能量激光脉冲输出。2012年,Liu等^[103]通过窄带宽SESAM稳定锁模掺Yb光纤激光器,获得高重复频率激光。2016年,Hirooka等^[104]采用高阶孤子效应和SESAM相结合的方法锁模掺Er光纤激光器,在高重复频率下获得超短脉冲激光。同年,Mashiko等^[105]报道了一种基于透镜系统色散的可调谐类噪声脉冲(NLP),在SESAM锁模掺Tm光纤激光器中,通过优化SESAM的位置,获得高功率输出。2018年,Hekmat等^[106]通过法拉第旋转镜缩短脉冲持续时间,使SESAM

表 6 近期商用 SESAM 锁模光纤激光器的发展

Table 6 Development of recent commercial SESAM mode-locked fiber lasers

Year	Reference	Doped ion	Wavelength /nm	Pulse width /fs	Average power /mW	Repetition rate /MHz
2009	[102]	Yb ³⁺	1068	910	1.7	397
2012	[103]	Yb ³⁺	1064	21×10 ³	17	397
2016	[104]	Er ³⁺	1560	440	15	9.2×10 ³
2016	[105]	Tm ³⁺	1928	280	195	20.5
2018	[106]	Er ³⁺	1550	135	45	23.5
2021	[107]	Er ³⁺	1561	3.86×10 ³	241	4.95×10 ³

锁模光纤激光器获得超短的脉冲输出。2021年, Gao等^[107]通过限制光纤长度和使用较低调制深度的 SESAM 获得高重复频率的 SESAM。

总的来说, 应用于光纤激光器的 SESAM 要求短的恢复时间、较高的调制深度, 从而达到光纤激光器实现短脉冲输出的目的, 更好地发挥光纤激光器短脉冲宽度的优势, 同时随着器件性能的提升, 激光性能也逐渐向高重复频率和高输出功率方向发展。从近期 SESAM 锁模光纤激光器的报道来看, 主要为商用的 SESAM, 以德国 BATOP 公司的应用最广泛, 该公司的 SESAM 产品参数范围广泛, 锁模稳定性好, 商业化成功。因此加快国内 SESAM 的研制对打破商业垄断具有重要意义。目前超快光纤系统存在的挑战除了 SESAM 本身的商业垄断之外, 还包括光纤技术的改进, 例如功率的缩放、光纤系统的成本以及光束能量的增加。

5 结 论

SESAM 在各类激光器的锁模应用中达到了比较成熟的水平, 其锁模的激光器在科学和工业领域广泛应用。一般情况下, 无论是固体激光器、垂直外腔表面发射激光器还是光纤激光器, 要获得更窄的脉冲宽度、更高的脉冲能量以及稳定锁模都要求 SESAM 拥有短的恢复时间、高的损伤阈值和长的使用寿命。然而, 这 3 种激光器对 SESAM 的吸收率、调制深度和饱和通量的要求却不相同, 固体激光器要求 SESAM 的吸收率在 0.7%~3% 之间、调制深度较小, 反谐振型结构更容易实现较小调制深度, 饱和通量约为 120 $\mu\text{J}/\text{cm}^2$ 。垂直外腔表面发射激光器要求 SESAM 具有低的饱和通量同时具有快的恢复时间, 通常采用低温生长的单量子阱构成反谐振结构, 与应用于固体激光器内的 SESAM 类似。光纤激光器要求 SESAM 的吸收率在 20%~40%、调制深度较大, 谐振型结构更容易实现较大调制深度, 饱和通量约为 30 $\mu\text{J}/\text{cm}^2$ 。

在固体激光器的锁模应用中, 基本上完成了对 SESAM 器件关键参数及其影响条件的探索, 明确了 SESAM 的弛豫时间、调制深度、损伤阈值、饱和通量等参数对超快激光器性能的影响。同时在 SESAM 与固体激光器的结合中也将固体激光器的性能提升了几

个数量级。在与 VECSEL 的锁模应用中, 不仅性能水平逐渐提高, 也完成了高度集成器件, 同时提出了新型膜系器件。在光纤激光器锁模中, 除了得到短的脉冲宽度输出, 同时还获得了以往光纤激光器未达到的高重复频率激光输出。随着 SESAM 器件性能的提升和商业化, 超快激光器的获取会越来越容易。将会开发出更小、更便宜、效率更高的超快激光, 更广泛地应用于各个领域。未来对超快激光器的改进也将着重在扩宽超快激光波长范围、提高效率, 减少热副作用, 提高器件的可靠性等方面。

参 考 文 献

- [1] 舒强, 舒永春, 刘如彬, 等. 半导体可饱和吸收镜实现超短高功率脉冲激光研究进展[J]. 激光与红外, 2007, 37(3): 197-199, 210.
Shu Q, Shu Y C, Liu R B, et al. Development of semiconductor saturable absorption mirror used for high average output power ultrashort pulses laser[J]. Laser & Infrared, 2007, 37(3): 197-199, 210.
- [2] Keller U, Miller D A, Boyd G D, et al. Solid-state low-loss intracavity saturable absorber for Nd: YLF lasers: an antiresonant semiconductor Fabry-Perot saturable absorber [J]. Optics Letters, 1992, 17(7): 505-507.
- [3] de Souza E A, Soccolich C E, Pleibel W, et al. Saturable absorber modelocked polarisation maintaining erbium-doped fibre laser[J]. Electronics Letters, 1993, 29(5): 447-449.
- [4] Häring R, Paschotta R, Morier-Genoud F, et al. Passively mode-locked diode-pumped surface-emitting semiconductor laser[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2000, 12(9): 1135-1137.
- [5] Spence D E, Kean P N, Sibbett W. 60-fsec pulse generation from a self-mode-locked Ti: sapphire laser[J]. Optics Letters, 1991, 16(1): 42-44.
- [6] Keller U. Recent developments in compact ultrafast lasers [J]. Nature, 2003, 424(6950): 831-838.
- [7] 周炳琨, 高以智, 陈侗嵘, 等. 激光原理[M]. 5 版. 北京: 国防工业出版社, 2004: 234.
Zhou B K, GAO Y Z, CHEN T R, et al. Laser principle [M]. 5th ed. Beijing: National Defense Industry Press, 2004: 234.
- [8] Brovelli L R, Keller U, and Chiu T H. Design and operation of antiresonant Fabry-Perot saturable semiconductor absorbers for mode-locked solid-state

- lasers[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1995, 12(2): 311-322.
- [9] Keller U, Chiu T H, Ferguson J F. Self-starting and self-Q-switching dynamics of passively mode-locked Nd:YLF and Nd:YAG lasers[J]. *Optics Letters*, 1993, 18(3): 217-219.
- [10] Kärtner F X, Brovelli L R, Kopf D, et al. Control of solid state laser dynamics by semiconductor devices[J]. *Optical Engineering*, 1995, 34(7): 2024-2036.
- [11] Fluck R, Jung I D, Zhang G, et al. Broadband saturable absorber for 10-fs pulse generation[J]. *Optics Letters*, 1996, 21(10): 743-745.
- [12] 张志刚, 柴路, 赵江山, 等. 用于钛宝石激光器自启动锁模的半导体可饱和吸收镜[J]. *光学学报*, 2002, 22(9): 1151-1152.
- Zhang Z G, Chai L, Zhao J S, et al. Semiconductor saturable-absorber mirror for self-starting mode-locked Ti:Sapphire lasers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, 22(9): 1151-1152.
- [13] Keller U. Ultrafast solid-state laser oscillators: a success story for the last 20 years with no end in sight[J]. *Applied Physics B*, 2010, 100(1): 15-28.
- [14] Fluck R, Weingarten K J, Moser M, et al. Diode-pumped passively mode-locked 1.3- μm Nd:YVO₄ and Nd:YLF lasers by use of semiconductor saturable absorbers[J]. *Optics Letters*, 1996, 21(17): 1378-1380.
- [15] Jung I D, Kärtner F X, Matuschek N, et al. Semiconductor saturable absorber mirrors supporting sub-10-fs pulses[J]. *Applied Physics B*, 1997, 65(2): 137-150.
- [16] Grange R, Schön S, Liverini V, et al. A low-loss and low-saturation-fluence GaInNAs SESAM for ultrafast 1.3- μm solid-state lasers[C]//Advanced Solid-State Photonics, February 1-4, 2004, Santa Fe, New Mexico. Washington, D. C.: Optica Publishing Group, 2004: WE3.
- [17] Spühler G J, Weingarten K J, Grange R, et al. Semiconductor saturable absorber mirror structures with low saturation fluence[J]. *Applied Physics B*, 2005, 81(1): 27-32.
- [18] Fluck R, Braun B, Gini E, et al. Passively Q-switched 1.34- μm Nd:YVO₄ microchip laser with semiconductor saturable-absorber mirrors[J]. *Optics Letters*, 1997, 22(13): 991-993.
- [19] Marchese S V, Baer C R, Engqvist A G, et al. Femtosecond thin disk laser oscillator with pulse energy beyond the 10-microjoule level[J]. *Optics Express*, 2008, 16(9): 6397-6407.
- [20] Saraceno C J, Schriber C, Mangold M, et al. SESAMs for high power oscillators: damage thresholds and design guidelines[C]//CLEO: 2011-Laser Applications to Photonic Applications, May 1-6, 2011, Baltimore, Maryland. Washington, D.C.: Optica Publishing Group, 2011: CFO1.
- [21] Saraceno C J, Hoffmann M, Schriber C, et al. SESAMs for high-power femtosecond modelocking: influence of growth temperature on damage and nonsaturable losses [C]//Lasers, Sources, and Related Photonic Devices, 29 January-1 February, 2012, San Diego, California. Washington, D. C.: Optica Publishing Group, 2012: AM4A.13.
- [22] Alfieri C G E, Diebold A, Emaury F, et al. Improved SESAMs for femtosecond pulse generation approaching the kW average power regime[J]. *Optics Express*, 2016, 24(24): 27587-27599.
- [23] Alfieri C G E, Diebold A, Kopp M, et al. SESAMs for high-power lasers[C]//Conference on Lasers and Electro-Optics, June 5-10, 2016, San Jose, California. Washington, D.C.: Optica Publishing Group, 2016: SM11.5.
- [24] Unold H J, Lorenser D, Maas D J H C, et al. Towards wafer-scale integration of high-repetition-rate passively mode-locked surface-emitting semiconductor lasers[C]//Conference on Lasers and Electro-Optics, May 22-27, 2005.
- [25] Maas D J H C, Bellancourt A R, Rudin B, et al. MIXSELS-a new class of ultrafast semiconductor lasers [C]//2007 European Conference on Lasers and Electro-Optics and the International Quantum Electronics Conference, June 17-22, 2007, Munich, Germany. New York: IEEE Press, 2007.
- [26] Maas D J H C, Bellancourt A R, Rudin B, et al. Vertical integration of ultrafast semiconductor lasers[J]. *Applied Physics B*, 2007, 88(4): 493-497.
- [27] Rudin B, Wittwer V J, Maas D J H C, et al. High-power MIXSEL: an integrated ultrafast semiconductor laser with 6.4 W average power[J]. *Optics Express*, 2010, 18(26): 27582-27588.
- [28] Finke T, Nürnberg J, Sichkovskiy V, et al. Temperature resistant fast In_xGa_{1-x}As/GaAs quantum dot saturable absorber for the epitaxial integration into semiconductor surface emitting lasers[J]. *Optics Express*, 2020, 28(14): 20954-20966.
- [29] Diebold A, Zengerle T, Mangold M, et al. Optimized SESAMs for kilowatt ultrafast lasers[C]//CLEO: 2015, May 10-15, 2015, San Jose, California. Washington, D. C.: Optica Publishing Group, 2015: STu10.5.
- [30] Diebold A, Zengerle T, Alfieri C G E, et al. Optimized SESAMs for kilowatt-level ultrafast lasers[J]. *Optics Express*, 2016, 24(10): 10512-10526.
- [31] Keller U. Ultrafast solid-state lasers[C]//Conference Digest. 2000 Conference on Lasers and Electro-Optics Europe (Cat. No.00TH8505), September 10-15, 2000, Nice, France. New York: IEEE Press, 2007.
- [32] Baer C R E, Heckl O H, Saraceno C J, et al. Frontiers in passively mode-locked high-power thin disk laser oscillators[J]. *Optics Express*, 2012, 20(7): 7054-7056.
- [33] der Au J A, Spühler G J, Südmeyer T, et al. 16.2-W average power from a diode-pumped femtosecond Yb:YAG thin disk laser[J]. *Optics Letters*, 2000, 25(11): 859-861.
- [34] Innerhofer E, Südmeyer T, Brunner F, et al. 60-W average power in 810-fs pulses from a thin-disk Yb:YAG laser[J]. *Optics Letters*, 2003, 28(5): 367-369.
- [35] Saraceno C J, Heckl O H, Baer C R E, et al. Sub-100 femtosecond pulses from a SESAM modelocked thin disk

- laser[J]. Applied Physics B, 2012, 106(3): 559-562.
- [36] Diebold A, Emaury F, Schriber C, et al. SESAM mode-locked Yb:CaGdAlO₄ thin disk laser with 62 fs pulse generation[J]. Optics Letters, 2013, 38(19): 3842-3845.
- [37] Schriber C, Emaury F, Diebold A, et al. Dual-gain SESAM modelocked thin disk laser based on Yb:Lu₂O₃ and Yb:Sc₂O₃[J]. Optics Express, 2014, 22(16): 18979-18986.
- [38] Saraceno C J, Emaury F, Schriber C, et al. Ultrafast thin-disk laser with 80 μJ pulse energy and 242 W of average power[J]. Optics Letters, 2013, 39(1): 9-12.
- [39] Saltarelli F, Graumann I J, Lang L, et al. Power scaling of ultrafast oscillators: 350-W average-power sub-picosecond thin-disk laser[J]. Optics Express, 2019, 27(22): 31465-31474.
- [40] Tomilov S, Hoffmann M, Heidrich J, et al. High-power Ho: YAG thin-disk laser and first SESAM modelocking [C]//Laser Congress 2020 (ASSL, LAC), October 13-16, 2020, Washington, D. C.. Washington, D. C.: Optica Publishing Group, 2020: AW5A.2.
- [41] Saraceno C J, Emaury F, Heckl O H, et al. 275 W average output power from a femtosecond thin disk oscillator operated in a vacuum environment[J]. Optics Express, 2012, 20(21): 23535-23541.
- [42] Bauer D, Zawischa I, Sutter D H, et al. Mode-locked Yb: YAG thin-disk oscillator with 41 μJ pulse energy at 145 W average infrared power and high power frequency conversion[J]. Optics Express, 2012, 20(9): 9698-9704.
- [43] Wentsch K S, Zheng L H, Xu J, et al. Passively mode-locked Yb³⁺: Sc₂SiO₅ thin-disk laser[J]. Optics Letters, 2012, 37(22): 4750-4753.
- [44] Ricaud S, Jaffres A, Wentsch K, et al. Femtosecond Yb:CaGdAlO₄ thin-disk oscillator[J]. Optics Letters, 2012, 37(19): 3984-3987.
- [45] Greborio A, Guandalini A, der Au J A. Sub-100 fs pulses with 12.5-W from Yb: CALGO based oscillators [J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8235: 823511.
- [46] Graumann I J, Diebold A, Emaury F, et al. Peak-power scaling of femtosecond SESAM-modelocked Yb:Lu₂O₃ thin-disk lasers[C]//2017 Conference on Lasers and Electro-Optics Europe & European Quantum Electronics Conference (CLEO/Europe-EQEC), June 25-29, 2017, Munich, Germany. New York: IEEE Press, 2017.
- [47] Meyer F, Hekmat N, Mansourzadeh S, et al. Optical rectification of a 100 W average power mode-locked thin-disk oscillator[J]. Optics Letters, 2018, 43(24): 5909-5912.
- [48] Beirow F, Eckerle M, Dannecker B, et al. Radially polarized passively mode-locked thin-disk laser oscillator emitting sub-picosecond pulses with an average output power exceeding the 100 W level[J]. Optics Express, 2018, 26(4): 4401-4410.
- [49] Saltarelli F, Diebold A, Graumann I J, et al. Self-phase modulation cancellation in a high-power ultrafast thin-disk laser oscillator[J]. Optica, 2018, 5(12): 1603-1606.
- [50] Tomilov S, Hoffmann M, Heidrich J, et al. SESAM-modelocked Ho: YAG thin-disk laser with 40.5 W of average power[C]//Conference on Lasers and Electro-Optics, May 9-14, 2021, San Jose, California. Washington, D. C.: Optica Publishing Group, 2021: SF2M.3.
- [51] Tomilov S, Wang Y C, Hoffmann M, et al. 50-W average power Ho:YAG SESAM-modelocked thin-disk oscillator at 2.1 μm[J]. Optics Express, 2022, 30(15): 27662-27673.
- [52] Lorensen D, Unold H J, Maas D J H C, et al. Towards wafer-scale integration of high repetition rate passively mode-locked surface-emitting semiconductor lasers[J]. Applied Physics B, 2004, 79(8): 927-932.
- [53] Garnache A, Hoogland S, Tropper A C, et al. Sub-500-fs soliton-like pulse in a passively mode-locked broadband surface-emitting laser with 100 mW average power[J]. Applied Physics Letters, 2002, 80(21): 3892-3894.
- [54] Lorensen D, Maas D J H C, Unold H J, et al. 50-GHz passively mode-locked surface-emitting semiconductor laser with 100-mW average output power[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2006, 42(8): 838-847.
- [55] Hoffmann M, Barbarin Y, Maas D J H C, et al. Modelocked quantum dot vertical external cavity surface emitting laser[J]. Applied Physics B, 2008, 93(4): 733-736.
- [56] Klopp P, Griebner U, Zorn M, et al. Pulse repetition rate up to 92 GHz or pulse duration shorter than 110 fs from a mode-locked semiconductor disk laser[J]. Applied Physics Letters, 2011, 98(7): 071103.
- [57] Hoffmann M, Sieber O D, Wittwer V J, et al. Femtosecond high-power quantum dot vertical external cavity surface emitting laser[J]. Optics Express, 2011, 19(9): 8108-8116.
- [58] Scheller M, Wang T L, Kunert B, et al. Passively modelocked VECSEL emitting 682 fs pulses with 5.1 W of average output power[J]. Electronics Letters, 2012, 48(10): 588-589.
- [59] Wilcox K G, Tropper A C, Beere H E, et al. 4.35 kW peak power femtosecond pulse mode-locked VECSEL for supercontinuum generation[J]. Optics Express, 2013, 21(2): 1599-1605.
- [60] Waldburger D, Link S M, Alfieri C G E, et al. High-power 100-fs SESAM-modelocked VECSEL[C]//Lasers Congress 2016 (ASSL, LSC, LAC), October 30-November 3, 2016, Boston, Massachusetts. Washington, D.C.: Optica Publishing Group, 2016: ATu1A.8.
- [61] Mangold M, Wittwer V J, Zaugg C A, et al. Femtosecond pulses from a modelocked integrated external-cavity surface emitting laser (MIXSEL) [J]. Optics Express, 2013, 21(21): 24904-24911.
- [62] Mangold M, Zaugg C A, Link S M, et al. Pulse repetition rate scaling from 5 to 100 GHz with a high-power semiconductor disk laser[J]. Optics Express, 2014, 22(5): 6099-6107.
- [63] Mangold M, Golling M, Gini E, et al. Sub-300-femtosecond operation from a MIXSEL[J]. Optics Express, 2015, 23(17): 22043-22059.
- [64] Alfieri C G E, Waldburger D, Nürnberg J, et al. Sub-

- 150-fs pulses from an optically pumped broadband modelocked integrated external-cavity surface emitting laser[J]. *Optics Letters*, 2018, 44(1): 25-28.
- [65] Alfieri C G E, Waldburger D, Link S M, et al. Optical efficiency and gain dynamics of modelocked semiconductor disk lasers[J]. *Optics Express*, 2017, 25(6): 6402-6420.
- [66] Laurain A, Marah D, Rockmore R, et al. Colliding pulse mode locking of vertical-external-cavity surface-emitting laser[J]. *Optica*, 2016, 3(7): 781-784.
- [67] Laurain A, Rockmore R, Chan H T, et al. Pulse interactions in a colliding pulse mode-locked vertical external cavity surface emitting laser[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2017, 34(2): 329-337.
- [68] Laurain A, Kilen I, Hader J, et al. Modeling and experimental realization of modelocked VECSEL producing high power sub-100 fs pulses[J]. *Applied Physics Letters*, 2018, 113(12): 121113.
- [69] McInerney J G, Mooradian A, Lewis A, et al. High-power surface emitting semiconductor laser with extended vertical compound cavity[J]. *Electronics Letters*, 2003, 39(6): 523-525.
- [70] Jasim K, Zhang Q A, Nurmikko A V, et al. Passively modelocked vertical extended cavity surface emitting diode laser[J]. *Electronics Letters*, 2003, 39(4): 373-375.
- [71] Pallmann W P, Zaugg C A, Mangold M, et al. Gain characterization and passive modelocking of electrically pumped VECSELs[J]. *Optics Express*, 2012, 20(22): 24791-24802.
- [72] Pallmann W P, Zaugg C A, Mangold M, et al. Ultrafast electrically pumped VECSELs[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2013, 5(4): 1501207.
- [73] Alhazime A, Butkus M, Hamilton C J, et al. 216 MHz repetition rate passively mode-locked electrically-pumped VECSEL[J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 8966: 89660K.
- [74] Zaugg C A, Gronenborn S, Moench H, et al. Absorber and gain chip optimization to improve performance from a passively modelocked electrically pumped vertical external cavity surface emitting laser[J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 104(12): 121115.
- [75] Chichkov N B, Yadav A, Munshi T, et al. Pulse dynamics in SESAM-free electrically-pumped VECSEL [C]//2019 Conference on Lasers and Electro-Optics Europe & European Quantum Electronics Conference (CLEO/Europe-EQEC), June 23-27, 2019, Munich, Germany. New York: IEEE Press, 2019.
- [76] Kahle H, Mateo C M N, Brauch U, et al. Semiconductor membrane external-cavity surface-emitting laser (MECSEL) [J]. *Optica*, 2016, 3(12): 1506-1512.
- [77] Ćutuk A, Grossmann M, Jetter M, et al. Membrane saturable absorber mirror (MESAM) in a red-emitting VECSEL for the generation of stable ultrashort pulses[J]. *Optics Express*, 2023, 31(4): 6796-6804.
- [78] Telle H R, Steinmeyer G, Dunlop A E, et al. Carrier-envelope offset phase control: a novel concept for absolute optical frequency measurement and ultrashort pulse generation[J]. *Applied Physics B*, 1999, 69(4): 327-332.
- [79] Steinmetz T, Wilken T, Araujo-Hauck C, et al. Laser frequency combs for astronomical observations[J]. *Science*, 2008, 321(5894): 1335-1337.
- [80] Udem T, Holzwarth R, Hänsch T W. Optical frequency metrology[J]. *Nature*, 2002, 416(6877): 233-237.
- [81] Coddington I, Swann W, Newbury N. Coherent multiheterodyne spectroscopy using stabilized optical frequency combs[J]. *Physical Review Letters*, 2008, 100(1): 013902.
- [82] Vazquez-Zuniga L A, Jeong Y. Wavelength-tunable, passively mode-locked erbium-doped fiber master-oscillator incorporating a semiconductor saturable absorber mirror[J]. *Journal of the Optical Society of Korea*, 2013, 17(2): 117-129.
- [83] Okhotnikov O G, Grudinin A B, Pessa M. Ultra-fast fibre laser systems based on SESAM technology: new horizons and applications[J]. *New Journal of Physics*, 2004, 6: 177.
- [84] Richardson D J, Nilsson J, Clarkson W A. High power fiber lasers: current status and future perspectives[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2010, 27(11): B63-B92.
- [85] Jauregui C, Limpert J, Tünnermann A. High-power fibre lasers[J]. *Nature Photonics*, 2013, 7(11): 861-867.
- [86] Kalaycıoğlu H, Elahi P, Akçaalan Ö, et al. High-repetition-rate ultrafast fiber lasers for material processing [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2018, 24(3): 8800312.
- [87] Fermann M E, Hartl I. Ultrafast fibre lasers[J]. *Nature Photonics*, 2013, 7(11): 868-874.
- [88] Rusu M, Karirinne S P, Guina M, et al. Femtosecond neodymium-doped fiber laser operating in the 894- to 909-nm spectral range[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2004, 16(4):1029-1031.
- [89] Price J H V, Lefort L, Richardson D J, et al. A practical, low-noise, stretched-pulse Yb³⁺-doped fiber laser[C]//Technical Digest. Summaries of papers presented at the Conference on Lasers and Electro-Optics, May 11, 2001, Baltimore, MD, USA. New York: IEEE Press, 2002: 291-293.
- [90] Rutz A, Liverini V, Grange R, et al. Parameter tunable GaInNAs saturable absorbers for mode locking of solid-state lasers[J]. *Journal of Crystal Growth*, 2007, 301/302: 570-574.
- [91] Kivisto S, Puustinen J, Guina M, et al. Tunable modelocked bismuth-doped soliton fibre laser[J]. *Electronics Letters*, 2008, 44(25): 1456-1458.
- [92] de Souza E A, Soccolich C E, Pleibel W, et al. Saturable absorber modelocked polarisation maintaining erbium-doped fibre laser[J]. *Electronics Letters*, 1993, 29(5): 447-449.
- [93] Jiang M, Sucha G, Fermann M E, et al. Nonlinearly limited saturable-absorber mode locking of an erbium fiber laser[J]. *Optics Letters*, 1999, 24(15): 1074-1076.
- [94] Sharp R C, Spock D E, Pan N, et al. 190-fs passively mode-locked thulium fiber laser with a low threshold[J]. *Optics Letters*, 1996, 21(12): 881-883.

- [95] Gumenyuk R, Vartiainen I, Tuovinen H, et al. Dissipative dispersion-managed soliton 2 μm thulium/holmium fiber laser[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(5): 609-611.
- [96] Ober M H, Keiler U, Chiu T H, et al. Self-starting diode-pumped femtosecond Nd fiber laser[J]. *Optics Letters*, 1993, 18(18): 1532-1534.
- [97] Herda R, Okhotnikov O G. Dispersion compensation-free fiber laser mode-locked and stabilized by a high-contrast saturable absorber mirror[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2004, 40(7): 893-899.
- [98] Herda R, Okhotnikov O G, Rafailov E U, et al. Semiconductor quantum-dot saturable absorber mode-locked fiber laser[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2006, 18(1): 157-159.
- [99] Suomalainen S, Guina M, Hakulinen T, et al. 1 μm saturable absorber with recovery time reduced by lattice mismatch[J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 89(7): 071112.
- [100] Kim M J, Kim H S, Kim N S, et al. Investigation of InGaAs quantum-well parameters of a semiconductor saturable absorber mirror used for mode locking of a Yb-doped fiber laser[J]. *Journal of the Korean Physical Society*, 2013, 63(10): 1919-1924.
- [101] 林楠, 仲莉, 黎海明, 等. 应变补偿多量子阱结构半导体可饱和吸收镜[J]. *中国激光*, 2022, 49(11): 1101002.
Lin N, Zhong L, Li H M, et al. Strain-compensated multi-quantum well structure semiconductor saturable absorption mirror[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(11): 1101002.
- [102] Tian X L, Tang M, Shum P P, et al. High-energy laser pulse with a submegahertz repetition rate from a passively mode-locked fiber laser[J]. *Optics Letters*, 2009, 34(9): 1432-1434.
- [103] Liu J, Xu J, Wang P. High repetition-rate narrow bandwidth SESAM mode-locked Yb-doped fiber lasers [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2012, 24(7): 539-541.
- [104] Hirooka T, Tokuhira K, Yoshida M, et al. 440 fs, 9.2 GHz regeneratively mode-locked erbium fiber laser with a combination of higher-order solitons and a SESAM saturable absorber[J]. *Optics Express*, 2016, 24(21): 24255-24264.
- [105] Mashiko Y, Fujita E, Tokurakawa M. Tunable noise-like pulse generation in mode-locked Tm fiber laser with a SESAM[J]. *Optics Express*, 2016, 24(23): 26515-26520.
- [106] Hekmat M J, Gholami A, Omoomi M, et al. Ultra-short pulse generation in a linear femtosecond fiber laser using a Faraday rotator mirror and semiconductor saturable absorber mirror[J]. *Laser Physics Letters*, 2018, 15(2): 025101.
- [107] Gao X B, Zhao Z G, Cong Z H, et al. Stable 5-GHz fundamental repetition rate passively SESAM mode-locked Er-doped silica fiber lasers[J]. *Optics Express*, 2021, 29(6): 9021-9029.