

文章编号: 1000-7032(2024)01-0149-08

SESAM 锁模全保偏皮秒脉冲光纤激光器输出特性

王帅坤^{1,2}, 仲 莉^{1*}, 林 楠¹, 刘素平¹, 马晓宇¹

(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: 搭建了基于半导体可饱和吸收镜(SESAM)锁模的全保偏皮秒脉冲光纤激光器, 对比分析了以多量子阱和体材料作为可饱和吸收层的SESAM对锁模激光器输出特性的影响。实验结果表明, 多量子阱和体材料SESAM均可实现稳定的自启动锁模。随着量子阱周期数的增加, SESAM调制深度增大, 激光器输出脉冲宽度变窄, 具有更高的输出功率和更大的锁模区间。但量子阱周期数过高的SESAM具有较大非饱和损耗, 使得相同泵浦功率下输出功率降低。在相同调制深度下, 体材料SESAM的非饱和损耗偏大, 降低了输出功率和光光转化效率, 但对脉冲的窄化作用更显著。SESAM对输出脉冲的波长和光谱宽度无显著影响, 主要受光纤布拉格光栅(FBG)控制。本文对SESAM的设计与选型具有一定指导意义。

关键词: 光纤激光器; 半导体可饱和吸收镜; 超短脉冲; 输出特性

中图分类号: TN248.1

文献标识码: A

DOI: 10.37188/CJL.20230245

Output Characteristics of SESAM Mode-locked All-polarization-maintaining (PM) Picosecond Fiber Laser

WANG Shuaikun^{1,2}, ZHONG Li^{1*}, LIN Nan¹, LIU Suping¹, MA Xiaoyu¹

(1. National Engineering Research Center for Optoelectronic Devices, Institute of Semiconductors,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China;

2. College of Materials Science and Opto-Electronic Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

* Corresponding Author, E-mail: zhongli@semi.ac.cn

Abstract: An all-polarization-maintaining picosecond fiber laser mode-locked by a semiconductor saturable absorber mirror (SESAM) is constructed. The effects of different SESAM structure with multi-quantum well and bulk material as saturable absorber layer on the output characteristics are analyzed and compared. The experimental results show that both the multi-quantum well and the bulk material SESAM can achieve stable self-starting mode-locking. The SESAM modulation depth increases with the number of quantum well periods, resulting in narrower laser output pulse width, higher output power, and a larger mode-locking range. However, the greater the number of quantum well periods, the more nonsaturable losses of the SESAM, and it will reduce the output power at the same pump power. At the same modulation depth, bulk material SESAM has more nonsaturable losses, which will reduce the output power and optical to optical conversion efficiency, but it has a more significant effect on pulse narrowing. The wavelength and spectral width of the output pulses are not significantly affected by the SESAM, but they are primarily controlled by the fiber Bragg grating (FBG). This study provides valuable guidance for the design and the selection of the SESAM.

Key words: fiber laser; semiconductor saturable absorber mirror; ultrashort pulse; output characteristic

收稿日期: 2023-10-17; 修订日期: 2023-10-31

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFB4601201)

Supported by National Key R & D Program of China (2022YFB4601201)

1 引 言

被动锁模光纤激光器具有光束质量高^[1]、环境稳定性好、易散热等优点,因而在科研和工业领域应用广泛^[2]。例如,超快光谱学、非线性显微镜、激光微加工等^[3-6]。半导体可饱和吸收镜^[7](SESAM)因具有自启动、设计灵活、插入损耗小、参数可精确调控等优势^[8-10],被广泛用作实现被动锁模的关键元件,应用于科研及商业领域。

近年来,国内外的研究人员在 SESAM 锁模的光纤激光器方面取得了一些重要进展。2018 年,比利时报道了 1 030 nm 的 SESAM 锁模光纤激光器,产生脉冲能量 0.22 nJ、脉冲宽度 6.5 ps、光谱宽度 7 nm 的种子光^[11]。2022 年,韩国研究团队提出了一种 SESAM 锁模的全保偏环形腔光纤振荡器,获得了波长 1 030 nm 的稳定锁模,其光谱宽度为 3.6 nm,经三级光纤放大后将输出功率提高到 11.3 W^[12]。国内的研究机构如西安光机所、北京工业大学等也进行了相关研究。2018 年,西安光机所使用窄带滤波器进行脉冲整形,获得了中心波长 1 030 nm、光谱宽度 4 nm、脉冲宽度 20.6 ps 的锁模脉冲^[13]。2021 年,北京工业大学以自制的 InGaAs/AlGaAsP 多量子阱(MQW)结构的 SESAM 作为锁模器件,获得了中心波长 1 064 nm、脉冲宽度 22 ps、光谱宽度 0.19 nm 的输出脉冲。其锁模输出特性表明,SESAM 的调制深度对脉冲宽度有显著影响,高调制深度有利于光纤激光器的锁模^[14]。2023 年,西南技术物理所搭建了基于非保偏线形腔 SESAM 锁模的掺镱光纤激光器,在没有任何腔内色散补偿和外部偏振控制的情况下,获得了中心波长 1 064 nm、脉冲宽度 12.51 ps、光谱宽度 0.32 nm、输出功率 2 mW 的锁模脉冲^[15]。

但是,国内外对于不同 SESAM 结构参数和性能参数对锁模脉冲输出特性影响规律的研究大多处于理论状态,具体实验研究相对较少,难以在实际工程技术中准确设计和选择合适的 SESAM 结构并优化超短脉冲光纤激光器的性能。因此,本文基于自主研发的 SESAM 器件,搭建了线型腔全保偏皮秒脉冲光纤激光器,研究了具有不同吸收层结构和不同量子阱(QW)数量的 SESAM 对激光器输出特性的影响,为 SESAM 的设计和选型提供了实验基础,并在优化和调整 SESAM 锁模光纤激

光器的性能方面具有重要参考价值。

2 实 验

2.1 SESAM 结构、制备及参数

本文所用 SESAM 材料采用金属有机化合物化学气相沉积(MOCVD)技术制备,包括 GaAs 衬底、GaAs 缓冲层、分布式布拉格反射镜层(DBR)、隔离层、可饱和吸收层、盖帽层。DBR 由 30 对 GaAs/AlGaAs 层(Al 的组分为 0.9)组成。

本文研究了四种不同的 SESAM,主要区别在于可饱和吸收层的结构不同,分别为 7, 14, 30 个周期的多量子阱和体材料。多量子阱和体材料是可饱和吸收体的两种不同结构,都可以利用其特殊的电子能级结构来实现对入射光的非线性吸收,可以实现锁模并窄化脉冲宽度。图 1 为多量子阱和体材料 SESAM 的结构示意图。

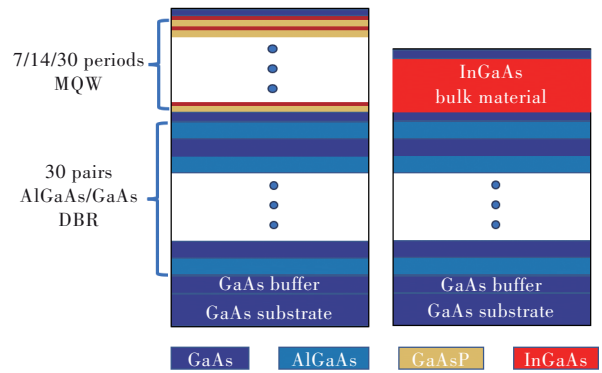


图 1 多量子阱(左)及体材料(右)SESAM 结构示意图
Fig.1 Schematic diagram of the MQW (left) and bulk material(right) SESAM structure

多量子阱 SESAM 的可饱和吸收层为应变补偿多量子阱结构,每对量子阱由厚度 10 nm 的 GaAsP 张应变量子垒层和厚度 10.08 nm 的 InGaAs 压应变量子阱层(In 组分为 0.25)交叉叠设而成,生长温度为 530 °C,其余层生长温度为 690 °C。在可饱和吸收层底部和顶部分别设有 GaAs 隔离层和盖帽层,厚度均为 4 nm。常规的 InGaAs/GaAs 多量子阱结构在 GaAs 衬底上生长 InGaAs 量子阱时,具有较大的压应变,因此量子阱周期数受到应变弛豫限制,周期数较多时会使材料质量恶化。而本文中所采用的 GaAsP/InGaAs 量子阱通过 GaAsP 的张应变补偿 InGaAs 的压应变,可以提高材料质量,增加量子阱周期数^[10]。此外,由于量子阱的量子尺寸效应,其电子能级可以通过改变量子阱的厚度和组分来调

整,因此可以灵活地设计可饱和吸收体的吸收特性。但要获得期望的电子能级结构,需要对多量子阱材料的厚度和组分进行精确控制,工艺容差小。

而体材料 SESAM 的不同之处在于其可饱和吸收层仅由单一组分的 InGaAs 体材料构成。生长 GaAs 隔离层后,在 530 °C 下外延生长一层 74 nm 厚的 InGaAs 材料层,无需进行不同材料层的交替生长。体材料的电子能级结构比较稳定,不易受到制备过程中微小变化的影响,工艺难度较

低。在相同的调制深度下,体材料吸收层厚度更薄,减少了生长成本。在相同厚度下,体材料吸收层的调制深度更大但杂质和缺陷更多,会有较大的非饱和损耗。而且体材料电子能级结构不能像量子阱那样可以通过改变尺寸来调整,限制了其应用和性能。

利用非线性测试装置测得四种 SESAM 的具体参数,如表 1 所示,包括线性反射率 R_{lin} 、饱和反射率 R_{ns} 、饱和通量 $F_{sat,A}$ 、调制深度 ΔR 、非饱和损耗 ΔR_{ns} 、损伤阈值 F_d 、吸收率 A_0 、弛豫时间 τ 。

表 1 四种 SESAM 的具体参数

Tab. 1 Parameters of four SESAM

	$R_{lin}/\%$	$R_{ns}/\%$	$F_{sat,A}/(\mu\text{J}\cdot\text{cm}^{-2})$	$\Delta R/\%$	$\Delta R_{ns}/\%$	$F_d/(\text{mJ}\cdot\text{cm}^{-2})$	$A_0/\%$	τ/ps
7QW	75	90	30	15	10	2.5	25	10
14QW	68	91	30	23	9	2.5	32	10
30QW	34	80	30	46	20	2.5	66	10
体材料	65	88	30	23	12	2.5	35	10

从表 1 中可以看出,7,14,30 个周期量子阱的 SESAM 调制深度逐渐增加,体材料 SESAM 的调制深度与 14 个周期量子阱的 SESAM 相同。7,14 个周期量子阱的 SESAM 非饱和损耗较小,30 个周期量子阱的 SESAM 非饱和损耗较大。

调制深度是指脉冲通量远大于饱和吸收通量时反射率的变化^[6],即饱和反射率 R_{ns} 和线性反射率 R_{lin} 之差。量子阱数量越多,可饱和吸收层越厚,对光的非线性吸收能力越强,使得反射率变化增大,调制深度也随之增大。

非饱和损耗指的是吸收体完全饱和时仍然存在的损耗^[16],即 $1 - R_{ns}$ 。包括 DBR 反射率不足 100% 的部分、表面粗糙造成的散射损耗、缺陷和杂质的吸收损耗等,主要影响脉冲输出功率。本文所用 SESAM 的非饱和损耗差异主要来自吸收体中缺陷和杂质的吸收损耗。7,14 个周期量子阱的 SESAM 可饱和吸收层厚度较薄,产生的杂质和缺陷较少。但 30 个周期量子阱的 SESAM 可饱和吸收层厚度较大,产生的缺陷和杂质更多,因此非饱和损耗更大。体材料 SESAM 的可饱和吸收层为单层整体生长,产生的缺陷较多,但整体厚度较小,因此非饱和损耗略有增加。

可见,可饱和吸收层结构对 SESAM 参数的影响主要体现在调制深度和非饱和损耗。量子阱数量越多,调制深度越大,但量子阱数量过多时,会使得 SESAM 具有较大的非饱和损耗。

2.2 实验装置

本实验搭建了基于 SESAM 锁模的全保偏皮秒脉冲光纤激光器,实验装置示意图如图 2 所示。激光器采用线型腔结构,将自主研发的 SESAM 作为锁模器件,所用 SESAM 尺寸为 2 mm×2 mm,并通过波分复用器(WDM)尾纤上的 FC/PC 光纤跳线端面与 SESAM 耦合。中心波长 1 030 nm、光谱带宽 0.2 nm、反射率为 60% 的光纤布拉格光栅(FBG)作为另一端腔镜,用于波长选择和激光耦合输出。增益介质为 50 cm 长的单包层保偏掺镱光纤(Yb300-6/125-PM),纤芯直径为 6 μm ,包层直径为 125 μm ,数值孔径为 0.12,在 976 nm 处的吸收系数为 300 dB/m。所用泵浦源为带尾纤的 976 nm 单模半导体激光器,最高输出功率为 320 mW,带有温控系统以保持输出功率稳定性,并添加了泵浦保护器以防止回光损伤。使用 WDM 将泵浦光耦合进线型腔中。输出端熔接保偏光纤隔离器(ISO),用以消除回光对锁模稳定性的影响。所有器件均使用保偏光纤连接,传输线偏振光。

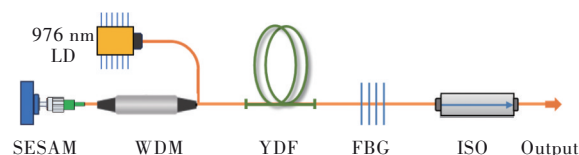


图 2 实验装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the experimental setup

3 结果与讨论

3.1 脉冲波形随泵浦功率的变化

首先探究了脉冲波形随泵浦功率的变化过程。将 SESAM 接入谐振腔中,采用带宽为 4 GHz 的高速示波器(Agilent, DSO7104B)配合光电探测器(Thorlabs PDA015C/M)对输出脉冲波形随泵浦功率的变化进行监测。

逐渐增大泵浦功率,示波器的波形经历如图 3(a)~(d)所示的变化。当泵浦功率较低时,SESAM 未达到饱和,仅有连续光输出,随着泵浦功率

增加会出现如图 3(a)所示的无序巨脉冲。继续增加泵浦功率,巨脉冲逐渐增多并达到平齐,此时为调 Q 状态,如图 3(b)所示。

当泵浦功率达到锁模阈值时,出现图 3(c)所示的稳定的连续锁模脉冲。四种 SESAM 均实现了稳定锁模。由于没有改变腔形结构以及腔长,输出脉冲重复频率保持不变,均为 27 MHz,与激光器腔长 3.8 m 对应。

当泵浦功率超过稳定锁模范围时,SESAM 的吸收损耗难以与增益平衡,因此由单脉冲分裂为多脉冲,增大吸收作用,脉冲波形如图 3(d)。

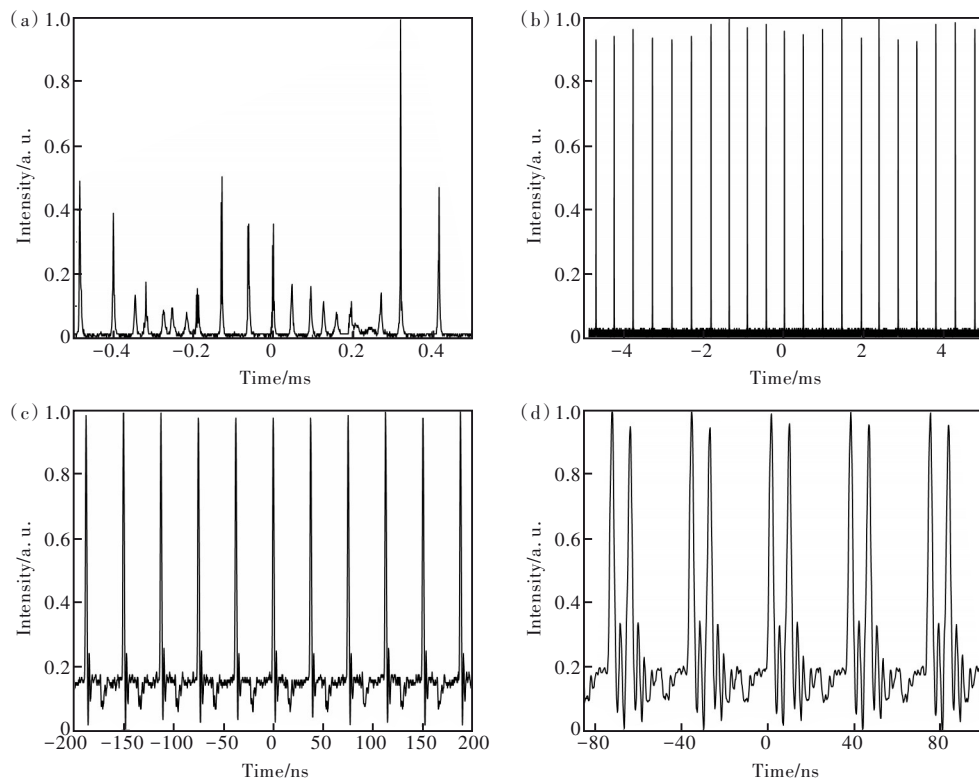


图3 SESAM 锁模建立过程中示波器波形变化。(a)无序巨脉冲;(b)调 Q ;(c)连续锁模;(d)双脉冲

Fig.3 Oscilloscope waveform evolution during the SESAM mode-locking establishment process. (a)Disordered giant pulse. (b) Q -switch. (c)Continuous-wave mode-locked. (d)Double pulse

3.2 锁模区间和输出功率

不同的 SESAM 吸收层结构会对输出脉冲的锁模区间及输出功率产生影响。锁模区间是激光器保持锁模状态的泵浦功率范围。使用光功率计(Thorlabs S145C)对输出功率进行测量。由于激光器种子源输出功率较小,单点记录容易造成测量误差。为了保证结论的严谨性,我们在测量输出功率时采用单点多次测试与换点测试同时进行的方法来确定误差棒,功率测量波动在 5% 以内,误差较小。图 4 为四种 SESAM 锁模时的输出功率曲线,记录了从出现锁模到出现双脉

冲前的输出功率。双脉冲的出现使脉冲的峰值功率增加,会对 SESAM 造成损伤,导致失锁,因此并未测量更高泵浦功率下的输出功率曲线。锁模时的锁模区间、输出功率以及光光转化效率数据详见表 2。

从图 4 和表 2 中可以看出,7 个周期量子阱的 SESAM 锁模时的泵浦功率范围最小,实现锁模所需要的泵浦功率最高,最大输出功率最低。随着量子阱数量的增加,14 个周期量子阱的 SESAM 和 30 个周期量子阱的 SESAM 锁模时的泵浦功率区间长度依次增大,最大为 39.4 mW,最大输出功率

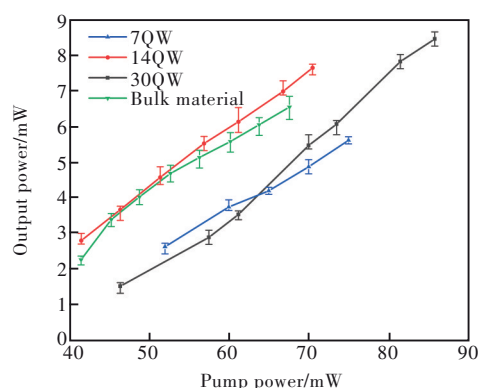


图 4 四种 SESAM 锁模时的输出功率曲线

Fig.4 Output power curves of four SESAM mode-locking

表 2 四种 SESAM 锁模时的锁模区间、输出功率及光光转化效率

Tab.2 Mode-locking range, output power, and optical to optical conversion efficiency of four SESAM mode-locking

SESAM 类型	锁模区间/ mW	输出功率/ mW	光光转化 效率/%
7QW	52.0 ~ 75.0	2.62 ~ 5.62	7.8
14QW	41.5 ~ 70.5	2.80 ~ 7.67	10.5
30QW	46.4 ~ 85.8	1.51 ~ 8.48	7.0
体材料	41.5 ~ 67.6	2.26 ~ 6.56	9.7

也相应提高,最高为 8.48 mW。这是因为量子阱数量的增加使 SESAM 的调制深度增大,脉冲宽度更窄(详见 3.4 节)。大的调制深度使可饱和吸收体对光的非线性吸收能力增强,使锁模更容易实现,扩大了锁模区间。而窄脉宽则使脉冲具有更高的峰值功率,可从增益介质中获取更多的增益,使最大输出功率提高。

相同泵浦功率下,四种 SESAM 的输出功率从高到低依次为 14QW、体材料、30QW、7QW。30 个周期量子阱的 SESAM 和体材料 SESAM 具有较高的非饱和损耗,使一部分光在锁模过程中被损耗掉,降低了输出功率和光光转化效率。而 7 个周期量子阱的 SESAM 的输出功率低则是因为调制深度过小,非线性吸收能力弱,获得的增益较少,导致输出功率处于最低水平。

综上所述,SESAM 量子阱数量增加可扩大锁模区间,提高输出功率和光光转化效率。但从实验中发现,当量子阱数量增加到 30 个时,因材料质量下降,造成了非饱和损耗增加,光光转化效率下降。

3.3 中心波长及光谱宽度

激光器实现稳定锁模后,利用分辨率为 0.03 nm 的光谱分析仪(Anritsu, MS9740B)测量了输出脉冲的中心波长和 3 dB 光谱宽度。图 5 显示了相同泵浦功率下四种 SESAM 的输出光谱,中心波长及光谱宽度数据详见表 3。可以看出,SESAM 对这两项参数的影响不大,四种 SESAM 在锁模时中心波长在 $(1\ 030 \pm 0.03)$ nm,光谱宽度在 0.133 nm 左右。其中,微小的带宽和波长差异是由光谱仪的分辨率以及光谱波动引起的测量误差,可忽略不计。这是由于所用 FBG 相同,FBG 的光谱滤波效应和窄带限模作用限制了中心波长和光谱宽度的改变。光谱的强度差异是因为在同一泵浦功率下,不同 SESAM 锁模时的输出功率不同。此外,因为所用光纤均带有正色散,激光器工作于全正色散区域,但由于 FBG 带宽较窄,并未形成耗散孤子锁模^[17],光谱两侧平滑。

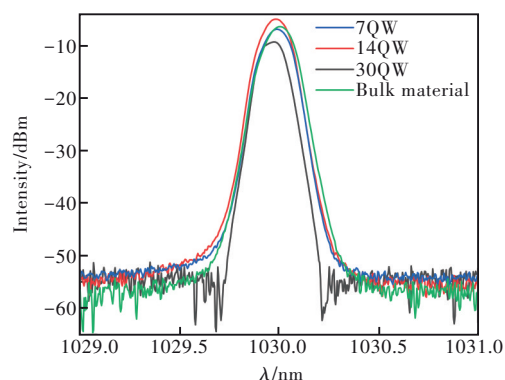


图 5 四种 SESAM 锁模时的输出光谱

Fig.5 Output spectra of four SESAM mode-locking

表 3 四种 SESAM 锁模时的中心波长和光谱宽度

Tab.3 Center wavelength and spectral width of four SESAM mode-locking

SESAM 类型	中心波长/nm	光谱宽度/nm
7QW	1 029.99	0.133
14QW	1 029.98	0.133
30QW	1 029.96	0.130
体材料	1 030.00	0.135

3.4 脉冲宽度

四种 SESAM 的参数中,比较明显的区别是调制深度不同。调制深度反映了可饱和吸收体对脉冲宽度的窄化能力^[18]。对于理想的可饱和吸收体,调制深度 ΔR 与锁模脉冲宽度 τ_p 的关系近似满足^[19]:

$$\tau_p = \frac{1.07}{\Delta f_g} \sqrt{\frac{g}{\Delta R}}, \quad (1)$$

其中, Δf_g 为激光介质的增益谱的半高宽, g 为功率增益系数。由公式(1)可得到, 随着可饱和吸收体调制深度的增加, 锁模时的脉冲宽度会逐渐变窄。

使用自相关仪 (APE, pulseCheck 150NX) 对四种 SESAM 稳定锁模时的脉冲宽度进行测量, 高斯拟合后的自相关曲线如图 6 所示。表 4 中显示了四种 SESAM 的调制深度与锁模时的脉冲宽度的对应关系。可以看出, 随着调制深度增加, 7, 14, 30 个周期量子阱的 SESAM 锁模时的输出脉冲宽度逐渐变窄, 与上述理论相吻合。

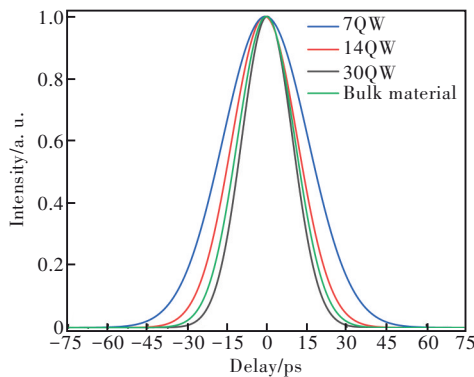


图 6 四种 SESAM 锁模时的自相关曲线

Fig.6 Autocorrelation curves of four SESAM mode-locking

表 4 四种 SESAM 锁模时的脉冲宽度

Tab. 4 Pulse width of four SESAM mode-locking

SESAM 类型	调制深度/%	脉冲宽度/ps
7QW	15	26
14QW	23	20
30QW	46	16
体材料	23	18

体材料 SESAM 与 14 个周期量子阱的 SESAM 调制深度相同, 但脉冲宽度更窄。这是因为实际外延生长时, 由于 In、P 对温度较为敏感, 可饱和吸收体的厚度和组分产生了一定的偏差, 导致最低反射率波长与设计值 1 030 nm 不一致, 使设计值波长处的反射率变化量减小, 造成实际使用时脉冲窄化能力减弱。而体材料相对于量子阱可饱和吸收体来说, 不需要进行高精度的层间界面控制, 生长的工艺容差更大, 与设计值 1 030 nm 偏差更小, 所以实际的脉冲窄化

能力更强。

在皮秒范畴, 要实现更短的脉冲宽度, 可在目前的基础上进行以下改进。由于脉冲宽度与光谱宽度的乘积即时间带宽积为定值, 仅与腔内色散量有关, 因此可在目前的基础上, 采用带宽更大的 FBG, 增大光谱宽度, 以获得更短脉宽。由于激光器中所用光纤均带有正色散, 会导致脉冲展宽, 因此, 可以引入啁啾光纤光栅等色散补偿元件, 减少腔内净色散, 进一步缩短脉冲宽度^[20]。此外, 还可以使用弛豫时间更短、调制深度更大的 SESAM, 缩短脉冲宽度。

但是不能一味追求更高的调制深度。因为锁模的实现对于 SESAM 的调制深度有一定要求。当量子阱周期数过大、调制深度较大时, 对入射脉冲的吸收也会过多, 导致出现自调 Q 现象。而当量子阱周期数过小、调制深度较小时, 脉宽变化缓慢, 实现锁模所需的时间较长, 甚至不锁模。因此, 具有满足锁模条件的参数的 SESAM 才符合文中对输出特征的讨论。

4 结 论

本文搭建了基于 SESAM 锁模的全保偏皮秒脉冲光纤激光器, 并探究了 SESAM 不同量子阱数量和吸收层结构对激光器输出特性的影响。结果表明, 对于 7, 14, 30 个周期量子阱的 SESAM, 随着量子阱数量的增加, SESAM 的调制深度由 15% 增加至 46%, 锁模时的脉冲宽度由 26 ps 缩短至 16 ps, 最大输出功率增加了 2.86 mW, 锁模时的泵浦功率范围增加了 16.4 mW, 锁模更易实现。但 30 个周期量子阱的 SESAM 具有较大的非饱和损耗, 导致在相同泵浦功率下输出功率低于 14 个周期量子阱的 SESAM。在相同调制深度下, 体材料 SESAM 的非饱和损耗比多量子阱 SESAM 略高, 但有助于获得较窄的脉冲宽度。SESAM 吸收层的结构对于光纤激光器的输出功率、脉冲宽度、调制深度以及非饱和损耗等重要性能参数具有直接决定作用。本研究为进一步优化和调整光纤激光器的性能提供了重要的参考。

本文专家审稿意见及作者回复内容的下载地址: <http://cjl.lightpublishing.cn/thesisDetails#10.37188/CJL.20230245>.

参 考 文 献:

- [1] WISE F W, CHONG A, RENNINGER W H. High-energy femtosecond fiber lasers based on pulse propagation at normal dispersion [J]. *Laser Photonics Rev.*, 2008, 2(1-2): 58-73.
- [2] KELLER U. Recent developments in compact ultrafast lasers [J]. *Nature*, 2003, 424(6950): 831-838.
- [3] 赵继民. 超快光谱技术及其在凝聚态物理研究中的应用 [J]. *物理*, 2011, 40(3): 184-193.
ZHAO J M. Ultrafast spectroscopy and its application in condensed matter physics [J]. *Physics*, 2011, 40(3): 184-193. (in Chinese)
- [4] DUPRIEZ P, SAHU J K, JEONG Y, *et al.* High-power high-brightness green laser based on a frequency doubled picosecond fiber laser [C]. *Proceedings of SPIE 6453, Fiber Lasers IV: Technology, Systems, and Applications, San Jose*, 2007: 64531H.
- [5] 曹灿, 张朝晖, 赵小燕, 等. 太赫兹时域光谱与频域光谱研究综述 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2018, 38(9): 2688-2699.
CAO C, ZHANG Z H, ZHAO X Y, *et al.* Review of terahertz time domain and frequency domain spectroscopy [J]. *Spectrosc. Spect. Anal.*, 2018, 38(9): 2688-2699. (in Chinese)
- [6] 何飞, 程亚. 飞秒激光微加工: 激光精密加工领域的新前沿 [J]. *中国激光*, 2007, 34(5): 595-622.
HE F, CHENG Y. Femtosecond laser micromachining: frontier in laser precision micromachining [J]. *Chin. J. Lasers*, 2007, 34(5): 595-622. (in Chinese)
- [7] 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]. *Opt. Lett.*, 1992, 17(7): 505-507.
- [8] BROVELLI L R, KELLER U, CHIU T H. Design and operation of antiresonant Fabry-Perot saturable semiconductor absorbers for mode-locked solid-state lasers [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1995, 12(2): 311-322.
- [9] KELLER U, KNOX W H, 'THOOF T G W. Ultrafast solid-state mode-locked lasers using resonant nonlinearities [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1992, 28(10): 2123-2133.
- [10] 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 absorber mirror [J]. *Chin. J. Lasers*, 2022, 49(11): 1101002. (in Chinese)
- [11] LECOURT J B, GUILLEMET S, DUPUY J, *et al.* High-power picosecond fiber-based laser operating at 515 nm [C]. *Proceedings of SPIE 10683, Fiber Lasers and Glass Photonics: Materials through Applications, Strasbourg*, 2018: 1068338.
- [12] KIM J W, PARK S, KIM G H, *et al.* A 1 030 nm all-PM SESAM mode-locked dissipative soliton fiber oscillator and its amplification with Yb-doped fiber and a Yb:YAG thin rod [J]. *Laser Phys.*, 2022, 32(10): 105102.
- [13] LV Z G, YANG Z, LI F, *et al.* SESAM mode-locked all-polarization-maintaining fiber linear cavity ytterbium laser source with spectral filter as pulse shaper [J]. *Laser Phys.*, 2018, 28(12): 125103.
- [14] SU N, LI P X, LIN N, *et al.* Passively mode-locked Yb-doped all-fiber oscillator using self-made strain-compensated semiconductor mirrors as saturable absorbers [J]. *Laser Phys.*, 2021, 31(2): 025102.
- [15] 张家瑞, 王蓓, 何幸谙, 等. 1.06 μm 结构参数最优化非保偏锁模光纤激光器 [J]. *红外与毫米波学报*, 2023, 42(2): 267-275.
ZHANG J R, WANG J, HE X K, *et al.* Optimization of structural parameters of a 1.06 μm non-polarization mode-locked fiber laser [J]. *J. Infrared Millim. Waves*, 2023, 42(2): 267-275. (in English)
- [16] 张志刚. 飞秒激光技术 [M]. 第2版. 北京: 科学出版社, 2017.
ZHANG Z G. *Femtosecond Laser Technology* [M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2017. (in Chinese)
- [17] 李平雪, 杨春, 赵自强, 等. 1 027 nm 大模场双包层光子晶体光纤半导体可饱和吸收镜锁模激光器 [J]. *中国激光*, 2014, 41(5): 0502007.
LI P X, YANG C, ZHAO Z Q, *et al.* 1 027 nm large-mode-area double-cladding photonic crystal fiber mode-locked laser

based on SESAM [J]. *Chin. J. Lasers*, 2014, 41(5): 0502007. (in Chinese)

- [18] KELLER U, WEINGARTEN K J, KARTNER F X, *et al.* Semiconductor saturable absorber mirrors (SESAM's) for femto-second to nanosecond pulse generation in solid-state lasers [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quant.*, 1996, 2(3): 435-453.
- [19] PASCHOTTA R, KELLER U. Passive mode locking with slow saturable absorbers [J]. *Appl. Phys. B*, 2001, 73(7): 653-662.
- [20] 孙江, 侯磊, 林启蒙, 等. 基于啾啾光纤布拉格光栅的掺镱保偏锁模光纤激光研究 [J]. *光子学报*, 2018, 47(1): 0114001.

SUN J, HOU L, LIN Q M, *et al.* All-polarization maintaining mode-locked Yb-doped fiber laser with chirped fiber Bragg grating [J]. *Acta Photon. Sinica*, 2018, 47(1): 0114001. (in Chinese)



王帅坤(1998-),男,河南新乡人,硕士研究生,2021年于西安电子科技大学获得学士学位,主要从事超快光纤激光器方面的研究。

E-mail: wangshuaikun@semi.ac.cn



仲莉(1980-),女,江苏连云港人,博士,研究员,博士生导师,2008年于中国科学院半导体研究所获得博士学位,主要从事大功率半导体激光器方面的研究。

E-mail: zhongli@semi.ac.cn