

## 1064 nm 半导体可饱和吸收镜的特性

张秋月<sup>1,2</sup>, 林楠<sup>1\*</sup>, 黄婷<sup>1,2</sup>, 刘素平<sup>1</sup>, 马骁宇<sup>1</sup>, 熊聪<sup>1</sup>, 仲莉<sup>1</sup>, 张志刚<sup>3</sup><sup>1</sup>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;<sup>2</sup>中国科学院大学材料科学与光电技术学院, 北京 100049;<sup>3</sup>北京大学信息科学技术学院, 北京 100871

**摘要** 为了提高应用于光纤激光器的多量子阱半导体可饱和吸收镜 (SESAM) 的特性参数, 对其结构进行优化, 模拟分析了不同量子阱周期数对器件电场分布、调制深度及反射光谱等参数的影响, 结果表明, SESAM 中吸收层量子阱周期数越大, SESAM 在 1064 nm 处的反射率越低, 调制深度越高, 在低反射率处的带宽越窄, 可饱和吸收镜对生长误差的容忍度也越小。利用金属有机化合物气相沉积 (MOCVD) 方法对 3 种量子阱周期数结构的 SESAM 进行外延生长, 通过非线性测试及锁模实验对 3 种结构的样品进行测量与表征, 结果表明, 3 种结构的 SESAM 均实现了自启动锁模, 其稳定锁模的泵浦区间为 150~200 mW。采用泵浦探测技术对 15 个量子阱周期的 SESAM 进行动态响应测试, 其响应恢复时间为 5 ps。

**关键词** 激光器; 超快激光器; 半导体可饱和吸收镜; 泵浦探测

**中图分类号** TN248.1

**文献标志码** A

**DOI:** 10.3788/AOS230981

## 1 引言

随着半导体外延技术的发展以及半导体材料本身具有较宽的吸收带, 半导体可饱和吸收镜 (SESAM) 成为十分有潜力的锁模器件<sup>[1-2]</sup>。SESAM 由分布式布拉格 (DBR) 反射镜和一个或多个量子阱 (QW) 或量子点 (QD) 吸收区组成<sup>[3]</sup>。可饱和吸收镜作为实现超短脉冲输出的重要锁模方式, 具有结构紧凑、波长覆盖范围广、可自启动等优点<sup>[4-5]</sup>, 可作为被动锁模调 Q 器件广泛应用于固体激光器、光纤激光器等激光器中<sup>[6-7]</sup>。

2011 年, Saraceno 等<sup>[8]</sup>设计了一个新型多量子阱和介质膜涂层的高损伤阈值 SESAM, 降低了双光子吸收 (TPA), 将此 SESAM 应用于薄片锁模激光器, 实现了脉宽为 235 fs、平均功率为 23 W 的锁模激光脉冲输出。2013 年, Kim 等<sup>[9]</sup>采用金属有机化合物气相沉积 (MOCVD) 方法制备了应用于掺 Yb 光纤激光器的 SESAM, 得到 SESAM 恢复时间为 114 ps, 饱和通量为  $1.8 \mu\text{J}/\text{cm}^2$ , 调制深度为 9.7%, 实现了掺 Yb 光纤激光器的被动锁模。2020 年, Finke 等<sup>[3]</sup>采用分子束外延 (MBE) 方法生长高质量  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$  量子点 SESAM, 并引入 p 型掺杂, 在 600 °C 下进行退火, 得到 SESAM 的恢复时间为 2 ps, 饱和通量  $< 10 \mu\text{J}/\text{cm}^2$ 。

国外设计及生长 SESAM 的技术已经比较成熟,

国内近年来也开展了 SESAM 的研制工作, 但国内对于 SESAM 器件的研究主要集中在固体激光器方面<sup>[10-12]</sup>, 对应用于光纤激光器的 SESAM 研制及关键特性表征的报道较少。本文通过计算模拟分析了 SESAM 吸收区中不同量子阱周期数的光场分布情况, 并对不同量子阱周期数的样品进行反射谱计算分析, 采用 MOCVD 方法进行不同量子阱周期数的 SESAM 外延生长, 利用非线性测试和泵浦探测对不同结构的 SESAM 进行性能表征与分析。

## 2 SESAM 中电场分布的计算和分析

SESAM 主要利用可饱和吸收体的可饱和吸收特性来实现锁模自启动和稳定输出锁模脉冲<sup>[13]</sup>, 对 SESAM 结构中的光电场分布情况进行计算, 主要是为了确定可饱和吸收体的嵌入位置, 使吸收层的位置位于其驻波场波峰处<sup>[14-15]</sup>。SESAM 的设计是以多膜层的光学镀膜理论为基础, 将不同材料的膜层视为多个不同界面, 将光在多个膜层间的传输看成正向和逆向光波传输的行波相互叠加<sup>[16]</sup>, 光波电场在膜层界面处、膜层界面之间以及整体膜层外部的分布可利用菲涅耳公式进行计算, 从而得到整个器件膜层内外各点的电场分布情况<sup>[17]</sup>。

SESAM 主要包括 DBR 反射镜和可饱和吸收体

收稿日期: 2023-05-15; 修回日期: 2023-06-06; 录用日期: 2023-06-26; 网络首发日期: 2023-08-10

基金项目: 国家重点研发计划 (2022YFB3606200, 2022YFB4601201)

通信作者: \*linnan@semi.ac.cn

两部分。采用半导体材料制备 DBR 反射镜时,由于半导体材料之间的折射率差别较小,通常需要经过较多周期数才能得到高反射率,但在实际外延生长过程中,外延层越厚,生长过程所需要的时间越长,外延生长过程中的指标与相应的设计值越容易出现偏差,从而增加了外延生长的成本。经过模拟计算并结合外延生长的实际情况,实验选择反射谱的中心波长为 1064 nm, DBR 反射镜为 30 对 GaAs/AlGaAs 结构, GaAs 层厚度

为 76.83 nm, AlGaAs 层厚度为 88.89 nm, 因为 AlGaAs 在空气中极易氧化,所以选用的材料为  $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$ , SESAM 衬底为 GaAs, 吸收层分别由 7、15、30 周期的 GaAsP/InGaAs 应变补偿量子阱构成, InGaAs 量子阱厚度为 10 nm, GaAsP 量子垒厚度为 9.47 nm, 量子阱的底部和顶部均为 4 nm 的 GaAs 缓冲层和 GaAs 盖帽层, InGaAs 材料选用  $\text{In}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}$ , 图 1 为 SESAM 结构示意图。

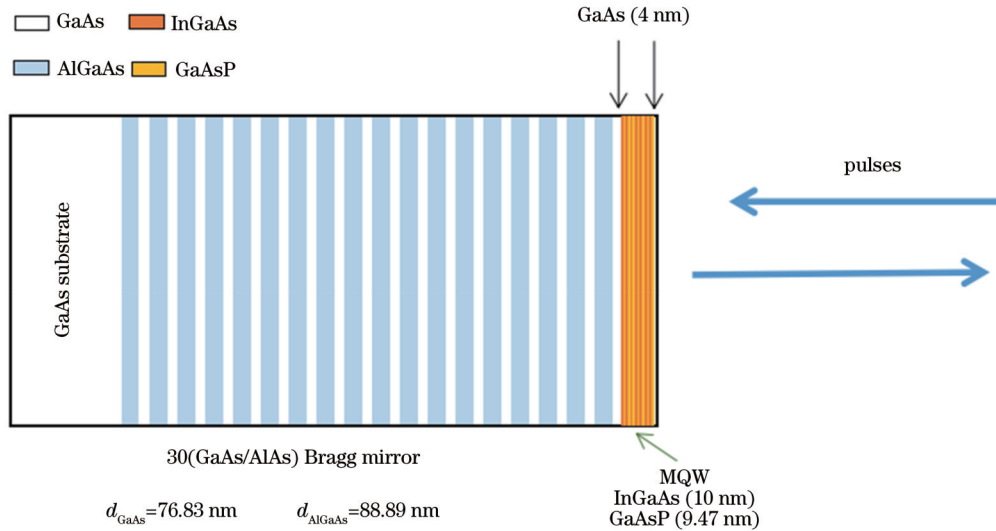


图 1 SESAM结构示意图  
Fig. 1 SESAM structure diagram

图 2 所示为用 COMSOL 软件模拟得出的不同量子阱周期数 SESAM 在 1064 nm 处的电场分布情况, 横轴表示材料的位置, 两个纵轴分别表示材料的折射率和电场强度, 绿色栅格为材料在 1064 nm 波长处的折射率。模拟计算中各层材料在 1064 nm 处的折射率分别为  $n_{\text{GaAs}} = 3.4323$ 、 $k_{\text{GaAs}} = 0.0142$ 、 $n_{\text{GaAsP}} = 3.4045$ 、 $k_{\text{GaAsP}} = 0.0127$ 、 $n_{\text{In}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}} = 3.4685$ 、 $k_{\text{In}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}} = 0.0373$ 、 $n_{\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}} = 3.2389$ 、 $k_{\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}} = 2.4794$ , 模拟分析 SESAM 的内部电场分布主要是为了确定吸收层插入的位置, 对于一般单、多量子阱 SESAM 结构, 吸收层的位置最好位于其驻波场波峰处, 从而实现对工作波长光的有效吸收。从图 2 可以看出: 7 个量子阱周期样品的吸收区位于一个驻波电场的波峰处, 已满足设计要求; 15 个量子阱周期样品的吸收区内有两个完整的电场波, 30 个量子阱周期样品的吸收区内有 3 个完整的电场波及一个 3/4 电场波, 当可饱和吸收区有完整的电场波时, 总有波峰和波谷在吸收区内, 对于 SESAM, 吸收区越多, 调制深度越大, 越容易获得较窄的脉宽, 越容易实现稳定锁模。但过多的吸收区会降低器件的误差容忍度, 增大反射率设计值与实际值的偏差程度, 所以在量子阱周期的选择上, 应结合 SESAM 的反射率光谱按照实际的需求进行选择。

利用软件对不同量子阱周期的可饱和吸收镜进行

反射率计算, 结果如图 3 所示。可以看到, 3 种结构的反射率最低点均在 1064 nm 处, 量子阱周期越多, SESAM 在 1064 nm 处的反射率越低, 即调制深度越高, 且量子阱周期越多, 在低反射率处带宽越窄, 这主要是因为 InGaAs 在此波段的消光系数不为 0, 随着 InGaAs 材料厚度的增加, 对入射光的吸收逐渐增强, 导致反射率降低, 也就是说, 吸收区厚度越大, 可饱和吸收镜对生长误差的容忍度越小, 较小的中心波长变化即会引起较大的反射率改变, 且随着量子阱周期的增多, 反射率逐渐减小, 7 个量子阱周期样品的最低反射率半峰全宽为 36 nm, 15 个量子阱周期样品的最低反射率半峰全宽为 34 nm, 30 个量子阱周期样品的最低反射率半峰全宽为 28 nm。

采用 MOCVD 方法对量子阱周期分别为 7、15 和 30 的样品进行外延生长, 其中 DBR 反射镜材料的生长温度为 690 °C, 可饱和吸收层材料的生长温度为 580 °C。采用分光光度计对生长后样品的反射谱进行测试, 测试结果如图 4 所示。

从图 4 可以看出, 外延生长的 3 个样品的最低反射率都比模拟值小, 这是因为外延材料在低温下生长时, 实际的消光系数比理论计算值大, 导致实际的反射率比理论计算的数值更低。最低反射率的波长与设计值有所偏差, 这主要是因为生长 InGaAs 量子阱和

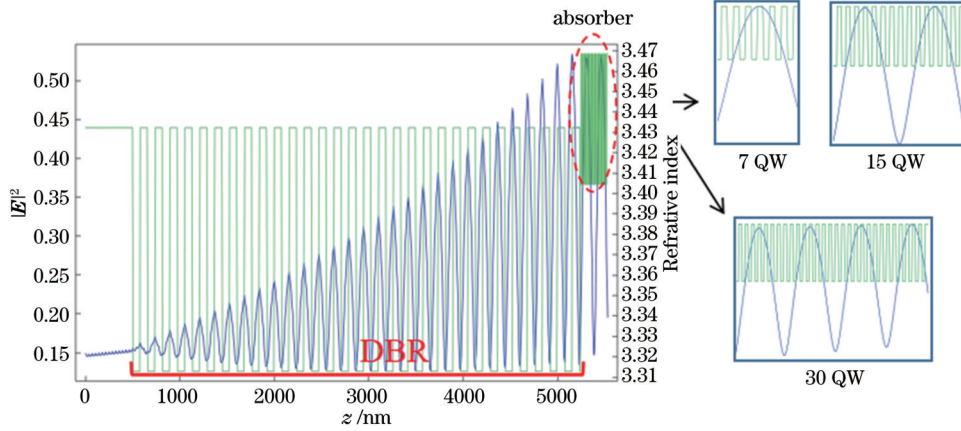


图 2 不同量子阱周期的 SESAM 光场分布

Fig. 2 SESAM field distribution with different quantum well periods

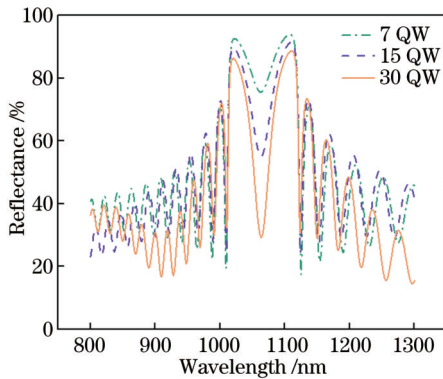


图 3 不同量子阱周期的 SESAM 反射谱

Fig. 3 Reflection spectra of SESAM with different quantum well periods

GaAsP 量子垒外延层时, In、P 材料对温度较为敏感, 使得生长过程中吸收区材料的厚度和组分与设计值产生了一定的偏差。在生长过程中可以通过调节生长时间来优化 InGaAs 量子阱和 GaAsP 量子垒外延层的厚度, 使其最低反射率尽可能与设计值保持一致。

### 3 锁模实验

#### 3.1 非线性测试

SESAM 作为重要的锁模器件, 对激光器的输出脉冲宽度、输出功率和使用寿命等性能起着关键作用, 因此对 SESAM 的特性进行正确测量与表征变得非常重要。

利用非线性测试, 可以确定 SESAM 的线性反射率(低光通量下的反射率)、饱和反射率、饱和通量、调制深度、损伤阈值等性能参数。实验采用的非线性测试装置如图 5 所示, 该装置包括一个超快激光光源、可调节的衰减单元和检测单元。其中激光光源选择中心波长为 1064 nm, 重复频率为 500 kHz, 平均功率为 2.5 W 的掺 Yb 激光器, 300 fs 脉冲宽带对应的脉冲能量为 5  $\mu$ J。通过可调节衰减结构可实现 4 个量级以上的光脉冲通量变化。通过半波片和偏振分束器将激光

光束分为参考光束和信号光束, 并通过两个光电探测器分别测量, 探测到的两个功率之比即为 SESAM 的反射率。在 SESAM 前放置一个焦距为 30 mm 的透镜, 从而在 SESAM 样品上获得直径为 34  $\mu$ m 的光斑, 最大脉冲通量可以达到数百  $\text{mJ}/\text{cm}^2$ , 并采用反射率为 95% 的银镜对检测系统进行标定。

对生长后的外延片进行非线性测试, 测试结果如表 1 所示, 其中  $F_{\text{sat}}$  为饱和通量,  $R_{\text{ns}}$  为饱和反射率,  $R_{\text{lin}}$  为线性反射率,  $\Delta R$  为调制深度,  $1-R_{\text{ns}}$  为非饱和损耗,  $F_d$  为损伤阈值,  $A_0$  为高通吸收率。从表 1 可以看出, 对于谐振型 SESAM, 量子阱周期对饱和通量的影响并不大, 随着吸收层量子阱周期的增大, SESAM 的调制深度逐渐增加, 在相同的泵浦功率下, 调制深度越高, 越容易获得较窄的脉宽, 且在较低泵浦功率时容易实现自启动稳定锁模。饱和反射率与分光光度计测量值基本一致, 随着量子阱周期的增大, 饱和反射率的提升十分有限, 对比 7 个量子阱周期的样品饱和反射率, 增加 8 个量子阱周期后饱和反射率仅提高 1%, 增加 23 个量子阱周期后饱和反射率仅提高 3% 左右, 而过大的量子阱周期也更容易在外延生长过程中与设计值产生偏差。当入射光能量密度为 1.5  $\text{mJ}/\text{cm}^2$ 、光斑半径为 30  $\mu$ m 时, 3 种结构的 SESAM 均未见损伤。

#### 3.2 锁模实验

用于测试 SESAM 锁模效果的 1064 nm 线性腔掺 Yb 光纤激光器如图 6 所示。腔体由 0.8 m 的单模掺 Yb 光纤作为增益介质, 在 980 nm 处的吸收系数为 5 dB/m。将最大输出功率为 500 mW、激光波长为 980 nm 的激光二极管作为泵浦源, 尾纤输出端为 0.5 m 的传导光纤, 其功率随着电流的增加而增大。反射镜由光纤布拉格光栅和 SESAM 组成。波分复用器主要是对 980 nm 和 1064 nm 的光进行分束。

对 3 个样品进行锁模实验, 将外延片切割出面积为 2 mm  $\times$  2 mm 的 SESAM, 并通过银胶将其粘贴在热沉上, 将其放置在图 6 所示的装置中进行测试分析,

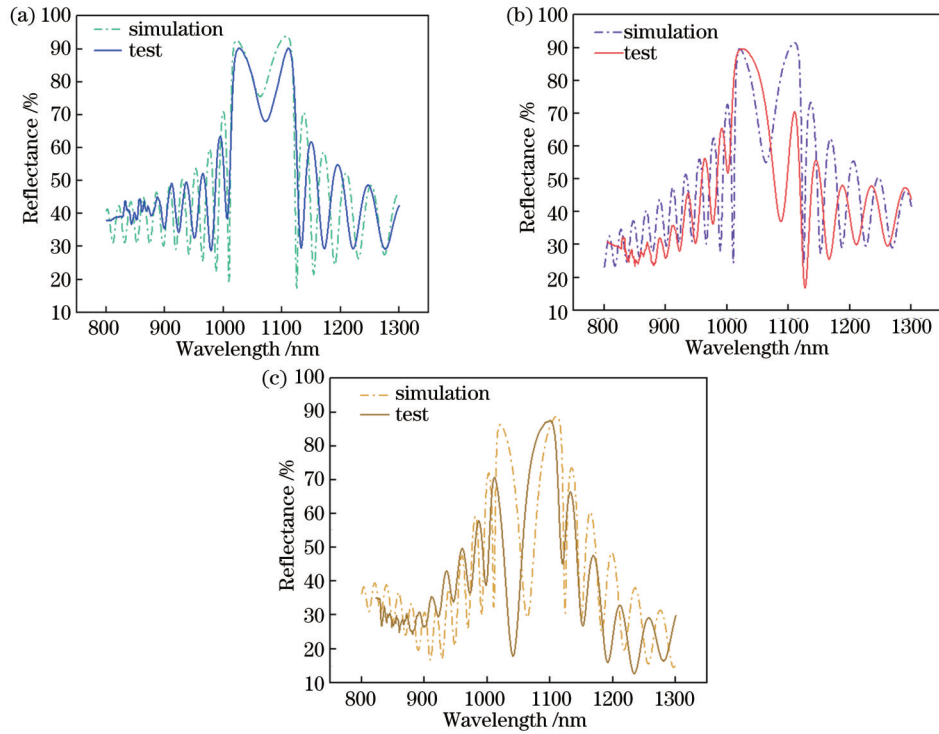


图 4 不同量子阱周期的 SESAM 测试和模拟反射谱。(a) 7 QW; (b) 15 QW; (c) 30 QW

Fig. 4 Reflection spectra of test and simulation SESAM with different quantum well periods. (a) 7 QW; (b) 15 QW; (c) 30 QW

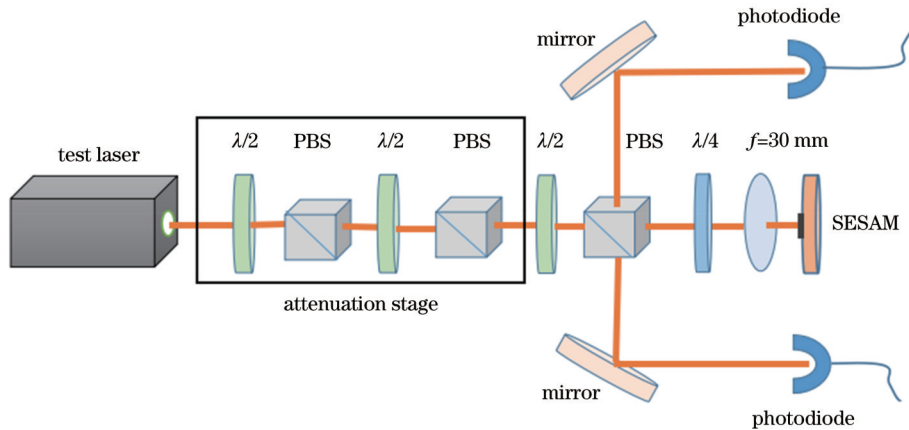


图 5 SESAM 非线性测试装置

Fig. 5 Nonlinear test device for SESAM

表 1 非线性测试结果

Table 1 Nonlinear test results

Parameter	7 QW	15 QW	30 QW
$F_{sat} / (\mu J \cdot cm^{-2})$	30	35	30
$R_{ns} / \%$	90	91	93.30
$R_{in} / \%$	71.87	67.20	59.80
$\Delta R / \%$	18.13	23.80	33.5
$1 - R_{ns} / \%$	10	9	6.70
$F_d / (mJ \cdot cm^{-2})$	>1.5	>1.5	>1.5
$A_0 / \%$	28.13	32.8	40.20

结果如图 7 所示。测试结果表明:3 种结构的 SESAM 均实现了自启动锁模,稳定锁模的泵浦区间为 150~

200 mW,当泵浦功率低于稳定锁模泵浦功率时,不能出现稳定的锁模,而当泵浦功率高于稳定锁模泵浦功率时,锁模脉冲出现双脉冲现象,7 个量子阱周期样品的最窄锁模脉冲宽度约为 20 ps,15 个量子阱周期样品的最窄锁模脉冲宽度约为 11 ps,30 个量子阱周期样品的最窄锁模脉冲宽度约为 8 ps。实验结果证明,随着 SESAM 调制深度的增加,所获得的锁模脉宽变窄。

#### 4 泵浦探测

半导体可饱和吸收体之所以可以自启动锁模,是因为它具有高速时间特性<sup>[18]</sup>。泵浦探测技术是探测超快光谱中最常用的测试方法之一,泵浦探测技术的基

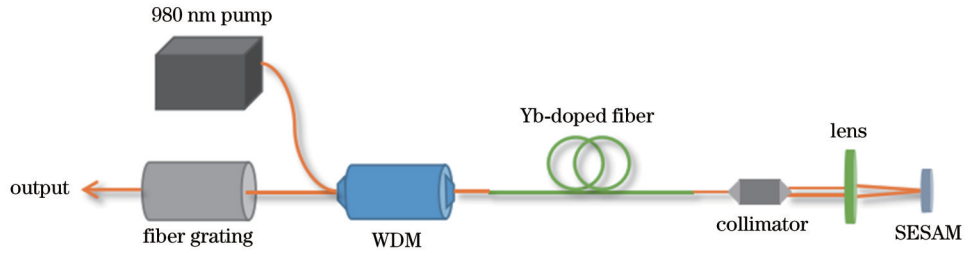


图 6 测试 SESAM 的锁模激光器  
Fig. 6 Mode locking laser for SESAM testing

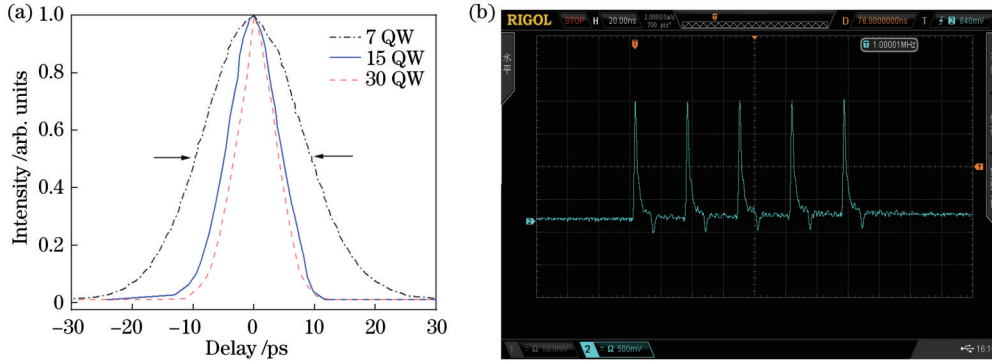


图 7 锁模测试结果。(a)自相关仪测量的输出脉宽;(b)示波器上的锁模脉冲序列

Fig. 7 Test results of SESAM mode locking. (a) Output pulse width measured by autocorrelator; (b) oscilloscope trace with a mode-locked pulse train

本原理是:将入射激光通过分束镜分成两束,即泵浦光和探测光,二者光强比例约为 10:1,利用泵浦光把样品的载流子激发到非平衡状态,并确保探测光不足以激发样品的非线性光学效应,通过调节光学延时平台来改变探测光脉冲和泵浦光脉冲到达样品的时间间隔,在样品处使两束光在空间上重合,并记录在不同的延迟时间条件下,探测光通过样品后的强度变化情况,从而研究被激发样品的光学参量随延迟时间的变化规律<sup>[19-20]</sup>。对于可饱和吸收镜,在泵浦光激发后,测量其反射率随时间的变化情况。

提供光源的飞秒激光器包括飞秒振荡器、泵浦模块、展宽模块、压缩器、再生放大器和脉冲识别器等模块,该飞秒激光器发出的种子光通过光学参量放大器(OPA),输出泵浦-探测实验所需要的飞秒脉冲,泵浦光功率为 0.2 mW,探测光功率为 0.05 mW,光参量放大器的作用是对超快激光器的波长进行调谐。泵浦-探测光路如图 8 所示,其中 1 为镀银反射镜,2 为可调节光阑,3 为半波片,4 为偏振分光棱镜(PBS),5 为延时移动平台和折返棱镜,6 为凸透镜,7 为 SESAM 样品,8 为光电探测器,9 为面积积分平均器 Boxcar,10 为数字示波器,11 为激光挡板。该光路搭建在气垫隔振光学平台上。

SESAM 恢复时间的主要影响因素是外延生长时吸收层的生长温度,量子阱周期对 SESAM 的恢复时间影响不大<sup>[14]</sup>,因此选取 15 个量子阱周期的 SESAM 来表征所制备器件的恢复时间。将 15 个量子阱周期

的 SESAM 放置在图 8 的测试光路中进行测试,测得的 SESAM 非线性反射率随延迟时间的变化如图 9 所示,其中曲线的点为泵浦-探测实验的测试数据,对样品选取同一个点进行两次测试,发现这两次测试的光谱几乎完全重合,样品的重复性较好。使用双指数函数  $f = A_1 \exp\left(-\frac{t}{\tau_1}\right) + A_2 \exp\left(-\frac{t}{\tau_2}\right)$  对测量数据进行拟合,其中  $A_1$ 、 $A_2$  分别表示两个过程所占的比例, $\tau_1$ 、 $\tau_2$  分别表示两个过程的弛豫时间常数。拟合得到的响应恢复时间为 5 ps。

## 5 结 论

通过对不同周期量子阱的 SESAM 的光场分布进行模拟计算,发现当量子阱周期数足够大时,SESAM 的吸收区内存在由入射光场产生的完整驻波,驻波数量随吸收层厚度的增加而增大。对不同周期量子阱结构的可饱和吸收镜反射率进行计算,结果表明,SESAM 随着吸收层量子阱周期数的增加,1064 nm 处的反射率逐渐降低,且低反射率处带宽变窄,这也意味着 SESAM 对生长误差的容忍度下降。通过采用 MOCVD 技术,对设计的 3 种不同量子阱周期数 SESAM 结构样品进行外延生长,对生长后的样品进行非线性测试及锁模实验,结果表明:测试的 3 种结构 SESAM 均实现了自启动锁模,稳定锁模的泵浦区间为 150~200 mW,当泵浦功率低于 150 mW 时,不

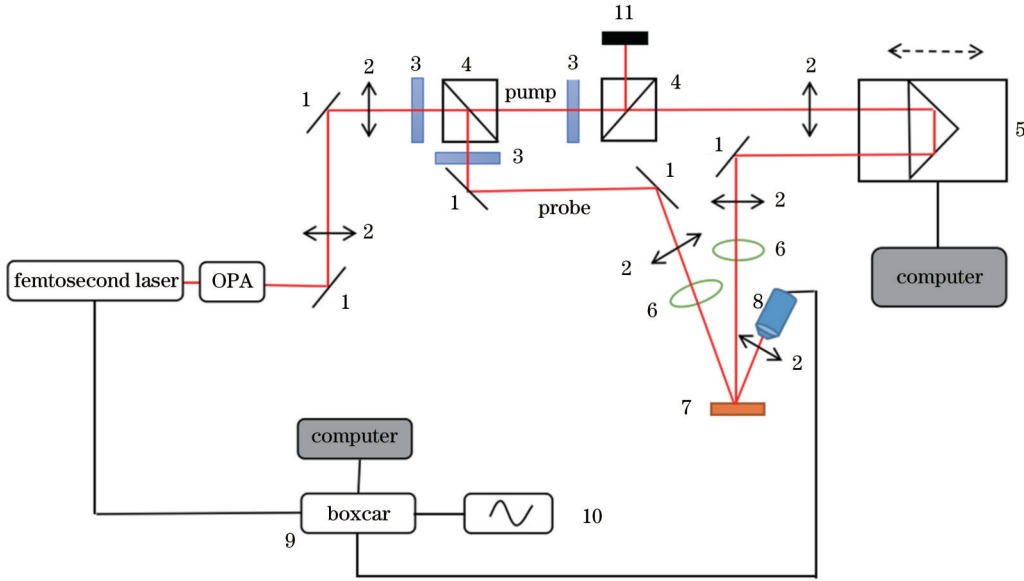


图 8 泵浦-探测光路示意图

Fig. 8 Diagram of pump-probe optical path

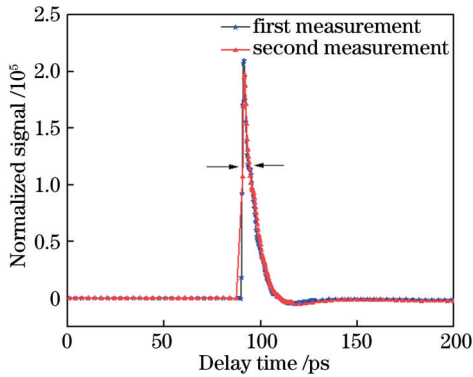


图 9 SESAM 超快光谱

Fig. 9 Ultrafast spectrum of SESAM

能出现稳定的锁模,而当泵浦功率大于 200 mW 时,锁模脉冲出现双脉冲现象。对于谐振型 SESAM,虽然量子阱周期数的增加可以增大 SESAM 的调制深度,但过多的量子阱容易使得外延生长过程中的指标与相应的设计值产生偏差,量子阱周期数对饱和通量的影响并不大,且对饱和反射率的提升十分有限。7 个量子阱周期样品的最窄锁模脉冲宽度约 20 ps,15 个量子阱周期样品的最窄锁模脉冲宽度约 11 ps,30 个量子阱周期样品的最窄锁模脉冲宽度约 8 ps。采用泵浦探测技术对 15 个量子阱周期的 SESAM 进行动态响应测试,测得响应恢复时间为 5 ps。

参 考 文 献

[1] 王勇刚, 马晓宇, 张志刚. 半导体可饱和吸收镜研究的进展[J]. 中国激光, 2004, 31(s1): 137-139.  
Wang Y G, Ma X Y, Zhang Z G. Development about the research of semiconductor saturable absorption mirror[J]. Chinese Journal of Lasers, 2004, 31(s1): 137-139.  
[2] 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 multiquantum well structure semiconductor saturable absorber mirror[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(11): 1101002.  
[3] Finke T, Nürnberg J, Sichkovskiy V, et al. Temperature resistant fast In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As/GaAs quantum dot saturable absorber for the epitaxial integration into semiconductor surface emitting lasers[J]. Optics Express, 2020, 28(14): 20954-20966.  
[4] Cong Z H, Tang D Y, Tan W D, et al. The Nd: CaYAlO<sub>4</sub> passively mode locked laser with a SESAM[C]//2010 Photonics Global Conference, December 14-16, 2010, Orchard, Singapore. New York: IEEE Press, 2011.  
[5] Oudar J L, Aubin G, Mangeney J, et al. Ultra-fast quantum-well saturable absorber devices and their application to all-optical regeneration of telecommunication optical signals[J]. Annales Des Télécommunications, 2003, 58(11): 1667-1707.  
[6] Xue Y H, Wang Q Y, Zhang Z G, et al. Passive mode locking of an Yb: YAB laser with a low modulation depth SESAM[J]. Chinese Optics Letters, 2004, 2(8): 466-467.  
[7] Schättiger F, Bauer D, Demser J, et al. Characterization of InGaAs and InGaAsN semiconductor saturable absorber mirrors for high-power mode-locked thin-disk lasers[J]. Applied Physics B, 2012, 106(3): 605-612.  
[8] 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.  
[9] 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.  
[10] 张光举. LD 泵浦 Nd:YVO<sub>4</sub> 二维新材料调 Q 锁模激光器[D]. 北京: 北京工业大学, 2015.  
Zhang G J. LD pumped Nd:YVO<sub>4</sub> two-dimensional new material Q-switched mode-locked laser[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2015.  
[11] Wang Y B, Wang S, Feng G Y, et al. SESAM combined Kerr lens mode locked Yb: CALGO laser pumped by a 1.2 W single mode fiber coupled laser diode[J]. Laser Physics Letters, 2017, 14(5): 055003.

- [12] 刘凤芹, 张百涛, 孙晓莉, 等. 基于 SESAM 的 Yb:KYW 飞秒激光器的研究[J]. 物理实验, 2020, 40(2): 16-21.  
Liu F Q, Zhang B T, Sun X L, et al. Study on Yb: KYW femtosecond laser based on SESAM[J]. Physics Experimentation, 2020, 40(2): 16-21.
- [13] Keller U, Knox W H, 'tHooft G W. Ultrafast solid-state mode-locked lasers using resonant nonlinearities[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1992, 28(10): 2123-2133.
- [14] 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, January 29-February 1, 2012, San Diego, California. Washington, D. C.: Optica Publishing Group, 2012: AM4A.13.
- [15] Li C X, Gusev V, Dimakis E, et al. Broadband photo-excited coherent acoustic frequency combs and mini-Brillouin-zone modes in a MQW-SESAM structure[J]. Applied Sciences, 2019, 9(2): 289.
- [16] 张靓. 半导体可饱和吸收反射镜的设计与特性研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2010.  
Zhang L. Design and characteristics of semiconductor saturable absorption mirror[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2010.
- [17] Monzón J J, Yonke T, Sánchez-Soto L L. Basic factorization for multilayers[J]. Optics Letters, 2001, 26(6): 370-372.
- [18] 柴路, 王清月, 赵江山, 等. 半导体可饱和吸收镜启动克尔透镜锁模机理的实验研究[J]. 物理学报, 2001, 50(7): 1298-1301.  
Chai L, Wang Q Y, Zhao J S, et al. Experimental study on the mechanism of a self-starting Kerr-lens-mode-locking using a semiconductor saturable absorber mirror[J]. Acta Physica Sinica, 2001, 50(7): 1298-1301.
- [19] 徐鑫泉. 基于泵浦-探测技术的超快过程研究[D]. 南京: 东南大学, 2018.  
Xu X Q. Research on ultrafast process based on pump-detection technology[D]. Nanjing: Southeast University, 2018.
- [20] Basak A K. Ultrafast carrier and lattice dynamics studies in GaAs with intense optical excitation[EB/OL]. [2023-02-03]. [http://d-scholarship.pitt.edu/8350/1/basak\\_etd\\_Jul2010.pdf](http://d-scholarship.pitt.edu/8350/1/basak_etd_Jul2010.pdf).

## Characteristics of 1064 nm Semiconductor Saturable Absorber Mirror

Zhang Qiuyue<sup>1,2</sup>, Lin Nan<sup>1\*</sup>, Huang Ting<sup>1,2</sup>, Liu Suping<sup>1</sup>, Ma Xiaoyu<sup>1</sup>, Xiong Cong<sup>1</sup>,  
Zhong Li<sup>1</sup>, Zhang Zhigang<sup>3</sup>

<sup>1</sup>National Engineering Research Center for Optoelectronic Devices, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China;

<sup>2</sup>College of Materials Science and Optoelectronics, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

<sup>3</sup>School of Electronics Engineering and Computer Science, Peking University, Beijing 100871, China

### Abstract

**Objective** A semiconductor saturable absorber mirror (SESAM) has the advantages of self-starting, easy integration, wide wavelength coverage, support for all-solid-state laser technology, fast saturation, compact structure, and flexible design. It has become a Q-switched and mode-locked element for various types of lasers such as solid-state, fiber, and semiconductor lasers. Recently, the rapid development of picosecond Yb-doped fiber lasers and their wide application in industrial processing have heightened interest in SESAM applied to Yb-doped fiber lasers. The technology of designing and epitaxial growing SESAM has been relatively mature abroad, and the development of SESAM has been carried out in China in recent years, but the research on SESAM devices in China mainly focuses on solid-state lasers, and there are few reports on the development and characterization of SESAM for fiber lasers. In the present study, we report the effects of the quantum well period numbers in the absorption region on the field distribution, modulation depth, and reflection spectrum of SESAM, and the key characteristic parameters of SESAM are characterized, which has important reference value for the further study of SESAM.

**Methods** In order to improve the characteristic parameters of multi-quantum well semiconductor saturable absorption mirror (SESAM) for fiber lasers, the effects of different quantum well period numbers on the field distribution, modulation depth, and reflection spectrum of the device were analyzed. The epitaxial growth of three kinds of quantum well structures with different period numbers of 7, 15, and 30 quantum wells was carried out by metal-organic compound vapor deposition (MOCVD) method. The reflectance spectra of the samples were measured by spectrophotometer, and the nonlinear test and mode-locking experiments were carried out on the developed three kinds of SESAM structures. The dynamic response of SESAM structures was tested by pump detection technology.

**Results and Discussions** The simulation calculates the electric field distribution of the semiconductor saturable absorption mirror at 1064 nm (Fig. 2). When the complete electric field wave is present in the saturable absorption region, there are always peaks and troughs in the absorption region. Reflectance is calculated for saturable absorption mirrors of

different quantum well structures (Fig. 3). The results show that the lowest reflectivity of the three structures is at 1064 nm, and more periods of quantum wells indicates lower reflectivity of SESAM at 1064 nm and higher modulation depth. Nonlinear tests and mode locking experiments are performed on epitaxial sheets of the three structures after growth (Fig. 7). The test results show that the SESAM of the three structures realizes self-starting mode locking, and the pump interval of stable mode locking is 150–200 mW. Pump detection of the SESAM of 15 quantum well structures yields a recovery time of 5 ps (Fig. 8).

**Conclusions** By simulating the calculation of the light field distribution of SESAM of different periods, it is found that when the number of quantum wells is large enough, there is a complete standing wave in the absorption zone generated by the incident light field, and the number of standing waves increases with the thickness of the absorption layer. The reflectance of the saturable mirror of the subtrap structure with different number of periods is calculated. The results show that the reflectance of SESAM decreases gradually at 1064 nm with the increase in the number of periods of the absorption layer quantum well, and the bandwidth at low reflectance becomes narrower, which also means that the tolerance of the growth error of SESAM is also smaller. By using MOCVD technology, epitaxial growth of three SESAM structure samples with different quantum well period numbers is carried out, and nonlinear testing and mode-locking experiments are carried out on the grown samples. The results show that the three SESAM structures tested all realize self-starting mode-locking, and the pump range of stable mode-locking is 150–200 mW. When the pump power is less than 150 mW, stable mode-locking cannot occur. When the pump power is more than 200 mW, the mode-locking pulse appears double pulse phenomenon. For resonant SESAM, although increasing the number of quantum wells can increase the modulation depth of the SESAM, too many quantum wells are more likely to deviate from the design value in the epitaxial growth process. The number of quantum wells has little effect on the saturation flux, and the improvement of saturation reflectance is very limited. The narrowest mode-locking pulse width of 7 quantum well structure samples is about 20 ps; the narrowest mode-locking pulse width of 15 quantum well structure samples is about 11 ps, and the narrowest mode-locking pulse width of 30 quantum well structure samples is about 8 ps. The dynamic response of 15 quantum-well SESAM structures is tested using pump detection technology, and the response recovery time is measured to be 5 ps.

**Key words** lasers; ultrafast lasers; semiconductor saturable absorber mirror; pump-probe