

## 应变补偿多量子阱结构半导体可饱和吸收镜

林楠<sup>1,2</sup>, 仲莉<sup>1,2\*</sup>, 黎海明<sup>3</sup>, 马晓宇<sup>1,2</sup>, 熊聪<sup>1</sup>, 刘素平<sup>1</sup>, 张志刚<sup>4</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>广东华快光子科技有限公司, 广东 中山 528436;<sup>4</sup>北京大学信息科学技术学院, 北京 100871

**摘要** 应用于掺镱(Yb)光纤激光器的半导体可饱和吸收镜(SESAM)需要具有较高的调制深度,即将较厚的砷化镓(InGaAs)材料作为吸收层。然而,InGaAs 材料与砷化镓(GaAs)衬底之间的大失配,导致过厚的 InGaAs 材料质量极易恶化,影响锁模效果。因此,优化的外延结构设计和高质量的外延材料成为研制高性能 SESAM 的关键。本文设计了吸收层 InGaAs 材料总厚度分别为 150 nm 和 300 nm 的两种应变补偿多量子阱(MQW)结构的 SESAM,利用金属有机化合物气相沉积(MOCVD)方法进行外延材料生长,采用光致发光光谱仪、高分辨 X 射线衍射仪和分光光度计对外延材料特性进行表征,优化外延材料生长参数。将研制的两种 SESAM 应用到线型腔掺 Yb 光纤激光器中,实现稳定锁模的泵浦功率分别为 130 mW 和 120 mW,输出激光脉宽分别为 18.3 ps 和 9.6 ps。实验结果表明,吸收层 InGaAs 材料厚度为 300 nm 的 SESAM 更容易实现稳定锁模并获得脉宽较窄的激光脉冲输出。

**关键词** 激光器; 超快激光器; 半导体可饱和吸收镜; 金属有机化合物气相沉积; 应变补偿多量子阱结构

中图分类号 TN248.1

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL202249.1101002

## 1 引言

半导体可饱和吸收镜(SESAM)被动锁模是利用半导体材料对激光的非线性吸收特性,即对弱光的吸收多、反射率低,对强光的吸收少、反射率高<sup>[1]</sup>,使得谐振腔中的弱光不断被消耗直至消失,而强光不断被振荡放大,从而输出超短脉冲激光。SESAM 具有可自启动、易于集成、覆盖波段范围广、支持全固态激光技术、快速饱和<sup>[2-4]</sup>、结构紧凑和设计灵活<sup>[5-7]</sup>等优点,已成为固体激光器、光纤激光器和半导体激光器等多种类型激光器<sup>[8]</sup>的调 Q 和锁模器件。近几年,皮秒掺 Yb 光纤激光器的快速发展及其在工业加工领域的广泛应用,使得应用于掺 Yb 光纤超快激光器的 SESAM 受到人们的广泛关注。

2004 年,Herda 等<sup>[9]</sup>采用由固态源分子束外延(MBE)方法生长的谐振型 SESAM 对掺 Yb 光纤激光器进行被动锁模,获得了重复频率为 80 MHz,波长为 1036 nm,脉宽为 11 ps 的激光脉冲输出。

2006 年,Suomalainen 等<sup>[10]</sup>利用晶格失配引入非辐射复合中心来减少 SESAM 的恢复时间,研制出调制深度为 12%,饱和通量为 13  $\mu\text{J}/\text{cm}^2$ ,非饱和损耗为 3.8%,恢复时间为 4.9 ps 的 SESAM,将其作为掺 Yb 光纤激光腔中的端镜,利用光栅补偿腔内色散实现了稳定锁模,并获得脉宽为 2.3 ps 的激光脉冲输出。2013 年,Kim 等<sup>[11]</sup>利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 的恢复时间为 14 ps,调制深度为 9.7%,饱和通量为 1.8  $\text{mJ}/\text{cm}^2$ ,实现了掺 Yb 光纤激光器的被动锁模和 760 ps 的激光脉冲输出。2019 年,Wang 等<sup>[12]</sup>采用 MOCVD 方法外延生长了应变补偿量子阱的 SESAM,研制出调制深度为 11.5%,饱和通量为 39.3  $\mu\text{J}/\text{cm}^2$ ,反转饱和通量为 630  $\text{mJ}/\text{cm}^2$ ,损伤阈值为 9.5  $\text{mJ}/\text{cm}^2$  的高损伤阈值 SESAM,并将其应用到线型腔掺 Yb 光纤激光器中,获得 19.2 ps 的激光脉冲输出。2021 年,Su 等<sup>[13]</sup>采用等离子体增强型化学气相沉

收稿日期: 2021-09-27; 修回日期: 2021-10-20; 录用日期: 2021-11-12

通信作者: \*zhongli@semi.ac.cn

积设备在 SESAM 顶部生长出不同周期的二氧化硅/氮化硅( $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ )介质膜,并将其应用到线型腔掺 Yb 光纤激光器中,获得了 22 ps 的激光脉冲输出。

目前,国内对于 SESAM 器件的研究主要集中在固体激光器方面<sup>[14-16]</sup>,对于光纤激光器所需要的 SESAM,多数研究侧重于其应用系统,对光纤激光器用 SESAM 的研制过程以及外延材料关键特性表征的报道较少。本文设计了两种应变补偿多量子阱结构的 SESAM,使用 MOCVD 方法进行外延材料生长,采用光致发光光谱仪、高分辨 X 射线衍射仪、分光光度计对外延材料特性进行表征,优化外延材料生长参数后进行 SESAM 外延材料生长。将研制的 SESAM 应用到线型腔掺 Yb 光纤激光器中,获得了输出功率为 9 mW,脉宽为 9.6 ps 的激光脉冲输出,相对于国内其他自制的 SESAM 获得了脉宽更窄的激光脉冲。

## 2 结构设计和器件制作

### 2.1 SESAM 结构设计

SESAM 的基本结构是把反射镜和可饱和吸收体结合在一起<sup>[2]</sup>,即由底部反射镜、顶部反射镜、可饱和吸收体组成。底部反射镜一般是由高折射率和低折射率半导体材料交替组成的分布式布拉格反射镜(DBR),如砷化镓/砷化铝( $\text{GaAs}/\text{AlAs}$ )、砷化铝镓/砷化镓( $\text{AlGaAs}/\text{GaAs}$ )、磷化铟/砷化铟镓( $\text{InP}/\text{InGaAsP}$ )等。饱和吸收体可以是厚度为几百纳米的半导体材料,也可以是厚度为几纳米的量子

阱,通过低温生长<sup>[17]</sup>或者离子注入<sup>[18]</sup>的方法缩短可饱和吸收体材料的光生载流子弛豫时间,有助于获得锁模自启动和更短脉宽的激光脉冲输出<sup>[19]</sup>。顶部反射镜可由  $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ 、二氧化钛/氮化硅( $\text{TiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ )等介质膜组成,也可以由半导体-空气界面或者半导体材料的 DBR 组成,但是半导体材料相对于介质膜具有更大的双光子吸收系数<sup>[20]</sup>,容易导致 SESAM 损伤,因此在实际应用中很少选用半导体材料的 DBR 作为顶部反射镜。

本文设计了两种应用于 1064 nm 波长的掺 Yb 光纤激光器的 SESAM,结构如图 1 所示。两种 SESAM 结构的主要区别在于可饱和吸收体部分的 MQW 周期数(即吸收层厚度)不同。具体结构为:底部反射镜为 30 周期的  $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}/\text{GaAs}$  DBR, 88.5 nm 厚的  $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$  和 76.5 nm 厚的 GaAs 的光学厚度均为  $\lambda/4$  ( $\lambda = 1064$  nm);可饱和吸收部分分别为 15 周期的砷化铟镓/砷磷化铟镓( $\text{InGaAs}/\text{GaAsP}$ )应变补偿 MQW(包含 15 个 10 nm 厚的 InGaAs 和 16 个 10 nm 厚的 GaAsP)和 30 周期的 InGaAs/GaAsP 应变补偿 MQW(包含 30 个 10 nm 厚的 InGaAs 和 31 个 10 nm 厚的 GaAsP)。由于在 GaAs 衬底上生长的 InGaAs 量子阱层处于压缩状态,整个  $\text{In}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}/\text{GaAs}$  MQW 结构具有较大的压应变,且 MQW 周期的数量受应变弛豫的限制。因此,结构设计中采用 GaAsP 的张应变补偿 InGaAs 的压应变,不仅可以获得较好的材料质量,同时还可以增加 MQW 周期的数量。此外,两种结构顶部均采用 5 nm 厚的 GaAs 层作为帽层。

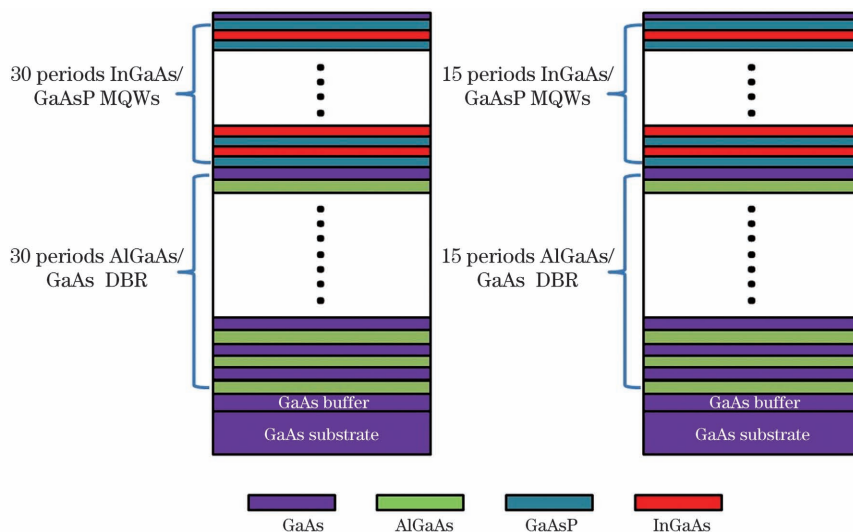


图 1 两种应变补偿多量子阱 SESAM 结构示意图

Fig. 1 Schematic of two strain-compensated multiquantum well SESAMs structures

## 2.2 SESAM 器件制作

利用低压-金属有机化合物气相沉积 (LP-MOCVD) 方法进行 AlGaAs/GaAs DBR、InGaAs/GaAsP MQW 和 SESAM 外延材料生长。将三甲基镓 (TMGa)、三甲基铝 (TMAI)、三甲基铟 (TMIIn) 分别作为外延材料所需的镓、铝、铟源, 将纯度为 100% 的砷烷 ( $\text{AsH}_3$ ) 和磷烷 ( $\text{PH}_3$ ) 作为砷源和磷源。将经过钨管纯化器净化后的氢气作为载气, 以 13 L/min 的流速将原材料运输到反应室。

实验过程共包含 6 次外延材料生长, 分别为 3 次 MQW, 1 次 DBR 和 2 次 SESAM 生长。所有外延材料均在厚度为 450  $\mu\text{m}$  的 n 型 Si 掺杂 2 英寸 (1 英寸 = 2.54 cm) GaAs 衬底上生长, 外延生长面为朝向 [110] 方向偏角为  $2^\circ$  的 (100) 面。在外延材料生长之前, 将反应室的压强控制在 50 mbar (1 mbar = 101 Pa), 在  $\text{AsH}_3$  流动气氛下将衬底在 725  $^\circ\text{C}$  下烘烤 10 min, 进行表面热解去吸附, 去除衬底表面的氧化层<sup>[21]</sup>。在材料外延生长过程中, AlGaAs/GaAs DBR 生长温度为 690  $^\circ\text{C}$ , InGaAs/GaAsP 应变补偿 MQW 和 GaAs 帽层的生长温度为 580  $^\circ\text{C}$ 。实验中采用的具体生长参数如表 1 所示, 所有外延材料生长均在 GaAs 衬底上先进行 200 nm 的 GaAs 缓冲层生长, 再进行相应外延结

构生长。首先, 样品 A、B、C 均由 InGaAs/GaAsP MQW 结构外延材料生长。样品 A 在 GaAs 缓冲层之上生长了 15 周期的 InGaAs/GaAsP MQW, 在生长 GaAsP 应变补偿量子垒时, 通入反应室的  $\text{AsH}_3$  和  $\text{PH}_3$  流量分别为 80 mL/min 和 500 mL/min。样品 B 在 GaAs 缓冲层之上生长了 30 周期的 InGaAs/GaAsP MQW, 生长 GaAsP 应变补偿量子垒时, 通入反应室的  $\text{AsH}_3$  和  $\text{PH}_3$  流量分别为 80 mL/min 和 500 mL/min。样品 B 生长完成后, 经测试发现, 外延材料质量较差, 因此在生长与样品 B 结构相同的样品 C 时, 将生长 GaAsP 应变补偿量子垒的  $\text{AsH}_3$  流量改为 40 mL/min,  $\text{PH}_3$  流量依然为 500 mL/min, 目的在于通过改变  $\text{AsH}_3$  流量来调整 GaAsP 材料中 As 和 P 的组分, 从而改变 GaAsP 的张应变, 提升材料质量。其次, 样品 D 由 DBR 结构外延材料生长, 在 GaAs 缓冲层之上生长 30 周期的 AlGaAs/GaAs DBR。最后, 基于样品 A、C、D 的外延材料生长参数, 进行具有 SESAM 完整结构的样品 E 和 F 生长, 样品 E 拥有 30 周期的 AlGaAs/GaAs DBR 和 15 周期的 InGaAs/GaAsP MQW, 样品 F 拥有 30 周期的 AlGaAs/GaAs DBR 和 30 周期的 InGaAs/GaAsP MQW。

表 1 DBR、MQW 和 SESAM 具体生长参数

Table 1 Specific growth parameters of DBR, MQW, and SESAM

Sample	GaAs buffer thickness /nm	Number of DBR periods	Number of MQW periods	GaAsP layer	
				$\text{AsH}_3$ flow / (mL $\cdot$ min $^{-1}$ )	$\text{PH}_3$ flow / (mL $\cdot$ min $^{-1}$ )
A	200	—	15	80	500
B	200	—	30	80	500
C	200	—	30	40	500
D	200	30	—	—	—
E	200	30	15	80	500
F	200	30	30	40	500

## 3 测试与分析

### 3.1 光致发光谱测试与分析

室温下, 采用 NANO 公司生产的 RPM-2000 半导体光致发光光谱仪对样品光致发光 (PL) 谱进行测试, 测试过程中选用激光波长为 785 nm 的半导体激光器和 InGaAs 探测器分别作为光源和光子接收器, 在激光器功率、狭缝宽度、扫描速率、分辨率等测试参数完全一致条件下, 对样品 A、B、C、E、F 的 PL 谱进行测试, 测试结果如图 2 所示, 表 2 为

各个测试样品 PL 谱的峰值波长和半峰全宽 (FWHM) 的具体数值。图 2 和表 2 所示的结果表明: 样品 A 具有最窄的 FWHM 和中等的峰值强度; 样品 C 的峰值光强最强, 但是其 FWHM 比样品 A 宽, 比样品 B 窄; 样品 B 的峰值强度最弱, FWHM 最宽。这主要是因为样品 A 和样品 B 外延生长过程中选用的  $\text{AsH}_3$  流量为 80 mL/min,  $\text{PH}_3$  流量为 500 mL/min, 生长的 GaAsP 量子垒应变补偿层不能完全补偿 InGaAs 量子阱的压应变, 导致净应变依然为压应变, 而样品 B 的量子阱周期

数是样品 A 的两倍,净应变加剧,导致样品 B 的量子阱材料质量较差,因此样品 B 的 PL 谱的峰值强度最弱,FWHM 最宽。样品 C 是基于样品 B 的测试结果,在生长 GaAsP 量子垒应变补偿层时将 AsH<sub>3</sub> 的流量由 80 mL/min 减小到 40 mL/min,通过减少 AsH<sub>3</sub> 流量可以有效增加 GaAsP 量子垒的 P 含量,从而增加 GaAsP 量子垒的张应变,使得净应变减小,从而改善 30 周期 MQW 的材料质量。如图 2 所示,与样品 B 相比,样品 C 的 PL 谱具有更大的峰值强度和更窄的 FWHM,说明样品 C 拥有更好的外延材料质量。样品 C 的 FWHM 宽于样品 A,说明样品 C 的材料质量不及样品 A 的材料质量,但是样品 C 拥有更多的量子阱周期数,使得样品 C 的峰值强度高于样品 A 的峰值强度。样品 E 和样品 F 为 SESAM 完整结构,其量子阱部分的外延工艺参数分别与样品 A 和样品 C 相同,DBR 均为 30 周期的 AlGaAs/GaAs。样品 E 和样品 F 的峰值强度和 FWHM 均差于只有 MQW 结构的样品 A 和样品 C,主要原因在于朝向(110)面偏角为 2°的 GaAs (100)面上生长的高 Al 组分 AlGaAs/GaAs DBR 材料表面不如 GaAs 缓冲层的表面平整,造成了生长在 AlGaAs/GaAs DBR 之上的 MQW 材料质量不及生长在 GaAs 缓冲层之上的 MQW 材料质量。

表 2 样品 A、B、C、E、F 的 PL 谱峰值波长和 FWHM  
Table 2 PL spectrum peak wavelength and FWHM of samples A, B, C, E, and F

Sample	A	B	C	E	F
Peak wavelength /nm	1079.0	1080.0	1078.1	1083.7	1095.0
FWHM /nm	25.5	54.8	42.0	29.7	58.4

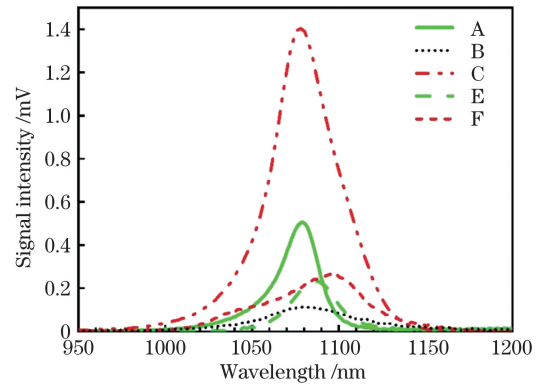


图 2 样品 A、B、C、E、F 的 PL 谱

Fig. 2 PL spectra of samples A, B, C, E, and F

### 3.2 高分辨 X 射线衍射摇摆曲线测试与分析

高分辨 X 射线衍射仪 (HRXRD) 是测量半导体异质结构材料结晶质量和结构参数的有力工具,一般情况下,外延材料的衍射峰数量和 FWHM 可表征外延层的结晶质量。图 3 所示为样品 A~F 在

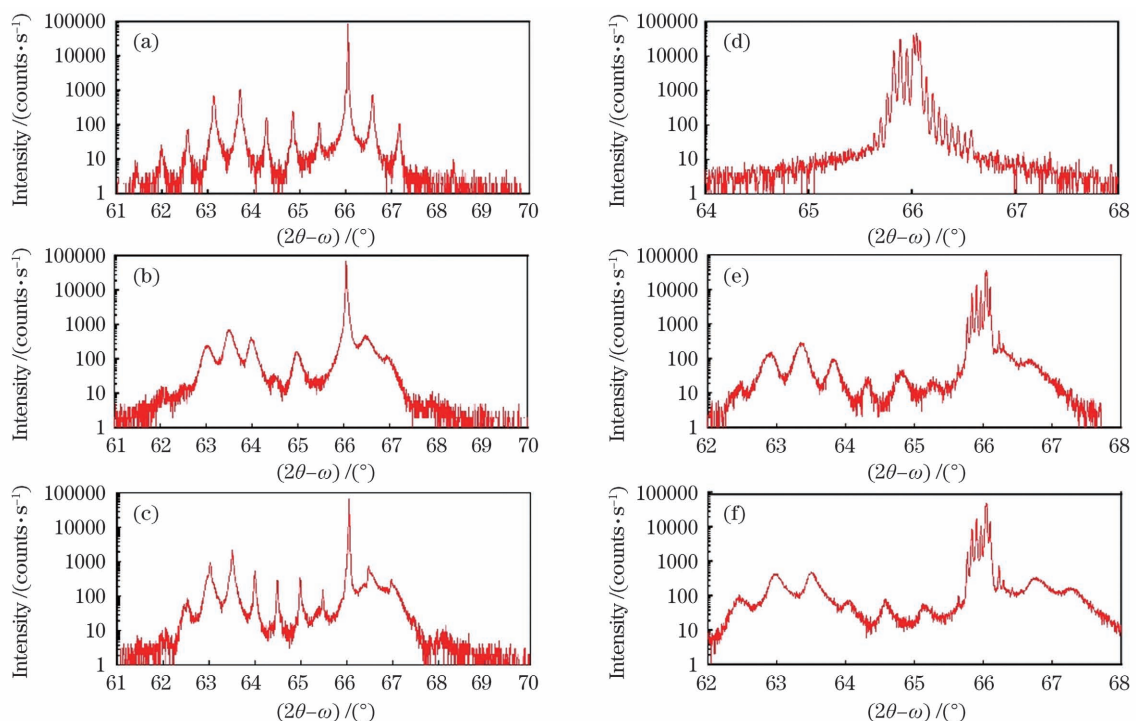


图 3 6 个样品在(004)点阵面上的高分辨 X 射线衍射摇摆曲线。(a)样品 A;(b)样品 B;(c)样品 C;(d)样品 D;(e)样品 E;(f)样品 F

Fig. 3 High resolution X-ray diffraction rocking curves on the lattice plane (004) of six samples. (a) Sample A; (b) sample B; (c) sample C; (d) sample D; (e) sample E; (f) sample F

(004)点阵面上扫描  $2\theta-\omega$  的摇摆曲线,其中每条摇摆曲线的最强峰对应于 GaAs 衬底的(004)点阵面的衍射峰,其余衍射峰对应于 InGaAs/GaAsP MQW 和 AlGaAs/GaAs DBR 的衍射峰。就 MQW 结构样品 A、B、C 而言:样品 A 拥有最多衍射峰,同时拥有最窄的 FWHM;样品 B 拥有的衍射峰数量最少并且 FWHM 最宽;样品 C 的衍射峰数量和 FWHM 居于样品 A 和 B 之间。从样品 A~C 摇摆曲线的衍射峰数量及 FWHM 可以判断,样品 A 拥有相对较好的材料质量和界面形貌,样品 C 次之,样品 B 的材料质量相对较差,该结论和 3 个样品的 PL 谱分析结果一致。具有 SESAM 完整结构的样品 E、F 拥有两组衍射峰,其中一组位于  $66^\circ$  附近的衍射峰为 AlGaAs/GaAs DBR 的衍射峰,与样品 D 的衍射峰相对应,其余为 InGaAs/GaAsP MQW 的

衍射峰,同时 MQW 在  $66^\circ$  附近的衍射峰被 DBR 的衍射峰所覆盖。与样品 A、C 相比,样品 E、F 的 InGaAs/GaAsP MQW 的衍射峰数量和 FWHM 都相对较差,说明在 SESAM 完整结构中生长在 AlGaAs/GaAs DBR 之上的 MQW 材料质量不及生长在 GaAs 缓冲层之上的 MQW 材料质量。

各个样品 MQW 和 DBR 的周期厚度的计算公式为

$$D = \frac{\lambda}{2\cos\theta_B \cdot \Delta\theta_M}, \quad (1)$$

式中: $\lambda$  为 X 射线波长; $\theta_B$  为布拉格角; $\Delta\theta_M$  为相邻卫星峰的角间距。根据式(1)计算得到的样品 A~F 的 MQW 和 DBR 的周期厚度如表 3 所示, MQW 和 DBR 的厚度虽然与设计值有所偏差,但是基本都在允许的误差范围内。

表 3 样品 A~F 的 MQW 和 DBR 的周期厚度

Table 3 Periodic thickness of MQW and DBR for samples A-F

Sample	A	B	C	D	E	F
Periodic thickness of MQW /nm	20.2	20.1	20.2	-	19.7	19.8
Periodic thickness of DBR /nm	-	-	-	166.7	162.8	163.5

### 3.3 反射谱测试与分析

采用分光光度计对样品 D~F 的反射谱进行测试,样品 D 的反射谱测试结果及其相同结构样品的模拟结果如图 4 所示。可以看到:样品 D 反射谱的最高反射率为 96.92%,对应波长为 1076 nm,高反射率带宽为 85 nm(反射率 $\geq 90\%$ );模拟曲线的最高反射率为 99.98%,对应波长为 1064 nm,高反射率带宽为 98 nm(反射率 $\geq 90\%$ )。样品 D 反射谱测试结果与模拟结果偏离的主要原因如下:1)在 DBR 生长过程中 AlGaAs 和 GaAs 各外延层厚度和 AlGaAs 组分与设计值之间存在偏差,使得样品 D 的反射谱中心波长与设计值偏离;2)在 GaAs (100)

衬底上生长高 Al 含量的 AlGaAs 材料容易出现表面不光滑现象,实际界面粗糙程度的增大造成光线入射角度的改变以及散射现象,从而使最高反射率低于设计值;3)DBR 相邻界面处一定程度的 Al、Ga 组分扩散和混合生长,导致有效折射率差变小,这对高反射率带宽和最高反射率均有影响。

基于样品 D 的反射谱测试结果,在生长 SESAM 完整结构样品 E 和样品 F 时对其 DBR 各层的生长时间进行了相应调整,通过调整生长时间优化 AlGaAs 和 GaAs 层的厚度,使得 DBR 的反射谱尽可能与设计结果保持一致。样品 E 和样品 F 的反射谱测试结果及其相同结构样品的模拟结果如图 5 所示。与样品 D 相比,样品 E 和样品 F 的反射谱测试结果与模拟结果在高反射率区域的一致性较好,这是在外延生长过程中对工艺参数进行调整的结果。从图 5 还可以发现,样品 E 和样品 F 的高反射率区域内均存在一个反射率很小的低谷点。样品 E 的测试光谱在低谷点的反射率为 37.04%,对应波长为 1089 nm;模拟光谱在低谷点的反射率为 38.4%,对应波长为 1064 nm。样品 F 的测试光谱在低谷点的反射率为 19.23%,对应波长为 1054 nm;模拟光谱在低谷点的反射率为 23.1%,对应波长为 1064 nm。样品 E 和样品 F 出现反射谱低谷的主要

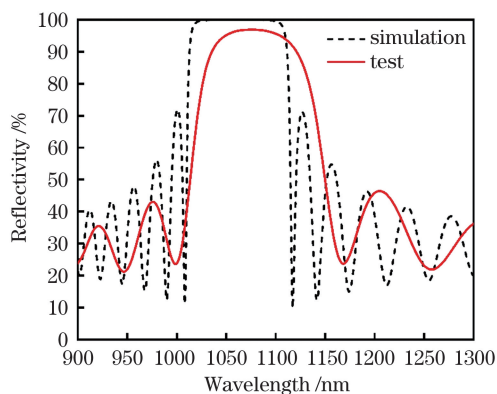


图 4 样品 D 的测试和模拟反射谱

Fig. 4 Reflection spectra of test and simulation for sample D

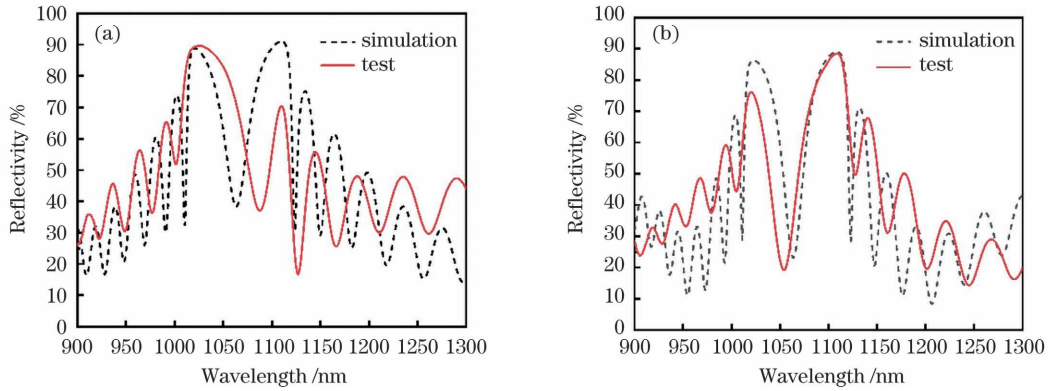


图 5 样品 E 和 F 的测试和模拟反射谱。(a) 样品 E; (b) 样品 F

Fig. 5 Reflection spectra of test and simulation for samples E and F. (a) Sample E; (b) sample F

原因是在设计 SESAM 吸收层 InGaAs/GaAsP 多量子阱时,吸收层的光学厚度为  $\lambda/2$  的整数倍,使得 SESAM 类似于反射型法布里-珀罗(F-P)标准具,前反射镜(GaAs 与空气界面)反射的光与后反射镜(DBR)反射的光发生干涉相消,形成最低反射率。最低反射率的波长与设计值有所偏差,主要是由生长的 InGaAs 量子阱和 GaAsP 量子垒的外延层厚度和材料组分与设计值有所偏差导致的。因此,与 DBR 外延生长类似,可以通过调整生长时间优化 InGaAs 量子阱和 GaAsP 量子垒的外延层厚度,使其低谷点尽可能与设计值保持一致。对比图 5(a)、(b)发现,样品 F 的低谷点所对应波长更接近于设计值,正是因为样品 F 的 InGaAs 量子阱和 GaAsP 量子垒外延层的生长时间在样品 E 的基础上进行了相应调整。

一般来说,F-P 标准具的反射率与半往返相位  $\varphi$ 、前反射镜和后反射镜的反射率  $R_f$  和  $R_b$ 、内部损耗系数  $\alpha$  以及前、后反射镜间的厚度  $L$  有关,其表达式为

$$R = \frac{R_{m\pi} + F \sin^2 \varphi}{1 + F \sin^2 \varphi}, \quad (2)$$

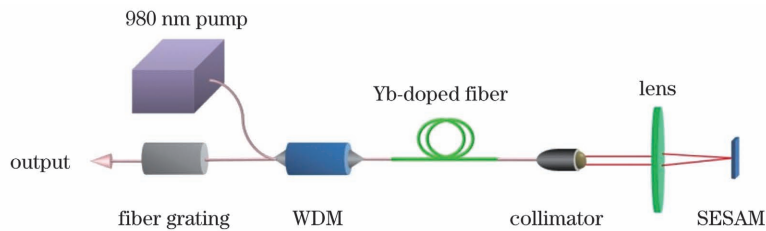


图 6 测试 SESAM 的锁模激光器

Fig. 6 Mode locking laser for testing the SESAM

将样品 F 切割成横截面为  $2 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$  的小块粘在热沉上,并将其应用到图 6 所示的实验装置中,相关测试结果如图 7 所示。图 7(a)所示为输出

$$F = 4R_e / (1 - R_e)^2, \quad (3)$$

$$R_{m\pi} = R_f \frac{(1 - R_e/R_f)^2}{(1 - R_e)^2}, \quad (4)$$

$$R_e = \sqrt{R_f R_b} \exp(-\alpha L). \quad (5)$$

由于 SESAM 吸收层 InGaAs/GaAsP 多量子阱的光学厚度为  $\lambda/2$  的整数倍,所以  $\varphi$  为  $\pi$  的整数倍,即  $\varphi = m\pi$ ,由式(2)可得 F-P 标准具的反射率  $R = R_{m\pi}$ ,就是相消干涉使  $R$  最小化的情况。通过调节腔内损耗  $\alpha$ ,可以使得 SESAM 在低强度下的反射率为 0。图 5 中样品 E 的最低反射率略高于样品 F,这是因为样品 E 的吸收层厚度比样品 F 薄,拥有更小的内部损耗。

### 3.4 锁模实验

构建了 1064 nm 波长的线型腔掺 Yb 光纤激光器来测试 SESAM 的性能,如图 6 所示,腔体中利用 0.8 m 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,一个最大泵浦功率为 500 mW 的单模 980 nm 激光二极管出射激光经过 980 nm/1064 nm 波分复用器(WDM)入射到增益光纤中,采用 1064 nm 附近的光纤布拉格光栅(FBG)作为反射镜,SESAM 作为另外一个腔镜。

功率随泵浦功率的变化曲线,当泵浦功率达到 120 mW 时,SESAM 实现了稳定锁模,激光器的输出功率为 4.8 mW,随着泵浦功率的增加,输出功

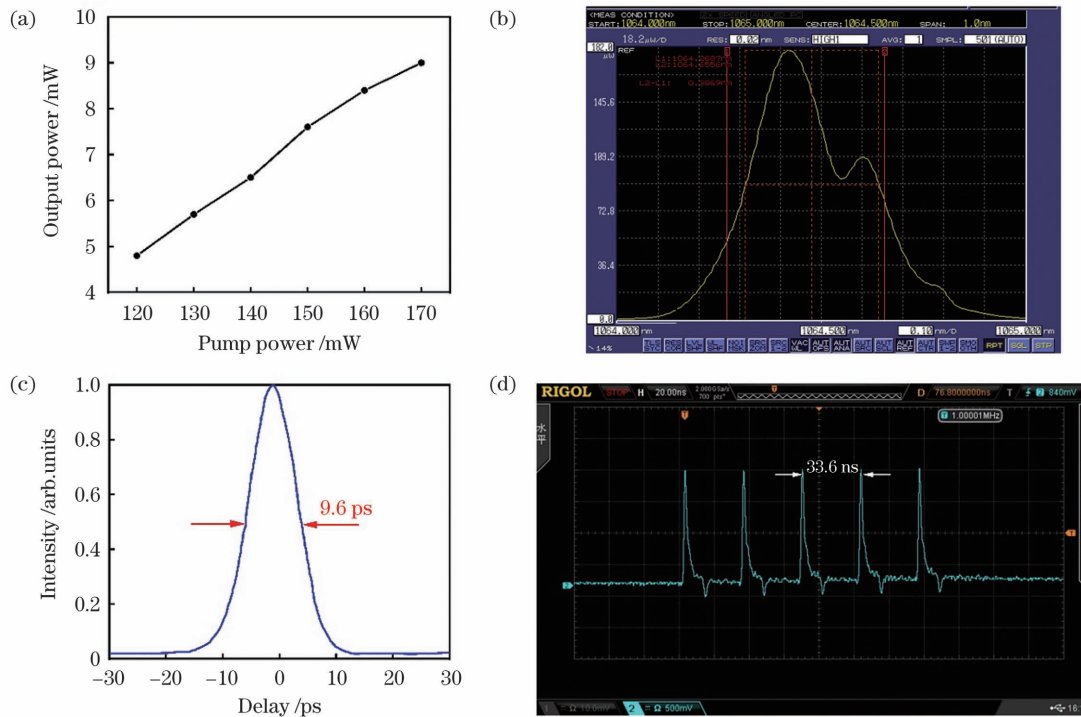


图 7 锁模测试结果。(a)输出功率随泵浦功率的变化曲线；(b)输出光谱；(c)自相关仪测量的输出脉宽；(d)示波器显示的锁模脉冲序列

Fig. 7 Results of mode locking test. (a) Curve of output power at different pump powers; (b) output optical spectrum; (c) output pulse width measured by autocorrelator; (d) oscilloscope trace with a mode-locked pulse train

率增大,当泵浦功率增加到 170 mW 时,输出功率为 9 mW;图 7(b)所示为输出光谱,其中心波长为 1064.5 nm;如图 7(c)所示,通过自相关仪测量的输出脉宽为 9.6 ps;图 7(d)所示为示波器测量到的典型均匀锁模脉冲序列,显示出良好的锁模稳定性,测量得到的相邻脉冲的时间间隔为 33.6 ns,脉冲重复频率为 29.8 MHz。

同样将样品 E 切割成横截面为  $2\text{ mm} \times 2\text{ mm}$  的小块粘在热沉上,并将其应用到实验装置中。当泵浦功率为 130 mW 时,SESAM 实现了锁模,随着泵浦功率的增大,输出功率增大;当泵浦功率为 170 mW 时,出现双脉冲现象。当泵浦功率为 160 mW 时,利用自相关仪测量得到的脉宽为 18.3 ps。包含样品 E 的实验装置实现锁模的泵浦功率较高,出现双脉冲现象的主要原因是样品 E 的量子阱周期数较少,因此其调制深度比较小,需要通过增加泵浦功率才可实现锁模,当泵浦功率增加到一定程度时,就会出现双脉冲现象,同时也是输出脉宽较宽的主要原因。

## 4 结 论

设计出吸收层 InGaAs 材料总厚度为 150 nm 和 300 nm 的两种应变补偿多量子阱结构的

SESAM,通过 MOCVD 方法对 MQW、DBR 进行外延材料生长,采用光致发光光谱仪、高分辨 X 射线衍射仪、分光光度计对外延材料特性进行表征,并优化外延材料生长参数。在 MQW、DBR 外延生长参数基础上对 SESAM 进行外延材料生长,并进行相同测试表征。将研制的两种 SESAM 应用到线型腔掺 Yb 光纤激光器中,吸收层 InGaAs 材料总厚度为 300 nm 的 SESAM 实现了稳定锁模。当泵浦功率达到 120 mW 时,激光器的输出功率为 4.8 mW,随着泵浦功率的增加,输出功率不断增大;当泵浦功率增加到 170 mW 时,输出功率为 9 mW,并获得了脉宽为 9.6 ps 的超短激光脉冲输出。吸收层 InGaAs 材料总厚度为 150 nm 的 SESAM 也能够实现锁模,锁模脉宽为 18.3 ps,当泵浦功率为 130 mW 时才能锁模,随着泵浦功率增大,输出功率有所增加,当泵浦功率为 170 mW 时,出现双脉冲现象。实验结果表明,吸收层 InGaAs 材料厚度为 300 nm 的 SESAM 更容易实现稳定锁模并获得脉宽较窄的脉冲输出。

## 参 考 文 献

- [1] 王勇刚, 马骁宇, 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] Jacobovitz-Veselka G R, Kellerm U, Asom T. Broadband fast semiconductor saturable absorber[J]. Optics Letters, 1992, 17(24): 1791-1793.
- [3] Keller U, Chiu T H. Resonant passive mode-locked Nd:YLF laser [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1992, 28(7): 1710-1721.
- [4] 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): 505-507.
- [5] Keller U, Knox W H, Hooft G W. Ultrafast solid-state mode-locked lasers using resonant nonlinearities [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1992, 28(10): 2123-2133.
- [6] 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]. Journal of the Optical Society of America B, 1995, 12(2): 311-322.
- [7] 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.
- [8] Saraceno C J, Schriber C, Mangold M, et al. SESAMs for high-power oscillators: design guidelines and damage thresholds[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2012, 18(1): 29-41.
- [9] Herda R, Okhotnikov O G. Dispersion compensation-free fiber laser mode-locked and stabilized by a high-contrast saturable absorber mirror [J]. Proceedings of SPIE, 2004, 5460: 14-22.
- [10] Suomalainen S, Guina M, Hakulinen T, et al. 1  $\mu\text{m}$  saturable absorber with recovery time reduced by lattice mismatch[J]. Applied Physics Letters, 2006, 89(7): 071112.
- [11] 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.
- [12] Wang Y, Lin N, Gao W L, et al. Strain compensated robust semiconductor saturable absorber mirror for fiber lasers [J]. Chinese Optics Letters, 2019, 17(7): 071404.
- [13] 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 Physics, 2021, 31(2): 025102.
- [14] Ju G F, Chai L, Wang Q Y, et al. Stable mode-locking in an Yb:YAG laser with a fast SESAM[J]. Chinese Optics Letters, 2003, 1(12): 695-696.
- [15] 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.
- [16] Li J F, Liang X Y, He J P, et al. Stable, efficient diode-pumped femtosecond Yb:KGW laser through optimization of energy density on SESAM [J]. Chinese Optics Letters, 2011, 9(7): 071406.
- [17] Keller U. Ultrafast all-solid-state laser technology [J]. Applied Physics B, 1994, 58(5): 347-363.
- [18] Lederer M J, Kolev V, Luther-Davies B, et al. Ion-implanted InGaAs single quantum well semiconductor saturable absorber mirrors for passive mode-locking [J]. Journal of Physics D, 2001, 34(16): 2455-2464.
- [19] Okhotnikov O, Grudinin A, Pessa M. Ultra-fast fiber laser systems based on SESAM technology: new horizons and applications [J]. New Journal of Physics, 2004, 6: 177.
- [20] van Stryland E W, Woodall M A, Vanherzeele H, et al. Energy band-gap dependence of two-photon absorption [J]. Optics Letters, 1985, 10(10): 490-492.
- [21] 童玉珍, 张国义, 陈妮兮. MOCVD 生长 AlGaAs-GaAs DBR 及其特性[J]. 应用基础与工程科学学报, 1994, 2(4): 288-292.
- Tong Y Z, Zhang G Y, Chen W X. Structure and characteristic of AlGaAs-GaAs DBR grown by MOCVD [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 1994, 2(4): 288-292.



# Strain-Compensated Multiquantum Well Structure Semiconductor Saturable Absorber Mirror

Lin Nan<sup>1,2</sup>, Zhong Li<sup>1,2\*</sup>, Li Haiming<sup>3</sup>, Ma Xiaoyu<sup>1,2</sup>, Xiong Cong<sup>1</sup>,  
Liu Suping<sup>1</sup>, Zhang Zhigang<sup>4</sup>

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

<sup>2</sup> College of Materials Science and Opto-Electronic Technology, University of Chinese Academy of Sciences,  
Beijing 100049, China;

<sup>3</sup> Guangdong Huakuai Photonics Technology Co., Ltd., Zhongshan 528436, Guangdong, China;

<sup>4</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 has heightened interest in SESAM applied to Yb-doped fiber lasers. However, domestic research on SESAM devices is mostly focused on solid-state lasers. Most studies on SESAM for fiber lasers focus on its application system, and there are few reports on the development process of SESAM for fiber lasers and the characterization of crucial epitaxial material features. Thus, the structural design of SESAM, epitaxial material growth process parameters, and characterization of key material properties reported in this study have important reference values for further SESAM research.

**Methods** Because the InGaAs quantum well layer developed on GaAs substrate is compressed, the entire In<sub>0.25</sub>Ga<sub>0.75</sub>As/GaAs multiquantum well (MQW) has a large compressive strain, which leads to the deterioration of the quality of the thick InGaAs material and affects the mode-locking effect of SESAM devices. Simultaneously, the number of MQW cycles will be limited by strain relaxation. Two kinds of strain compensated InGaAs/GaAsP MQW SESAMs with total thicknesses of 150 and 300 nm are designed in this study. The tensile strain of the GaAsP quantum barrier is employed to compensate for the compressive strain of InGaAs quantum well, resulting in not only superior epitaxial material but also an increase in the number of MQW cycles. The epitaxial materials are grown by metal-organic compound vapor deposition (MOCVD). The characteristics of the epitaxial materials are described using photoluminescence spectroscopy, high-resolution X-ray diffraction, and a spectrophotometer. The growth parameters of epitaxial materials are optimized to obtain high-quality epitaxial materials based on the characterization results of the epitaxial materials. The developed SESAM is applied to the mode-locking experiment of a linear cavity Yb-doped fiber laser, and a stable mode-locking pulse output is achieved, verifying the rationality of the structure design of SESAM and the growth of epitaxial materials.

**Results and Discussions** The photoluminescence spectrum (PL spectrum) and high-resolution X-ray diffraction rocking curves of epitaxial materials with MQW and SESAM structures are tested (Figs. 2 and 3) at room temperature. PL spectrum and high-resolution X-ray diffraction rocking curve test results show that the epitaxial material with 150 nm InGaAs MQW structure has the relatively good material quality and interface morphology. The second-best MQW structure is 300 nm InGaAs with an AsH<sub>3</sub> flow of 40 mL/min during the growth process, while the worst is an MQW structure with an AsH<sub>3</sub> flow of 80 mL/min. The main reason is that the grown GaAsP quantum barrier strain compensation layer cannot completely compensate for the compressive strain of InGaAs quantum wells, resulting in a compressive net strain of MQW. The net strain increases with an increase in the quantum well period, thus deteriorating the material quality. By reducing the AsH<sub>3</sub> flow during the growth process of the GaAsP quantum barrier, the P component of GaAsP can be effectively increased, and the strain compensation effect can be increased, so that the net strain is reduced and the material quality is improved. The reflection spectrum test and simulation results of epitaxial materials with DBR and SESAM structures (Figs. 4 and 5) show that the test and simulation

results are deviated because of the fluctuation in the growth process of epitaxial materials. The reasons for the deviation are analyzed. Two structures of SESAM are applied to Yb-doped fiber lasers for testing (Fig. 6), and both SESAM structures achieve stable mode-locking. The SESAM achieves mode-locking at a pump power of 130 mW using an absorption layer InGaAs material with a total thickness of 150 nm. The output power increases as the pump power increases. The mode-locked pulse width is 18.3 ps when the pump power is 160 mW, and the double pulse phenomenon appears when the pump power increases to 170 mW. The SESAM with a total thickness of 300 nm of the absorption layer InGaAs material achieves stable mode-locking at a pump power of 120 mW and a laser output power of 4.8 mW. Further, the output power increases as the pump power increases. The output power is 9 mW when the pump power increases to 170 mW, resulting in an ultrafast laser pulse output with a pulse width of 9.6 ps.

**Conclusions** In this study, two kinds of strain-compensated MQW SESAM structures with a total thickness of 150 and 300 nm of InGaAs absorber layer are designed. The epitaxial material of MQW and DBR is grown by MOCVD. The features of epitaxial material are characterized by photoluminescence spectrometer, high-resolution X-ray diffractometer, and spectrophotometer; its growth parameters are optimized based on the characterization results. Further, epitaxial materials of SESAM are grown and characterized using the same test based on MQW and DBR epitaxial growth parameters. The two SESAMs are applied to the linear cavity Yb-doped fiber laser, and stable mode-locking is achieved. The experimental results show that SESAM with the thickness of the InGaAs absorber layer of 300 nm is more likely to achieve stable mode-locking and obtain pulse output with narrow pulse width.

**Key words** lasers; ultrafast lasers; semiconductor saturable absorber mirror; metal organic chemical vapor deposition; strain-compensated multi-quantum well structure