

文章编号: 0253-2239(2009)11-3121-03

基于金属/介质混合反射镜的高调制深度半导体可饱和吸收镜锁模的飞秒光纤激光器

蔡岳 杨暉建 周春 张广晓 张梦 张志刚

(北京大学信息科学技术学院量子电子学研究所, 区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室, 北京 100871)

摘要 介绍了一种新型半导体可饱和吸收镜 (SESAM) 的原理与特性, 并用它来实现掺铒光纤激光器的锁模飞秒脉冲的生成。这种新型宽带 SESAM 调制深度可以达到 20%, 用在 1.5 μm 波段的环形腔掺铒光纤激光器里, 实现自启动锁模。锁模光谱以 1559 nm 为中心, 半峰全宽为 9 nm, 锁模激光脉冲串重复频率为 25.6 MHz, 输出功率 14 mW, 自相关仪测得脉宽为 170 fs。

关键词 超快光学; 锁模; 半导体可饱和吸收体; 光纤激光器

中图分类号 O432 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092911.3121

Femtosecond Erbium-Doped Fiber Laser Mode-Locked with a High Modulation Depth SESAM

Cai Yue Yang Weijian Zhou Chun Zhang Guangxiao Zhang Meng Zhang Zhigang

(*Institute of Quantum Electronics, State Key Laboratory of Advanced Optical Communication System and Networks, School of Electronics Engineering and Computer Science, Peking University, Beijing 100871, China*)

Abstract We fabricated a 20% modulation depth semiconductor saturable absorber mirror on a metal/dielectric mirror base, for ease of the growth restrictions. Using such a saturable absorber mirror, we obtained self-starting mode-locking in a ring erbium-doped fiber laser. The output pulse width was 170 fs and the repetition rate was 25.6 MHz.

Key words ultrafast optics; mode locking; semiconductor saturable absorber; fiber laser

1 引 言

锁模光纤激光器由于能够小型化廉价的实现飞秒脉冲, 在科研和生产中得到了广泛的关注。常见的光纤激光器的启动锁模机制为非线性偏振演化 (Nonlinear polarization evolution, NPE)^[1]。由于光纤容易受外界环境温度与振动的影响, 容易失锁。而基于半导体可饱和吸收镜锁模的激光器 (Semiconductor saturable absorber mirrors, SESAMs) 已经得到了长足的发展^[2,3]。如果在光纤激光器里引入 SESAM 锁模, 将有可能使锁模脉冲

更为稳定, 不易受环境影响。

2 SESAM 的制备与特性

SESAM 的基本结构如图 1 所示^[4], 在 InP 基片上由分子束外延法 (Molecular beam epitaxy, MBE) 生长一层晶格匹配的 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 作为止蚀层, 接着是一层 $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ 空间层。吸收体是一层厚度为 216 nm 的 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$, 它提供大约 20% 的吸收率。半导体层总的厚度为 0.75λ , 吸收体层 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 的生长温度为 250 $^{\circ}\text{C}$ 。为了增

收稿日期: 2008-10-18; 收到修改稿日期: 2008-11-12

基金项目: 国家支撑计划 (2006BAF03A20)、国家自然科学基金 (60490280)、国家 863 计划 (2008AA031901) 和北京市海淀区科委资助项目 (K2008096)。

作者简介: 蔡岳 (1977—), 男, 博士研究生, 主要从事超快光学与光纤激光器等方面的研究。

E-mail: cai_yue@pku.edu.cn

导师简介: 张志刚 (1955—), 男, 教授, 主要从事超短脉冲激光方面的研究。E-mail: zhgzhang@pku.edu.cn

强金膜的反射率，一对四分之一波长厚度的 $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ 覆盖在吸收体层 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 上，另外在金膜敷设之前用厚度为 0.23λ 的 Al_2O_3 层来补偿金膜

的相移。所有的金属与介质层都是由电子束蒸发沉积形成。

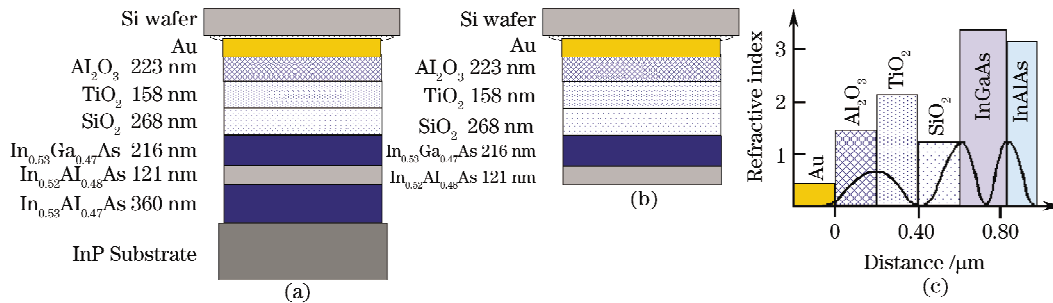


图 1 SFSAM 的生长结构图(a)腐蚀前;(b)腐蚀后;(c)折射率与电场分布

Fig. 1 Growth structure of the SESAM. (a) Before etching; (b) after etching; (c) index profile and electric field distribution inside the SESAM

生长好的晶片切割成 $4\text{ mm}\times 4\text{ mm}$ 的方块，用环氧树脂粘在硅基片上。固化后先用盐酸腐蚀掉下面的 InP 基片，再用甲基琥珀酸腐蚀掉止蚀层 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ ，在腐蚀区得到一个非常光滑的镜面。

图 2 是测量的小信号强度下的 SESAM 的反射率，得出在 $1530\sim 1600\text{ nm}$ 范围内的高吸收率(低反射率)。SESAM 的时间特性由抽运-探针实验测量，显示吸收恢复时间小于 2 ps 。

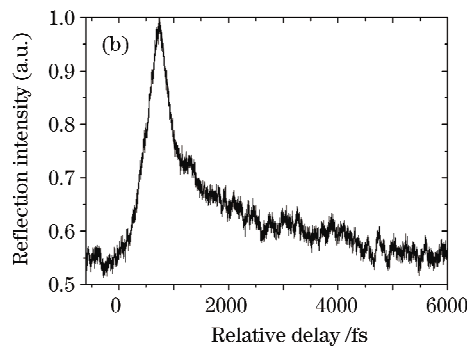
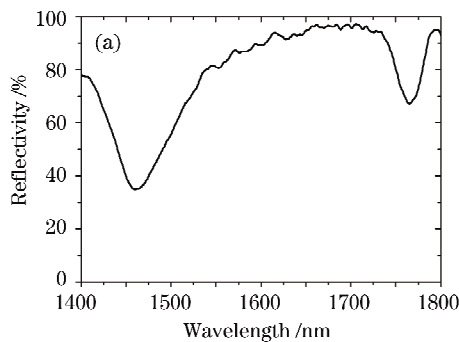


图 2 SESAM 在小信号强度下的反射率(a)与 SESAM 的时间响应特性(b)

Fig. 2 Measured relative low-intensity reflectivity (a) and temporal response (b) of the SESAM

3 实验结果与分析

将制备好的 SESAM 按照图 3 所示应用到 T 型腔^[5]掺铒光纤激光器中。先用全反银镜替代图中 SESAM，按照正常的 NPE 锁模机制调节好波片组(包括三个四分之一波片 WP1, WP3, WP4 和一个二分之一波片 WP2)实现锁模。在这种情况下，锁模对波片组的调节要求很高，只有在少数合适的角度，才能实现锁模。将银镜换成 SESAM，明显观察到波片组的锁模调节更方便，出现锁模的概率显著增加，即使去掉 WP1 和 WP4 使得单独的 NPE 的锁模机制不完整，但是在 SESAM 的作用下，锁模仍然稳定存在。而为了检验 SESAM 的作用，我们再次用全反银镜代替 SESAM，在没有 WP1 和 WP4 的情况下，锁模很难调节，即使偶尔能够调出，锁模

脉冲也是极不稳定的。

在 370 mW 抽运功率下，典型的锁模脉冲激光输出功率为 14 mW ，脉冲光谱以 1559 nm 为中心，半高全宽为 9 nm ，锁模激光脉冲串重复频率为

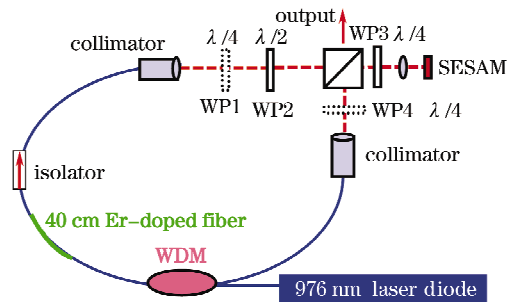


图 3 激光器原理框图

Fig. 3 Schematic of the fiber laser

25.6 MHz,由自相关仪测得脉宽为 170 fs(假定为双曲正割脉冲)。这个值是按照光谱来计算的傅里叶极限脉宽的 2.1 倍。由于腔内总色散为 -0.165 ps^2 ,受工作在负色散区的孤子型锁模影响,光谱带宽不可能太大,而由图 2 可以看到的 SESAM 实际支持的带宽能够达到 200 nm,如果能够改变腔型,使锁模为展宽脉冲(Stretched pulse)型或者自相似(Self-similar)型,有望得到更宽的锁模光谱。

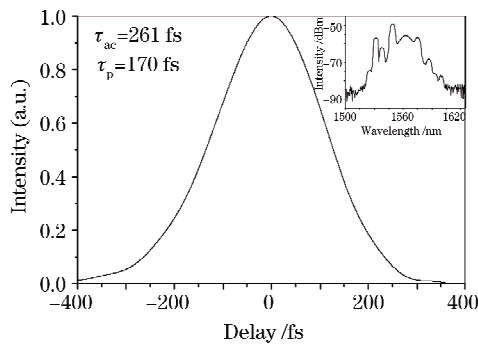


图 4 锁模激光脉冲的脉宽与光谱
Fig. 4 Autocorrelation trace and the spectrum (inset) of the output pulses

4 结 论

本文提出并制备了一种基于半导体可饱和吸收镜的新型高调制深度的金属/介质混合反射镜。这种 SESAM 的优点是生长时间短,带宽比较宽,可避免普通布拉格反射镜的带宽窄,易漂移等缺点。将这种 SESAM 应用在环形腔掺铒光纤激光器中实现锁模,能够自启动自恢复。锁模光谱半峰全宽 9 nm,锁模激光脉冲串重复频率 25.6 MHz,脉宽为 170 fs。

参 考 文 献

- 1 K. Tamura, E. P. Ippen, H. A. Haus *et al.*, 77 fs pulse generation from a stretched-pulse mode-locked all fiber ring laser [J]. *Opt. Lett.*, 1993, **18**, (13): 1080~1082
- 2 <http://www.immra.com>
- 3 <http://www.fianium.com/pdf/tech/>
- 4 Z. Zhang, T. Nakagawa, K. Torizuka *et al.*, Gold reflector based semiconductor saturable absorber for femtosecond mode-locked Cr⁴⁺:YAG lasers[J]. *Appl. Phys. B: Laser Opt.*, 2000, **70**: s59~s62
- 5 J. Chen, J. W. Sickler, P. Fendel *et al.*, Generation of low-timing-jitter femtosecond pulse trains with 2 GHz repetition rate via external repetition rate multiplication[J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(9): 959~961