

文章编号: 0258-7025(2004)Supplement-0143-03

半导体可饱和吸收镜的被动锁模研究

杨云锋, 朱晓, 齐丽君, 宋婷婷, 丘福生

(华中科技大学激光技术国家重点实验室 武汉 430074)

摘要 介绍了半导体可饱和吸收镜的结构及参量,分析了其被动锁模的原理,并对影响被动锁模稳定输出,造成Q脉冲包络输出原因进行了分析讨论,从三个方面提出了优化方案。

关键词 半导体可饱和吸收镜; 被动锁模; 半导体抽运 Nd:YAG 激光器

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A

Study on Passively Mode-Lock Using a Semiconductor Saturable Absorber Mirror

YANG Yun-feng, ZHU Xiao, QI Li-jun, SONG Ting-ting, QIU Fu-sheng

(State Key Laboratory of Laser Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract The structure and the parameters of semiconductor saturable absorber mirror (SESAM) are introduced. The principle of passively mode-lock is analysed. The optimized project is raised in three different aspects after a discussion about the reason of Q-switched profile mode-locking.

Key words laser technique; semiconductor saturable absorber mirror; passively mode-lock; diode pumped Nd:YAG lasers

1 引言

半导体可饱和吸收镜(SESAM)是以半导体中的吸收漂白为基础的一种新型被动锁模器件,它包含了半导体可饱和吸收体与腔镜。与主动锁模相比,SESAM具有响应时间较小、结构简单、插入损耗小、自启动和锁模稳定输出的特点。分子束外延技术(MBE)及能带工程使得材料的关键参量,例如恢复时间、饱和能量、插入损耗,能够被自由设计以满足不同情况的需要。早在1992年,瑞士的Keller^[1]等人就实现了Nd:YLF和Nd:YAG的被动锁模运行,1995年,他们还利用可饱和吸收体解决克尔透镜锁模的自启动问题^[2]。在钛蓝宝石激光器中,利用可饱和吸收体及克尔锁模可以产生6.5 fs的短脉冲^[3]。将SESAM用于半导体抽运的Nd:YAG,可以在保持系统结构简单、紧凑的前提下获得稳定的皮秒锁模输出。

2 SESAM的结构和参量

2.1 半导体可饱和吸收镜的结构

SESAM的主体是半导体可饱和吸收层,它具有非线性谐振效应的多层量子阱结构。当光束持续

照射时,器件的反射率随着光束强度的增加而增高;在脉冲持续期间,载流子数目增加,产生吸收漂白,实现损耗的非线性变化。但是仅对量子阱结构而言,它饱和强度小,损伤阈值低,插入损耗较大,直接将半导体插入腔内将会增加腔内损耗,这就需要采取一定的结构设计半导体可饱和吸收镜。

通常的方法是将半导体可饱和吸收层放置在防谐振的法布里-珀罗谐振腔中。整体由衬地、多层结构的布拉格反射层、多层量子阱吸收层以及顶部反射层组成。半导体反射镜整体结构如图(1)所示。

底部的布拉格反射层由多对AlAs-GaAs反射层组成,每层介质厚度对特定波长光程为 $\lambda/4$ 。其反射层的数目决定了反射层的整体反射率及相移 $R_b \exp(i\varphi_b)$,一般该层反射率90%以上。在某些半导体可饱和吸收镜中,布拉格反射层被反射带宽更高的银反射层所代替。

带有一定反射率及相移 $R_a \exp(i\varphi_a)$ 的上反射镜减少入射光强,降低腔内损耗,提高了可饱和吸收体的饱和能量密度。从另外一个角度说,该反射率决定了能直接作用到可饱和吸收体的能量、饱和能

作者简介: 杨云锋(1978-),华中科技大学硕士研究生,主要从事固体激光及其单元技术方面的研究。

Email: yyfeng_hust@163.com

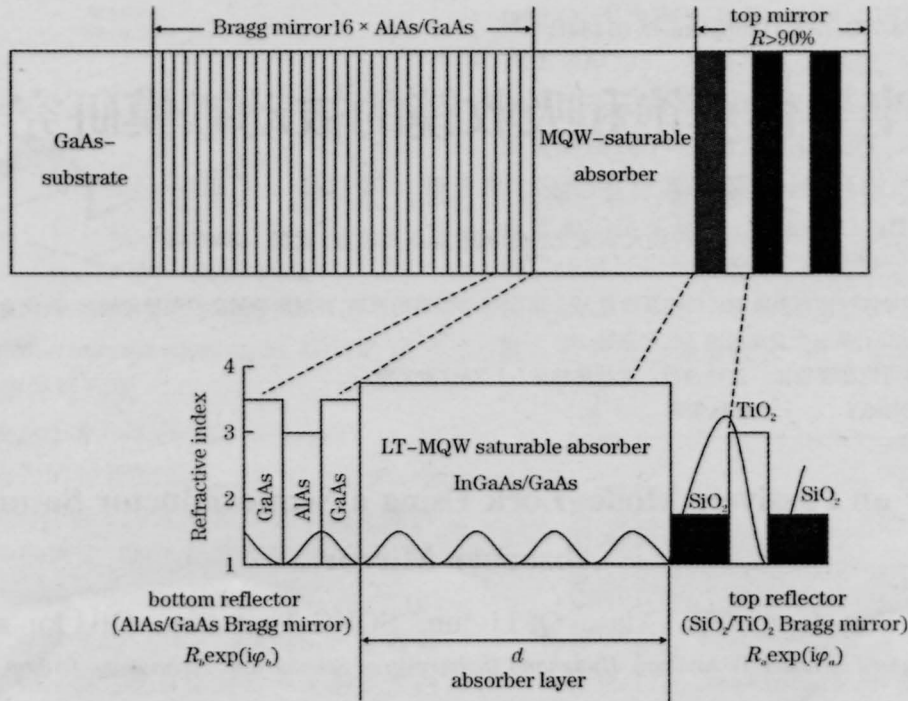


图 1 中心波长为 1064 nm 的一种半导体可饱和吸收镜结构图
Fig.1 Schematic of a special SESAM, the center wavelength is 1064 nm

量密度及插入损耗的大小。

可饱和吸收体的 3 层结构均会带入附加的相移,为了达到防谐振的效果,可饱和吸收体的厚度 d 必须适当调整,以满足如下反谐振条件:

$$\varphi_{total} = \varphi_a + \varphi_b + 2knd = (2m+1)\pi \quad (1)$$

其中 φ_{total} 为反射镜一个回程总相移, \bar{n} 为吸收层平均折射率, $k=2\pi/\lambda$ 为波矢, λ 为波长, m 为整数。

2.2 半导体可饱和吸收镜的参量

可饱和吸收体模块化结构及能带工程使得器件参量要求可以通过特定的设计得到满足。

非饱和损耗是由布拉格镜的吸收和透射引起的。透射损耗一般较小,低于 0.1%;布拉格镜的透射率随着层数的增加而减少。非饱和损耗一般只有 0.3%。

分子束外延(MBE)技术能精密设计饱和吸收体的载流子复合时间和调制深度。连续激光器的稳定锁模要求载流子的复合时间略高于锁模脉冲皮秒量级甚至更低的脉冲宽度,而直接生长的半导体材料载流子复合时间在 ns 量级,这不足以提供足够快的饱和速度。不同的 MBE 生长温度可以使半导体材料具有不同的载流子复合时间。同时还能设计多层量子阱的非线性吸收参量,也就是调制深度 ΔR 。在决定 MBE 生长温度时必须给予综合考虑 3 个因素:载流子复合时间、较好的非线性调制深度以及非

饱和损耗。量子阱的生长温度一般为 250℃。

饱和能量密度是用来来衡量可饱和吸收体饱和程度的一个重要的参量。如图 2 当可饱和吸收体中的脉冲能量密度 E_p 达到预计的脉冲能量密度时,材料达到饱和。 E_p 一般是饱和脉冲能量密度 $E_{sat,A}$ 的几倍,然而过大的 E_p 可能导致多脉冲的产生,同时 E_p 的上限受到材料损伤阈值的限定。可饱和吸收的过程可用公式(2)描述:

$$A(E_p) = A_0 / (1 + E_p / E_{sat,A}) \quad (2)$$

其中 A 表示饱和吸收程度, A_0 表示小信号吸收系数, E_p 表示脉冲能量密度, $E_{sat,A}$ 表示饱和吸收体的饱和能量密度。

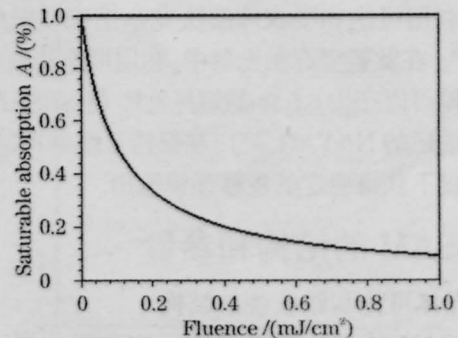


图 2 饱和吸收与脉冲能量密度关系图
($A_0=1\%$, $E_{sat,A}=0.1 \text{ mJ/cm}^2$)

Fig.2 Saturable absorption A in dependency of the fluence ($A_0=1\%$, $E_{sat,A}=0.1 \text{ mJ/cm}^2$)

3 锁模的原理和改善锁模脉冲的措施

3.1 锁模的原理

半导体可饱和吸收镜的脉冲响应时间主要包含两个部分^[1]:由能带内部载流子之间的散射和热能化引起的快饱和和吸收,响应时间大概为 100 fs 量级;由能带之间载流子的俘获和复合过程引起的慢饱和区,响应时间为皮秒量级。对于半导体可饱和吸收体的非线性吸收漂白而言,主要起作用的是光致激发载流子对上能带复合而造成的慢饱和吸收。

在 DPL 的被动锁模中,具有皮秒量级的慢响应饱和区和相对较低的饱和阈值半导体可饱和吸收体相对连续激光的起伏噪声是一个快可饱和吸收体,拥有皮秒量级的净增益窗口保持时间。在锁模的过程中,自脉冲在可饱和吸收体中的碰撞形成的瞬时光栅对脉冲本身具有一定的整形作用,因此可饱和吸收体的非线性可饱和吸收特性很容易从连续激光的起伏噪声中选出较大脉冲进入被动锁模过程,并压缩脉宽达到皮秒量级,形成稳定的皮秒脉冲锁模。由于被动锁模主要起作用的是快饱和和吸收体,与谐振腔参量关系不大。因此,调整腔参量对被动锁模状态影响不大,整个稳定区均可实现被动锁模。

3.2 改善锁模脉冲的措施

DPL 腔内实现稳定被动锁模必须解决的主要问题是克服由于饱和吸收体介入引起的 Q 脉冲包络锁模(Q-switched profile mode-locking)。实现连续激光器 ps 量级稳定锁模,腔内单脉冲能量 E_p 必须满足公式(3)描述的阈值条件^[4]:

$$E_p^2 > E_{sat,L} A_L E_{sat,A} A_A \Delta R \quad (3)$$

$E_{sat,L}$ 表示激光介质的饱和能量密度, A_L 表示激光照射模面积, A_A 表示可饱和吸收体照射模面积,

ΔR 表示调制深度。

为了实现稳定锁模,可从三个方面进行优化克服 Q 脉冲包络锁模。

首先,选择适当的增益介质。单脉冲能量密度的阈值正比与增益介质的饱和能量密度。在驻波腔中,增益介质的饱和能量密度可表示为 $E_{sat,L} = h\nu / 2\sigma_L \sigma_L$, σ_L 表示增益介质发射横截面积。相对于产生 fs 脉冲的激光材料而言,产生 ps 脉冲的激光材料,比如 Nd:YAG 或 Nd:YVO₄, 具有相对较大的发射横截面积,降低了连续锁模阈值。

其次,选择具有合适参量的 SESAM。可饱和吸收体的饱和能量密度和调制深度都可以通过设计获得各种不同的参量。较低的饱和能量密度和调制深度可以直接降低连续锁模的阈值。通常用于连续锁模的调制深度在 0.5%和 2%之间,可饱和吸收体饱和能量密度约为 100 $\mu\text{J}/\text{cm}^2$ 。

第三,采取适当的腔型设计。激光介质的照射面积应尽可能的小,而受抽运方式的影响和散热的需要, A_L 通常较大。可以从另一方面通过减少 A_A 来补偿较大的 A_L 而带来的影响。例如在 SESAM 前面放置聚焦镜,减少饱和吸收体照射面积,提高单脉冲能量密度。

参考文献

- 1 Keller U. Ultrafast all-solid-state laser technology [J]. *Appl. Phys. (B)*, 1994, 58(3): 347-363
- 2 Brovelli L R, Jung I D, Kopf D et al.. Self-starting soliton modelocked Ti:sapphire laser using a thin semiconductor saturable absorber[J]. *Electron. Lett.*, 1995, 31(4): 287-288
- 3 U. Keller, K. J. Weingarten et al.. *IEEE J. Quant. Electr. Selected Topics in Quant. Electr.*, 1996, 2 :435-453
- 4 Hönninger C, Paschotta R, Morier-Genoud F et al.. Q-switching stability limits of continuous-wave passive mode locking[J]. *J. Opt. Soc. Am.B*, 1999, 16(1):46-56