

表面态型半导体可饱和吸收镜实现 Yb : YAG 激光器被动锁模

王勇刚¹ 马晓宇¹ 居桂方² 张志刚²

(1 中国科学院半导体研究所, 北京 100083)

(2 天津大学精密仪器与光电子工程学院超快激光实验室, 天津 300072)

摘要: 制作了一种新型的半导体可饱和吸收镜: 表面态型半导体可饱和吸收镜。用表面态型半导体可饱和吸收镜作为被动锁模吸收体, 实现了半导体端面泵浦 Yb : YAG 激光器被动连续锁模。在泵浦功率为 10W 时, 获得了连续锁模脉冲序列, 重复频率 200MHz, 锁模脉冲平均输出功率为 70mW。在未加任何色散补偿的情况下, 脉冲宽度为 4.35ps。

关键词: 半导体可饱和吸收镜; 表面态; 被动连续锁模; Yb : YAG 激光器

PACC: 4330B

中图分类号: TN 248.1

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2004)08-1000-04

1 引言

20世纪80年代以来, 超短脉冲激光技术得到了迅猛发展, 在分子反应动力学、激光测距、生物学、医学、显示以及新材料领域有广泛应用。超短脉冲激光可以进行精密加工, 加工时热影响区比聚焦区更小, 可以达到几个微米, 且不易使材料因产生热应力而破裂。生物医学专家已将它作为超精密外科手术刀, 用于视力矫正手术, 既能减少组织损伤又不会留下手术后遗症, 甚至可对单个细胞动精密手术。由飞秒激光可以产生X射线, 可用于激光核聚变, 产生几百次以上的高阶谐波, 其波长短于3nm。用皮秒或飞秒脉冲激光照射金属或半导体光阴极材料产生微电子束团, 作为自由电子激光器的重要前级设备。皮秒脉冲激光也可用于激光卫星测距, 显微技术等。目前, 实用化程度最高的皮秒脉冲激光器是掺钕系列的YAG, YLF等激光器。利用半导体饱和吸收镜(semiconductor saturable absorption mirror, SESAM)作为饱和吸收体直接进行固体激光器被动锁模, 可以轻易地获得皮秒级超短脉冲。半导体可饱和吸收镜加在自锁模(self-mode-locked)固体激光器中, 可以产生自启动(self-starting)的效果, 解决自锁模固体激光器稳定性不好的问题。1992年, Keller^[1]等在腔内引入反共振的法布里-帕罗标准具有可饱和吸收体(antiresonant Fabry-Perot saturable absorber, a-FPSA), 实现了Nd:YLF自启动的被动锁模, 脉宽3.3ps, 泵浦源为钛宝石激光器。现在, 几乎所有主要的固体激光器和光纤激光器都实现了用半导体可饱和吸收镜进行被动锁模或调Q^[2~4]。

超短激光脉冲由于具有脉宽短、峰值功率高、带宽大等特点, 在科研和生产中有着广泛的应用。传统的Ti:sapphire超短脉冲激光系统多采用倍频后的掺钕激光器或氩离子激光器泵浦, 成本高, 体积大。特别是它的市场价格动辄几百万元, 这严重限制了它的应用。所以低成本、紧凑型的全固化超短脉冲激光系统近年来成为研究热点。这其中, 由于Yb³⁺介质具有很多优良的特点而被广泛地研究。它的输出波长在1030~1060nm之间, 可以作为Nd:glass放大器的振荡级; 它具有比Nd³⁺更宽的发射谱线, 能支持更短的锁模脉冲; 同时它还具有量子缺陷小、

王勇刚 男, 1973年出生, 博士研究生, 主要从事固体激光器及光纤激光器锁模和调Q用吸收体(半导体可饱和吸收镜, GaAs等)的研制。

Email: wygxjwchina@vip.sina.com

2003-08-22 收到, 2003-10-31 定稿

©2004 中国电子学会

掺杂浓度高等优点。但由于 Yb^{3+} 是准三能级运转机制, 这种机制会造成对振荡光严重地再吸收, 所以良好的冷却和较强的泵浦是保证激光器运转的必要条件。

传统的半导体可饱和吸收镜基本上都采用分子束外延(molecular beam epitaxy, MBE)或金属有机化学气相外延(metal organic chemical vapor epitaxy, MOCVD)方法低温生长吸收镜的最关键部分——非线性吸收区。由于低温生长, 伴随产生了很大的非饱和损耗, 使得增益小的 Cr : SAF 等激光器使用半导体可饱和吸收镜后很难出光或输出功率仅有毫瓦级; 同时, 也使得器件的寿命很难提高, 难以实现产品化。用常温生长吸收区, 再用离子注入的办法制作非线性吸收区也存在类似的问题。本文中, 我们用自己研制的表面态型半导体可饱和吸收镜实现了 Yb : YAG 激光器被动锁模, 得到了连续锁模脉冲序列。由于所用的泵源光束质量不好, 锁模平均输出功率只有 70mW, 脉冲宽度为 4.35ps, 脉冲重复频率 200MHz。采用表面态型半导体可饱和吸收镜大大降低了非饱和损耗, 虽然 Yb : YAG 的激光阈值很高, 我们仍然能够在泵源光束质量不好的情况下观察到锁模现象, 进一步的研究还在进行中。

2 表面态型半导体可饱和吸收镜基本原理

通常用于 1060nm 波长附近的半导体可饱和吸收镜采用 GaAs 为衬底, 其上生长由 GaAs 和 AlAs 交错构成的半导体布拉格反射镜(distributed bragg reflector, DBR), 反射率高达 99% 以上。布拉格反射镜的上面是 $\text{In}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}/\text{GaAs}$ 量子阱, 其中 $\text{In}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}$ 层是采用低温生长或离子注入的, 一方面, 可以吸收波长短于 1060nm 的入射光, 产生电子和空穴载流子; 另一方面, 低温生长或离子注入形成的 A_{Ga} 和 V_{Ga} 可以作为载流子的快速弛豫陷阱, 弛豫时间在几皮秒到几十皮秒。这两个因素共同实现对入射光按照光强大小进行非线性吸收, 从而实现被动锁模。但是, 低温生长或离子注入会带来很大的非饱和损耗, 非饱和损耗会降低脉冲激光输出功率, 并且降低器件使用寿命。

基于上述原因, 我们制作了表面态型半导体可饱和吸收镜。与低温型半导体可饱和吸收镜不同之处在于整个材料都采用正常温度生长。晶体质量很

好, 大大减少了非饱和损耗。将吸收区 $\text{In}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}$ 紧紧靠在空气表面, 两者之间只有 2nm 厚的 GaAs 相隔, 使得表面态和体态有相当地重叠, 以保证光入射后吸收区 $\text{In}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}$ 产生的载流子能够很快地通过表面向空气中放电而弛豫。

3 表面态型半导体可饱和吸收镜设计与制作

我们采用 MOCVD 方法生长表面态型半导体可饱和吸收镜, 如图 1 所示。生长温度为 700°C, 对 MOCVD 生长的 GaAs 系材料来说为正常温度。DBR 是 22 对 GaAs/AlAs 组成的, 反射率可高达 99% 以上。

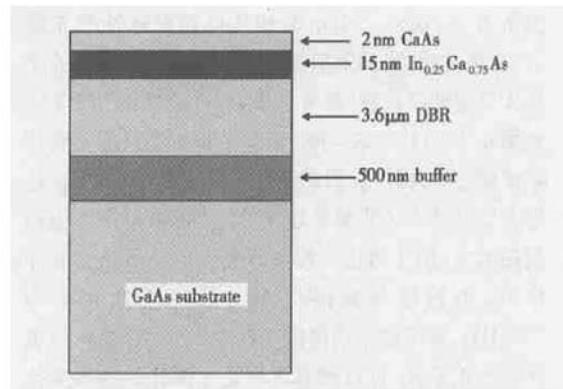


图 1 表面态型半导体可饱和吸收镜生长结构图

Fig. 1 Growth scheme of surface type semiconductor saturable absorption mirror

图 2 为吸收体的光反射谱。垂直轴并不代表绝对反射率, 数值大小与测试系统有关。可以看到, 其带宽约 60nm, 高反带从 1020nm 到 1180nm。对于皮秒级锁模, 反射谱通常只有几个 nm 的宽度就足够了。

4 表面态型半导体可饱和吸收镜实现 Yb : YAG 激光器被动调 Q 锁模实验

本实验装置如图 3 所示。采用 X-型四镜折迭像散补偿腔, 目的是产生单束脉冲激光输出, 实验中选用的泵浦源为 Apollo 公司生产的 F15-940-1 半导体激光器, 发射中心波长为 940nm, 泵浦功率 10W, 激光器总的腔长为 75cm 左右。实验装置的像散补

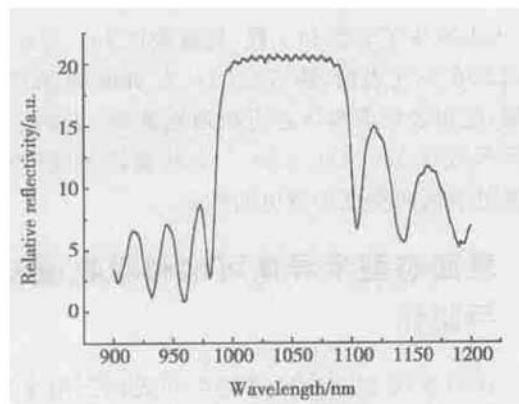


图 2 表面态型半导体可饱和吸收镜的反射谱

Fig. 2 Reflection spectrum of surface type semiconductor saturable absorption mirror

偿角为 9° , 获得了 70mW 的连续锁模脉冲激光输出. 在此之前, 我们采用制作的几种低温吸收区的半导体可饱和吸收镜(单量子阱, 双量子阱和三量子阱分别在 $400, 450, 500$ 和 550°C 生长), 都只能实现调 Q 锁模, 这归因于腔内的功率密度太低, 具体而言是因为低温吸收区式的半导体可饱和吸收镜的非饱和损耗太大. 图 4 为由示波器观察到的连续锁模脉冲序列, 锁模脉冲间隔为 5ns , 脉冲重复频率为 200MHz , 对应的平均输出功率为 70mW . 根据傅里叶变换关系式, 可以推算出理论上激光器能够支持约 400fs 脉冲宽度. 由于没有进行色散补偿, 脉冲有较强的啁啾, 测得脉冲宽度为 4.35ps . 图 5 是由示波器观察到的自相关曲线.

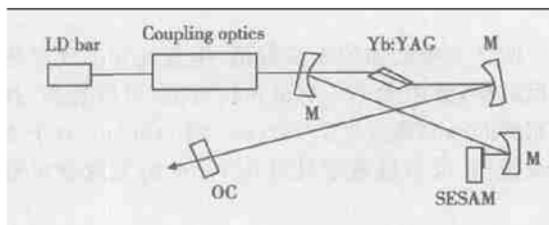


图 3 用半导体可饱和吸收镜来实现 Yb : YAG 激光器被动锁模实验装置

Fig. 3 Experiment scheme of passive modelocked Yb : YAG laser with semiconductor saturable absorption mirror

5 结论

用 MOCVD 设备生长了一种表面态类型的新型半导体可饱和吸收镜, 它具有优于国外常见的半

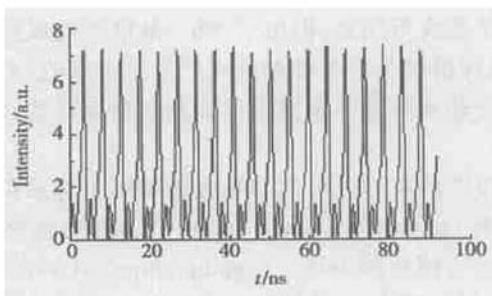


图 4 用半导体可饱和吸收镜实现 Yb : YAG 激光器被动锁模的锁模脉冲序列

Fig. 4 Modelocking pulse sequence of passive mode-locking Yb : YAG laser with semiconductor saturable absorption mirror

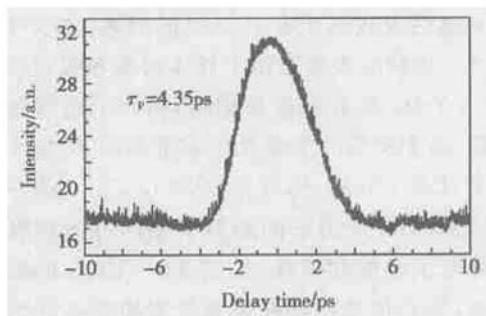
图 5 自相关仪显示的锁模脉冲宽度为 4.35ps

Fig. 5 Modelocking pulse duration is 4.35 ps , which is shown by autocorrelator.

导体可饱和吸收镜的性质: 非饱和损耗小. 我们用自己研制的表面态型半导体可饱和吸收镜实现了 10W 端面泵浦 Yb : YAG 激光器被动连续锁模, 得到了连续锁模脉冲序列, 锁模平均输出功率 70mW , 脉冲重复频率 200MHz . 我们将设法进行色散补偿, 提高泵浦光束质量, 并对此做进一步的研究.

参考文献

- [1] Keller U, Miller D A B, Boyd G D, et al. Solid-state low-loss intracavity saturable absorber for Nd : YLF lasers: an A-FPSA. Opt Lett, 1992, 17 (7): 505
- [2] Wang Yonggang, Ma Xiaoyu, Li Chunyong, et al. Passive modelocked diode-end-pumped Nd : YAG with semiconductor saturable absorption mirror grown by metal organic chemical vapor deposition. Chinese Physics Letters, 2003, 20(11): 1960
- [3] Danailov M B, Cerullo G, Magni V, et al. Diode-pumped 100-fs passively mode-locked Cr : LiSAF laser with an A-FPSA. Opt Lett, 1994, 19(11): 792

- [4] Wang Yonggang, Li Chaoyang, Ma Xiaoyu, et al. Passive Q -switching of flash-pumped Nd : YAG laser with ion-implanted GaAs. Chinese Journal of Semiconductors, 2004, 25(2): 148

Passive Modelocking Diode-End-Pumped Yb : YAG Laser with Surface-State Type of Semiconductor Saturable Absorption Mirror

Wang Yonggang¹, Ma Xiaoyu¹, Ju Guifang² and Zhang Zhigang²

(1 Institute of Semiconductors, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

(2 Ultrafast Laser Laboratory, School of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, University of TianJin, TianJin 300072, China)

Abstract: A new type of semiconductor saturable absorption mirror, surface-state semiconductor saturable absorption mirror, is introduced with which passive continuous wave modelocking of diode-end-pumped Yb : YAG laser is realized. At the 10W of pumping power, continuous wave modelocking series is obtain, which has 70mW average output and 200MHz frequency. Without any disperse compensation, the pulse duration is 4.35ps.

Key words: semiconductor saturable absorption mirror; surface state; continuous wave modelocking; Yb : YAG laser

PACC: 4330B

Article ID: 0253-4177(2004)08-1000-04

Wang Yonggang was born in 1973. PhD candidate. He is engaged in the research on absorbers(semiconductor saturable absorption mirrors and GaAs) for the modelocking and Q -switching of solid-state lasers. Email:wygxjwchina@vip.sina.com