

文章编号: 1000-5013(2009)06 0628-04

# 多量子阱 InGaAsP 实现 Nd: YAG 激光器被动锁模

苏培林, 王加贤, 王国立, 张峻诚

( 华侨大学 信息科学与工程学院, 福建 泉州 362021 )

摘要: 采用 InGaAsP 多量子阱作为可饱和吸收体, 以及 Nd: YAG 激光器的耦合输出镜, 实现 1.06  $\mu\text{m}$  激光的被动锁模运转. 当激光器腔长为 115 cm 时, 在平凹腔结构中获得平均脉宽 23 ps、能量 7 mJ 的单脉冲序列; 在平凸腔结构获得平均脉宽 21 ps、能量 10.5 mJ 的单脉冲序列. 比较平凹腔和平凸腔结构的 Nd: YAG 激光器的锁模效果, 并根据样品结构和可饱和吸收体被动锁模理论, 分析半导体多量子阱材料 InGaAsP 实现被动锁模的机理.

关键词: Nd: YAG 激光器; InGaAsP; 被动锁模; 多量子阱

中图分类号: TN 248.1+3 文献标识码: A

近年来, 半导体可饱和吸收镜 (SESAM) 因其装置简单、使用方便, 以及能获得较小的脉冲宽度<sup>[1]</sup>, 逐渐受到人们的青睐. 利用 SESAM 实现激光器的锁模, 主要是基于多量子阱带间的可饱和和共振吸收原理, 材料的带隙要与激光波长相一致<sup>[2-4]</sup>. SESAM 器件的锁模效果好, 但制作比较复杂, 要有一层半导体布喇格反射镜 (DBR), 而且都是作为端镜使用, 给其应用带来了困难. 多元合金的多量子阱半导体材料作为锁模器件, 国内外均有相关的报道. 杜建荣等<sup>[5]</sup>设计和实现了一种新型多量子阱主被动锁模半导体激光器, 其具有脉宽窄、波长调谐范围大, 以及输出光波长可精确稳定在 1.55  $\mu\text{m}$  等优点. 文[6]用三元合金的多量子阱材料  $\text{In}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}$  作为吸收体和耦合输出镜, 实现了 1.06  $\mu\text{m}$  半导体端面抽运 Nd: YAG 激光器被动锁模, 脉冲宽度为皮秒量级, 重复率为 150 MHz. 本文将多量子阱结构的半导体材料 InGaAsP 作为饱和吸收体和 Nd: YAG 激光器的耦合输出镜, 研究锁模激光器的结构设计.

## 1 实验部分

### 1.1 样品特性

研究表明, 四元化合物 InGaAsP 可以通过改变各元素成分, 调整材料的能带间隙. 考虑到量子阱结构大的三阶非线性效应及获得较少表面缺陷的优势, 实验采用能带不连续的 InGaAsP 多量子阱作为激光波长有效吸收层. 其中, 势阱与势垒对应的带隙波长分别为 1.3, 1.1  $\mu\text{m}$ , 重复生长 6 个周期. 样品结构如图 1 所示.

采用金属有机化合物气相沉积法 (MOCVD), 在 (100) 取向的 InP 衬底上首先生长 140 nm 厚的 InGaAsP 缓冲层, 其光吸收短波限为 1.1  $\mu\text{m}$ . 然后, 在低温生长多量子阱有源层, 再次生长 160 nm 的 InGaAsP 缓冲层, 覆盖 InP 保护层. 对于 1.064  $\mu\text{m}$  激光, InP 层是透明的, InGaAsP 多量子阱区对 1.064  $\mu\text{m}$  具有很高的吸收系数. 材料的吸收主要发生在 InGaAsP 多

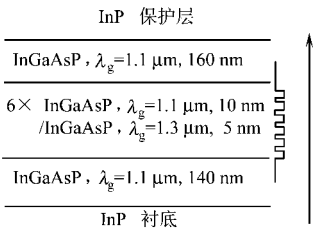


图 1 样品的结构

Fig. 1 Structure of the sample

收稿日期: 2008-07-23

通信作者: 王加贤 (1955-), 男, 教授, 主要从事固体激光与光电子技术的研究. E-mail: wangjx@hqu.edu.cn.

基金项目: 福建省自然科学基金资助项目 (A0610023)

量子阱中, 入射的光子在势阱层近共振吸收作用下激发大量载流子, 导致类似于 SESAM 的吸收饱和.

采用 UV-2800H 型紫外可见分光光度计测得样品的光透射谱, 如图 2 所示. 从图 2 可知, 在  $1.064\text{ }\mu\text{m}$  处, 材料对应的透过率为 23%. 因为其对  $1.064\text{ }\mu\text{m}$  激光存在一定的透过率, 因此在实验中, 将设计的样品直接作为 Nd: YAG 激光器的耦合输出镜使用, 而不需要另外设置额外光学元器件. 这对于获得简单紧凑结构的锁模激光器是很有帮助.

1.2 被动锁模实验

多量子阱结构的 InGaAsP 被动锁模 Nd: YAG 激光器的实验装置, 如图 3 所示. 图 3 中,  $M_1$  是曲率半径  $300\text{ cm}$  的全反射凹面镜(也可换为凸面镜); InGaAsP 样品(SA)既作为可饱和吸收体, 又可作为耦合输出镜;  $\phi 4\times 60\text{ mm}$  的 Nd: YAG 棒由单根脉冲氙灯抽运, 工作重复率  $1.0\text{ Hz}$ ; 棒的左端面与  $M_1$  镜的距离为  $5\text{ cm}$ , 右端面与饱和吸收体的距离在实验中进行调整, 范围为  $80\sim 130\text{ cm}$ .

输出激光脉冲由响应时间  $1\text{ ns}$  的 PIN 硅光电二极管(D)接收并输入到  $300\text{ MHz}$  存储示波器(OSC)上存储和观察脉冲波形, 用非共线自相关二次谐波法测定脉冲宽度, 用 PT-1 型激光能量计测量输出激光能量.

2 实验结果

2.1 平凹腔结构

在图 3 的实验装置中, 采用平凹腔结构, 当腔长大于  $85\text{ cm}$  时, 激光器可实现锁模运转. 当氙灯工作电压为  $850\text{ V}$ , 腔长  $L$  为  $95, 115\text{ cm}$  时, 示波器上观察到的锁模脉冲波形, 分别如图 4(a), (b) 所示.

从图 4 可以看出, 当  $L = 95\text{ cm}$  时, 脉冲间隔约为  $6.5\text{ ns}$ , 脉冲包络时间约为  $320\text{ ns}$ , 而且出现次脉冲, 锁模调制深度较差, 约为  $60\%$ ; 而当  $L = 115\text{ cm}$  时, 脉冲间隔约为  $8.2\text{ ns}$ , 脉冲包络时间约为  $400\text{ ns}$ , 调制深度约为  $90\%$ , 没有出现次脉冲.

脉冲间隔时间与光脉冲在腔内往返的渡越时间相符合. 腔长较大时, 没有出现次脉冲, 锁模效果和锁模几率都比短腔好, 脉冲包络也较宽, 脉冲能量也较大. 当腔长  $L = 115\text{ cm}$  时, 用非共线自相关二次谐波法测得脉冲平均宽度为  $23\text{ ps}$ , 用激光能量计测得脉冲能量为  $7\text{ mJ}$ .

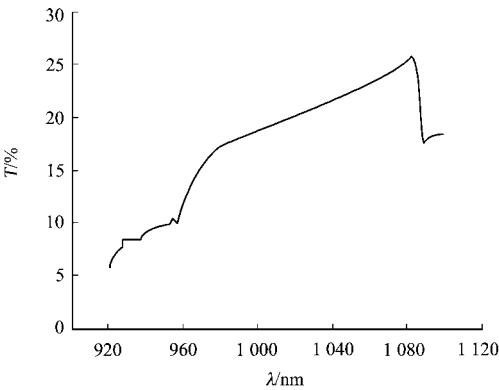


图 2 样品透射谱线

Fig.2 Transmission spectrum of the sample

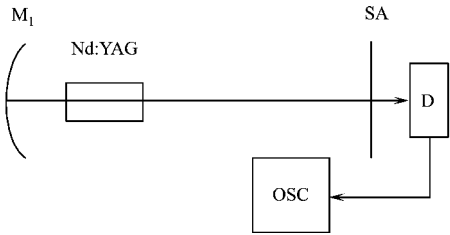
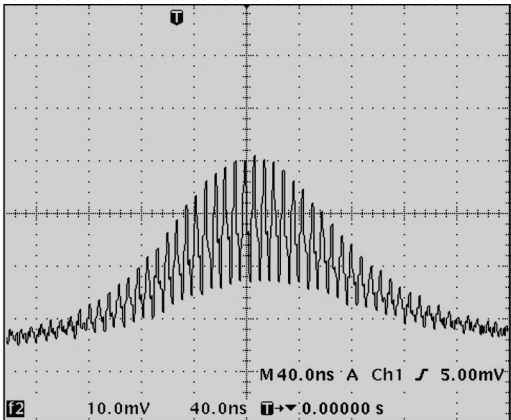
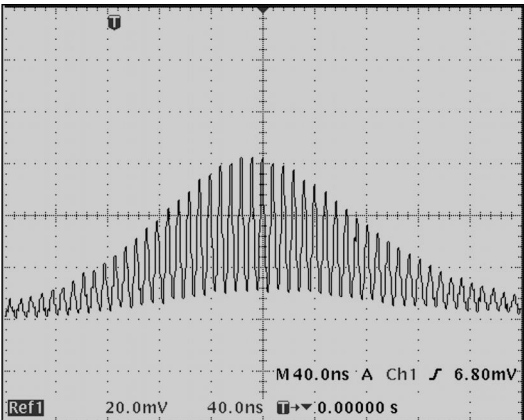


图 3 被动锁模 Nd: YAG 激光器实验装置

Fig.3 Experimental setup for passively mode locked Nd: YAG laser



(a) 腔长  $L = 95\text{ cm}$



(b) 腔长  $L = 115\text{ cm}$

图 4 平凹腔 Nd: YAG 激光器输出的锁模激光脉冲

Fig.4 Mode locked laser pulses from the plane concave cavity Nd: YAG laser

从图 4 还可以看出,腔长  $L=115\text{ cm}$  的锁模效果要好于腔长  $L=95\text{ cm}$  的锁模效果. 其主要原因在于,随着腔长的增加,InGaAsP 样品上的光斑半径减小,激光功率密度提高,多量子阱中的激发态吸收加剧. 而且,当腔长大时,锁定的纵模数多,有利于脉宽的压缩和激光峰值功率的增加,因此被动锁模更容易达到.

2.2 平凸腔结构

在图 3 的实验装置中,把凹面镜  $M_1$  换成曲率半径  $300\text{ cm}$  的凸面镜,在氙灯工作电压为  $850\text{ V}$ ,腔长  $L$  为  $115\text{ cm}$  的条件下进行实验,锁模脉冲波形如图 5 所示. 测得脉冲宽度约为  $21\text{ ps}$ ,脉冲能量为  $10.5\text{ mJ}$ ,脉冲间隔约为  $8.3\text{ ns}$ ,脉冲包络时间约为  $400\text{ ns}$ ,调制深度接近  $100\%$ ,没有出现次脉冲.

采用平凸非稳腔结构不仅得到较大的能量输出,而且可以获得比平凹稳定腔好的锁模效果. 这是因为,与平凹腔相比,平凸腔能够抑制高阶横模振荡,有较大的基模模体积,可实现较高能量单模运转;在非稳腔中,腔内激光能量较大,提高了调制深度.

3 结果分析

根据被动锁模的一般理论,多量子阱材料 InGaAsP 能够实现 Nd:YAG 激光器的被动锁模. 但它必须具备如下 2 个基本条件: (1) 对  $1.06\text{ }\mu\text{m}$  激光具有可饱和吸收特性; (2) 可饱和吸收的恢复时间应小于光脉冲在腔内往返的渡越时间(纳秒量级). InGaAsP 势阱层的带隙波长为  $1.3\text{ }\mu\text{m}$ ,在量子限制效应作用下,其实际光学带隙会略有展宽. 当  $1.064\text{ }\mu\text{m}$  激光入射时,材料发生较强的近共振吸收.

由于材料的多量子阱结构,其三阶非线性效应得到加强,饱和效应也就越明显. InGaAsP 多量子阱在吸收  $1.06\text{ }\mu\text{m}$  光子后,会产生大量光生载流子. 这些载流子将集中到势阱中的量子化能级上,光强越大,载流子聚集得越多. 能级上载流子积累到一定程度时,光吸收饱和,吸收体被“漂白”. 然后,大部分的载流子通过辐射复合回到初态,材料又恢复较大的吸收系数. 饱和吸收体的恢复时间很短,一般认为,低温外延生长的半导体材料,其能带间载流子复合的特征弛豫时间为皮秒量级. 它可以有效地启动锁模,支持皮秒脉冲的产生.

带内飞秒量级的热弛豫时间有利于进一步压缩脉冲<sup>[7]</sup>. 正是由于 InGaAsP 多量子阱多量子阱层对与  $1.06\text{ }\mu\text{m}$  激光的饱和吸收以及快的响应速度,样品才可以用于 Nd:YAG 激光器的被动锁模. 样品结构设置中,多量子阱上下的两个 InGaAsP 波导层可以用于改进对电场和光场的限制,从而提高饱和吸收体的吸收效率.

把 InGaAsP 多量子阱置于腔内,由 Nd:YAG 自发发射基础上发展起来的噪声光脉冲中的较弱光脉冲被吸收,而较强的光脉冲因饱和效应被吸收很少. 这样就可以在噪声群中选出最大的光脉冲. 然后,在强尖峰光脉冲多次经过薄膜和增益介质时,由于被吸收,其前沿(如果光生载流子的能量弛豫时间小于光脉冲宽度,也包括后沿)损耗大于增益而不断削弱;中间部分由于没有被吸收或吸收很少而不断增强;后沿由于被吸收或因为增益介质的增益饱和没有被放大也不不断削弱,所以形成了周期  $2L/C$  的脉冲序列.

生长在 InP 衬底上的薄膜样品在  $1.06\text{ }\mu\text{m}$  激光波段具有一定的透射率,对应的透过率为  $23\%$ . 因此,可以直接代替常规的输出镜作为激光耦合输出端镜,具有一定的应用价值. 倘若在样品上沉积光学薄膜,还能方便地改变薄膜样品在相应波段的光透过率. 通过调整 InGaAsP 的化学成分比与膜层厚度,可以控制量子阱的光学吸收边与吸收强度,从而改变饱和吸收层作用波长与调制深度,如获得  $946\text{ }\mu\text{m}$  Nd:YAG 激光器的锁模脉冲输出.

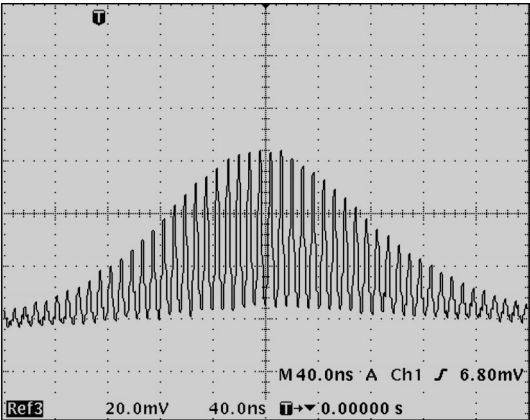


图 5 平凸腔 Nd:YAG 激光器输出的锁模激光脉冲

Fig. 5 Mode locked laser pulses from the plane convex cavity Nd:YAG laser

## 4 结束语

采用多量子阱半导体材料 InGaAsP 作为可饱和吸收体, 以及兼作 Nd: YAG 激光器的耦合输出镜, 实现了 Nd: YAG 激光器的被动锁模. 当激光器腔长为 115 cm 时, 在平凹腔结构获得平均脉宽为 23 ps、能量为 7 mJ 的单脉冲序列; 在平凸腔结构获得平均脉宽为 21 ps、能量为 10.5 mJ 的单脉冲序列, 且平凸腔结构的锁模效果好. 该多量子阱半导体材料的锁模效果好, 而且可兼作为输出端镜使用, 所以具有一定的应用价值.

### 参考文献:

[1] 王加贤, 庄鑫巍. 基于半导体可饱和吸收镜实现闪光灯抽运 Nd: YAG 激光器的被动调 Q 与锁模[J]. 光学精密工程, 2006, 14(4): 584-588.

[2] KELLER U, WEINGARTEN K J, FRANZ 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.

[3] 陈 檬, 张丙元, 李 港, 等. 半导体可饱和吸收镜被动锁模 Nd: YAG 激光器的研究[J]. 中国激光, 2004, 31(6): 646-648.

[4] 柴 路, 王清月, 张志刚, 等. 用腔内半导体可饱和吸收镜钛宝石激光器中自锁模状态的实验研究[J]. 物理学报, 2001, 50(1): 68-71.

[5] 杜荣建, 向望华, 张贵忠, 等. 新型多量子阱被动锁模半导体激光器噪声分析[J]. 中国激光, 2003, 30(12): 1066-1069.

[6] WANG Yong-gang, MA Xiao-yu, ZHANG Bing-yuan, et al. Passively mode locked diode end pumped Nd: YAG laser with  $\text{In}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}$  as output coupler[J]. Chinese Journal of Semiconductors, 2004, 25(12): 1595-1598.

[7] NEOGI A, YOSHIDA H, MOZUME T, et al. Enhancement of interband optical nonlinearity by manipulation of intersubband transitions in an undoped semiconductor quantum well[J]. Optics Communications, 1999, 159(4/6): 225-229.

# Investigation on Passive Mode Locking in an Nd: YAG Laser Using Multi-Quantum Well InGaAsP

SU Pei-lin, WANG Jia-xian,  
WANG Guo-li, ZHANG Jun-cheng

(College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China)

**Abstract:** The passive mode locking operation of an Nd: YAG laser at 1.06  $\mu\text{m}$  was achieved by using multi quantum well InP/InGaAsP as saturable absorber and output coupler. When the cavity length was 115 cm, a single pulse train with average pulse duration of 23 ps and energy of 7 mJ was obtained in a plane convexity cavity. The pulse duration was 21 ps and energy was 10.5 mJ from a plane concave cavity Nd: YAG laser. The mode locking effect of the plane convexity cavity and the plane concave cavity Nd: YAG laser was compared in the experiment. According to the structure of the sample and the passive mode locking theory of the saturable absorber, the passive mode locking mechanism of semiconducting multi quantum well InGaAsP was analyzed in this paper.

**Keywords:** Nd: YAG laser; InGaAsP; passive mode locking; multi quantum well

(责任编辑: 黄仲一 英文审校: 吴逢铁)