

文章编号: 0253-2239(2009)06-1591-05

采用半导体量子阱薄膜实现 Nd:YAG 激光器 被动锁模

王加贤 王国立 苏培林 郭亨群

(华侨大学信息科学与工程学院, 福建 泉州 362021)

摘要 采用金属有机化学气相淀积(MOCVD)法在 InP 衬底上低温生长 6 个周期的 InGaAsP 多量子阱薄膜, 薄膜对 1.06 μm 激光的小信号透过率为 23%。该薄膜兼作 Nd:YAG 激光器的可饱和吸收体及耦合输出镜, 实现 1.064 μm 激光的被动锁模运转, 获得平均脉宽 23 ps、能量 15 mJ 的单脉冲序列。采用射频磁控溅射法在石英衬底上制备 4 个周期的 Si/SiN_x 多量子阱薄膜, 样品在氮气环境下以 1000 $^{\circ}\text{C}$ 退火 30 min 后, 插入 Nd:YAG 激光器腔内, 实现 1.064 μm 激光的被动锁模, 获得脉宽 30 ps 的脉冲序列。多量子阱半导体薄膜作为可饱和吸收体实现激光器的被动锁模具有成本低、设计和制作简单、运转稳定和使用方便的优点。

关键词 激光技术; InGaAsP 多量子阱; Si/SiN_x 多量子阱; 被动锁模; Nd:YAG 激光器

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092906.1591

Passive Mode-Locking in Nd:YAG Laser Using Semiconductor Quantum-Well Films

Wang Jiaxian Wang Guoli Su Peilin Guo Hengqun

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

Abstract A 6-period InGaAsP quantum-wells film has been grown on InP substrate at a low temperature by metal organic chemical vapor deposition (MOCVD). The small signal transmission of the sample at 1.064 μm is 23%. By using it as a saturable absorber and an output coupler concurrently, passive mode-locking operation in a Nd:YAG laser at 1.064 μm can be realized, and a single pulse train with average pulse duration of 23 ps and energy of 15 mJ was obtained. A Si/SiN_x film which consisted of 4-period quantum-wells structure has been prepared on quartz substrates by RF magnetron reaction sputtering technique and annealed at 1000 $^{\circ}\text{C}$ for 30 min in N₂ environment. Inserting the sample into the Nd:YAG laser resonator, passive mode-locking operation at 1.064 μm and a single pulse train with 30 ps average pulse duration can be obtained. Passive mode-locking of using semiconductor multiple quantum-wells film as saturable absorber has advantages of low cost, design and manufacture simplicity, stability and convenience.

Key words laser technology; InGaAsP multiple quantum-wells; Si/SiN_x multiple quantum-wells; passive mode-locking; Nd:YAG laser

1 引言

长期以来, Nd:YAG 激光器一直采用有机染料(如五甲川溶于二氯乙烷溶液)作为可饱和吸收体实现被动锁模, 以获得皮秒量级的激光脉冲。有机染料有毒性、稳定性差、使用很不方便, 所以采用晶体

或半导体材料代替染料实现激光器的被动锁模是人们颇感兴趣的研究课题。已报道的研究结果有: 利用 Cr⁴⁺:YAG 晶体对 1.064 μm 激光的激发态饱和吸收实现 Nd:YAG 激光器的被动锁模^[1], 但获得的锁模脉冲较宽、锁模几率和稳定性较差; 采用单晶

收稿日期: 2008-10-23; **收到修改稿日期**: 2008-11-25

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(60838003)、国家自然科学基金(60678053)和国家 973 计划(2007CB613401)资助课题。

作者简介: 王加贤(1955—), 男, 博士, 教授, 主要从事固体激光技术与器件和超短光脉冲等方面的研究。

E-mail: wangjx@hqu.edu.cn

Si 或 GaAs 实现 Nd:YAG 激光器的被动锁模^[2,3], 但实验条件较苛刻, 稳定性较差, 调制深度不够, 所以没有更进一步的发展; 近年来采用半导体可饱和吸收镜 (SESAM) 实现 LD 连续抽运激光器的被动锁模^[4], 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), DBR 增加了损耗, 而且都是作为端镜使用, 给某些应用带来一些困难; WangYonggang 等^[5]用三元合金的多量子阱 $\text{In}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}$ 作为吸收体和输出镜, 实现二极管端面抽运 Nd:YAG 激光器被动锁模, 脉冲宽度为皮秒量级, 重复率为 150 MHz。S. C. Huang 等^[6]采用四元合金 AlGaInAs 作为可饱和吸收体, 实现 LD 抽运掺 Nd 固体激光器 $1.06\mu\text{m}$ 激光的被动调 Q, 得到 0.9 ns 的光脉冲; A. Li^[7]采用生长在 InP 衬底的 InGaAsP 多量子阱作为可饱和吸收体, 实现 LD 抽运固体激光器 $1.3\mu\text{m}$ 激光的被动调 Q, 得到脉宽 19 ns、重复率 38 kHz 的脉冲, 但没有用它进行 $1.064\mu\text{m}$ 激光被动锁模的实验。

本研究采用与 InP 衬底晶格匹配的 InGaAsP 六量子阱薄膜和经过退火之后的 Si/SiN_x 多量子阱薄膜作为可饱和吸收体, 实现 Nd:YAG 激光器 $1.064\mu\text{m}$ 激光的被动锁模, 获得几十皮秒的激光脉冲输出, 其中采用 Si/SiN_x 多量子阱薄膜实现被动锁模尚未见过报道。

2 锁模激光器实验装置

采用 InGaAsP 多量子阱薄膜或 Si/SiN_x 多量子阱薄膜作为可饱和吸收体的被动锁模 Nd:YAG 激光器如图1所示。M₁ 是曲率半径 300 cm 的全反射凹面镜; M₂ 是透过率 25% 的平面输出镜; A 是作为可饱和吸收体的 InGaAsP 多量子阱或 Si/SiN_x 多量子阱薄膜 (薄膜既可以插入腔内, 也可以代替 M₂ 作为输出镜); $\phi 4\text{ mm}\times 60\text{ mm}$ 的 Nd:YAG 棒由单根脉冲氙灯抽运, 工作重复率 1 Hz。YAG 棒的左端面与 M₁ 镜的距离 15 cm, 右端面与 M₂ 镜的距离在实验中调整。输出激光由响应时间 1 ns 的

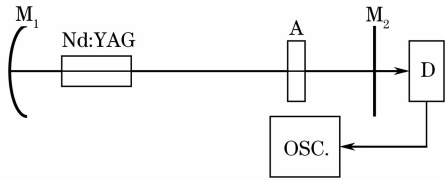


图 1 被动锁模 Nd:YAG 激光器实验装置
Fig. 1 Experimental setup for passively mode-locked Nd:YAG laser

PIN 硅光电二极管接收并输入到 300 MHz 数字示波器上存储和观察脉冲波形, 其脉冲宽度和输出激光能量分别由非共线自相关二次谐波法和 PT-1 型激光能量计测得。

3 InGaAsP 多量子阱薄膜作为锁模器件

3.1 样品结构

实验采用 InP/InGaAsP 多量子阱激光器外延片, 面积为 $1\text{ cm}\times 1\text{ cm}$ 。样品采用金属有机化学气相淀积法 (MOCVD) 在 (100) 取向的 InP 衬底上生长, 其结构如图 2 所示。自 InP 衬底沿生长方向依次为: 厚度 140 nm、带隙波长 $\lambda_g=1.1\mu\text{m}$ 的下波导层; 有源区为 6 周期的 InGaAsP 多量子阱, 其结构是厚度为 10 nm 的势垒和厚度为 5 nm 的势阱交替生长; 往上面是厚度 160 nm、带隙波长 $\lambda_g=1.1\mu\text{m}$ 的上波导层; 最上面是薄的 InP 保护层。对于 $1.064\mu\text{m}$ 激光, InP 层是透明的, 而 InGaAsP 多量子阱区对 $1.064\mu\text{m}$ 具有很高的吸收系数。用 UV-2800H 型紫外可见分光光度计测得在 $1.064\mu\text{m}$ 处的小信号透过率为 23%。

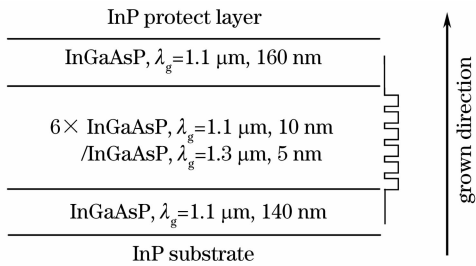


图 2 样品结构
Fig. 2 Structure of the sample

3.2 实验结果与分析

当腔长大于 85 cm 时, 激光器实现锁模运转。图 3 分别是氙灯工作电压 850 V, 腔长 $L=95\text{ cm}$ 和 $L=115\text{ cm}$ 时示波器上观察到的锁模脉冲波形。可以看出, $L=95\text{ cm}$ 时, 脉冲间隔约 6.5 ns, 脉冲包络时间约 320 ns, 脉冲包络中出现次脉冲, 锁模调制深度较差; $L=115\text{ cm}$ 时, 脉冲间隔约 8.2 ns, 脉冲包络时间约 400 ns, 调制深度接近 100%, 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。可见, 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 ps, 用激光能量计测得脉冲序列能量为 15 mJ。

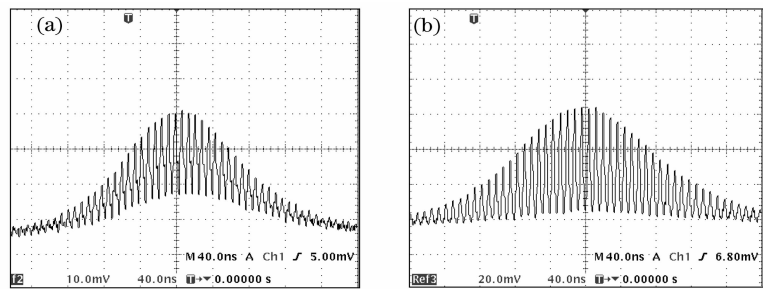


图 3 InP/InGaAsP 多量子阱锁模的激光脉冲。(a) 腔长 $L=95\text{ cm}$;(b) 腔长 $L=115\text{ cm}$

Fig. 3 Mode-locked laser pulses using InP/InGaAsP multiple quantum-wells. (a) $L=95\text{ cm}$; (b) $L=115\text{ cm}$

根据被动锁模一般理论, InGaAsP 多量子阱能够实现激光器的被动锁模,必须具备二个基本条件:对 $1.064\text{ }\mu\text{m}$ 激光具有可饱和吸收特性以及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。本实验采用的 InGaAsP 对 $1.064\text{ }\mu\text{m}$ 激光有较强的吸收。当受到 $1.064\text{ }\mu\text{m}$ 激光作用时,在 InGaAsP 有源层吸收 $1.064\text{ }\mu\text{m}$ 光子后产生光生载流子;在量子阱结构中,由于空间电荷转移特性,载流子将集中到势阱中的量子化能级上,分立的能级使得光吸收具有可饱和性质,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”。能带间载流子复合的特征弛豫时间一般为皮秒量级^[8],经过这一时间后,大部分的载流子通过辐射复合回到初态,材料又恢复吸收。有源层上下两个 InGaAsP 波导层用于改进对光场的限制,提高饱和吸收体的吸收效率。

把 InGaAsP 多量子阱薄膜置于腔内或作为输出镜,由 Nd:YAG 自发辐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。而后,在强尖峰光脉冲多次经过薄膜和增益介质时,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)因为被吸收,损耗大于增益而不断削弱;中间部分没有被吸收或吸收很少而不断增强;后沿因为被吸收或因为增益

介质的增益饱和没有被放大也不断削弱,所以形成了周期 $2L/c$ 的脉冲序列。

4 Si/SiN_x 多量子阱薄膜作为锁模器件

4.1 样品制作

采用射频磁控反应溅射法,在石英片上沉积 Si/SiN_x 多量子阱薄膜。衬底选择不加热,经过常规清洗后置入溅射室,溅射靶材为高纯度单晶 Si 靶。溅射室本底真空度为 $8\times 10^{-4}\text{ Pa}$ 。溅射 Si 层时通入高纯度 Ar 气(流量为 $90\text{ cm}^3/\text{s}$),溅射 SiN_x 层时通入 Ar 和 N₂ 气,流量比 $R(\text{Ar}/\text{N}_2)$ 为 40/20。为了保持陡的界面,每沉积一层 Si 或 SiN_x 薄膜后,立即关闭等离子体并抽空溅射室内气体,再通入相应工作气体进行下一层淀积。实验中射频功率均为 150 W ,工作气压 $P_{\text{SiN}_x}=0.8\text{ Pa}$, $P_{\text{Si}}=1\text{ Pa}$,在此条件下可以将沉积速率控制在每分钟几个纳米之内,从而较好地控制薄膜厚度的精确性与重复性。沉积完毕后在 N₂ 气保护下以 $1000\text{ }^\circ\text{C}$ 退火 30 min ,以形成纳米 Si 晶粒。实验中制备 2 种样品:样品 1 的结构为 Si 厚度 5 nm 、SiN_x 厚度 5 nm ,Si/SiN_x 交替生长 4 个周期;样品 2 的结构为 Si 厚度 6 nm 、SiN_x 厚度 7 nm ,Si/SiN_x 交替生长 4 个周期。

4.2 实验结果与分析

把样品 1 和样品 2 分别作为腔长 125 cm 的 Nd:YAG 激光器的输出镜,实现激光器的被动锁

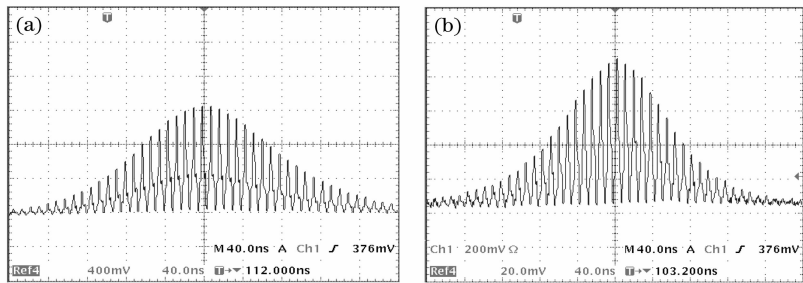


图 4 Si/SiN_x 多量子阱锁模的激光脉冲。(a) 样品 1;(b) 样品 2

Fig. 4 Mode-locked laser pulses using Si/SiN_x multiple quantum-wells. (a) sample 1; (b) sample 2

模,输出的激光脉冲如图 4 所示。在误差范围内,测得两个样品锁模的脉冲宽度基本相同为 30 ps。对 Si/SiN_x 多量子阱薄膜的锁模机制解释如下。

大量研究表明,镶嵌在绝缘介质中的纳米 Si 有相当大的表面-体积比,由于晶相不同,纳米 Si 与介质之间形成较陡的界面,界面原子排列和键的组态有较大的无规则性,所以存在大量的界面态。丁文革等^[9]在研究氮化硅镶嵌纳米 Si 薄膜的键合特性时发现,薄膜在 1.85 eV 左右存在次带吸收,并认为其来自于纳米 Si 的表面态和(或)缺陷态的跃迁。通过对镶嵌纳米 Si 晶粒的 Si 基薄膜光致发光的研究^[10~12],也可以发现纳米 Si 界面的 Si 悬键在薄膜材料的禁带中引入缺陷能级,并大量俘获光生载流子,一般认为该缺陷态能级寿命在 ns 量级。本文报道的样品在退火后形成纳米 Si 晶粒镶嵌结构,由于没有 H 的钝化,势必在薄膜中引入大量界面缺陷。这些表面缺陷态的存在,不但形成光的次带吸收,而且使得导带中的载流子首先弛豫到这些表面缺陷态,然后退激发到基态。

除上述界面态可以俘获并积累大量光生载流子外,量子阱的限域作用造成的能级分立对于非线性饱和吸收也起了很大的作用。多量子阱薄膜的结构参数表明,Si 层的厚度以及 Si 晶粒粒径接近载流子德布罗意波长,在氮化硅介质势垒强限域作用下表现出量子尺寸效应,纳米 Si 能带中电子占有能级量子化,其三阶光学非线性响应得到极大的增强,这种增强的非线性响应还具有可饱和吸收特性^[13]。样品超快过程的饱和吸收与纳米 Si 晶粒中电子占有能级量子化有关。为了验证这种想法,实验上测试了沉积在石英衬底上、厚度为 300 nm 的 α -Si 体材料,结果并未出现明显的锁模现象。 α -Si 体材料与 Si/SiN_x 多量子阱薄膜二者在能带结构上的主要区别就是有无量子化能级,以上结果表明,样品的锁模调制与载流子在量子化能级上的跃迁积累有关。另外,Si 体系的能隙由于量子限制效应的作用被有效的增大。样品的吸收谱表明,入射的单光子能量(1.17 eV)小于样品退火前与退火后的能带间隙,而两个光子能量又超过能带间隙,因此样品中存在双光子吸收。双光子吸收属于非共振非线性吸收,光响应时间快,它将引起样品吸收系数以及折射率的变化。当入射光光强较大时,价带中的电子吸收两个光子跃迁到导带,同时在价带和导带中产生大量光生载流子^[14],聚集在量子化能级上。研究表明,在声子的参与下,光生载流子在导带能级上的弛豫时

间为 ps 量级^[15,16]。

按照上面的分析,可以对 nc-Si/SiN_x 多量子阱薄膜的可饱和吸收过程作如下描述:较强的 1064 nm 激光入射到样品中,诱发材料低维纳米 Si 体系的双光子吸收,载流子跃迁并分布在量子化能级上(非线性响应时间 ps 量级),而后载流子迅速弛豫到较为稳定的表面缺陷态,最后退激发到基态。随着缺陷能级的大量被占据,薄膜的吸收趋于饱和而变得透明,尔后又恢复吸收,由此实现锁模产生 ps 量级的超短光脉冲。

5 结 论

分别采用中科院半导体研究所提供的 InP/InGaAsP 多量子阱薄膜和自制的 Si/SiN_x 多量子阱薄膜作为可饱和吸收体,在 Nd:YAG 激光器中实现 1.064 μ m 激光的被动锁模,获得几十皮秒的激光脉冲。InGaAsP 薄膜与 Si/SiN_x 薄膜中的量子阱结构提供的量子化能级,增强了非线性饱和吸收效应;光生载流子(单光子或者双光子激发)在量子化能级上的快速弛豫,使可饱和吸收得到快速恢复,这二者是导致激光器被动锁模的主要因素。

参 考 文 献

- 1 Wang Jiaxian, Zhang Wenzhen, Xing Qirong *et al.*. Investigation of Cr⁴⁺:YAG passive mode-locking in a pulsed Nd:YAG laser [J]. *Optics & Laser Technology*, 1998, **30**(5): 303~305
- 2 Renzhong Hua, Liejia Qian, Tingting Zhi *et al.*. Short pulse generation in a Nd:YAG laser by silicon [J]. *Opt. Commun.*, 1997, **143**(1): 47~52
- 3 Zhuo Zhuang, Jiang Qichang, Wang Yonggang *et al.*. Study on the property of passively Q-switched mode-locked Nd:Gd_{0.42}Y_{0.58}VO₄ laser with GaAs absorber grown at low temperature [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(1): 77~80
卓 壮,姜其畅,王勇刚 等. 低温 GaAs 被动调 Q 锁模 Nd:Gd_{0.42}Y_{0.58}VO₄ 混晶激光器特性研究 [J]. *光学学报*, 2006, **26**(1): 77~80
- 4 Cai Zhiqiang, Wen Wuqi, Yao Jianquan *et al.*. Continuous-wave passively mode-locked diode end-pumped Nd:YVO₄ laser with a semiconductor saturable absorber mirror [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **A32**(6): 734~738
蔡志强,温午麒,姚建铨 等. 半导体可饱和吸收镜连续被动锁模端面抽运 Nd:YVO₄ 激光器 [J]. *中国激光*, 2005, **A32**(6): 734~738
- 5 Wang Yonggang, Ma Xiaoyu, Zhang Bingyuan *et al.*. Passively mode locked diode-end-pumped Nd:YAG Laser with In_{0.25}Ga_{0.75}As as output coupler [J]. *Chinese J. Semiconductors*, 2004, **25**(12): 1595~1598
- 6 S. C. Huang, S. C. Liu, A. Li *et al.*. AlGaInAs quantum-well as a saturable absorber in a diode-pumped passively Q-switched solid-state laser [J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(11): 1480~1482
- 7 A. Li, S. C. Liu, K. W. Su *et al.*. InGaAsP quantum-wells saturable absorber for diode-pumped passively Q-switched 1.3- μ m lasers [J]. *Appl. Phys B*, 2006, **84**(3): 429~431

8 A. Neogi, H. Yoshida, T. Mozume *et al.*. Enhancement of interband optical nonlinearity by manipulation of intersubband transitions in an undoped semiconductor quantum well[J]. *Opt. Commun.*, 1999, **159**(3): 225~229

9 Ding Wenge, Yu Wei, Yang Yanbin *et al.*. Bonding structure in silicon nitride thin films containing silicon nano-particles [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2006, **26**(10): 1798~1801
丁文革, 于 威, 杨彦斌 等. 镶嵌有纳米硅的氮化硅薄膜键合特性分析[J]. *光谱学与光谱分析*, 2006, **26**(10): 1798~1801

10 Deshpande S V, Gulari E, Brown S W *et al.*. Optical properties of silicon nitride films deposited by hot filament chemical vapor deposition[J]. *J. Appl. Phys.*, 1995, **77**(12): 6534~6541

11 Fu Guangsheng, Ding Wenge, Song Weicai *et al.*. Microstructure modification of silicon nanograins embedded in silicon nitride thin films[J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2006, **23**(7): 1926~1928

12 Kanemitsu Y, Liboshi M, Kushida T. Photoluminescence spectrum of *a*-Si/SiO₂ and *c*-Si/SiO₂ quantum well [J]. *J. Luminescence*, 2000, **87**~**89**: 463~465

13 Guo Hengqun, Lin Shangxin, Wang Qiming. Photoluminescence and application of nonlinear optical property of nc-Si-SiO₂ films [J]. *Chinese J. Semiconductors*, 2006, **27**(2): 345~349
郭亨群, 林赏心, 王启明. 纳米 Si 镶嵌 SiO₂ 薄膜的发光与非线性光学特性的应用[J]. *半导体学报*, 2006, **27**(2): 345~349

14 Yao Weiguo, Yue Lanping, Qi Zhenzhong *et al.*. Visible photoluminescence of Ge nanocrystallites embedded in SiO₂ thin film[J]. *J. Functional Material*, 1997, **28**(5): 477~488
姚伟国, 岳兰平, 戚震中 等. 镶嵌在 SiO₂ 薄膜中的锗纳米晶粒的光致发光[J]. *功能材料*, 1997, **28**(5): 477~488

15 Ma L B, Song R, Huang R *et al.*. Tunable light emission and decaying process of photoluminescence from a nanostructured Si-in-SiN_x film [J]. *J. Luminescence*, 2007, **126**(2): 536~540

16 Dao V L, Davis J, Hannaford P *et al.*. Ultrafast carrier dynamics of Si quantum dots embedded in SiN matrix[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, **90**(8): 1105