

文章编号: 1001-3806(2008)03-0296-03

SESAM 实现脉冲式 Nd YAG 激光器的被动锁模特性研究

李立卫, 王加贤*, 王娟娟

(华侨大学 信息科学与工程学院, 泉州 362021)

摘要: 为了研究半导体可饱和吸收镜的被动锁模特性, 采用中科院半导体所提供的半导体可饱和吸收镜, 实现了脉冲式 Nd YAG 激光器 1.06 μm 激光的被动锁模, 获得了稳定的皮秒激光脉冲序列输出。经自相关实验装置测量, 其锁模激光脉冲宽度大约为 48 ps, 脉冲序列的能量为 24mJ, 实验中采用直腔结构的谐振腔, 该腔结构简单、易于调整。理论上分析了 1.06 μm 半导体可饱和吸收镜结构及被动锁模基本原理, 计算并模拟了半导体可饱和吸收镜中布喇格反射层不同周期时对应的反射谱图以及不同周期时中心频率处布喇格反射层的反射率曲线。结果表明, 随着布喇格反射层周期数的增加, 其中心波长处的反射率也随着增加。当周期数大于 13 时, 其中心波长反射率超过 99%。半导体可饱和吸收镜是实现 Nd YAG 激光器的被动锁模的理想锁模器件。

关键词: 激光技术; 半导体可饱和吸收镜; 被动锁模; 分布布喇格反射

中图分类号: TN248.1 **文献标识码:** A

Study on passive mode-lock of pulsed Nd YAG laser with SESAM

LILiwei, WANGJia-xian, WANGJuan-juan

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

Abstract: For studying the passively mode-locked character of semiconductor saturable absorber mirror (SESAM), a semiconductor saturable absorber mirror, made by Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, was used to obtain a passively mode-locked Nd YAG laser with a simple straight cavity. Stable ps mode-locked pulse train was realized. The mode-locked pulse duration is about 48 ps measured by autocorrelation. The energy of the train is 24mJ. In addition, the constructure of 1.06 μm semiconductor saturable absorber mirror and the theory of passively mode-lock was analyzed. Semiconductor saturable absorber mirror is mainly made up of distributed Bragg reflection (DBR) and saturable absorber. The DBR is made up of different higher and lower refractive index materials. Then the reflection spectrum of different pairs of DBR in semiconductor saturable absorber mirror was simulated, so was the distribution of electric field in DBR. From the results, it can be seen that as the increase of pairs of DBR, the reflectivity of central wavelength also increased; when the pairs is above 13, the reflectivity of central wavelength exceeded 99%. In conclusion, semiconductor saturable absorber mirror can replace the traditional passively mode-locked component (such as Cr³⁺ YAG or organic dye) to be the most perfect component for the mode-lock of solid laser.

Key words: laser technique; semiconductor saturable absorber mirror; passively mode-lock; distributed Bragg reflection

引 言

半导体可饱和吸收镜 (semiconductor saturable absorber mirror, SESAM) 是采用分子束外延或者金属有机化学气相沉淀技术将半导体可饱和吸收体直接生长在半导体布喇格反射镜上形成的器件, 1992 年由 KELLER 等^[1] 研制成功并应用于锁模激光器。因为半导体可饱和吸收镜被动锁模激光器具有结构简单、稳

定可靠、光束质量好等特点, 故已经成为当今锁模激光器中最理想的锁模元件。另外, SESAM 也作为启动器件广泛应用于飞秒激光器的自锁模^[2-3]。近年来国外利用半导体可饱和吸收镜被动锁模特性, 在半导体抽运的多种 Nd³⁺ 激光器中实现了皮秒锁模激光脉冲输出^[4-5], 在国内, 近几年也有一些关于利用 SESAM 实现被动锁模的报道, 2004 年, CHEN 等利用 SESAM 实验了 1.06 μm 波长 Nd YAG 激光器的连续锁模运转, 得到了脉宽为 9ps 的光脉冲^[6]。但是用 SESAM 实现对脉冲式的 Nd YAG 激光器 1.06 μm 激光的被动锁模很少有报道。作者从理论上模拟了 SESAM 中布喇格反射层 (distributed Bragg reflection, DBR) 不同周期时对应反射谱图以及 DBR 中电场强度的分布图, 并在脉冲式 Nd YAG 激光器中插入 SESAM 实现被动锁模, 获得

基金项目: 国务院侨办科研基金资助项目 (05QZR11); 福建省自然科学基金资助项目 (A0610023)

作者简介: 李立卫 (1983-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为固体激光器件。

* 通讯联系人。E-mail: wangjx@hgu.edu.cn

收稿日期: 2007-03-27; 收到修改稿日期: 2007-04-02

了稳定的皮秒激光序列输出。

1 理论分析

1.1 SESAM 结构及其实现 1.06μm 激光被动锁模基本原理

半导体可饱和吸收体的基本结构是将反射镜与可饱和吸收体结合在一起。为了调节吸收体的调制深度和反射镜的带宽,根据上下反射镜的不同反射率以及吸收体的厚度,分为布喇格型、法布里珀罗型、无谐振型以及超带宽型。通常对于 1.06μm 波长附近的 SESAM,其结构如图 1 所示,它采用以 GaAs 为衬底,其上

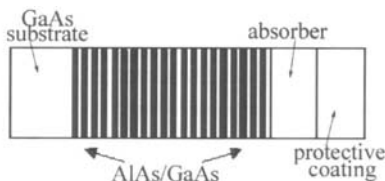


Fig 1 Structure of SESAM

生长由 GaAs 和 AlAs 交错生长构成的 DBR,反射率可达到 99% 以上,在布喇格反射镜上面的是吸收体,它是由几个 $\text{In}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}/\text{GaAs}$ 量子阱构成,目的是产生 As_{Ga} 和 V_{Ga} 作为载流子的快速弛豫陷阱,弛豫时间为几皮秒到几十皮秒,用于实现被动锁模。

对于半导体材料的可饱和吸收体有两个时间常数效应^[7]。其一为源自于半导体材料能带带内热化的特征弛豫时间,一般为飞秒量级,称之为快时间常数;另一为半导体材料能带间载流子复合的特征弛豫时间,一般为皮秒量级,称之为慢时间常数,作用是有效地启动锁模,支持皮秒脉冲的产生。弛豫时间的大小主要取决于半导体生长时衬底的温度,一般来说,生长时温度越低,带间的跃迁时间就会越短,但是过低的生长温度会使半导体的生长产生缺陷,一般选择温度为 3000℃~5000℃。

1.2 DBR 反射率的计算

为了计算 DBR 的反射率,采用菲涅耳系数矩阵法对不同层数 GaAs/AlAs DBR 进行了计算。图 2 中示

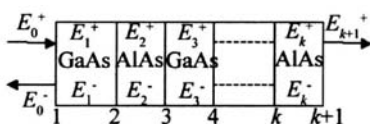


Fig 2 Schematic drawing electric field in DBR

意了高折射率材料 GaAs 和低折射率材料 AlAs 的半导体多层膜结构。其中, E_k^+ 和 E_k^- 分别表示第 k 层介质材料中波的复振幅的正负向量,两者叠加即可得到该层的总电场。

当光垂直入射 DBR 时,其菲涅耳系数矩阵为^[8]:

$$M = \begin{bmatrix} l & r \\ r & l \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \exp(j\delta_1) & r_1 \exp(j\delta_1) \\ r_1 \exp(-j\delta_1) & \exp(-j\delta_1) \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \exp(j\delta_2) & r_2 \exp(j\delta_2) \\ r_2 \exp(-j\delta_2) & \exp(-j\delta_2) \end{bmatrix} \dots \begin{bmatrix} \exp(j\delta_k) & r_k \exp(j\delta_k) \\ r_k \exp(-j\delta_k) & \exp(-j\delta_k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, $r_0 = \frac{n_0 - n_1}{n_0 + n_1}$, $r_1 = \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2}$, $r_2 = \frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1}$, 当 k 为偶数时, $r_k = r_1$; 当 k 为奇数时, $r_k = r_2$; n_0 为空气折射率, n_1 为 GaAs 折射率, n_2 为 AlAs 折射率。 $\delta_k = 2\pi n_k d_k / \lambda$, λ 为入射波长, d_k 和 n_k 分别为第 k 层膜的厚度和折射率, $d_k = \lambda_0 / 4n_k$, λ_0 为入射光中心波长。

反射率公式为^[8]:

$$R = (c \cdot c^*) / (a \cdot a^*) \quad (2)$$

当入射光的中心波长 $\lambda_0 = 1.06\mu\text{m}$, $n_1 \approx 3.5$, $n_2 \approx 2.9$, 将以上数据带入 M , 并分别取 $k = 21$, $k = 45$, 即 DBR 分别有 10 对, 22 对 GaAs/AlAs 时, 用 MATLAB 软件模拟得到两种 DBR 反射率谱 (见图 3)。由图 3 可知, 在

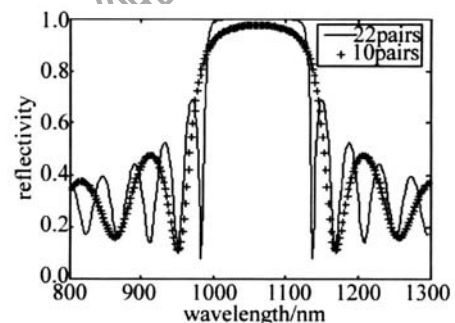


Fig 3 Reflection spectrum of 10 pairs, 20 pairs GaAs/AlAs DBR

中心辐射波长两侧存在对称的峰值,峰值两侧反射率迅速下降,随着 DBR 结构周期数的增加反射率峰值逐渐增加,峰值带逐渐变平、变宽,中心波长的凹坑逐渐变细、变窄。计算得到 10 对和 22 对 DBR 中心波长的反射率分别为 97.28% 和 99.97%。22 对 DBR 的反射率峰值较 10 对 DBR 大,22 对 DBR 的反射率峰值宽度大约为 160nm。用于飞秒激光器的自启动,带宽要求比较大,但对于锁模皮秒激光器,160nm 的带宽是足够的。

用同样方法模拟出了不同对数 DBR 中心波长 (1.06μm) 处的反射率曲线 (见图 4)。由图 4 可以看出,随着 DBR 结构周期数的增加,中心波长的反射率也随着增加。当 DBR 结构周期数 $n = 13$ 时,中心波长的反射率可以达到 99%。另外还可以看出,随着 DBR 结构周期数的增加到一定程度时,中心波长处的反射率接近于 1,基本不再发生变化。所以,通常 DBR 结构的周期数的选取一般不超过 30 对。

利用 TFCALC 软件对 10 对 GaAs/AlAs DBR 中电场的分布情况做了模拟仿真,仿真结果见图 5。由图中可以看出,电场强度从 DBR 的表层到内部衰减的很快。另外,DBR 中电场强度的峰值和谷值位于 GaAs

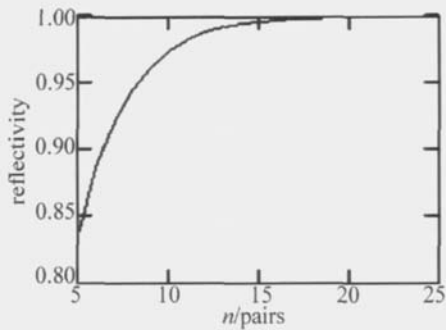


Fig. 4 Reflection curve of different pairs GaAs/AlAs DBR at central wavelength

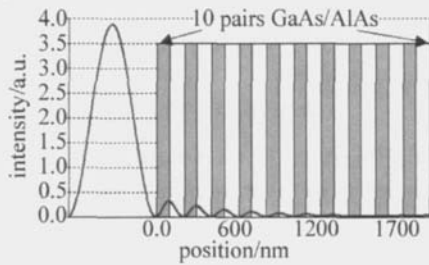


Fig. 5 The electric field intensity pattern at $1.06\mu\text{m}$ with the refractive index profile of the 10 layers DBR

和 AlAs 交界处,其原因是 GaAs 和 AlAs 材料的厚度为中心波长的 $1/4$ 。所以采用折射率差较大的 GaAs 和 AlAs 材料,可以满足 DBR 高反射率的要求。

2 实验装置

实验装置见图 6, SESAM (由中科院半导体所提

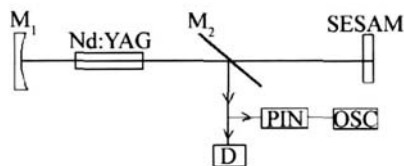


Fig. 6 Experimental setup of passively mode-locked Nd:YAG laser with SESAM

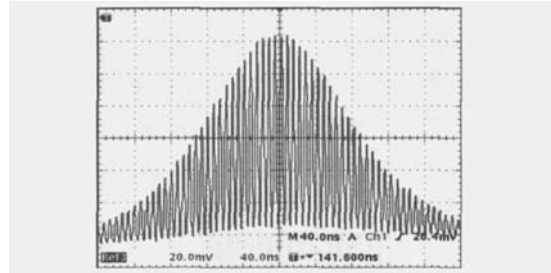
供,其由 22 对 GaAs/AlAs DBR 和 $\text{In}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}/\text{GaAs}$ 量子阱可饱和吸收体构成)在脉冲式 Nd:YAG 激光器中实现被动锁模。本装置采用的是简单的直腔结构,腔长 $L = 140\text{cm}$ 。 M_1 为对 $1.06\mu\text{m}$ 光全反、曲率半径 $R = 300\text{mm}$ 的凹面镜; M_2 为对 $1.06\mu\text{m}$ 光透过率 $T = 40\%$ 的平面镜,与光传播方向成 45° 放置。激光器的输出脉冲由 Si 光电二极管构成的探测器接收,并输入到 30MHz 数字存储示波器 (TDS 3032B 型) 上存储和显示。图中 D 装置用于测量皮秒脉冲宽度,采用的是传统的非共轴自相关二次谐波法。本装置是以迈克尔逊干涉仪为基础,由可移动臂、棱镜、透镜 ($f = 5\text{cm}$)、薄片 BBO 倍频晶体、自相关半反镜等组成。

3 实验结果与分析

在实验中发现,当腔长较小时 ($L < 80\text{cm}$),激光运转在调 Q 状态,随着腔长的增加,调 Q 脉冲中出现调

制,并且调制的深度随着腔长的增加而增加,在腔长较大时 ($L > 130\text{cm}$),得到了 Nd:YAG 激光器稳定的皮秒激光序列输出。出现这种现象的原因是:腔长的增加使得腔内锁定的纵模数多,有利于锁模脉冲的形成、脉宽的压缩和激光峰值功率的提高。

在腔长 $L = 140\text{cm}$ 时,测得的锁模脉冲序列见图 7。



每个脉冲的间隔大约为 10ns ,与光在腔内往返一次所需时间 $2L/c \approx 9.3\text{ns}$ 非常接近。实验测得的 SESAM 锁模脉冲强度自相关曲线如图 8 所示,曲线的半峰全宽 $\Delta \approx 68\text{ps}$,所以由公式 $\tau = \Delta t/\alpha$ (对于高斯波形 $\alpha = 1.41$) 可以求出锁模脉冲宽度 $\tau = 48.2\text{ps}$ 。

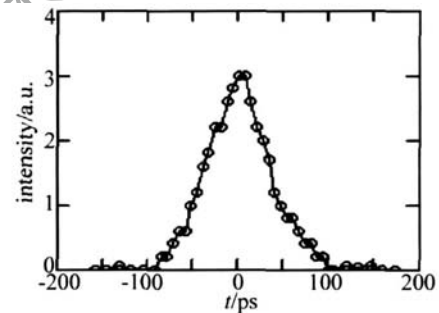


Fig. 8 Autocorrelation curve of mode-locked pulse (FWHM $\Delta t = 68\text{ps}$)

4 结论

利用半导体可饱和吸收镜,实现了 $1.06\mu\text{m}$ 波长脉冲式 Nd:YAG 激光器的被动锁模,获得了稳定的皮秒锁模激光输出,经测量,其激光脉冲宽度大约为 48.2ps ,脉冲序列的能量为 24mJ 。从模拟出的半导体可饱和吸收镜中 DBR 反射谱图、DBR 中电场强度的分布图以及可饱和吸收体的选择条件,可以清楚地了解 SESAM 的主要特性。另外,实验表明半导体可饱和吸收镜是实现皮秒锁模激光非常有效的方法,它具有结构简单、成本低、锁模稳定等优点,是实现全固态皮秒锁模激光器产品的有利保证。

参考文献

- [1] KELLER U, KNOX W H, ROSKOS H. Coupled-cavity resonant passive mode-locked Ti:sapphire laser [J]. Opt Lett, 1990, 15 (23): 1377-1379.

(下转第 301 页)

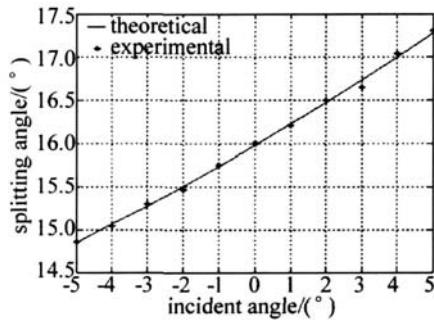


Fig 3 Changing of beam splitting angle with the incident angle

2.2 光强分束比测量

测试光路如图 4 所示。样品棱镜放在测角仪的

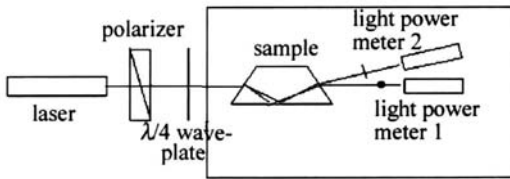


Fig 4 Measurement setup of beam splitting angle
中部,测角仪角度的读出精度为 $15''$,两光功率计是同一型号且由中国计量科学院进行了定标,加入偏振器和 $\lambda/4$ 波片的目的是为了消除 He-Ne 激光器出射光部分偏振对测量的影响。测量过程为:(1)将单元式偏光分束棱镜置于光路,调整棱镜,对应图 1 中 $\alpha_0 = 0$;(2)将光探测器的探头分别对准 o 光、e 光,同时读出 o 光、e 光的光强,求出分束比;(3)旋转测角仪上的刻度盘,改变入射角,再测出 o 光、e 光的光强,求出分束比。把实验所测的值与理论值相比较,作出的曲线图见图 5。

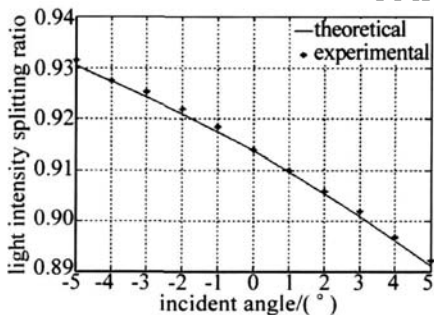


Fig 5 Changing of beam splitting ratio with the incident angle

3 结论

(1)单元式偏光分束棱镜的分束角和光强分束比均随入射角的变化而变化。(2)分束角与入射角的关系基本呈线性变化,且分束角的变化约为入射角的 $1/2$ 。(3)o 光、e 光的光强分束比随入射角在负方向的增大而趋向与 1,但此时 o 光、e 光之间的分束角要变小,所以,在使用时应综合考虑 o 光、e 光的分束角及光强分束比,以选择合适的入射角。

参考文献

- [1] WANG T, WU F Q, MA L L. Effect of air-gap polarizing prism on distribution of light intensity of single-mode gaussian beam [J]. Acta Optica Sinica, 2006, 26 (9): 1335-1339 (in Chinese).
- [2] FAN J Y, LI H X, WU F Q. A study on transmitted intensity of disturbance for air-spaced Glan-type polarizing prisms [J]. Opt Commun, 2003, 223: 11-16.
- [3] MA L L, SONGL K, WU F Q. Design of parallel and symmetric beam splitting prism based on Wollaston prism [J]. Optical Technique, 2003, 29 (5): 602-603 (in Chinese).
- [4] SONGL K, LI G H, WU F Q, et al Designing method for double polarizing prisms with large beam-splitting angle [J]. Optical Technique, 1996, 21 (6): 43-45 (in Chinese).
- [5] MENG F H, SONGL K, KONG F Zh, et al A new symmetric beam-splitting polarization prism [J]. Laser Technology, 2006, 30 (6): 670-672 (in Chinese).
- [6] REN Sh F, WU F Q, ZHAO P. Design of parallel beam splitter whose shear difference is insensitive to incident angle [J]. Optical Technique, 2005, 31 (5): 749-750 (in Chinese).
- [7] WANG T, WU F Q, MA L L. Transmitting characteristics of decentered girding radius single mode gaussian beam [J]. Journal of Qufu Normal University (Nature Science), 2006, 32 (4): 72-74 (in Chinese).
- [8] LI J Zh, LI G H, XIAO Sh G, et al Spectrophotometer polarization spectrum measurement [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 1994, 14 (5): 121-126 (in Chinese).
- [9] TANG H J, WU F Q, DENG H Y. Transmittance comparison of Glan-Taylor prism and Glan-Foucault prism [J]. Laser Technology, 2006, 30 (2): 215-217 (in Chinese).
- [10] BORN M, WOLF E. Principles of optics [M]. Beijing: Science Press, 1978: 61-71 (in Chinese).
- [11] LI J Zh, SU Sh X, ZHAO JM, et al Handbook of optics [M]. Xi'an: Technology and Science Press of Shanxi, 1986: 497-521 (in Chinese).

(上接第 298 页)

- [2] SUTTER D H, JUNG I D, KARNER F X, et al Self-starting 6.5 fs pulse from a Ti sapphire laser using a semiconductor saturable absorber and double-chirped mirrors [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 1998, 4 (2): 169-177.
- [3] YU X L, CAO Y L, YANG B J, et al Research of the mode-locked element SBR in the femtosecond solid-state lasers [J]. Laser Technology, 2004, 28 (4): 397-400 (in Chinese).
- [4] TSAI S W, LAN Y P, WANG S C, et al High-power diode-end-pumped passively mode-locked Nd:YVO₄ laser with a relaxed saturable Bragg reflector [J]. SPIE, 2002, 4630: 17-23.

- [5] NNERHOFER E, S DMEYER T, BRNNER F, et al 60W average power in 810fs pulses from a thin-disk Yb:YAG laser [J]. Opt Lett, 2003, 28 (5): 367-369.
- [6] CHEN M, ZHANG B Y, LI G, et al Study on SESAM passively mode-locked Nd:YAG laser [J]. Chinese Journal of Lasers, 2004, 31 (6): 646-648 (in Chinese).
- [7] WANG Y G, MA X Y, FENG J, et al Analysis about the invalidation and improvement research of semiconductor saturable absorber mirror [J]. Infrared and Laser Engineering, 2004, 33 (3): 256-259 (in Chinese).
- [8] LI N Y Ch. The theory of optical films [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1990: 28-31 (in Chinese).