

文章编号: 0258-7025(2003)05-0401-04

# 半导体可饱和吸收镜中电场的分析和计算

赵江山, 张志刚, 柴路, 王清月

(天津大学精密仪器与光电子工程学院超快激光实验室, 光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300072)

**摘要** 简要介绍了在飞秒激光器中提供自启动机制的半导体可饱和吸收镜 (SESAM) 的主要功能特点以及相关膜层结构的发展过程; 着重阐述了半导体可饱和吸收镜膜层结构中电场分布以及反射率和反射带宽的影响, 同时对三种不同结构的半导体可饱和吸收镜反射率作了分析比较。

**关键词** 激光技术; 半导体可饱和吸收镜; 飞秒激光脉冲; 自启动

**中图分类号** TN 248.1 **文献标识码** A

## Analysis and Calculation on Semiconductor Saturable-absorber mirror

ZHAO Jiang-shan, ZHANG Zhi-gang, CHAI Lu, WANG Qing-yue

(Ultrafast Laser Lab, School of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, and Key Laboratory of Optoelectronics Information Technical Science, EMC, Tianjin 300072, China)

**Abstract** This paper introduced the main characteristics and relative development process of the thin films constructions of semiconductor saturable-absorber mirror, which supported the self-starting mechanism in the femtosecond lasers. The great emphases were focused on the contribution of the electrical fields of the thin films constructions and the affection due to the reflectivity and the bandwidth. Also the comparison of reflectivity for the three different constructions in semiconductor saturable-absorber mirror was made.

**Key words** laser technique; semiconductor saturable-absorber mirror (SESAM); femtosecond laser pulse; self-starting

## 1 引言

作为一种新型的可提供锁模自启动机制的光学器件, 半导体可饱和吸收镜 (SESAM)<sup>[1]</sup> 在飞秒锁模脉冲激光器中发挥着越来越广泛的作用。它可以依靠其中的半导体材料充当可饱和吸收体, 对入射光脉冲中低强度部分进行有效的吸收, 在吸收达到饱和阈值后形成无吸收的透明体, 使光无损耗通过; 待有效恢复时间之后又还原为吸收体, 再次重复上述的吸收、饱和过程, 通过有效恢复时间所形成的时间选通门对光强进行有效的吸收饱和实现被动锁模, 并为克尔透镜锁模提供种子脉冲, 从而最终实现克尔透镜锁模的自启动和稳定化。作为腔内元件, 它

需要首先具有足够高的反射率, 以减少激光在腔内往复传输造成的反射损耗; 其次要求在较宽的波段范围内实现有效的反射和可饱和吸收, 从而支持飞秒激光脉冲的产生。

半导体可饱和吸收镜的结构是半导体可饱和吸收体和底层反射镜的结合。早期人们曾尝试过利用在两个由布拉格层对所构成的反射镜之间插入半导体可饱和吸收体材料构成可饱和吸收镜<sup>[1]</sup>, 引入表层反射镜是为了提高整体反射率和减少吸收层的光学破坏, 但是这样做会使大部分光被反射, 而入射到可饱和吸收体上的光变得较弱, 所以要求较厚的可饱和吸收体材料。整体结构过厚不但使得非可饱和吸

收稿日期: 2002-04-29; 收到修改稿日期: 2002-06-07

**基金项目:** 天津市自然科学基金 (003800611)、国家自然科学基金 (60178007)、教育部高等学校骨干教师资助计划、国家重点基础研究项目专项基金 (G1999075201-2) 资助课题。

**作者简介:** 赵江山 (1974—), 男, 满族, 天津大学精密仪器与光电子工程学院博士研究生。主要研究方向为超短脉冲激光技术, 可调谐自启动飞秒钛宝石激光器, 半导体材料与器件以及啁啾脉冲放大器等。E-mail: zjsbj@eyou.com 或 ull@tju.edu.cn

收损耗增加,而且增加了镀制过程中的工艺难度和加工成本。而后人们又通过逐渐降低表层反射率,采用表层低反射的膜层结构甚至完全去掉表面反射层,以增加入射光的通量。这样做可以采用较薄的半导体材料充当可饱和吸收体,从而降低饱和的阈值,实现激光腔内自启动的可靠和稳定运转。然而去掉了表面的高反射层,整个可饱和吸收镜的反射率则大部分由底部反射层所决定。底部反射层通常由 GaAs 和 AlGaAs 交替生长的布拉格层对构成,根据镀膜理论,反射镜的反射率和反射带宽取决于相邻膜层材料折射率的差。但是由于 GaAs 和 AlGaAs 的折射率差较小,所以反射镜的反射率和反射带宽都相对较小。为了提高反射带宽,人们提出了采用金属膜层代替布拉格反射镜对充当底层反射镜<sup>[2]</sup>,这样做可以较好地消除由于折射率的差异变化所引起的色散带宽的限制。然而用金属膜作反射镜有两个问题:一是金属膜一般反射率较低,二是金属与半导体之间的结合力较差。两者结合,将使半导体可饱和吸收镜的反射率降低,一般只有 92% 至 97% 左右<sup>[2]</sup>。为了提高半导体可饱和吸收镜的整体反射率,张志刚等提出了在半导体和金属膜之间增加一层适当厚度 ( $< \lambda/4$ ) 的低折射率介质膜的方案<sup>[3,4]</sup>,实际厚度的大小可以通过有关公式进行计算。此低折射率层的引入起到两个作用,第一,增加金属膜的反射率;第二,增加金属与半导体膜之间的结合力。本文对金属膜半导体可饱和吸收镜中的电场分布和反射率作了计算和分析,指出半导体可饱和吸收体在整个反射膜中的位置选择,以及吸收对于反射率的影响。

## 2 计算理论

整个半导体可饱和吸收镜的设计原理是以多膜层的光学镀膜理论为基础,将不同材料的膜层视为多个不同的界面,如图 1 所示。将光在多个膜层间的传输,看成正向和逆向光波传输的行波相互叠加,将光波电场在膜层界面处、膜层界面之间以及整体膜层外部的分布利用菲涅耳公式计算,从而得到相应的整个器件膜层内外各点处的电场分布情况,进而得到相应的表面反射率变化分布<sup>[5]</sup>。

图 2 所示为半导体可饱和吸收镜膜层结构和内部光电场分布示意图。膜层中采用 InGaAs 双量子阱结构作为可饱和吸收体,AlGaAs 作为势垒,底部反射层采用金膜,在金膜与吸收体之间加入一层

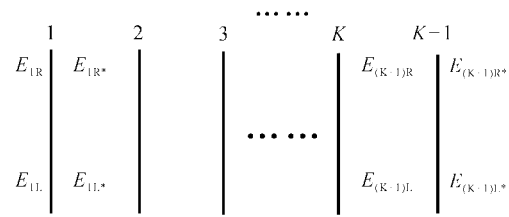


图 1 多膜层光波传输示意图

Fig. 1 Schematic of light transmission in multilayers

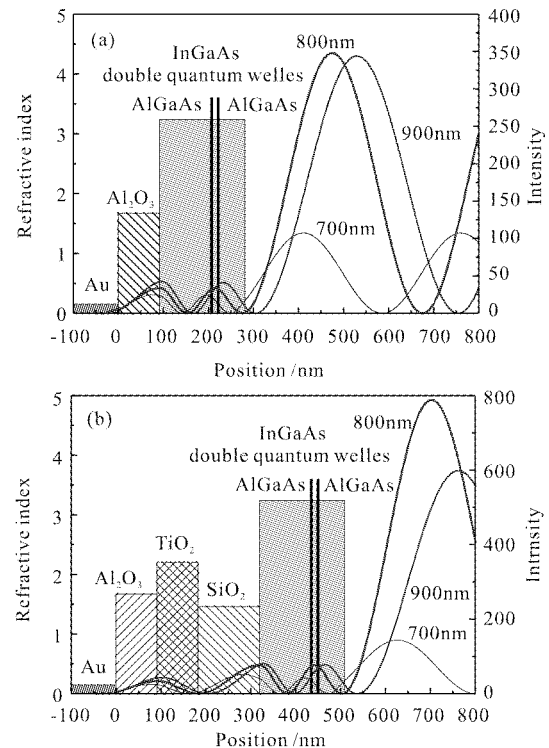


图 2 SESAM 内外电场分布示意图

(a) 结构 1; (b) 结构 2

Fig. 2 Schematic of electrical field distribution in SESAM

(a) construction 1; (b) construction 2

$\text{Al}_2\text{O}_3$  作为过渡层,加强与金膜的粘着力,采用镀制这种膜层的方法可以在一定程度上提高金属膜的反射率。其主要原理可利用所谓的导纳和导纳图的方法来解释<sup>[3]</sup>,半导体和金属膜之间所增加的那层“适当厚度”介质膜层厚度的计算方法<sup>[6]</sup>为

$$\frac{n_2 d_2}{\lambda} = \frac{1}{4\pi} \tan^{-1} \left( \frac{2n_2 k_m}{n_2^2 - n_m^2 - k_m^2} \right) + \frac{m}{4}$$

$$m = 0, 1, 2, \dots$$

一般取  $m = 1$ ,其中金属膜层的折射率  $n$  可以表示为  $n = n_m - ik_m$ ,  $n_2$  为此层过渡膜层的折射率,  $d_2$  即为相应的膜层厚度。

### 3 计算结果和分析

图 2,3 为 SESAM 内外驻波电场强度的分布情况,横轴表示各个膜层实际的相应位置,以金膜为底部反射膜层,把金膜一侧作为 SESAM 整体结构位置的 0 起点,不同直方块的横轴投影即为不同种材料的相应厚度。两个纵轴分别表示材料的折射率和电场的强度。图 2(a)中曲线所示为一种结构下的 SESAM 内外驻波电场强度分布情况(结构 1),从中可清楚地看到光电场在半导体可饱和吸收镜中的分布情况,三条曲线分别相应于入射光波长为 700 nm,800 nm 和 900 nm 时的光电场分布情况。可饱和吸收体 InGaAs 双量子阱结构正好位于中心波长驻波电场的波峰位置。

为了进一步增加反射率,我们改进了图 2(a)所

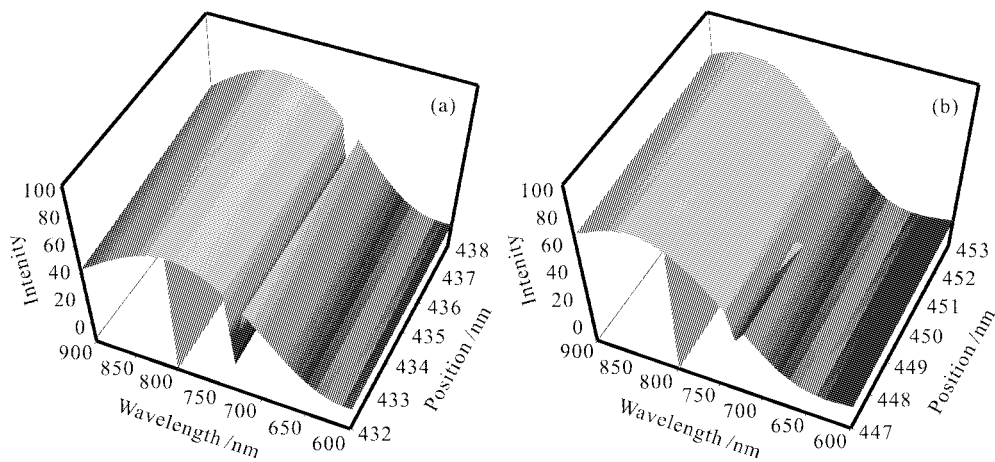


图 3 量子阱中电场分布示意图

(a) 量子阱 2, 4.5 nm; (b) 量子阱 1, 5 nm

Fig. 3 Schematic of electrical field distribution in quantum wells

(a) quantum well 2, 4.5 nm; (b) quantum well 1, 5 nm

作为对照,也把瑞士联邦工业大学的半导体可饱和吸收镜膜层结构和相应的光电场分布示意图画了出来,相应结构 3(图 4),其可饱和吸收体为 InGaAs 单量子阱,势垒为 GaAs,采用 AlAs 为隔离过渡层,底部反射层是银膜。

图 5 为三种结构的反射率比较,从图中可以看出我们所采用的双量子阱结构半导体可饱和吸收镜与瑞士联邦工业大学设计的半导体可饱和吸收镜相比具有更高的反射率( $>99\%$ ),而且在 650~950 nm 波段范围内均可以保持很高的反射率,同时反射带宽较宽( $>250$  nm),足以支持亚十飞秒量级的超短激光脉冲的产生;另外在图中还可看到,在采用第二种结构的情况下,在金膜上添加了一个  $\text{TiO}_2$

示结构。其基本膜层仍然采用 InGaAs 双量子阱结构,但是在  $\text{Al}_2\text{O}_3$  过渡层之后添加了一个  $\text{TiO}_2$  和  $\text{SiO}_2$  高反射层对,其光学厚度为中心波长的四分之一(图 2(b)所示结构 2)。这一结构可以非常有效地提高整个膜层结构的反射率,并且使反射曲线在较宽的反射范围内变得更加平缓。

图 3 中(a),(b)分别表示半导体可饱和吸收镜中两个量子阱可饱和吸收体内部的光电场分布。从图 3 中可以看出对应入射光波波长为 800 nm 时,量子阱可饱和吸收体中的电场强度为最大,这样的结果同初期预计的相符合,利于在钛宝石激光器中使用,便于有效地实现可饱和吸收、启动和稳定脉冲的锁模运转。

和  $\text{SiO}_2$  高反射层对之后,反射率较第一种结构有明显的提高,并且反射率曲线更趋平缓,保证了宽带高反的特点。由于在计算过程中,忽略了各种材料的非饱和吸收(可饱和吸收体除外)和散射损耗,所以实际得到的反射率要比计算值低一些。

将自行设计的半导体可饱和吸收镜插入飞秒钛宝石锁模脉冲激光器中进行锁模自启动实验,获得了较为满意的预期效果<sup>[4]</sup>。利用半导体可饱和吸收镜有效地实现了锁模的自启动运转,并且可以在较长的时间范围内保持锁模的稳定。在进一步改进优化膜层结构,提高加工工艺的基础上,将会获得更加满意的结果。

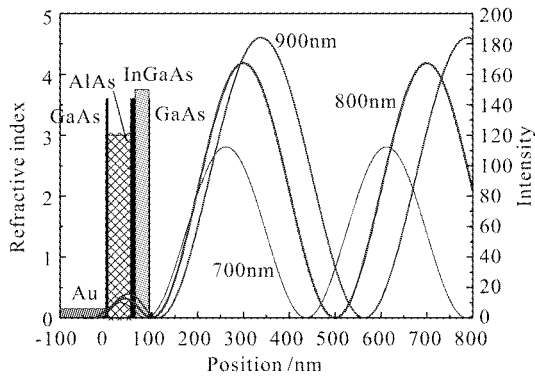


图 4 SESAM 内外电场分布示意图(结构 3)

Fig. 4 Schematic of electrical field distribution in SESAM (construction 3)

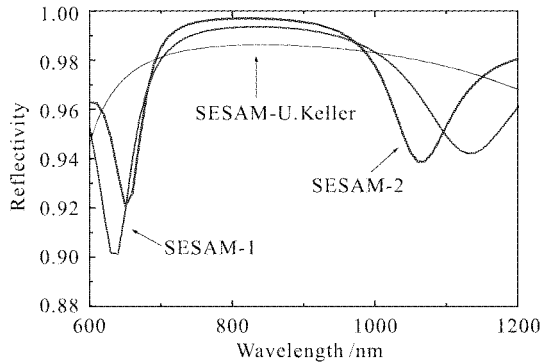


图 5 三种结构 SESAM 的反射率比较

Fig. 5 Comparison of reflectivity for three constructions

## 4 结 论

通过对于半导体可饱和吸收镜中电场分布情况的分析,可对可饱和吸收体的插入位置和相应厚度的变化做出定性和定量的判断,并且通过一系列膜层设计和加工工艺的改进,使其在获得宽带高反的基础上又能够保持较好的可饱和吸收特性,与国外同类器件相比具有非常好的光学特性。

## 参 考 文 献

- 1 U. Keller, D. A. B. Miller, G. D. Boyd *et al.*. Solid-state low-loss intracavity saturable absorber for Nd:YLF lasers; An antiresonant semiconductor Fabry-Perot saturable absorber [J]. *Opt. Lett.*, 1992, **17**(7):505~507
- 2 R. Fluck, I. D. Jung, G. Zhang *et al.*. Broadband saturable absorber for 10-fs pulse generation [J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(10):743~745
- 3 Z. Zhang, K. Torizuka, T. Itatani *et al.*. Broadband semiconductor saturable-absorber mirror for a self-starting mode-locked Cr:forsterite laser [J]. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(18):1465~1467
- 4 Zhang Zhigang, Chai Lu, Zhao Jiangshan *et al.*. Semiconductor saturable-absorber mirror for a self-starting mode-locked Ti:sapphire lasers [J]. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2002, **22**(9):1151~1152 (in Chinese)
- 5 I. J. Monzon, T. Yonte, L. I. Sanchez-soto. Basic factorization for multilayers [J]. *Opt. Lett.*, 2001, **26**(6):370~372
- 6 H. Angus Macleod. Thin-film Optical Filter [M]. Third edition, Institute of Physical Publishing, 2001. 141