

半导体可饱和吸收镜失效分析及改进方法研究

王勇刚, 马骁宇, 冯 健, 李 伟, 李照银

(中国科学院 半导体研究所, 北京 100083)

摘 要: 介绍了半导体可饱和吸收镜的锁模原理和制作方法, 通过分析超短脉冲激光与半导体材料作用原理, 阐述了提高半导体可饱和吸收镜抗激光损伤阈值的方法, 如吸收区掺杂、退火、扩大低温生长区、表面热沉等。实验中通过退火和镀介质薄膜使半导体可饱和吸收镜由不能工作转为能够工作, 并且获得稳定的连续锁模脉冲激光输出。

关键词: 超短脉冲激光; 半导体可饱和吸收镜; 损伤

中图分类号: TN24 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2276(2004)03-0256-04

Analysis about the invalidation and improvement research of semiconductor saturable absorption mirror

WANG Yong-Gang, MA Xiao-Yu, FENG Jian, LI Wei, LI Zhao-Yin

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

Abstract: The modelocking principle and the manufacture method of semiconductor saturable absorption mirror are introduced. By analyzing the behavior that ultrashort pulse acts on semiconductor material, some methods to increase the anti-damage threshold are put forward, such as doping in absorption layer, annealing, widening the area grown at low temperature, surface heat sink and so on. In experiment, several semiconductor saturable absorption mirrors could work and obtain stable passive modelocking pulse output after annealing and being coated with dielectric film.

Key words: Ultrashort pulse laser; Semiconductor Saturable Absorption Mirror (SESAM); Damage

0 引 言

20 世纪 80 年代以来, 超短脉冲激光技术得到迅猛的发展, 在分子反应动力学、激光测距、生物学、医

学、激光显示以及新材料等领域有广泛应用。半导体可饱和吸收镜 (SESAM) 技术发明于 1992 年^[1], 现已广泛地应用于固体激光器和光纤激光器被动锁模和被动调 Q 以实现短脉冲或超短脉冲。制作 SESAM 的关键是形成对激光具有非线性吸收的吸收层, 其对

收稿日期: 2003-08-15; 修订日期: 2003-10-22

作者简介: 王勇刚 (1973-), 男, 新疆乌鲁木齐人, 博士生, 主要从事固体激光器及光纤激光器锁模和调 Q 用吸收体的研制。

强光吸收少,反射率高;对弱光吸收多,反射率低。通常制作 SESAM 的方法有三种:低温分子束外延法(LT MBE),常温金属有机气相淀积(MOCVD)+离子注入+退火,低温金属有机气相淀积(MOCVD)。受设备限制,文中采用第三种方法。由于 SESAM 有一层吸收层,所以在强光作用下容易失效,这就迫切需要提高损伤阈值。

1 SESAM 制作方法及其原理

SESAM 的基本结构就是把反射镜与吸收体结合在一起。底层一般为半导体反射镜,其上生长一层半导体可饱和吸收体薄膜,最上层可能生长一层反射镜或直接利用半导体与空气的界面作为反射镜,这上下两个反射镜就形成了一个法布里-珀罗腔,改变吸收体的厚度以及两反射镜的反射率,可以调节吸收体的调制深度和反射镜的带宽。

通常,半导体的吸收有两个特征弛豫时间:带内热平衡(intraband thermalization)弛豫时间和带间跃迁(interband transition)弛豫时间。带内热平衡弛豫时间很短,在 100~200 fs 左右,而带间跃迁弛豫时间则相对较长,从几皮秒到几百皮秒。带内热平衡时间基本上无法控制,设计可饱和吸收器的时间特性主要是设法缩短带间弛豫时间。这个时间主要取决于半导体生长时衬底的温度,常规情况,生长时的温度越低,带间跃迁弛豫时间越短。但是低温生长会产生缺陷,一般选择 300~500℃。

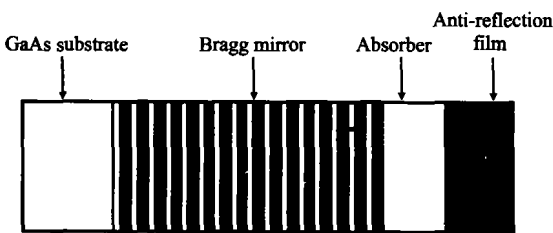


图 1 半导体布拉格反射镜结构的 SESAM 生长结构图
Fig. 1 The growth scheme of SESAMs with reflector based on semiconductor Bragg mirror

图 1 是布拉格反射镜结构的 SESAM 常规生长结构图。布拉格反射镜结构由 20 对以上的 GaAs/AlAs 交错生长而成,反射率可达到 98% 以上。布拉格反射镜结构的上面是量子阱结构,阱区为非线性吸

收区,是 SESAM 的核心组成部分。有时,量子阱结构的上面还生长高反或增透介质膜。整个结构的光学长度为使用波长的半奇数倍,构成反谐振腔结构。这种结构的 SESAM 用来产生皮秒级脉冲或亚飞秒(100~999 fs)脉冲。

图 2 是固体激光器用 SESAM 自启动的自锁模激光器系统。用来产生飞秒级脉冲,对 SESAM 抗损伤的要求更高。这种 SESAM 采用金属和介质构成的复合结构作为反射镜,制作成为宽带 SESAM。

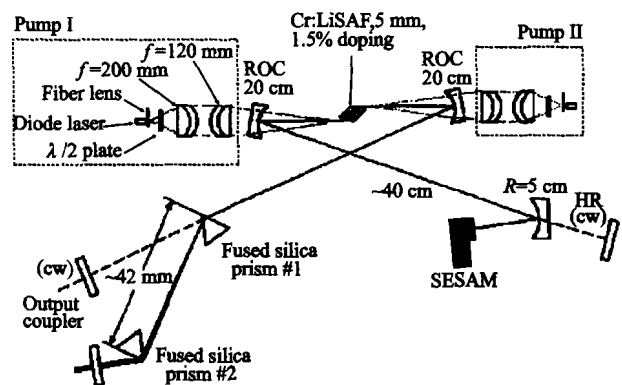


图 2 用 SESAM 启动的 Cr:LiSAF 克尔镜飞秒锁模光路
Fig. 2 Cr:LiSAF Kerr lens modelocking laser initiated by SESAM

2 连续激光与超短脉冲激光作用于半导体材料的差异

光学材料的激光损伤阈值是衡量其抗激光能力强弱的标志。SESAM 在抗激光能力更显突出。一方面,因为 SESAM 是用来作被动锁模用吸收体的。而作为被动锁模吸收体是利用反射率与人射光强成非线性的原理,入射到吸收镜上的光斑通常要聚焦到几到几十微米,这样就增大了功率密度。另一方面,锁模激光器的激光脉冲一般是皮秒乃至飞秒,平均功率虽然不大,但是峰值功率极大。此外,半导体材料的光损伤阈值要小于介质等材料。

连续激光与超短脉冲激光作用于半导体材料的热作用机理并不一样。在连续激光的辐照下,杂质有足够的时间和周围基质材料达到热平衡,杂质吸收对材料破坏的影响不像脉冲情况下那样严重,属于热传导性质的热作用。在超短脉冲或高功率密度的短脉

冲激光作用下半导体材料的热力学响应,在作用期间光斑区域向外扩散的能量微乎其微,所以光斑效应应该服从于以杂质缺陷吸收为主的热爆模型^[2]。

3 超短脉冲作用于不同材料的效果

3.1 超短脉冲作用于半导体材料

大量实验研究表明,纳秒以上宽度的脉冲激光与连续激光作用于半导体材料的热作用基本一致,是热传导形式的,单温的,即激光作用下晶格的温升和载流子的温升是同步的。而皮秒脉冲激光作用下的晶格的温升明显延迟于载流子的温升,且在脉冲作用过程中晶格温度比载流子温度低几倍^[3],飞秒脉冲激光更是如此。因此,用超短脉冲切割材料时破坏范围小,是未来激光加工和医用激光的发展方向。但是,对于 SESAM 来说,这是致命的,因为这样使得吸收镜的冷却装置起不到太大的作用。

半导体材料中有效的吸收机制有本征吸收、激子吸收、自由载流子吸收和杂质吸收等。本征吸收对应于价带电子吸收光子跃迁到导带,产生电子-空穴对。它的吸收系数比较大,可达 $10^5 \sim 10^6 \text{ cm}^{-1}$ 。激子能级位于接近导带底的禁带中,电离能很小,在室温下,已经电离了。所以在常温下激子的吸收是很弱的,可以不考虑。自由载流子可以在宽阔的红外光谱区引起吸收,载流子吸收系数和载流子浓度成正比。在 $h\nu > E_g$ 的激光作用下,由于光激发可以产生大量的过剩载流子,因此自由载流子吸收在激光与半导体材料相互作用过程中也是主要的吸收机制。由晶格振动的激发而引起的吸收一般比较小,只有在离子晶体或离子性比较强的化合物中才有显著的吸收作用。杂质吸收包括中性杂质吸收和电离的杂质吸收。一般只有在重掺杂的情况下它才是主要的^[3]。

入射激光在半导体中的传递机制可归纳为如下几种类型。

(1) 电介质型

入射激光的光子能量远小于半导体材料的禁带宽度,多光子过程和吸收是无足轻重的,在导带和价带没有自由载流子,在高激励下,光的基本吸收机理是光与晶格直接相互作用,导致高速的声子振荡。

(2) 金属型

半导体材料是强电导型的,入射激光的光子能量小于半导体材料的禁带宽度,此时多光子吸收也是无足轻重的,但导带和价带内有大量的自由载流子,吸收可能靠与自由载流子相互作用来实现,并以热能的形式传给晶格。

(3) 感应金属型

对于本征半导体材料,初始自由载流子浓度很低,入射激光的光子能量大于半导体材料的禁带宽度,此时初始吸收主要为本征吸收,产生大量自由载流子,随后自由载流子吸收也参与作用,与本征吸收一起成为主要的吸收机制,载流子吸收的光能同时以热能的形式传给晶格^[3]。

SESAM 工作时采用的吸收机制是感应金属型,入射激光的光子能量大于半导体材料的禁带宽度。此时吸收的大小可以通过调整吸收区的宽度做到。为了使吸收的光能尽量传递给晶格,可以有意识地进行掺杂,增加自由载流子,以便增加同晶格作用的机会。同时,可以考虑扩大低温生长区域(文献一般报道的只是吸收区为低温生长区域),以便扩大载流子复合区域,减轻单位体积材料受热作用的压力,增加抗损伤能力。

3.2 超短脉冲作用于氧化物膜

氧化物膜(如二氧化硅等)的抗激光损伤阈值一般要比半导体材料的抗激光损伤阈值高出几倍,所以可以考虑在 SESAM 外生长一层氧化物膜。氧化物膜与空气直接接触,将灰尘等阻挡在外面,灰尘作为吸热中心破坏氧化物膜的能力要比破坏半导体材料的能力弱得多。氧化物膜中, ZrO_2 和 HfO_2 等材料熔点高,有较强的耐单次激光损伤的能力,但因其热导率小,有一定的能量累积效应,对重复率激光易产生严重损伤, TiO_2 不适合做保护膜。 SiO_2 对大于损伤阈值的高能量密度激光来说,能降低薄膜损伤概率,减小损伤程度,因而能显著提高薄膜损伤概率阈值^[4]。

4 选择合适的热沉提高 SESAM 的损伤阈值

SESAM 采取和半导体激光器类似的后表面热沉。后表面热沉具有一定作用,但由于飞秒脉冲光进入正表面吸收区时热作用扩散距离极短,不超过

100 nm,而表面热沉距离正表面至少 50 μm ,所以即使进一步改进后表面热沉,也不能解决根本问题。垂直外腔面发射激光器(VECSEL)用一种蓝宝石做正表面热沉,该方法可以借鉴。也可以通过光刻等尝试一些正表面散热方法。另外,800 nm SESAM 在激光器形成飞秒脉冲时只是起到自启动作用,对其恢复时间要求并不苛刻,而恢复时间与非饱和损耗有关,所以,可以通过改变恢复时间来减少非饱和损耗。

5 研究 SESAM 发热的几种方法

为了定性地研究 SESAM 发热情况,需要采用有效地测量 SESAM 在激光作用下温度变化的手段。红外扫描热像法就是测量器件表面的温度及其分布的一种方法,其原理是热辐射定律,但是红外系统的分辨尺寸在 15 μm 以上,与光斑大小接近,所以测量不到更细微的信息;另一种方法是液晶法。液晶在不同的温度下对恒定光源反射不同波长的光,呈现出不同的颜色。通常随着温度的升高,由无色变红、变蓝再变紫,超过某一温度又变为无色^[5]。液晶法的分辨极限值是 4 μm ,缺点是液晶与 SESAM 表面接触,可能会对器件带来不利影响。

6 实验

实验中,首先采用了退火和镀介质膜的方法对器件进行改进。因为这两种方法工艺相对简单,比较容易进行,其他方法还在调研中。SESAM 结构如图 1 所示。吸收区材料为 $\text{In}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}/\text{GaAs}$ 量子阱结构。实验装置为 808 nm 光纤耦合半导体激光器泵浦的直腔结构的 Nd:YAG 激光器,泵浦功率为 5 W,如图 3 所示。 L_3 为热透镜效应补偿透镜, L_4 为聚焦透镜,目的是将入射在 SESAM 表面上的光强密度增大到非线性工作区域。脉冲光从腔中间分两束引出。采用直腔结构是因为腔型简单,容易调整,并且消除了色散,同时也降低了输出功率。

采用金属有机化学气相淀积设备生长 SESAM。当吸收区采用一个量子阱(生长温度为 500 $^{\circ}\text{C}$,厚度为 12 nm)时,可以得到稳定的连续锁模,当采用三个量子阱(生长条件与前面相同)或一个量子阱,而生长

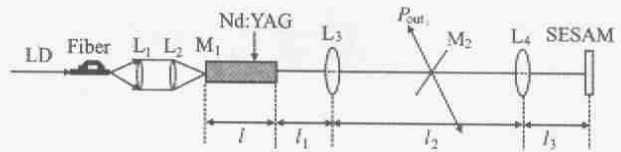


图3 用半导体可饱和吸收镜实现直腔结构 Nd:YAG 激光器被动锁模

Fig. 3 Passive modelocking of linear cavity Nd:YAG laser with semiconductor saturable absorption mirror

温度降为 400 $^{\circ}\text{C}$ 时,器件极易损坏,并且只能出现调 Q 锁模。采用多个量子阱,对大功率的激光器实现更窄的脉冲宽度是有利的,采用更低温度对实现更窄的脉冲宽度也是有利的,但是这样做都使得非饱和损耗大大增加。对这样的器件表面用 PECVD 生长了一层 20 nm 的 SiO_2 ,然后在 600 $^{\circ}\text{C}$ 温度下退火 5 min,再进行被动锁模实验,几个原来不能工作的器件都能够工作,并得到了连续锁模,如图 4 所示,重复频率为 150 MHz,脉冲宽度为 10 ps。

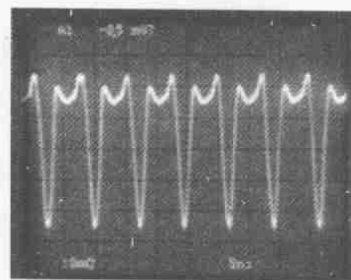


图4 示波器显示的连续锁模

Fig. 4 Continuous wave modelocking observed from oscillator

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 [J]. Opt Lett, 1992, 17(7): 505.
- [2] 郭少锋,陆启生,程湘爱,等.连续激光辐照下光学材料损伤阈值的斑斑效应[J].光学学报,2002, 22(9):1055.
- [3] 沈中华,陆建,倪晓武.皮秒和纳秒脉冲激光作用于半导体材料的加热机理研究[J].中国激光,1999, 26(9):859.
- [4] 胡建平,马孜,李伟,等.氧化物薄膜抗 1064 nm 脉冲激光损伤的特性研究[J].光学学报,2000, 20(2):262.
- [5] 李道成.半导体器件热测试[J].半导体情报,1993, 30(5):60.