

文章编号: 1001-3806(2005)01-0009-02

半导体致冷复合相变硅镜光照热有限元模拟

刘倚红, 余文峰*, 孙 峰, 程祖海 张耀宁
(华中科技大学 激光技术国家重点实验室, 武汉 430074)

摘要: 为克服高能激光用相变致冷镜两次出光时间间隔长的缺点, 设计了一种新型半导体致冷复合相变硅镜, 并采用 ANSYS 有限元程序模拟了实心硅镜、相变镜和半导体致冷镜的光照热行为。由最大温度-时间曲线可知, 在净吸收热量为 100W、环境温度为 20℃、制冷量为 25W 时, 半导体致冷复合相变硅镜只需 5s 就可使镜体的温度和弹性变形恢复至初始状态。

关键词: 半导体致冷; 相变硅镜; 高能激光; 光束质量

中图分类号: TN248.4 **文献标识码:** A

Finite element simulating about laser radiation of semiconductor-cooled composite phase change silicon mirror

LIU Yi-hong, YU Wen-feng, SUN Feng, CHENG Zu-hai, ZHANG Yao-ning
(National Laboratory of Laser Technology, HUST, Wuhan 430074, China)

Abstract: In order to overcome the shortcoming of long time interval between two shoots in the high-energy laser by using phase change material (PCM) cooled mirror, a novel semiconductor-cooled composite phase change silicon mirror is presented in this paper. Thermal process of laser radiation of solid silicon mirror, PCM and semiconductor-cooled mirror is simulated by ANSYS finite element program. From the largest temperature-time curves there can be seen that semiconductor-cooled composite phase change silicon mirror can restore the temperature of mirror and elastic deformation to their start for 5s in the 25W of refrigerating output under 20℃ of environment temperature and 100W of net absorption heat quantity.

Key words: semiconductor-cooled; phase change silicon mirror; high-energy laser; beam quality

引 言

在众多的反射镜基片材料中, 硅片因具有好的导热性能和好的光学加工性能, 而成为高能激光器的首选镜片材料。但当激光功率较大时, 硅镜的热变形^[1]也会影响激光光束质量。为在高能激光系统中减少全反镜热畸变、提高输出激光光束质量, 采用新型体结构以及有效的冷却措施已成为一种行之有效的重要途径, 于是相继出现了水冷多层铜镜^[2]、相变致冷镜^[3]等结构。实验证明, 相变致冷镜能显示出良好的性能, 能够有效地降低镜面热变形峰谷值, 减小 β 因子, 提高光束质量。但是, 相变致冷镜致命缺陷在于其工作的连续性, 当一束高能激光结束在镜面上的辐照后, 必须等待相变致冷镜内的相变物质冷却、凝固, 恢复回初始状态, 否则, 当后继光束辐照到镜面上时, 相变物质仍是液态, 不能够再次依靠吸收溶化潜热来吸收大量的

热能, 从而导致光束质量变坏。所以, 采用相变致冷镜的高功率激光器只能在间歇较长时间后才能继续工作。

本文中提出半导体致冷复合相变硅镜的目的就是为了力求缩短镜体变形弹性恢复的时间, 减少两次出光之间的时间间隔, 保证二次出光的光束质量, 提高工作的连续性以满足实际应用的需要。

1 半导体致冷复合相变硅镜的结构及工作原理

如图 1 所示, 该半导体致冷复合相变硅镜 (以下简称半导体致冷镜) 是由基底 (受光面)、半导体制冷

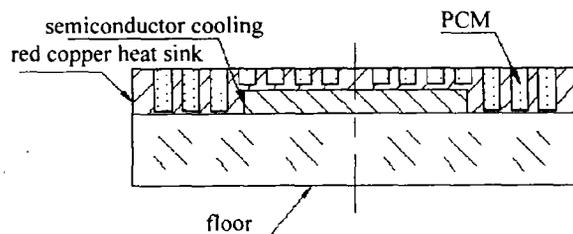


Fig 1 The construction of semiconductor-cooled composite phase change silicon mirror

片、相变物质及紫铜热沉组成的。基底材料为高电阻

作者简介: 刘倚红 (1975-), 女, 硕士研究生, 现从事气体激光器及关键光学器件研究。

* 通讯联系人。E-mail: gdlaser@hotmail.com

收稿日期: 2003-12-10; 收到修改稿日期: 2004-05-09

值;上层为紫铜热沉制备的热交换层,浸以相变材料,导热热量;在上层与基底的中间有半导体制冷片,它是半导体致冷镜的核心部分,其作用是快速抽运冷端的热量。所以,该半导体致冷镜的工作原理就是利用有机相变物质作为半导体制冷片的热端储能热沉,依靠半导体制冷片的珀耳帖效应^[4],可以从冷端快速抽运大量的热量,达到使冷端的镜面迅速冷却和恢复弹性形变的目的。

这种半导体致冷镜的关键在于,利用半导体制冷片的珀耳帖效应把半导体制冷片的冷端与基底接触,热端与热沉和相变物质相连,这里的相变物质虽然也担当相变储能的作用,但增加了制冷片,可以在极短的时间内更迅速地把基底的热量带走,激光辐照期间能够减小温升,辐照结束后能促使其快速冷却。这种技术把相变吸热和半导体制冷结合在一起,提高了镜体致冷效率。

2 冷却模拟

依照图 1 建立了半导体致冷镜 ANSYS 热分析模型:基底为厚 12.5mm、直径 80mm 的单晶硅,半导体制冷片尺寸为 40mm × 40mm × 4.2mm,与硅基底无空隙接触,即两者之间没有接触热阻。基底净吸收热量为 100W,环境温度为 20℃,所有工作材料与周围环境绝热。相变物质正十八烷工作在熔点状态,即 28.9℃。硅基底的夹持方式为边缘径向约束。采用 ANSYS 对实心硅镜、相变致冷镜和半导体致冷镜冷却过程的模拟,计算出冷却过程温度和变形随时间变化的曲线如图 2 和图 3 所示。

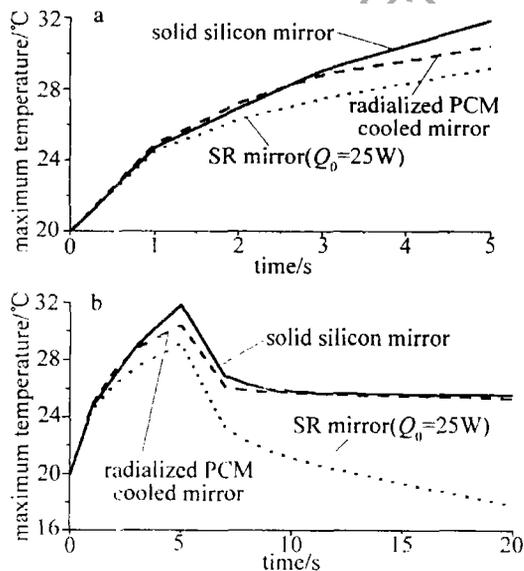


Fig 2 The largest temperature-time curves contrast during radiation and cooling between solid silicon mirror, radialized PCM cooled mirror and SR mirror a—during radiation b—during cooling

图 2 中为 3 种腔镜的整个加热、冷却过程的最

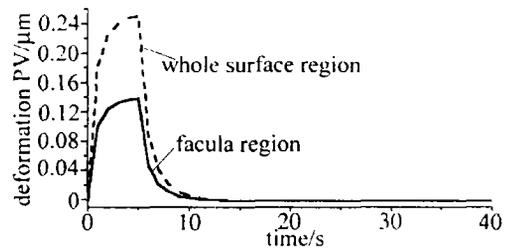


Fig 3 The differential changes of the largest temperature of SR mirror along with time via different refrigerating output

温度随时间变化曲线。其中图 2a 为加热段的最大温升的变化过程,由图可知,在第 5s 末,实心镜的温升最大,其次是相变致冷镜,半导体致冷镜最小。而且,可以注意到相变致冷镜在第 2s 末的温度仍高于实心硅镜,从第 2s 开始相变致冷镜的温升放缓,在第 2.5s 以后相变致冷镜的最大温度就一直小于实心硅镜了。这个现象的原因在于,因为相变致冷镜中的有机相变物质的热导率只有 $0.15\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,与硅的热导率 $140\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 相比非常小,在激光辐照的前 2s 中,相变物质还未开始大量吸热,此时导热率占主要因素,导热率大的温升慢,所以相变致冷镜温度较高;2 秒之后,相变物质开始起作用,相当于一个大的热容,阻止了热量在硅层中的沉积,此时吸收潜热的作用大于导热率,因此实心硅镜温度高于相变致冷镜。在第 5s 时 3 种镜体的最大温度列于表 1 中。

Table 1 The largest temperature of solid silicon mirror, radialized PCM cooled mirror and SR mirror at the fifth second

	solid silicon mirror	radialized PCM cooled mirror	SR mirror
the largest temperature/℃	31.895	30.443	29.2086

图 2b 中显示了实心硅镜、相变致冷镜和半导体致冷镜从激光辐照开始,到停止,到冷却的温度变化过程。计算中,实心硅镜与外界对流换热系数为 $10\text{W}/(\text{K}\cdot\text{m}^2)$ 。明显看到,相变致冷镜的冷却曲线降幅几乎与实心硅镜一致,二者最大温度之间的差距很小,在第 20s 和第 40s 时都只相差 0.2℃。最终,相变致冷镜冷却到初始温度需要 61min,比实心硅镜少 6min。虽然辐照刚结束时实心镜与相变致冷镜的最大温度像差约 1.5℃,但在冷却阶段,相变致冷镜中溶化的相变物质开始缓慢释放储存的热量,对于镜面而言,相当于一个热源在加热,从而导致冷却速率与实心硅镜相比没有更大的优势。对于半导体致冷镜,由于有半导体制冷片在不断地抽运热量,冷却速率极快,辐照停止后第 5s 时最大温度就已降到 20℃。

从图 2 可以看出:在整个加热、冷却过程中,对于镜体最大温度而言,半导体致冷镜低于实心硅镜和相

(下转第 17 页)

退化的现象,只要抽运光平均功率和探测光功率取值适当,即使是向上转换消光比也不会退化,这是普通交叉增益型波长转换器所不能比拟的。

2.5 消光比和注入电流的关系

图 8 中反应了不同的注入电流情况下,输出消光比随抽运光功率的变化情况,注入电流越大,输出消光比也越大,因为注入电流越大,提供的载流子浓度也越大,为输入光功率提供高的增益,使得输出的消光比增大。

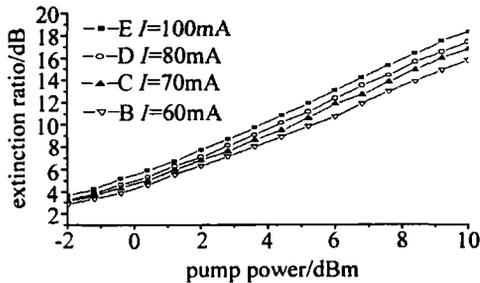


Fig 8 Output extinction ratio versus pump power in different bias current

3 结论

利用单端 SOA 实现波长转换比普通 SOA 实现波长转换可以获得更好的输出消光比特性,只要适当的调整并改变这些相关因素,就可以提高输出的消光比。本文中利用动态模型分析了影响输出消光比的各种因素。如输入抽运光的平均功率增加会提高输出消光比,注入电流增加也会提高输出消光比,探测光功率减小可以提高输出消光比,选择适当剩余反射率小的

SOA 也可以改善输出消光比,在波长转换器应用于实际全光网络中,难以预料的是何种波长的光要实现转换,所以,分析转换的波长转换间隔对输出消光比的影响显得很重要,模拟计算表明,应用单端 SOA 实现波长转换,当向下转换时,波长转换间隔对消光比的影响比较大,而且波长转换间隔的绝对值越小,输出的消光比也越小,当向上转换时,输出消光比存在局部极大值。总体上,输出消光比不会因为波长转换间隔的改变而出现消光比退化,在这点上优于普通交叉增益型波长转换器。

参 考 文 献

- [1] DURHUSS T, MIKKELESEN B, JOERGENSEN C. All-optical wavelength conversion by semiconductor optical amplifiers [J]. *J Lightwave Technol*, 1996, 14 (6): 942~954.
- [2] 张新亮,孙军强,黄德修.交叉增益型全光波长转换器消光比退化机理 [J]. *华中理工大学学报(自然科学版)*, 1999, 27(10): 15~17.
- [3] ZHANG X L, HUANG D X, SUN J Q. Extinction ratio improvement in XGM wavelength conversion based on novel scheme [J]. *IEEE International Conference on Communication Technology Proceedings*, 2000, 2: 1571~1574.
- [4] CONNELLY M J. Wideband semiconductor optical amplifier steady-state numerical model [J]. *Quantum Electron*, 2001, 37 (3): 440~443.
- [5] MIKKELESEN B. *Optical amplifiers and their system application* [D]. Copenhagen: Technical University of Denmark, 1994. 19~23.
- [6] WILLNER A E. Optimal spectral and power parameters for all-optical wavelength shifting: single stage, fanout, and cascability [J]. *J Lightwave Technol*, 1995, 13 (5): 771~779.

(上接第 10 页)

变致冷镜。尽管在激光辐照前 2s 内,这种优势并不明显,但在 2s 后,半导体致冷镜的最大温度就明显低于实心硅镜和相变致冷镜,尤其是在激光辐照停止 5s 后,半导体致冷镜的最大温度急剧下降,同实心硅镜和相变致冷镜相比,显示出不可比拟的优越性。

图 3 中比较了制冷量不同时的最大温度随时间变化关系。在加热段,制冷量越大,升温越缓慢,当制冷量大到一定程度时,尽管镜体还在受激光辐照,温度已随时间下降,如制冷量为 100W 时,第 5s 的温度低于第 1s 和第 2s 的温度值。在冷却段,制冷量越大,温度降低越迅速,甚至有可能达到零度以下。

以上计算结果表明,采用半导体致冷镜能够快速有效地降低镜面温度,制冷量越大,温度减小越快。镜面温升的减小使镜体内热应力变小,因此,采用半导体致冷镜能够提高镜体抵抗激光束破坏的阈值。而且由于半导体制冷片的制冷量采用直流电源电流调节,因而操作简单方便,易于控制。但值得注意的是:当激光停止辐照后,冷却速度很快,以至于半导体制冷片工作时间稍长,就容易使镜面结露,因此工作电流和开关时

间需要精确控制。且半导体制冷片并不能提高镜面的变形均匀性,对于减小热变形没有作用,所以,镜面热变形峰谷值与实心硅镜相比没有优势。

3 小结

这种半导体致冷镜利用相变吸热和半导体制冷片的珀耳帖效应可以使基底的热量在极短的时间内被迅速地带走。通过对实心硅镜、相变镜和半导体致冷镜的冷却模拟可知,制冷量为 25W 时只需 5s 就可使镜体的温度和弹性变形恢复至初始状态,并具有较低的功耗,故能满足高效冷却镜体的需要。

参 考 文 献

- [1] 张耀宁,程祖海,库耕 *et al* 硅镜热畸变研究 [J]. *中国激光*, 1997, 24 (8): 688~692.
- [2] 彭玉峰,程祖海,张耀宁 *et al* 强激光辐照下硅基片超薄多层金属镜的热畸变 [J]. *中国激光*, 2002, 29 (1): 21~24.
- [3] 张耀宁,彭玉峰,周次明 *et al* 相变制冷复合镜研究 [J]. *强激光与粒子束*, 2000, 12 (4): 77~79.
- [4] 徐德胜. *半导体制冷与应用技术* [M]. 上海:上海交通大学出版社, 1992. 3~5.