

文章编号:1001-5078(2007)03-0197-03

半导体可饱和吸收镜实现超短高功率脉冲激光研究进展

舒强¹, 舒永春¹, 刘如彬¹, 陈琳¹, 姚江宏¹, 许京军¹, 王占国^{1,2}

(1. 南开大学弱光非线性光子学材料先进技术及制备教育部重点实验室, 天津 300457;

2. 中国科学院半导体研究所半导体材料科学重点实验室, 北京 100083)

摘要:介绍了半导体可饱和吸收镜(SESAM)的基本结构及使用半导体可饱和吸收镜被动锁模固态激光器的基本原理。综述了利用半导体可饱和吸收镜被动锁模薄片式固态激光器及光泵浦垂直外腔面发射半导体激光器, 获得高平均输出功率超短脉冲的最新进展, 并指出量子点半导体可饱和吸收镜的使用将加速超短高功率脉冲的发展。

关键词:激光技术; 半导体可饱和吸收镜; 被动锁模; 薄片式固态激光器; 光泵浦垂直外腔面发射半导体激光器

中图分类号: TN248.1

文献标识码: A

Development of Semiconductor Saturable Absorption Mirror Used for High Average Output Power Ultrashort Pulses Laser

SHU Qiang¹, SHU Yong-chun¹, LIU Ru-bin¹, CHEN Lin¹, YAO Jiang-hong¹,

XU Jing-jun¹, WANG Zhan-guo^{1,2}

(1. Key Lab of Advanced Technique and Fabrication for Weak-Light Nonlinear Photonics Materials, Ministry of Education, Tianjin 300457, China; 2. Key Laboratory of Semiconductor Materials Science, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

Abstract: The basic structure and the fundamental principle of semiconductor saturable absorption mirrors (SESAM) that are used for passive mode-locking solid-state lasers are introduced. By using these mode-locking devices on novel thin-disk solid state lasers and optically pumped vertical-external-cavity surface-emitting semiconductor lasers (OP-VECSEL) to obtain high average output power ultrashort pulses are stated, and it is emphasized that the study of high average output power ultrashort pulses laser can be accelerated greatly by using the quantum dot SESAM.

Key words: laser techniques; semiconductor saturable absorption mirrors; passive mode-locking; thin-disk solid-state lasers; optically pumped vertical-external-cavity surface-emitting semiconductor lasers

1 引言

超短、高峰值功率的脉冲激光已广泛地应用于光纤通讯、医学、超精细加工、高密度信息存储、时间分辨光谱学等诸多领域。调Q技术和锁模技术是获得超短脉冲的两种主要方法。尤其是1991年出现的克尔透镜锁模方法(KLM)^[1]和1992年出现的SESAM锁模方法^[2]使超快脉冲领域得到了飞速发展。但由于激光器增益介质本身性能的限制, 输出功率能达到几瓦甚至几十瓦的皮秒或亚皮秒超短脉

冲输出一直很难实现。近几年出现的薄片式固态激光器(thin-disk solid laser)^[3]和光泵浦垂直外腔面发射半导体激光器^[4]使这个问题得到了改善。SESAM和这些新型激光器的结合, 使超短脉冲激光器的输出功率得到几倍甚至几十倍的提高。

基金项目:国家自然科学基金(60476042); 天津市应用基础研究计划06/FJZJC01100资助项目。

作者简介:舒强(1979-), 博士研究生, 主要研究方向为半导体光电材料与器件。E-mail: shuqiang@mail.nankai.edu.cn

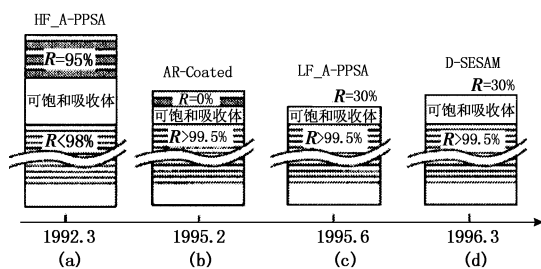
收稿日期:2006-07-10; **修订日期:**2006-08-22

本文主要介绍了 SESAM 的基本原理及发展状况,以及国际上使用 SESAM 被动锁模薄片式固态激光器及垂直外腔面发射激光器实现超短高功率皮秒或飞秒脉冲的最新进展。

2 半导体可饱和吸收镜 (SESAM) 的基本原理及发展状况

半导体可饱和吸收镜就是半导体可饱和吸收体和反射镜的结合。一般使用半导体布拉格层对构成底部反射镜,顶部采用高反射介电膜层或直接使用空气层作为反射界面,可饱和吸收体夹在中间。可饱和吸收体利用其自身的相应恢复时间作为时间选通门来对激光脉冲进行时间上的整形,对于脉冲中能量较低的部分完全吸收,引入损耗机制;当脉冲中能量较高的部分通过,达到可饱和吸收体的饱和吸收阈值时,可饱和吸收体在强光的作用下吸收饱和和被漂白而变得透明,这样使得后续部分得以在漂白恢复时间内无损耗地通过;而当可饱和吸收体达到响应恢复时间,重新恢复吸收特性后,新的可饱和吸收过程便再次重新开始。

SESAM 的工作波段以及可饱和吸收体的特征参数可通过控制半导体材料的生长条件来加以调整。在近十几年里,陆续出现了高精密度反共振法布里-珀罗标准具可饱和吸收体 (High-finesse A-FPSA)^[2]、无共振型可饱和吸收镜 (Thin AR-Coated SESAM)^[5]、低精密密度反共振法布里-珀罗标准具可饱和吸收体 (Low-finesse A-FPSA)^[6-7]、色散补偿可饱和吸收镜 (D-SESAM)^[8] 等一系列具有代表性的锁模器件,其发展历程及结构示意图如图 1 所示。



(a) 高精密度 A-FPSA; (b) 无共振型可饱和吸收镜;
(c) 低精密密度 A-FPSA; (d) 色散补偿可饱和吸收镜

图1 SESAM 锁模器件的发展历程及结构示意图

3 SESAM 被动锁模实现高功率超短脉冲

3.1 SESAM 被动锁模薄片式固体激光器实现高功率超短脉冲输出

多年来,在超短脉冲激光器领域的研究热点主要集中在体材料固体激光器。人们使用 SESAM 被动锁模体材料固体激光器,在皮秒脉冲量级已经得到了近 30W 的输出功率,但在飞秒脉冲量级的输出

功率却只有几瓦^[9]。这是由于传统的固体激光器冷却是沿着垂直光轴的横向进行热传递的,因而由于温度的升高所引发的热透镜效应等导致光束质量变差、能量的损失大,所以人们把晶体介质制成薄片(厚度为 100 ~ 200 μm),并采用 LD 对其进行泵浦,制成薄片式激光器。薄片的前表面有一个增透镀层,后表面是一个高反射镀层,同一个热沉安装一起,该平面同时构成激光器的反射镜之一。冷却沿着与光轴平行的方向进行。晶体内部温度的均匀分布大大消除了晶体的热透镜效应。这种薄片式激光器在高功率激光源领域有广阔的应用前景。图 2 为带 SESAM 薄片式激光器的装置示意图。

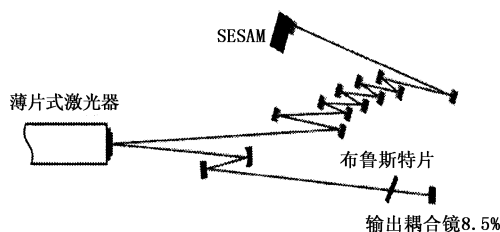


图2 使用 SESAM 被动锁模薄片式激光器的装置示意图

2000 年, J. Aus der Au 等使用 Yb:YAG 薄片作为增益介质,使用两个 30W 光纤耦合二极管激光器泵浦,用 SESAM 进行被动锁模,实现了 16.2W 的平均输出功率,脉冲宽度为 730fs^[10]。这是人们第一次使用 SESAM 被动锁模薄片式固态激光器,其输出功率比当时别的亚皮秒脉冲激光器的输出功率高一个数量级。他们使用的 Yb 薄片只有 220 μm 。SESAM 的吸收体是一个 8nm 厚的 $\text{In}_{0.26}\text{Ga}_{0.74}\text{As}/\text{GaAs}$ 单量子阱薄膜,其调制深度减小到了约 0.5%,通过低精密密度的反谐振腔设计,把其饱和通量降低到约 100 $\mu\text{J}/\text{cm}^2$ 。2003 年, E. Innerhofer 等使用一个 370W 的光纤耦合二极管激光器泵浦 Yb:YAG 薄片激光器,薄片厚度减小到 100 μm 。用一个 10nm 厚的 $\text{InGaAs}/\text{GaAs}$ 单量子阱 SESAM 进行被动锁模,得到了 60W 的输出功率,脉冲宽度为 810fs,中心波长是 1030nm^[11]。

Yb:KY(WO₄)₂ 晶体比 Yb:YAG 晶体具有更大增益带宽,理论上能得到更短的脉冲。2002 年, F. Brunner 等使用 Yb:KY(WO₄)₂ 晶体作为薄片激光器的增益介质,使用一个 100W 的光纤耦合二极管激光器泵浦,用 SESAM 进行被动锁模得到 240fs 的超短脉冲,输出功率达到了 22W,脉冲中心波长为 1028nm^[12]。将此前使用 SESAM 被动锁模掺 Yb 钨酸盐体材料激光器的输出功率 (1.1W) 提高了一个数量级^[13]。

本来 KLM^[1] 更适合于实现高功率输出,因为软光阑 KLM 不用引入耗损能量的光学元件,所以可以避免高功率情况下的热透镜效应。然而,KLM 需要工作在激光器谐振腔的稳定区的边缘,而且对于一些峰值功率不是很强的脉冲,克尔透镜效应也很弱,所以使用 KLM 的方法锁模薄片式激光器一直没能实现。虽然 SESAM 在高功率的情况下工作带来了很大的能量耗损,但人们可通过减小 SESAM 的调制深度(使用较薄的吸收体)来限制入射到 SESAM 上的强度,以避免非热耗损(比如多光子离子化),以及通过减小 SESAM 的饱和通量来降低热耗损,从而实现高功率超短脉冲的输出。

3.2 SESAM 被动锁模光泵浦垂直外腔面发射半导体激光器(OPS-VECSEL)实现超短高功率脉冲输出

OPS-VECSEL 是近几年刚出现的一种新型半导体激光器。它由一个多模泵浦二极管激光器的输出光被聚焦入射 VECSEL 芯片,激光腔由一个高反射率的镜面和一个外部的球面镜之间形成。多量子阱提供增益,外腔镜控制激光器的单横模模式。这样,OPS-VECSEL 把产生光能的多横模二极管激光器泵浦和泵浦光转变圆形基横模光学功能的 VECSEL 激光器结合在一起。图 3 为使用 SESAM 被动锁模的 OPS-VECSEL 的装置示意图。通过使用多泵浦单增益结构或多增益结构,OPS-VECSEL 的输出功率可以提高到数瓦特范围,而且 OPS-VECSEL 的增益带宽一般超过 5THz,理论上可以在不经过外部压缩的情况下产生亚 100fs 的脉冲。

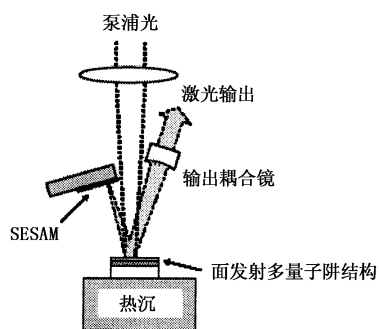


图3 SESAM 被动锁模 V 形腔结构 OPS-VECSEL 示意图

2000 年,Hoogland 等报道了第一台使用 SESAM 被动锁模的 OPS-VECSEL^[14]。SESAM 是一个低精密密度反共振结构。可饱和吸收体是一个 20nm 厚的 InGaAs/GaAs 单量子阱结构。这台激光器采用一个工作波长 810nm、输出功率 2W 的宽条二极管激光器连续泵浦,当芯片表面的泵浦光功率为 1.4W 时,VECSEL 的平均输出功率最大,为 21.6mW,脉冲宽

度为 22ps,中心波长为 980nm。由于热效应,进一步增加泵浦功率会使输出功率变小。

2001 年,R. Haring 等通过优化 VECSEL 的增益结构,使用一个单量子阱 SESAM 被动锁模 VECSEL,把平均输出功率提高到 200mW,脉冲宽度缩短到 3.2ps^[15]。2002 年,他们通过进一步降低增益结构的热阻,实现了 950mW 平均输出功率^[16]。

2005 年,Aschwanden 等报道了 2.1W 的平均功率^[17]。增益芯片采用 MOVPE 工艺按照与前述结构相反的顺序生长,并被焊接在一个铜热沉上。GaAs 衬底通过湿法腐蚀被除去,使得这个结构具有非常低的热阻,容许输出大的功率而不会过分发热。此 OPS-VECSEL 采用 V 形腔布局,并在 SESAM 和增益芯片之间插入了一个标准具,通过调整标准具的角度和热沉的温度,他们对输出功率做了优化。当泵浦功率为 18.9W,标准具与入射光垂直,热沉温度为 -40℃ 时,平均输出功率最大,为 2.1W。这也是目前使用 SESAM 被动锁模 OPS-VECSEL 得到的最高输出功率。

与固态激光器相比,OPS-VECSEL 谐振腔中的半导体量子阱结构,其相对小的增益饱和系数使它们能在 GHz 量级高重复频率下被动锁模而不会有调 Q 不稳定趋势,半导体低维材料的能带工程可使 OPS-VECSEL 工作波长和泵浦波长根据需要设计选择。同边发射半导体被动锁模激光器及电泵浦面发射半导体激光器相比,OPS-VECSEL 制作工艺更加简单,可以得到更高的输出功率和接近衍射极限的圆形光强分布^[18]。使用 SESAM 锁模 OPS-VECSEL 实现高功率超短脉冲输出已经成为人们近几年研究的热点。

4 总结与展望

总之,半导体外延技术的发展以及半导体材料在很宽的范围内可变的吸收带,使 SESAM 成为非常有潜力的被动锁模器件。SESAM 与薄片式固态激光器的结合,得到高功率飞秒脉冲为非线性波长转换及多光子光谱学的发展提供了巨大动力。SESAM 同 OPS-VECSEL 的集成,制成高功率输出、高重复频率的超短脉冲激光器在光通讯和激光测距方面有着广阔的应用前景。随着激光器增益结构的进一步优化及 SESAM 结构的进一步改进,特别是具有较大增益带宽的量子点 SESAM^[19] 的出现,人们有能力进一步提高超短脉冲激光器的输出功率。

(下转第 210 页)

光的相干组束功率输出远不能满足机载软杀伤光源的功率需求。

5 结 论

分别给出了光纤非相干和相干组束方法的组束个数,非相干组束方法可以实现几十到几百根的光纤激光合成,组束功率输出可以达到 10kW 量级,满足战术型激光武器的功率需求,是机载软杀伤光源的理想选择。而相干组束方法仅能实现几根光纤激光的功率合成,对于功率需求较高的战术激光武器光源,实用性较小。

(上接第 199 页)

参考文献:

- [1] Spence D E, Kean P N, Sibbet W. 60-fsec pulse generation from a self-mode-locked Ti:sapphire laser[J]. Opt. Lett., 1991, 16(1): 42-44.
- [2] Keller U, Miller D A B, Boyd G D. Solid-saturable absorber for Nd:YLF laser; an antiresonant semiconductor Fabry-Perot saturable absorber[J]. Opt. Lett., 1992, 17(7): 505-507.
- [3] Giesen A, Hügel H, Voss A. Scalable concept for diode-pumped high-power solid state lasers[J]. Appl. Phys. B, 1994, 58(5): 363-372.
- [4] Kuznetsov M, Hakimi F, Sprague R. High power (>0.5 W cw) diode pumped vertical external cavity surface-emitting semiconductor lasers with circular TEM₀₀ beams[J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 1997, 9(8): 1063-1065.
- [5] Brovelli L R, Jung I D, Kopf D. Self-starting soliton mode-locked Ti:sapphire laser using a thin semiconductor saturable absorber[J]. Electron. Lett., 1995, 31(4): 287-289.
- [6] Jung I D, Brovelli L R, Kamp M. Scaling of the antiresonant Fabry-Perot saturable absorber design toward a thin saturable absorber[J]. Opt. Lett., 1995, 20(14): 1559-1561.
- [7] Tsuda, Knox W H, Souza E A. Low-loss intracavity AlAs/AlGaAs saturable Bragg reflector for femtosecond mode locking in solid-state lasers[J]. Opt. Lett., 1995, 20(12): 1406-1408.
- [8] Kopf D, Zhang G, Fluck R. All-in-one dispersion-compensating saturable absorber mirror for compact femtosecond laser sources[J]. Opt. Lett., 1996, 21(7): 486-488.
- [9] Chen Y F, Tsai S W, Lan Y P. Diode-end-pumped passively mode-locked high-power Nd:YVO₄ laser with a relaxed saturable Bragg reflector[J]. Opt. Lett., 2001, 26

参考文献:

- [1] 王戎瑞. 美国机载激光武器发展现状[J]. 激光与红外, 1999, 29(4): 195-196.
- [2] 李红艳, 任向军. 光束合成技术研究及其应用[J]. 激光与光电子学进展, 2002, 39(7): 22-23.
- [3] T Y Fan. Laser Beam Combining for High-Power High-Radiance Sources[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2005, 11(3): 573-574.
- [4] Dmitrii Kouznetsov. Limits of coherent addition of lasers: simple estimate[J]. Applied Physics A, 2003, 189(4): 1601-1602.
- [5] (4): 199-201.
- [10] Aus der Au J, Sphler G J, Sdmeyer T. 16. 2W average power from a diode-pumped femtosecond Yb:YAG thin disk laser[J]. Opt. Lett., 2000, 25(11): 859-861.
- [11] Innerhofer E, Südmeyer T, Brunner F. 60W average power in 810fs pulses from a thin-disk Yb:YAG laser[J]. Opt. Lett., 2003, 28(5): 367-369.
- [12] Brenner F, Südmeyer T, Innerhofer E. 240 fs pulses with 22 W average power from a mode-locked thin-disk Yb:KY(WO₄)₂ laser[J]. Opt. Lett., 2002, 27(13): 1162-1164.
- [13] Brunner F, Spühler G J, Aus der Au J. Diode-pumped femtosecond Yb:KGd(WO₄)₂ laser with 1.1W average power[J]. Opt. Lett., 2000, 25(15): 1119-1121.
- [14] Häiring R, Paschotta R, Gini E. Picosecond surface-emitting semiconductor laser with >200 mW average power[J]. Electron. Lett., 2001, 37(12): 766-768.
- [15] Hoogland S, Garnache A, Sagnes I. Picosecond pulse generation with 1.5 μ m passively modelocked surface-emitting semiconductor laser[J]. Electron. Lett., 2003, 39(11): 846-847.
- [16] Hoogland S, Dhanjal S, Tropper A C. Passively mode-locked diode-pumped surface-emitting semiconductor laser[J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2000, 12(9): 1135-1137.
- [17] Aschwanden A, Lorenser D, Unold H J. 2.1 W picosecond passively mode-locked external-cavity semiconductor laser[J]. Opt. Lett., 2005, 30(3): 272-274.
- [18] Gamache A, Hoogland S, Tropper A C. Sub-500fs soliton-like pulse in a passively mode-locked broadband surface-emitting laser with 100 mW average power[J]. Appl. Phys. Lett., 2002, 80(21): 3892-3894.
- [19] Lagatsky A A, Rafailov E U, Sibbett W. Quantum-dot-based saturable absorber with P-N junction for mode-locking of solid-state lasers[J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2005, 17(2): 294-296.