

文章编号: 1001-3806(2007)03-0291-04

SESAM 锁模 OP-VECSELs 技术

张 鹏¹, 于未茗¹, 宋晏蓉^{1*}, 张志刚^{1,2}

(1. 北京工业大学 应用数理学院, 北京 100022 2 北京大学 量子电子研究所, 北京 100871)

摘要: 综述了半导体可饱和吸收镜 (SESAM) 锁模光抽运垂直外腔面发射半导体激光器的理论, 分析总结了相关实验技术手段, 对 SESAM 锁模 OP-VECSELs 的最新研究成果作了介绍。

关键词: 激光技术; 半导体可饱和吸收镜锁模; 光抽运垂直外腔面发射半导体激光器; 重复频率; 饱和能量; 饱和参数; 调制深度

中图分类号: TN248.4 文献标识码: A

Technology of SESAM mode-locked OP-VECSELs

ZHANG Peng¹, YU Weiming¹, SONG Yanrong¹, ZHANG Zhigang^{1,2}

(1. College of Applied Science, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China; 2. Institute of Quantum Electronics, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract The correlative experimental techniques of SESAM mode-locked OP-VECSELs were analyzed, and the latest results of relevant researches were introduced.

Key words laser technique; semiconductor saturable absorber mirror (SESAM) mode-locked optically pumped vertical external-cavity surface-emitting semiconductor lasers (OP-VECSELs); repetition rate; saturation energy; saturation parameter; modulation depth

引 言

半导体可饱和吸收镜 (semiconductor saturable absorber mirror, SESAM) 被动锁模技术, 用于光抽运垂直外腔面发射半导体激光器 (optically pumped vertical external-cavity surface-emitting semiconductor lasers, OP-VECSELs), 能综合发挥出 SESAM 锁模、大功率均匀光抽运、外腔选模、高微分增益半导体量子阱增益结构^[1]等诸多单元技术的优越性, 得到高重复频率 (几吉赫兹到几十吉赫兹)、高输出功率 (数瓦量级)、基横模近衍射极限圆形光束和无 Q 开关不稳定性的优质连续稳定锁模皮秒脉冲列, 在光时钟、光子开关、高速电光采样、时间分辨光谱学及频率转换 (倍频或抽运光参变振荡器) 等许多方面应用广泛。特别是在通信领域, 它是一种结构简单紧凑、输出性能优良, 且成本合理的新型高重复频率皮秒脉冲源, 可作为初级光源和多波长源, 有着十分诱人的前景。

1 锁模条件

在 SESAM 锁模 OP-VECSELs 中, 增益介质的饱和作用引起非线性相位改变^[2]:

$$\Delta\phi_g(t) = \frac{-\alpha_g g(t)}{2} \quad (1)$$

式中, α_g 是增益介质的线宽扩展因子, $g(t)$ 是无量纲的总的功率增益系数。对 SESAM, 对应线宽扩展因子 α_s 有类似的式子。由于 SESAM 通常工作在远高于带隙的较低激发水平 (与增益介质比较而言), 故 α_g 比 α_s 大许多, 因此, 尽管 SESAM 中的损耗 (负增益) 调制比增益介质中的大很多, 二者产生的非线性相位改变仍能在相近的量级。

增益介质中的非线性相位改变是正值, SESAM 中的则相反。典型情况下, 二者之和为负, 并在脉冲前沿某点达到一个最小值。当 OP-VECSELs 正的腔群延色散引入的相位改变与它刚好抵消时, 即可达到稳定的锁模状态。实验中, 由于增益介质和 SESAM 的饱和作用带来的非线性相位改变难于操作控制, 因而可在腔中插入一个标准具^[3,4], 一是可以调节控制腔色散, 其次也可以对激光波长进行一定范围的调谐。理论和实验都证明, 正的腔群延色散有利于脉冲的形成与稳定。

要自启动锁模运行, SESAM 的饱和吸收参数 S_a

作者简介: 张 鹏 (1969-), 男, 硕士研究生, 研究方向为超短脉冲技术和新型激光器。

* 通讯联系人。E-mail: yrsong@bjut.edu.cn

收稿日期: 2006-02-27; 收到修改稿日期: 2006-03-22

($S_a = \frac{E_p}{E_{sat a}}$, 其中 E_p 为腔内脉冲能量, $E_{sat a}$ 为饱和吸收能量, 即腔内脉冲能量与 SESAM 的饱和能量之比) 必须大于 1, 其典型值在 3 以上, 这样 SESAM 带来的负相位改变主要发生在脉冲前沿, 并基本上与脉冲能量无关。另一方面, 增益介质的饱和吸收参数则要工作在 $\left(S_g = \frac{E_p}{E_{sat g}} \right) S_g \ll 1$ 的状态。上述条件可写成:

$$\frac{S_a}{S_g} = \frac{E_{sat g}}{E_{sat a}} = \frac{F_{sat g} A_g}{F_{sat a} A_a} \gg 1 \quad (2)$$

式中, $F_{sat g}$ 和 $F_{sat a}$ 是增益介质和 SESAM 各自的饱和通量, $E_{sat g}$ 是增益介质的饱和能量。一般增益介质和 SESAM 都是基于相同材料系列的量子阱, 所以二者在同一量级; A_g 和 A_a 分别是增益介质和 SESAM 上的激光模式面积之比。因 $F_{sat g}$ 和 $F_{sat a}$ 相当, 故 (2) 式要求 $\frac{A_g}{A_a} \gg 1$ 。一般稳定锁模要求该值在 10~30 之间。实验中通过把腔长调节到稳区的边缘 (在常见的以 SESAM 和输出镜作为两端镜的 V 型腔中, 即让腔长约等于输出耦合镜的曲率半径, 并让 SESAM 所在的臂较长而输出镜所在一臂较短一些), 来使光束在 SESAM 上比在增益上更好地聚焦, 达到使 SESAM 比增益介质更强地饱和的目的。

关于锁模运行的稳定性, PASCHOTTA 等人的研究结果表明: 增益介质的饱和作用会带来激光波长相对于峰值增益处的红移, 与此相反, 可饱和吸收体则带来蓝移; 净蓝移下的脉冲是不稳定的, 而少许净红移下则可以稳定。低重复频率 (几吉赫兹) 时, 增益饱和作用较强, 它产生较大红移, 因而需要用高调制深度的 SESAM 片提升蓝移, 同时配以较高的输出耦合透过率; 高重复频率 (几十吉赫兹) 时, 由于增益饱和作用较弱, 则必须采用低调制深度的 SESAM 片, 配以低的输出耦合透过率, 降低蓝移, 同时提高抽运强度来增强红移。另外, 由于少许净红移的存在下锁模是稳定的, 所以实验中考虑附加一点红移是有益的。让 SESAM 工作在相对接近带隙也是有利的, 它可增大非线性相位改变的作用, 从而抑制其它的扰动, 以增强锁模的稳定性。

2 脉冲宽度

所有的锁模理论均指出, SESAM 锁模产生的脉冲宽度 τ_p (半峰全宽 FWHM: full width half maximum) 与 SESAM 的调制深度 ΔR 成反比关系:

$$\tau_p \propto \frac{1}{(\Delta R)^\beta}, \quad (\beta > 0) \quad (3)$$

β 是因锁模理论而异的指数。粗略的脉宽估算可用以下的式子:

$$\tau_p \approx \frac{1.07}{f_g} \sqrt{\frac{g}{\Delta R}} \quad (4)$$

f_g 是增益带宽, g 为单程饱和增益。

由此可见, 深度调制可以获得更短的脉冲宽度, 同时缓和自启动的要求。但深度调制会带来自调 Q 倾向, 同时带来过大的非饱和损耗 ΔR_{ns} 。虽然半导体材料较低的饱和通量会抑制自调 Q 的出现, 但过大的插入损耗对 SESAM 锁模 OP-VECSELs 这样的从本质上来讲是小增益的激光器还是很不利。

实验中获得近变换极限脉冲的方法是在尽可能地减小腔色散的条件下达达到锁模, 以削弱脉冲所带的啁啾, 减小时间带宽积。目前, 利用 SESAM 锁模 OP-VECSELs 得到的最短脉宽是 477 fs^[5]。

3 重复频率

在 SESAM 锁模 OP-VECSELs 中, 主要有以下几个因素对重复频率产生限制。

第 1 个限制来源于 Q 开关不稳定性。半导体量子阱较大的微分增益带来很强的饱和作用, 能有效抑制锁模过程中的自调 Q 的出现, 即使是在数吉赫兹重复频率上也能得到稳定的连续锁模脉冲。但当重复频率越来越高时, Q 开关不稳定的情况会变得越来越严峻。避免 Q 开关不稳定的条件是:

$$\frac{E_p}{E_{sat g}} > \frac{\Delta R}{S_a} \quad (5)$$

取 $S_a = 3$ 利用 (4) 式, 从 (5) 式可得到不出现自调 Q 的重复频率最大值:

$$f_{rep max} \approx 2.6 \frac{P_{int} (f_g \tau_p)^2}{F_{sat g g}} \quad (6)$$

式中, P_{in} 是腔内平均功率。

第 2 个限制来自重复频率的增加会减小腔内脉冲能量 E_p , 从而要求更低的调制深度 ΔR , 而低的调制深度导致更宽的脉冲宽度。过宽的脉宽在过大的重复频率下使脉冲间出现交叠, 这在实际应用中是不希望的, 这个方面也会对重复频率产生限制。

第 3 个限制来自腔长。大的重复频率要求对应极短的腔长 (如 50GHz 对应腔长 3mm), 当把如此短的腔调到稳区边缘时, 由机械振动或热漂移导致的很小的腔长变化都会引起增益介质和 SESAM 上模区面积大的变化, 激光变得对各种扰动都很敏感, 难于稳定运行。短腔的困难可通过把 SESAM 与半导体增益片集成, 亦或把 SESAM、增益片和输出镜三者一起集成的方式来解决。但此时的 SESAM 应是饱和通量小很多的量子点 SESAM 而非非常用的量子阱 SESAM。使用量

子点 SESAM (尚未进行上述的集成) 获得了迄今为止在 SESAM 锁模 OP-VECSELs 中产生的最高重复频率, $30\text{GHz}^{[6]}$ 。

最后的限制是由热问题引起的。重复频率增大, 腔内脉冲能量随之减小, 为了维持饱和水平, 势必要求光束在 SESAM 上更紧地聚焦, 与此同时光束在增益介质上也会更紧地聚焦, 从而导致增益上过高的温升, 熄灭激光; 或 SESAM 上过高的温升, 产生损坏。

4 输出功率

在 OP-VECSELs 中使用的光抽运方式和圆片状增益结构都是特别适合高功率运行的^[7]。精确控制外延生长过程得到的具有低散射损耗和高有效增益的半导体增益芯片^[8], 以及良好的散热处理, 是获得高输出功率的必要保障。

连续波 (continuous wave, CW) 运转的 OP-VECSELs 的输出功率为:

$$P_{\text{out}} = (P_p - P_{\text{th}}) \eta_{\text{diff}} \quad (7)$$

式中, P_p 是抽运功率, P_{th} 是激光阈值功率, η_{diff} 是微分效率, $\eta_{\text{diff}} = \eta_{\text{out}} \eta_{\text{quant}} \eta_{\text{abs}}$, 即为输出效率 η_{out} 、量子亏损效率 η_{quant} 和抽运吸收效率 η_{abs} 三者之积。

增大抽运功率可以得到更大的输出功率, 但为了减轻热问题, 必须增大抽运光斑, 同时更好地散热。在保持抽运功率密度不变时, 输出功率与抽运光斑面积大小成比例, 但这是以不出现温升导致功率下降为前提的。

在 (7) 式中, 激光阈值会随抽运光斑面积的增大几乎成线性地增加^[9]:

$$P_{\text{th}} = N_{\text{th}} \frac{h\nu W L_w A_p}{\eta_{\text{abs}} \tau(N_{\text{th}})} \quad (8)$$

式中, N_{th} 是阈值载流子密度, $h\nu$ 是光子能量, N_w 是半导体增益介质片中量子阱的个数, L_w 是量子阱厚度, A_p 是抽运光斑面积, $\tau(N_{\text{th}})$ 是与阈值载流子密度有关的载流子寿命。

CHILLA 等人用基于 InGaAs/GaAs 系的 OP-VECSELs 把抽运光斑从 $500\mu\text{m} \sim 900\mu\text{m}$ 之间范围变化, 得到了 30W 的当今最大的 CW 运行输出功率^[10]。

锁模运转之后, 调节内插的标准具, 调谐激光, 小的波长变化就会导致脉冲宽度和输出功率大的改变。可以以此来优化脉宽和输出功率, 从而得到最大的平均输出功率。目前的最大平均输出功率值是 2IW 。

5 热问题

当抽运光斑半径比半导体增益片, 即带分布布拉格反射镜 (distributed Bragg reflector, DBR) 的谐振周期增益 (resonate period gain, RPG) 结构的厚度大很多时, 可认为热量沿光腔轴向一维地流向热沉; 再设热源总

功率有横向的高斯分布, 则与增益片和热沉的接触面相比, 增益片上抽运光斑中心温升^[11]:

$$\Delta T_{\text{se}} = 2 \frac{P_{\text{heat}} d}{\pi w_p^2 \kappa_{\text{se}}} \quad (9)$$

式中, P_{heat} 即热源总功率, d , κ_{se} 分别是半导体增益片的厚度和热导率, w_p 则是抽运光斑半径。上述温升有 3 个主要的负面作用: (1) 随温度的升高量子阱增益会逐渐减小, 引发输出功率下降; (2) 温度升高使量子阱的发射波长以约 $0.3\text{nm}/\text{K}$ (对于 GaAs 结构) 的速度红移, 导致量子阱与驻波模交叠减小, RPG 结构失谐, 从而减小激光单程增益, 也会使激光功率下跌; (3) 量子阱的发射波长以约 $0.3\text{nm}/\text{K}$ 红移时, 材料折射率也随波长变化, 致使子腔 (DBR 与半导体-空气界面构成) 谐振波长同方向移动, 但其漂移速度大约只有 $0.1\text{nm}/\text{K}$, 一旦作更快移动的激光波长移出子腔共振之外, 激光即被熄灭。

当用热沉来对半导体增益介质片进行冷却时, 因为基质的存在延缓了热量通过 DBR 向热沉传递的过程, 所以最早的办法是利用蚀刻去除基质层^[12, 13], 在 DBR 后粘贴热沉。但蚀刻会导致表面质量问题, 引入很大的损耗。更好的办法是让热从增益区直接扩散掉, 这也是目前为止最好的散热处理, 即采用液体毛细绑定 (liquid capillary bonding) 技术, 通过范德瓦耳斯力的作用, 把散热片直接粘合在半导体芯片的上表面来散热。有报道^[14]证明用一块蓝宝石散热片贴上后即可使半导体片温度下降约 50% 。常用散热片材料的导热系数按大小排列依次是: 金刚石、碳化硅、硅、氮化镓和蓝宝石等。

因金刚石良好的导热性能和光学性能, 在 VECSELs 上表面贴金刚石片作散热处理的技术越来越多地被采用, 但也要考虑到这样一来会形成标准具效应。高功率下还常在 DBR 与热沉之间再贴一片单晶金刚石作为传热片来把热迅速有效地从 DBR 带走。散热片的粘贴必须注意材料热膨胀系数的匹配, 以免出现不必要的应力和分层。

另一方面, SESAM 上的温升则在高重复频率时变得显著。它与重复频率的关系近似为:

$$\Delta T_{\text{SESAM}} = \frac{1}{\sqrt{2\kappa_{\text{SESAM}}}} \sqrt{P_{\text{int}} f_{\text{rep}} F_{\text{sat}} S_a} \times \left[\Delta R_{\text{ns}} + \frac{\Delta R}{S_a} (1 - e^{-S_a}) \right] \quad (10)$$

式中, κ_{SESAM} 和 ΔR_{ns} 是 SESAM 的热导率和非饱和损耗, f_{rep} 是脉冲重复频率, 其余各量均已在前面提及。高重复频率下的 SESAM 温升会导致 SESAM 的损坏, 此时 SESAM 也需要作散热处理。缓和重复频率下 SES-

AM 温升的有效措施之一是采用前面提到过的低饱和通量 F_{sat} 的量子点 SESAM。

6 小 结

理论上半导体材料大于 5THz 的增益带宽典型值足以支持 100fs 以下的脉冲^[15]；其高重复频率下较弱的 Q 开关不稳定性倾向使其重复频率可达几十吉赫兹，甚至超过 1THz^[16]；而 SESAM 被动锁模技术也已获得高达 160GHz 的重复频率。所以，随着半导体增益片生长技术的进一步提高和散热处理的进一步完善，再对光腔的设计进行不断优化，以及通过发展前面所提的单片集成技术，SESAM 锁模 OP-VECSELs 各方面的性能都有望得到进一步的提升，成熟的 SESAM 锁模 OP-VECSELs 器件也会在不久的将来进入商业化阶段，在各个领域一显身手。

参 考 文 献

- [1] ZHU W J GUO X LIAN P *et al* Characteristics comparison of a novel vertical cavity surface-emitting laser [J]. *Laser Technology*, 2003, 27 (4): 325~ 327(in Chinese).
- [2] PASCHOTTA R, HARING R, GARNACHE A *et al* Soliton-like pulse-shaping mechanism in passively mode locked surface-emitting semiconductor lasers [J]. *Appl Phys* 2002, B75(4): 445~ 451
- [3] ASCHWANDEN A, LORENSER D, UNOLD H *et al* 2.1W picosecond passively mode locked external cavity semiconductor laser [J]. *Opt Lett* 2005, 30(3): 272~ 274
- [4] CASEL O, WOLL D, TREMONT M A *et al* Blue 489nm picosecond pulses generated by intracavity frequency doubling in a passively mode locked optically pumped semiconductor disk laser [J]. *Appl Phys* 2005, B81(4): 443~ 446
- [5] GARNACHE A, HOOGLAND S, TROPPER A C. Sub-500fs soliton-like pulse in a passively mode locked broad-band surface-emitting laser with 100mW average power [J]. *A P L*, 2002, 80(21): 3892~ 3894
- [6] LORENSER D, UNOLD H, JMAAS D, JH C *et al* Towards wafer-scale integration of high repetition rate passively mode locked surface-emitting semiconductor lasers [J]. *Appl Phys* 2004, B79(8): 927~ 932
- [7] TROPPER A C, FOREMAN H D, GARNACHE A *et al* Vertical external cavity semiconductor lasers [J]. *J Phys* 2004, D37(9): R75~ R85.
- [8] CAO S S. Review of high power semiconductor lasers [J]. *Laser Technology*, 2000, 24(4): 203~ 206(in Chinese).
- [9] KUZNETSOV M, HAKMIE, SPRAGUE R *et al* Design and characteristics of high-power (0.5W CW) diode-pumped vertical external cavity surface-emitting semiconductor lasers with circular TEM₀₀ beams [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 1999, 5(3): 561~ 573.
- [10] CHILLA J, BUTTERWORTH S, ZEITSCHEL A *et al* High power optically pumped semiconductor lasers [J]. *Proc SPIE*, 2004, 5332: 143~ 150.
- [11] HÄRING R, PASCHOTTA R, ASCHWANDEN A *et al* High-power passively mode locked semiconductor lasers [J]. *IEEE J Q E*, 2002, 38(9): 1268~ 1275.
- [12] HOOGLAND S, DHANJAL S, TROPPER A C *et al* Passively mode locked diode pumped surface-emitting semiconductor laser [J]. *IEEE Photonics Technology Letters* 2000, 12(9): 1135~ 1137
- [13] LUTGEN S, ALBRECHT T, BRICK P *et al* 8W high efficiency continuous wave semiconductor disk laser at 1000nm [J]. *A P L*, 2003, 82(21): 3620~ 3622
- [14] ALFORD W J, RAYMOND T D, CRAWFORD M H *et al* High power (> 1W) good beam quality surface-emitting semiconductor laser [J]. *J O S A*, 2002, B19(4): 663~ 666.
- [15] HOOGLAND S, GARNACHE A, SAGNES I *et al* Picosecond pulse generation with 1.5W passively mode locked surface-emitting semiconductor laser [J]. *Electron Lett* 2003, 39(11): 846~ 847
- [16] ARAHARA Sh, MATSUY, OGAWA Y. Mode locking at very high repetition rates more than terahertz in passively mode locked distributed Bragg reflector laser diodes [J]. *IEEE J Q E*, 1996, 32(7): 1211~ 1224.
- [6] GUSTAFSSON M, SEBESTA M, BENGTSSON B *et al* High-resolution digital transmission microscopy—a Fourier holography approach [J]. *Optics and Lasers in Engineering* 2004, 41(3): 553~ 563.
- [7] NOVAK E. MEM Metrology techniques [J]. *Proc SPIE*, 2005, 5716: 173~ 181.
- [8] YUAN C J, ZHONG L Y, WANG Y P *et al* The analysis of off-axis digital holographic recording conditions [J]. *Laser Technology*, 2004, 28(5): 482~ 485(in Chinese).
- [9] YASUHIRO T, HITOSHI O. Fast numerical reconstruction hybrid holographic microscopy [J]. *Appl Opt* 1999, 38(11): 2204~ 2211
- [10] LI J C. Diffraction of laser and calculation on thermal acting [M]. Beijing Science Press 2002, 48~ 54(in Chinese).

(上接第 290 页)