

光泵浦外腔半导体激光器的研究进展

张守权¹, 邵志强²

(1. 海军装备部驻沈阳地区军事代表局, 辽宁 沈阳 110031; 2. 中国电子科技集团公司第四十九研究所, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要:从谐振腔和半导体增益介质的角度介绍了光泵浦外腔面发射半导体激光器的基本结构, 评述了国内外在该领域的最新研究进展, 探讨了该类型激光器在大功率、小型化技术方面的发展前景。

关键词:谐振腔; 半导体增益介质; 光泵浦垂直外腔面发射半导体激光器; 大功率

中图分类号: TN248.4 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2016.02.001

Research development of optical pumped external cavity semiconductor laser

ZHANG Shou-quan¹, SHAO Zhi-qiang²

(1. The Shenyang military representation office of navy equipment department, Shenyang 110031, China;

2. China Electronics Technology Group Corporation No. 49th Research Institute, Harbin 150001, China)

Abstract: The basic structure of optical pumped vertical external cavity surface emitting semiconductor laser (OP-VECSEL) was introduced from resonant cavity and semiconductor gain medium. The latest development of OP-VECSEL was reviewed. The development prospect of this laser was discussed in high power and miniaturization.

Key words: resonant cavity; semiconductor gain medium; OP-VECSEL; high power

1 引言

近些年来, 半导体二极管激光器和固体激光器技术已经日趋成熟, 在大功率和光斑质量等方面的性能仍在不断提升, 但是由于其固有的结构和发光机理上的特点, 限制了其进一步发展。固体激光器的光功率稳定、噪声低、光束质量好。但是由于固体激光器的工作物质是晶体, 晶体的种类有限, 限制了激光器的波长可选择范围。半导体二极管激光器因为其效率高、质量轻、波长范围广、体积小、可靠性高, 近些年来成为光电子技术领域的重要器件。但是半导体激光器也存在不足: 面发射型半导体激光器输出光斑很理想, 但是在单模工作时, 很难达到大功率输出。边发射型半导体激光器可以获得大功率

输出, 但是其输出光斑质量差。以至于在应用时需要外加一套结构复杂的光束整形系统。垂直外腔面发射半导体激光器虽然能够弥补以上两类激光器的不足, 但是垂直外腔面发射半导体激光器使用的是电泵浦, 串联电阻上有一定的电能损耗, 电流的波动增加了器件的不稳定性, 最后影响激光器输出光束的质量^[1]。

光泵浦垂直外腔面发射半导体激光器 (Optically pumped vertical external cavity surface emitting laser, OP-VECSEL) 在 1997 年被美国的 Kuznetsov 首次提出, 随后世界各国的激光界科学家对其产生了浓厚的兴趣。国内的长春光机所、南开大学、北京工业大学、长春理工大学、重庆师范大学等研究机构对

作者简介: 张守权 (1978 -), 男, 工程师, 主要从事装备质量监督工作。E-mail: 58144748@qq.com

通讯作者: 邵志强 (1991 -), 男, 助理工程师, 从事全固态激光器及半导体激光器技术研究。E-mail: szq880227@163.com

收稿日期: 2015-05-25; **修订日期:** 2015-06-23

其展开了相应的研究工作,并取得了一定的研究成果。在国外,芬兰、德国、瑞士、英国和美国在 OP-VECSEL 研究方面投入了大量的精力,在脉冲锁模、腔内倍频、可调谐运转和高功率等技术领域均取得了极大的成功^[2]。

国内外激光科学界之所以花费大量的经历去研究 OP-VECSEL,是因为 OP-VECSEL 具有激光二极管泵浦固体激光器的优点,既可以方便地进行腔内倍频、调谐运转,又能获得高质量的输出光束。同时它还兼备了半导体激光器的优点,利用半导体能带工程,可以自行设计自己需要的波长。更重要的是,使用激光作为泵浦源,半导体增益芯片结构简单,无电接触,无 pn 结,极大地简化了生长过程,既提高了增益芯片的可靠性,又消除了附加电阻上的热效应,提高了激光器的转化效率^[3-4]。

本文从谐振腔和半导体增益介质的角度介绍了光泵浦垂直外腔面发射半导体激光器的基本结构,评述了国内外在该领域的最新研究进展,探讨了该类型激光器在大功率、小型化技术方面的发展前景。

2 OP-VECSEL 的基本结构

图 1 展示了 OP-VECSEL 的基本结构图,OP-VECSEL 结构非常简单,主要由泵浦源、聚焦透镜、半导体增益介质、热沉、输出耦合透镜几部分组成。图 2 是 OP-VECSEL 半导体增益介质结构图,半导体增益介质主要由多层分布反馈布拉格反射镜 (DBR) 和多量子阱结构的增益区、保护层和窗口层组成。泵浦光源发出的泵浦光束经过聚焦透镜聚焦后入射到多量子阱结构的增益区。

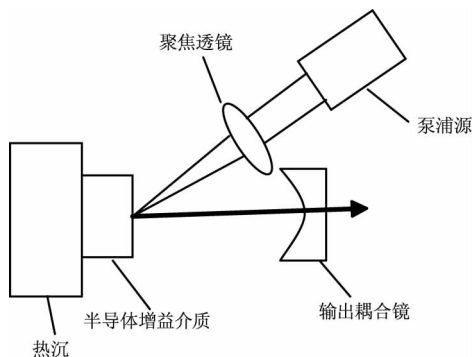


图 1 OP-VECSEL 的基本结构图

Fig. 1 OP-VECSEL basic structure

量子阱增益区吸收泵浦光后产生电子、空穴,电子和空穴扩散至量子阱并被其俘获,提供激光器的粒子束反转。电子和空穴经过辐射复合后发光,产生光子,光子在由 DBR 和输出耦合透镜组成的谐振腔内振荡,产生激光。

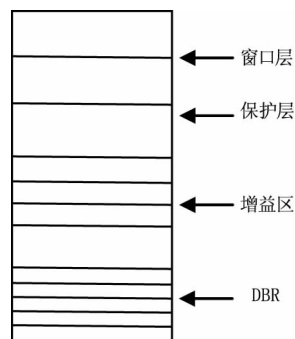


图 2 OP-VECSEL 芯体结构图

Fig2 OP-VECSEL core body structure

另外,可以根据需要将激光器的谐振腔设计成 V 型、W 型或者 Z 型,通过谐振腔形状及尺寸的设计:改变泵浦光的抽运方式,增加有源层对泵浦光的吸收效率;对输出镜尺寸的合理选择,控制激光器的输出模式特性;在谐振腔内部插入倍频晶体及调谐器件,获得倍频光或者脉冲光输出。以使输出的光束质量满足应用需求。

也可以通过选择不同的半导体材料体系,来制造不同波长的激光器,现有的能用来制作 OP-VECSEL 的半导体材料体系基本能覆盖紫外到红外的所有波长范围。目前,800 nm ~ 1.5 μm 波段对应的半导体材料体系是最常用的半导体材料体系。常用的比较成熟的半导体材料体系还有:InGaAsP-InP、InGaAs-InGaAsP-GaAs、InGaAs-AlGaAs-GaAs 等。

3 OP-VECSEL 的国内外发展现状

自从 OP-VECSEL 在 1997 年被美国的 Kuznetsov 首次提出后,近十几年来国内外激光界科学家对其投入了大量的研究工作。关于激光器的相关技术(大功率技术、被动锁模技术、倍频技术、可调谐运转技术)不断被应用到 OP-VECSEL 领域,并取得了很大的成功。每年都有大量关于 OP-VECSEL 的文献报道。

3.1 国外发展现状

理论上 OP-VECSEL 可以实现高功率输出,但是在 OP-VECSEL 发展初期,散热问题一直限制着 OP-VECSEL 输出功率的提升。半导体增益介质内部的温度上升会导致布拉格反射镜和有源区的材料参数发生变化,最终使输出功率降低。OP-VECSEL 发展至今,科学家们选择各种方法增强半导体增益介质的散热性能,提高激光器的输出功率。

Kuznetsov 的实验小组使用激光二极管抽运半导体激光芯体,得到了最大输出功率为 0.69 W 的 TEM₁₁ 模激光输出,工作波长为 980 nm^[5]。半导体

增益介质的结构为:30 对 $\text{Al}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}/\text{GaAs}$ 组成的 DBR 作为激光器的全反镜,有源层由 13 对 $\text{Al}_{0.08}\text{Ga}_{0.92}\text{As}/\text{In}_{0.16}\text{Ga}_{0.84}\text{As}$ 组成。ALFORD 等人把一个未镀膜蓝宝石窗口与 VECSEL 增益区前表面相连,蓝宝石使得热量从工作区直接通过 DBR 释放。该技术的使用,实现了最大输出功率为 1.6 W 的连续激光输出^[6]。HASTIE 等人使用 SiC 代替蓝宝石作为热扩散平板,将此技术应用到 $\text{GaInP}/\text{AlGaInP}/\text{GaAs}$ VECSEL,得到最大输出功率为 0.5 W 的 TEM_{00} 模 850 nm 激光输出^[7]。在此实验基础之上,他们又将泵浦源换为波长为 810 nm 的光纤耦合激光器,得到最大输出功率为 2.5 W 的 980 nm $\text{InGaAs}/\text{GaAs}$ VECSEL。随后,研究人员采用毛细绑定散热窗口、基质刻蚀、热管理技术改善 OP-VECSEL 的性能。到目前为止,采用毛细绑定散热窗口技术获得的最大输出功率为 9.1 W^[8];采用基质刻蚀的技术获得的最大输出功率为单模 20 W^[9];采用多片增益结构获得的最大输出功率为 70 W^[10]。

半导体饱和吸收镜 (SESAM) 是利用半导体材料对光具有吸收的特性制成的可饱和吸收体。作为可饱和吸收体,SESAM 可直接用于皮秒至飞秒量级的被动锁模激光器中。吉赫兹量级的皮秒脉冲光源可以应用在高速电光采样、时间分辨光谱学、光时钟、频率转换等领域。实验证明了将 SESAM 用于 OP-VECSEL 可获得连续稳定的吉赫兹量级的皮秒脉冲序列,并且输出的光束质量很好。

图 3 为 OP-VECSEL 被动锁模腔体结构示意图,SESAM 作为谐振腔的一个腔镜使用。SESAM 和半导体增益介质内部的 DBR、OC 共同组成被动锁模激光器的谐振腔。当激光在谐振腔内部振荡时,产生吉赫兹量级的皮秒脉冲激光输出。

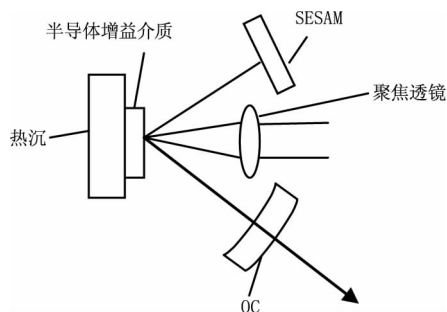


图 3 OP-VECSEL 被动锁模腔体结构示意图

Fig. 3 OP-VECSEL passive mode-locking cavity structure diagram

使用 SESAM 作为锁模元件,HÄRING 等人得到了半峰全宽为 3.2 ps、发射波长为 963 nm、平均输出功率超过 200 mW 的 $\text{InGaAs}/\text{GaAs}$ VECSEL^[11]。在

此基础之上,他们又得到了半峰全宽为 15.3 ps、发射波长为 952 nm、平均输出功率高达 950 mW、脉冲重复频率为 6 GHz 的 VECSEL。

HOOGLAND 等人使用 SESAM (SESAM 由一个 $\lambda/2$ 抗反射谐振腔和 20 mm 厚的 $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ 量子阱构成,位于 V 型谐振腔的末端)^[12]。作为锁模器件,得到了波长为 1000 ~ 1040 nm、半峰宽度为 22 ps 的 $\text{InGaAs}/\text{GaAs}$ 脉冲 OP-VECSEL。SESAM 包括两部分响应时间,4 ps 的慢恢复时间和 30 fs 的快速响应时间。K. G. wilcox、Z. Mihoubi 等人报道了一台 SESAM 被动锁模 OP-VECSEL^[13]。SESAM 由距离空气交界面 2nm 的 GaAs 量子阱组成。得到了输出光束脉冲间隔 15.3 ps、重复频率 1.9 GHz、线宽 0.63 nm 的 832.5 nm 脉冲激光输出。

OP-VECSEL 拥有和固体激光器同样的谐振器结构,因此固体激光器的相关技术(倍频技术、可调谐运转技术等)同样可用于 OP-VECSEL。芬兰的 Emmi Kantola、Tomi Leinonen 等人成功地将倍频技术、可调谐运转技术应用于 OP-VECSEL,研制了一台最高输出功率为 20 W 的可调谐运转黄光 OP-VECSEL^[14]。

图 4 是他们的实验装置图。他们使用最大输出功率为 200 W、输出波长为 808 nm 的激光二极管作为泵浦源。半导体增益介质的有源区采用 GaInAs-GaAs-GaAsP 组合结构。半导体增益介质有源区的发射为 1170 ~ 1180 nm,整台激光器采用 V 型结构谐振腔。在激光器谐振腔的一个腔臂内插入倍频晶体 LBO,进行腔内倍频;在谐振腔的另一个腔臂内插入标准具和双折射滤波器(BF)进行波长调谐以及线宽压窄。得到 585 ~ 590 nm 连续可调窄线宽黄光输出。当激光器连续运转时,从吸收的泵浦光到发射的黄光,最大的转换效率达到 28%。同时实验人员还通过直接调制泵浦光,得到了 570 ns 的脉冲激光输出。

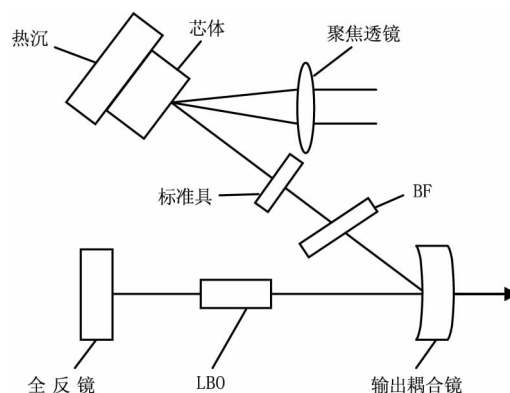


图 4 黄光 OP-VECSEL 实验装置图

Fig. 4 Yellow light OP-VECSEL experiment device

Fan Zhang、Bernd Heinen 等人使用输出波长 808 nm、最大输出功率 120 W 的光纤耦合激光器作为 OP-VECSEL 的泵浦光源。半导体增益介质的有源层使用 InGaAs-GaAsP 周期性结构,谐振腔采用 V 型结构。得到了输出功率为 23.6 W 1013 nm 激光输出。在此实验基础之上他们又将双折射滤波器(BF)插入谐振腔,限制谐振腔内部激光纵模数量,最终获得单纵模激光输出^[15]。

3.2 国内发展现状

国内的研究机构:长春光机所、南开大学、北京工业大学、长春理工大学、重庆师范大学等对 OP-VECSEL 的发光机理进行了研究,并对 OP-VECSEL 的发光过程进行了仿真计算,取得了一定的成果。

长春理工大学的王菲和王晓华等人,设计了光抽运面发射半导体激光器件结构和实验光路。他们采用的半导体增益介质是多周期应变补偿 InGaAs/GaAsP 双量子阱结构的半导体器件。为了保证 VECSEL 表面的抽运光斑为圆形光斑,他们在谐振腔内部插入分束棱镜来实现。计算模拟了相应的输出功率与抽运功率间关系模拟曲线^[16]。

北京工业大学的宋晏蓉、郭晓萍等人使用最大输出功率 1.5 W 的 LD 泵浦半导体量子阱增益介质,使用平—凹腔作为激光器的谐振腔,得到 40 mW 的 1005 nm 激光输出^[17]。实验装置如图 5 所示。

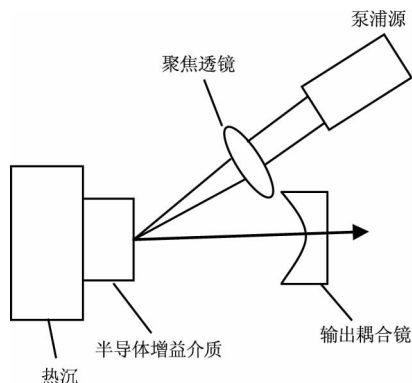


图5 实验装置图

Fig. 5 Experimental device

重庆师范大学的陈柏众、戴特力等人使用有限元分析了光抽运垂直外腔面发射半导体激光器(OP-VECSEL)的内部热分布情况,特别对 OPS-VECSEL 芯片帽层表面与金刚石散热片毛细键合(capillary bond)的情况做了计算^[18]。同时他们还设计了两种不同结构的 VECSEL 倍频结构和散热装置。长春光机所的何春风、李军等人给出了增益材料内部热的产生过程和热效应对器件功率特性的

影响。

4 OP-VECSEL 的发展前景

OP-VECSEL 的研究工作可以在很多方面丰富地拓展,这种激光器在未来很有可能被广泛地应用于多种用途。最重要的两个突破点仍然是 VECSEL 的大功率和小型化。

在大功率方面,由于采用多抽运和增益元件,OP-VECSEL 激光器能达到瓦级激光输出。对于激光器来说,热效应永远是抑制激光器获得大功率输出的一个重要原因。对于 OP-VECSEL 也不例外。OP-VECSEL 的耗散热主要集中在泵浦光斑的范围,泵浦光斑内的功率密度非常大,温度的升高会导致量子阱和 DBR 材料的参数发生变化,最终影响激光器的输出功率。将来可以采用散热窗口绑定、基质刻蚀和多片增益结构等多种热管理的技术相结合的方式,更大幅度地改善散热性能,提高激光器的输出效率。

另一方面,为了实现 OPS-VECSEL 的小型化,可以通过采用精细的晶片设计注入抽运,实现介质功率器件的优化,有可能制造带有复杂谐振腔的高度小型化的 VECSEL 设备。此技术可应用在超快脉冲源领域。另外可以将 OP-VECSEL 结构集成化,使用集成外腔、集成抽运技术,可以有效减小激光器的体积,增加激光器工作的稳定性。集成化技术一旦研究成功,有望发展出带有高级功能的超小型器件。

参考文献:

- [1] Ni Yanhai, Dai Teli, Liang Yiping, et al. Vertical cavity surface emitting laser simulation analysis[J]. Journal of Chongqing Normal University: Natural Sciences, 2011, 28(1): 556. (in Chinese)
倪滨海,戴特力,梁一平,等.垂直外腔面发射激光器的模拟分析[J].重庆师范大学学报:自然科学版,2011,28(1):556.
- [2] Nin Yanhai. New type of vertical cavity surface emitting laser research[D]. Chongqing: Chongqing Normal University, 2011: 1. (in Chinese)
倪滨海.新型垂直外腔面发射激光器研究[D].重庆:重庆师范大学,2011:1.
- [3] ZONG Nan, LI Chengming, CHEN Yahui, et al. The research progress of optically pumped of vertical cavity surface emitting laser[J]. Infrared and Laser Engineering, 2007, 36(6): 785. (in Chinese)
宗楠,李成明,陈亚辉,等.光泵垂直扩展腔面发射半导体激光器的研究进展[J].红外与激光工程,2007, 36(6): 785.

- [4] ZHANG Guanjie, SHU Yongchun, et al. Optically pumped vertical cavity surface emitting laser characteristics and research progress[J]. Laser Technology, 2006, 30(4): 351–354. (in Chinese)
张冠杰, 舒永春, 等. 光抽运垂直外腔面发射激光器特性与研究进展[J]. 激光技术, 2006, 30(4): 351–354.
- [5] Kuznetsov M, Hakimi F, Sprague R, et al. High power (> 0.5 W CW) diode-pumped vertical-external-cavity surface-emitting semiconductor lasers with circular TEM₀₀ beams[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1997, 9(8): 1063–1065.
- [6] Alford W J, Raymond T D, Aijfrman A A. High power and good beam quality at 980 nm from a vertical external-cavity surface emitting laser[J]. JOSA, 2002, B19(4): 663–666.
- [7] Hastie J E, Calvez S, Dowson M D. High power CW red VECSEL with linearly polarized TEM₀₀ output beam[J]. Optics Express, 2005, 13(1): 77–81.
- [8] Jun Ho Lee, Jun Youn Kim, Sang Moon Lee, et al. 9.1 W high efficient continuous wave end pumped vertical external cavity surface emitting semiconductor laser[J]. IEEE Photon Techn Lett, 2006, 18(20): 2117.
- [9] Rudin B, Rutz A, Hoffmann M, et al. Highly efficient optically pumped vertical emitting semiconductor laser with more than 20 W average output power in a fundamental transverse mode[J]. Opt Lett, 2008, 33(22): 2719.
- [10] Juan Chilla, Shu Qi Ze, Zhou Hailong, et al. Recent advances in optically pumped semiconductor lasers[C]. Solid State Lasers X VI: Technology and Devices. San Jose, 2007.
- [11] Häring, Paschotta R, Gini E, et al. Picosecond surface-emitting semiconductor laser with >200 mW average power[J]. Electron Lett, 2001, 37(12): 766–767.
- [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] K G Wilcox, Z. Mihoubi, et al. Passively modelocked 832 nm vertical-external-cavity surface-emitting semiconductor laser producing 15.3 ps pulses at 1.9 GHz repetition rate[J]. Electron Lett, 2008, 44(25): 1469–1470.
- [14] Emmi Kantola, Tomi Leinonen, et al. High-efficiency 20 W yellow VECSEL[J]. Optical society of America, 2014, 22(6): 6372–6380.
- [15] Fan Zhang, Bernd Heinen, et al. A 23-watt single-frequency vertical-external-cavity surface-emitting laser[J]. Optical society of America, 2014, 22(11): 12817–12822.
- [16] 王菲, 王晓华, 等. 光抽运垂直外腔面发射半导体激光器的设计与数值模拟[J]. 长春理工大学学报, 2010, 33(2): 48–50.
- [17] SONG Yanrong, GUO Xiaoping, et al. New optical pump vertical ex-cavity surface emitting diode laser[J]. Journal of photons, 2005, 34(10): 1448–1450. (in Chinese)
宋晏蓉, 郭晓萍, 等. 新型光泵浦垂直外腔面发射半导体激光器[J]. 光子学报, 2005, 34(10): 1448–1450.
- [18] CHEN Baizhong, DAI Teli, et al. With finite element method discuss the performance of radiator of optical pumping vertical ex-cavity surface emitting diode laser[J]. China Laser, 2009, 36(10): 2745–2750. (in Chinese)
陈柏众, 戴特力, 等. 用有限元法讨论光抽运垂直外腔面发射半导体激光器的散热性能[J]. 中国激光, 2009, 36(10): 2745–2750.