

文章编号: 1001-3806(2006)04-0351-04

光抽运垂直外腔面发射激光器特性与研究进展

张冠杰¹, 舒永春^{1*}, 刘如彬¹, 舒强¹, 林耀望^{1,2}, 姚江宏¹, 王占国^{1,2}, 许京军¹

(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: 介绍了光抽运半导体垂直外腔面发射激光器的结构特点、设计原理及其性能优势, 综合评述该领域的最新研究进展, 并探讨该类型激光器的发展前景和技术发展方向。

关键词: 光电子学; 垂直外腔面发射激光器; 光抽运; 分布布喇格反射镜; 超短脉冲

中图分类号: TN248.4 文献标识码: A

Characteristics and development of optical pumping vertical external cavity surface emitting lasers

ZHANG Guan-jie¹, SHU Yong-chun¹, LIU Ru-bin¹, SHU Qiang¹, LIN Yaowang^{1,2}, YAO Jiang-hong¹,
WANG Zhan-guo^{1,2}, XU Jing-jun¹

(1. Key Laboratory of Advanced Technique and Fabrication for Weak-Light Nonlinear Photonics Materials of Ministry of Education Nankai University Tianjin 300071, China; 2 Key Laboratory of Semiconductor Materials Science, Institute of Semiconductors, the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

Abstract The properties and advantages of optical pumping semiconductor vertical external cavity surface emitting laser (VECSEL) are introduced and the latest device development is demonstrated. On the basis of these analyses, the application potential and technology direction in the areas are pointed out.

Key words optoelectronics; vertical external cavity surface emitting laser (VECSEL); optical pumping distributed Bragg reflector (DBR); ultra short pulse

引 言

近几十年来, 各类半导体激光器的性能在不断提高, 但也均存在着缺点, 限制了其进一步发展。传统的半导体二极管激光器技术已经相当成熟, 能高效可靠地产生大功率光束, 但其固有缺点是很难获得圆形衍射极限的基横模输出光束; 垂直腔面发射激光器 (vertical cavity surface emitting laser, VCSEL) 具有理想的圆形输出光束, 但在单横模下工作很难达到大功率。垂直外腔面发射激光器 (vertical external cavity surface emitting laser, VECSEL)^[1] 有望克服上述缺点, 现在已受到了越来越广泛的关注。

与传统的半导体激光器不同, VECSEL 具有类似于 VCSEL 的增益结构, 再通过与固体激光器相近的外腔结构进行选模输出, 可形成圆形高斯 TEM₀₀ 模式的输出光束, 克服了固体激光器光束质量不理想的缺点。与 VCSEL 相比, VECSEL 突破了功率限制, 单横模输

出功率可达几百毫瓦, 同时在高效实现腔内倍频的前提下简化了谐振腔内的结构, 从而降低了激光器晶片生长和加工的难度。

VECSEL 可采用成熟的大功率半导体激光器做抽运源, 称为光抽运垂直外腔面发射激光器 (OPS-VECSEL)。与电抽运激光器相比, OPS-VECSEL 不使用 p-n 结或电接触, 既降低了串联电阻上的电能损耗, 又增加了器件的可靠性。宽抽运带宽 (大于 40nm) 和极短的抽运吸收长度 (约 1 μ m ~ 2 μ m) 确保抽运光的有效吸收, 消除了二极管激光器抽运的严格波长限制。此外, OPS-VECSEL 使用无掺杂的半导体材料, 降低了由于自由载流子吸收造成的光学损耗。可以说, OPS-VECSEL 结合了二极管抽运固体激光器和 VCSEL 的构造方法, 吸取了二者的优点。

良好的空间光强分布、大的输出功率范围、体积小、光束质量好等突出优点, 使 OPS-VECSEL 具有广阔的应用范围, 并已在高速激光打印、高密度光存储、超快激光、激光雷达等方面显示出诱人的前景。本文中就将光抽运垂直外腔面发射激光器的特性进行介绍, 综述目前最新的研究进展。在此基础上, 分析了该类型激光器的发展潜力和技术发展方向。

作者简介: 张冠杰 (1979-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为纳米光电材料与器件。

* 通讯联系人。E-mail: shuy@nankai.edu.cn

收稿日期: 2005-06-29; 收到修改稿日期: 2005-08-10

1 器件原理

图 1 显示了典型的 OPS-VECSEL 结构示意图, 其核

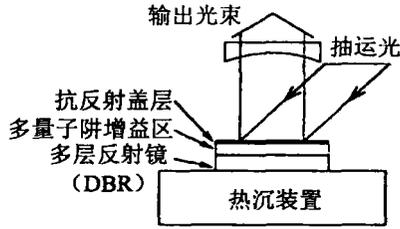


图 1 OPS-VECSEL 结构示意图

心部分是包含多量子阱增益区和多层分布反馈布拉格反射镜 (DBR) 增益结构的激光谐振腔。为使模斑尺寸能适应腔内每个工作组件的大小需要, 谐振腔可被设计成 V 形、Z 形或 W 形等多种形式。如图 1 所示, 入射抽运光聚焦至 VECSEL 芯片上, 在高反射率的 DBR 镜和外部球面镜之间形成激光振荡, 多量子阱提供增益, 外镜控制激光器在单横模下工作。

图 2 显示了 VECSEL 谐振腔内有源区的能带图,

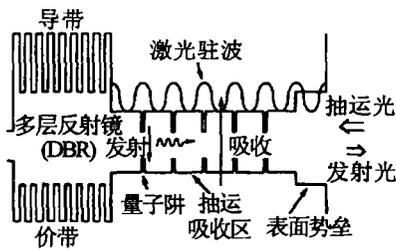


图 2 典型 OPS-VECSEL 有源区的能带图

展示了激光器工作原理。这个结构类似于 VCSEL, 但是要将其中一个 DBR 反射镜替换成透明的窗口层。工作区由一系列周期性的量子阱结构将势垒层分开, 每个周期厚度为半波长。量子阱置于激光驻波的波腹, 形成谐振的周期增益结构。抽运吸收区的势垒层通过带间跃迁吸收入射光, 产生的电子和空穴扩散至量子阱并被其俘获, 提供激光器的光增益。最右侧的

A GaAs 窗口层接收入射光, 并提供了一个更高的表面势垒, 阻止载流子扩散到芯片表面而发生无辐射复合。紧接着量子阱的高反射率多层 DBR 反射镜作为激光器的一个腔镜, 一般要求其最大反射率达到 99% 以上。

2 OPS-VECSEL 研究进展

2.1 不同波长范围与材料体系的 VECSEL

对 OPS-VECSEL 而言, 激光器工作波长和抽运波长可根据设计选择。几种成熟的半导体材料体系, 如 InGaAs/GaAs^[2], InGaAs-InGaAsP/GaAs^[3] 和 InGaAsP-InP^[4], 都可以用来制造不同波长的激光器。

多数 VECSEL 都是在 GaAs 衬底上制作, 使用高折射率比值的 GaAs/AlAs 反射镜, 用于近红外方面的应用。这些激光器主要工作在两个波长段: 使用晶格匹配 GaAs/AlGaAs 量子阱的激光器, 工作波长为 850nm 左右^[5]; 使用压应变 InGaAs/GaAs 量子阱的激光器, 波长在 1000nm 附近^[6]。但最近的报道显示, 其它材料体系的 VECSEL 可实现从红外到可见光的不同波长范围的应用。

红光 VECSEL 已有报道, 它使用应变 InGaP 量子阱, 带有一个 AlGaInP DBR, 以 660nm 绿光氩离子激光器作为抽运源, 可以输出超过 200mW 功率的光束^[7]。紫光输出也由 PARK 等人^[8]实现, 他们的器件使用 GaN 基材料, 带有一个蓝宝石谐振腔, 实际上构成了一个微腔 VECSEL, 该激光器在室温下输出 391nm 的激光。

以 InP 为衬底可制造工作波长在 1.5μm 附近的器件。在这个材料体系里, VECSEL 遇到了与 VCSEL 同样的难题: 由于波长较长, DBR 各层的折射率也会有所降低, 要求反射镜厚度更大; 并且在这种结构的材料中, 吸收和散射不能忽略, 反射镜的总反射率就会受到影响。近年来, 生长技术的提高推动了高反射率和低电子阻抗 InP/InGaAs DBR 的发展, 利用这种工艺

表 1 VECSEL 工作波长范围及其结构特征

λ 衬底	DBR	量子阱	功能特性
391 nm	介电 SiO ₂ /H ₂ O ₂	InGaIn/GaN	335nm 三倍频 Nd:YAG 激光器抽运 ^[8]
660nm (GaAs)	AlGaInP	InGaP	514nm 氩离子激光器抽运 ^[7]
670nm (GaAs)	AlGaAs	InGaP/InGaAsP/GaAs	532nm Nd:YAG 激光器抽运 ^[3]
850nm ~ 870nm (GaAs)	AlAs/AlGaAs	GaAs/AlGaAs	670nm LD 抽运大功率 ^[5] 660nm Kr ⁺ 激光器为抽运源 ^[12]
960nm ~ 1030nm (GaAs)	AlAs/AlGaAs	InGaAs/GaAs	808nm LD 抽运 ^[13] SESAM 锁模 大功率 ^[2] 发射近 500fs 的孤子波 ^[14]
1.34μm	AlAs/GaAs	GaInAs/GaAs	810nm LD 抽运源、大功率 ^[10]
1.54μm (InP)	InAlAs/GaInAs InP/InGaAs	InGaAs/InGaAsP InGaAsP	980nm LD 抽运 ^[9] SESAM 锁模 ^[4]
2.34μm (GaSb)	GaSb/AlAsSb	GaInAsSb AlGaAsSb	室温下 830nm LD 抽运 ^[11]

可制造出均匀的 VECSEL 增益结构, 并成功地在 7°C 温度下连续工作^[9]。总体来说, 与 GaAs 器件相比, InP 器件具有低的特征温度和高的热阻, 受到更为严格的热问题限制。近来, 以稀氮四元化合物 GaInNAs 为基础的 $1.3\mu\text{m}$ 激光器设计也已得到发展并成功实现, 其 $1.3\mu\text{m}$ 波长的连续输出功率达 0.6W ^[10]。

在长波长范围, CERUTTI 等人^[11]报道了工作在 $2\mu\text{m} \sim 2.5\mu\text{m}$ 波段的 GaSb 基 VECSEL。这种波长的激光器因对 CH_4 和 CO 等污染物有强烈的吸收峰, 在大气探测方面有较高的应用价值。他们研制的光抽运 VECSEL 激光器可以在 350K 温度下连续运转, 工作波长为 $2.3\mu\text{m}$, 室温下最大输出功率为 7mW , 特征温度为 70K , 入射抽运的阈值强度为 $800\text{W}/\text{cm}^2$ 。

表 1 中列出了现有报道的 VECSEL 的工作波长范围, 以及每个装置中量子阱和反射镜的结构及功能特性。

2.2 大功率 OPS-VECSEL 的研究

1997 年, KUZNETSOV 的小组第 1 次实现了以二极管激光器抽运产生大功率和高质量光束的 VECSEL^[1], 工作波长为 980nm 。其结构为: 在最顶端使用 30 对 $\text{Al}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}/\text{GaAs}$ 多层镜面作为反射镜; 增益区由 $\text{Al}_{0.08}\text{Ga}_{0.92}\text{As}$ 抽运吸收层, 和 8nm 厚的位于光驻波波腹位置的压应变 $\text{In}_{0.16}\text{Ga}_{0.84}\text{As}$ 量子阱组成 (13 对)。该激光器在 TEM_{11} 模式的最大输出功率为 0.69W ; 与单模光纤耦合, 在 TEM_{00} 模式下输出功率为 0.37W 。HOLM 等人^[5]以 $\text{AlGaAs}/\text{GaAs}$ 晶格匹配材料为基础, 研制了工作波长为 870nm 的 VECSEL。相对于应变 $\text{InGaAs}/\text{GaAs}$ 系统, 这个量子阱结构系统表现出较低的微分增益和特征温度相关性。由一对极化耦合 670nm 二极管提供 850mW 功率的抽运能量, 实现了 0.15W 的输出功率。

ALFORD 等人^[15]提出了将热量从工作区通过 DBR 直接释放的技术, 有效地提高了激光器的输出功率。他把一个无镀层的蓝宝石窗口与 VECSEL 增益部分的前表面相连, 蓝宝石起热扩散平板作用。利用该技术, 其 985nm 的 $\text{InGaAs}/\text{GaAs}$ VECSEL 抽运区域直径达到 $500\mu\text{m}$ 以上, 实现了最大功率为 1.6W 的连续输出。HASTIE 等人^[3]将热扩散平板技术应用到 850nm 的 $\text{GaAs}/\text{AlGaAs}$ VECSEL, 使用 SC 代替蓝宝石作为热扩散平板, 观察到在 TEM_{00} 模式下的最大输出功率是 0.5W 。此后的工作中, 他们还报道了一台使用 810nm 波长光纤耦合激光器作为抽运源, 微片温度维持在 20°C 的 $\text{InGaAs}/\text{GaAs}$ VECSEL, 获得了功率 1.7W 、波长 980nm 的输出光。将微片冷却到 0°C 后, 激光器输出功率增加到 2.5W , 光斑为圆形对称分布。

最新的研究成果已体现出 OPS-VECSEL 达到更高

功率的潜力。LUTGEN 等人^[2]报道使用一个 808nm 光纤耦合二极管激光器做为抽运源的 $\text{InGaAs}/\text{GaAs}$ VECSEL 工作波长为 $1\mu\text{m}$ 。由于外延生长的高质量、高精度、低散射损失和高有效增益, 最大输出功率达到了 8W , 光-光转换总效率达到了 41% 。CHILLA 等人^[16]使用 $\text{InGaAs}/\text{GaAs}$ 有源区制成波长为 980nm 的 VECSEL, 它使用 3 台光纤耦合二极管激光器组成阵列, 可向增益结构输入 70W 的净抽运能量, 抽运光的光斑直径在 $500\mu\text{m} \sim 900\mu\text{m}$ 之间变化, 输出功率达迄今为止最高的 30W 。

2.3 超短脉冲发生的 SESAM 锁模 VECSEL

锁模 VECSEL 可以作为超短脉冲的高质量和高平均功率光谱源, 脉冲仅传播几微米厚度, 避免了强烈的色散和自相位调制, 因而成为研究的热点。VECSEL 锁模的早期研究是在 100MHz 重复频率的锁模抽运源同步抽运基础上进行的, 例如 Nd:YAG 或 $\text{Ti}^{3+}:\text{Al}_2\text{O}_3$ 激光器。第 1 台脉冲主动锁模 VECSEL^[5]由常用的二极管激光器连续抽运, 长腔具有 168MHz 往返频率, 在二次谐波频率 336MHz 处锁模, 观测到持续时间达 $100\text{ps} \sim 120\text{ps}$ 的脉冲。

现在出现了一种非常简单的锁模激光器, 就是通过半导体饱和吸收镜 (SESAM) 将 VECSEL 被动锁模, 产生超短脉冲, 其结构示意图如图 3 所示。第 1 台

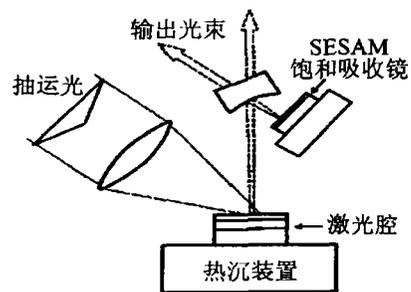


图 3 SESAM 锁模 VECSEL 结构示意图

SESAM 锁模 VECSEL 由 HOOGLAND 等人^[13]设计实现, 其使用 $\text{InGaAs}/\text{GaAs}$ 增益结构, 发射波长为 $1000\text{nm} \sim 1040\text{nm}$ 。SESAM 锁模增益结构位于一个不对称的 V 形腔末端, 由一个 $\lambda/2$ 抗谐振腔和 20nm 厚 $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ 量子阱构成。SESAM 大约会产生 1.3% 的低强度损耗, 响应时间分为两部分, 包括 130fs 的快速响应时间和 4ps 的慢恢复时间。腔内工作一个来回的重复频率为 4.4GHz 与纳秒级别的载流子寿命相适应。该激光器脉冲为双曲正弦自相关的形状, 半峰全宽 (FWHM) 为 22ps 。HÄRNG 等人^[17]报道了平均输出功率超过 200mW 、发射波长为 963nm 的 $\text{InGaAs}/\text{GaAs}$ VECSEL, 发射近转换极限脉冲的 FWHM 为 3.2ps 。他们随后又研制了平均输出功率达 950mW 的 952nm 激光器, 脉冲重复频率为 6GHz ^[18]。当处于最

高输出功率时, 输出脉冲变得相当长, 具有双曲正割形状, FWHM 为 1.5 ps

近几年, 一些更新颖的技术也开始应用于 SESAM 的研究, 提高了激光器的性能。例如, GARNACHE 等人^[14]采用了具有快速非线性响应量子阱吸收结构的 SESAM, 获得了 1030 nm 波长的 VECSEL, 得到重复频率为 1.2 GHz , 接近转换限制的 477 fs 准孤子脉冲。另一些研究中, 锁模 VECSEL 的饱和吸收装置使用自组织 InAs/GaAs 量子点, 获得了比量子阱系统更宽的吸收曲线和更均匀的光谱特性, 显示出良好的前景。

3 OPS-VECSEL 的发展方向与展望

OPS-VECSEL 的研究工作在许多新的方向可以被丰富地拓展, 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 的高性能和小型化。

由于 OPS-VECSEL 腔内功率高, 腔内倍频会有很高效率。采用多抽运和增益元件, 激光器能达到数瓦的输出功率, 同时具有优异的光束质量。使用可调的外部光栅或微观结构镜, 有望实现激光器的可调大功率工作。这样, VECSEL 无疑会在要求衍射极限光束质量和大功率高效光源方面的应用大受欢迎。进一步研究饱和吸收装置, 将很可能实现锁模 OPS-VECSEL 在更大功率量级下工作。除此之外, OPS-VECSEL 在其它波长和材料体系的工作也应该进一步探索研究, 例如, 波长为 1550 nm 的 InGaAsP/InP 激光器、使用铋化物半导体材料的中红外激光器、 AlInGaP/GaAs 红光激光器、蓝色到紫外的 AlInGaN/GaN 激光器, 等等。

另一方面, 为了 OPS-VECSEL 的商品化, 要求高效、小型化和更可靠的封装。在小型化超快脉冲源领域, VECSEL 具有相当大的发展潜力。注入抽运通过精细的晶片设计, 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。OPS-VECSEL 集成外腔是一种非常理想, 也有可能实现的结构, 集成抽运激光器的可能性也值得进一步探讨。在这些集成结构中, 反射镜将与增益结构整合, 结合其它非线性和光谱滤波功能, 将有望发展出带有高级功能的超小型器件。

参 考 文 献

- [1] KUZNETSOV M, HAKMIEF, SPRAGUE R *et al*. High power ($> 0.5 \text{ W CW}$) diode pumped vertical external cavity surface emitting semiconductor lasers with circular TEM_{00} beams [J]. IEEE Photonics Technology Letters 1997, 9(8): 1063~1065.
- [2] IUTGEN S, ALBRECHT T, BRICK P *et al*. 8W high efficiency continuous wave semiconductor disk laser at 1000 nm [J]. A P L, 2003, 82(21): 3620~3622.
- [3] HASTIE JE, CALVEZ S, DOWSON M D. High power CW red VECSEL with linearly polarized TEM_{00} output beam [J]. Optics Express, 2005, 13(1): 77~81.
- [4] HOOGLAND S, GARNACHE A, SAGNES I *et al*. Picosecond pulse generation with 1.5 ps passively mode locked surface emitting semiconductor laser [J]. Electron Lett 2003, 39(1): 846~847.
- [5] HOLM M A, BURNS D, CUSUMANO P *et al*. High-power diode pumped AlGaAs surface emitting laser [J]. Appl Opt 1999, 38(27): 5781~5784.
- [6] KUZNETSOV M, HAKMIEF, SPRAGUE R *et al*. Design and characteristics of high-power (0.5 W CW) diode pumped vertical external cavity surface emitting semiconductor lasers with circular TEM_{00} beams [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics 1999, 5(3): 561~573.
- [7] LINDER N, KARNUTSCH C, IUFFT J *et al*. High power 660 nm optically pumped semiconductor thin disk laser [A]. IEEE/LEOS Summer Topics [C]. Ingenieur IEEE, 2002, 5~6.
- [8] PARK SH, KM J, JEON H *et al*. Room-temperature GaN vertical cavity surface emitting laser operation in an extended cavity scheme [J]. A P L, 2003, 83(11): 2121~2123.
- [9] SYMONDS C, SAGNES I, GARNACHE A *et al*. Continuous wave operation of a monolithically grown $1.5 \mu\text{m}$ optically pumped vertical external cavity surface emitting lasers [J]. Appl Opt 2003, 42(33): 6678~6681.
- [10] HOPKINS JM, SMITH SA, JEON CW *et al*. 0.6 W CW GaInAs vertical external cavity surface emitting laser operating at $1.32 \mu\text{m}$ [J]. Electron Lett 2004, 40(1): 30~31.
- [11] CERUTTIL, GARNACHE A, GENTY F *et al*. Low threshold, room temperature laser diode pumped Sb-based VECSEL emitting around $2 \mu\text{m}$ [J]. Electron Lett 2003, 39(3): 290~292.
- [12] HASTIE JE, HOPKINS JM, CALVEZ S *et al*. 0.5 W single transverse mode operation of an 850 nm diode pumped surface emitting semiconductor laser [J]. IEEE Photonics Technology Letters 2003, 15(7): 894~896.
- [13] 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.
- [14] GARNACHE A, HOOGLAND S, TROPPER A C *et al*. Sub-500-fs soliton-like pulse in a passively mode locked broadband surface emitting laser with 100 mW average power [J]. A P L, 2002, 80(21): 3892~3894.
- [15] ALFORD W J, RAYMOND T D, ALLERMAN A A. High power and good beam quality at 980 nm from a vertical external cavity surface emitting laser [J]. JO SA, 2002, B19(4): 663~666.
- [16] CHILLA J, BUTTERWORTH S, ZEITSCHIEL A *et al*. High power optically pumped semiconductor lasers [J]. Proc SPIE, 2004, 5332: 143~150.
- [17] HÄRING R, PASCHOTTA R, GNIIE *et al*. Picosecond surface emitting semiconductor laser with $> 200 \text{ mW}$ average power [J]. Electron Lett 2001, 37(12): 766~767.
- [18] 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.