

文章编号: 1001-3806(2012)02-0200-04

基质刻蚀的高功率外腔面发射激光器

伍瑜^{1,2} 倪演海^{1,2} 戴特力^{1,2} 周勇³ 秦莉⁴ 梁一平^{1,2} 范嗣强^{1,2} 张鹏^{1,2*}

(1. 重庆师范大学 物理与电子工程学院, 重庆 400047; 2. 重庆师范大学 重庆市高校光学工程重点实验室, 重庆 400047; 3. 中国电子科技集团公司 第四十四研究所, 重庆 400060; 4. 中国科学院 长春精密机械与物理研究所, 长春 130022)

摘要: 为了降低光抽运外腔面发射激光器的热效应, 提高激光器的输出功率, 采用液体毛细键合方法将逆序生长的半导体外延片与高热导率的碳化硅散热窗口键合, 并用化学刻蚀方法去除外延片的基质。实验研究了用基质刻蚀的外延片搭建的外腔面发射激光器的性能。当增益介质的有源区为 InGaAs/AlGaAs 多量子阱、抽运源为 808nm 的光纤耦合输出半导体激光器, 输出镜对激光波长透过率为 3% 时, 在室温下获得 TEM₀₀ 模的最大输出功率 0.52W, 激光波长 1018nm, 光谱线宽 2nm(半峰全宽), 激光器的光光转换效率约为 20%。测得 x 方向与 y 方向的 M^2 因子分别为 1.01 和 1.00, 说明输出光束为质量优良的近衍射极限高斯光束。结果表明, 基质刻蚀技术可明显改善外腔面发射激光器的热性能, 获得高功率、高光束质量的激光输出。

关键词: 激光器; 外腔面发射激光器; 多量子阱; 基质刻蚀; 光抽运

中图分类号: TN248.4 文献标识码: A doi: 10.3969/j.issn.1001-3806.2012.02.014

Substrate-etched high power external-cavity surface-emitting lasers

WU Yu^{1,2}, NI Yan-hai^{1,2}, DAI Te-li^{1,2}, ZHOU Yong³, QIN Li⁴, LIANG Yi-ping^{1,2},
FAN Si-qiang^{1,2}, ZHANG Peng^{1,2}

(1. College of Physics and Electronic Engineering, Chongqing Normal University, Chongqing 400047, China; 2. Chongqing High Education Key Laboratory of Optical Engineering, Chongqing Normal University, Chongqing 400047, China; 3. The 44th Research Institute, China Electronics Technology Group Corporation, Chongqing 400060, China; 4. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022, China)

Abstract: To decrease the thermal effect of a vertical-external-cavity surface-emitting laser and increase its output power, a high thermal conductivity SiC heatspreader was bond on the reverse-order semiconductor wafer with the capillary method, and then the substrate was removed by means of chemical etch. The characteristics of the laser formed by the substrate-etched wafer were experimentally studied. When the active region in the gain structure is InGaAs/AlGaAs multiple quantum wells, the pump source is a fiber-coupled 808nm diode laser, and the transmission of the output coupler is 3% at laser wavelength, the TEM₀₀ mode output power of 0.52W and the optical-to-optical conversion efficiency of 20% are obtained at room temperature. The laser wavelength is 1018nm, and the spectrum width is 2nm (full width half maximum). The measured M^2 factor in x and y direction of 1.01 and 1.00 demonstrate the near diffraction-limited Gaussian beam of the laser. It can be concluded that the substrate-etching technology can significantly improve the thermal property of vertical-external-cavity surface-emitting lasers and results in high power and high beam quality.

Key words: lasers; external-cavity surface-emitting laser; multiple quantum well; substrate-etched; optically-pumped

引言

1997年, 美国的 KUZNETSOV 等人设计并研制了

基金项目: 重庆市高校创新团队建设计划资助项目 (201013); 重庆市高校光学工程重点实验室资助项目 (0705); 重庆师范大学博士启动基金资助项目 (11XLB014)

作者简介: 伍瑜 (1986-), 女, 硕士研究生, 主要从事激光光电子器件及技术方面的研究。

* 通讯联系人。E-mail: gchzh2003@yahoo.com.cn

收稿日期: 2011-07-08; 收到修改稿日期: 2011-07-12

第1台光抽运半导体垂直外腔面发射激光器^[1] (vertical-external-cavity surface-emitting laser, VECSEL), 结合了激光二极管抽运固体激光器和垂直腔面发射激光器 (vertical-cavity surface-emitting laser, VCSEL) 的优势。VECSEL 拥有许多独特的优点: 输出功率高、调谐范围广、运行波长可根据要求设计、抽运吸收效率高, 以及可得到高质量的近衍射极限 TEM₀₀ 模高斯光束^[2]。另外, 由于使用外腔结构, 可方便地插入非线性光学元件, 进行腔内倍频^[3-5], 使激光输出波长扩展到可见光及紫外; 也可利用可饱和吸收体进行被动锁

模^[6-8] 获得超短脉冲。VECSEL 在科研、生物医学、工业生产和军事领域等方面均有非常广泛的应用,尤其是近红外波段 VECSEL 相关技术都比较成熟,有非常好的发展前景,使得它成为国际上新型激光器研究领域的热点。

在 VECSEL 的理论和实验研究方面,美国 and 韩国等^[9-11] 国家一直处于领先地位,其输出功率已达数十瓦,光光转换效率也从最初的 10% 提高至 40%。中国一些科研机构 and 高等院校的研究小组也做了很多相应的研究工作,取得了一些成果,在 VECSEL 的输出功率方面,采用金刚石散热窗口,最大功率 880mW^[12-16]。与半导体光抽运固体激光器一样,VECSEL 的输出功率限制主要来自于散热问题,即热效应引发的激光器功率下降直至热熄灭。VECSEL 基质的热导率一般较低(如 GaAs 为 $45 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$),而相对于有源区来讲厚度太大(基质一般约 $350 \mu\text{m}$,有源区仅几个微米),因此,基质层的去除^[12] 能有效地加快有源区的热扩散,减少激光器的热负载,延缓热熄灭,提高激光器的输出功率。本文中采用逆序生长(在 GaAs 衬底上首先生长多量子阱有源区(multiple quantum well, MQW),最后生长分布喇格反射镜(distributed Bragg reflector, DBR))的 VECSEL 半导体外延片,用化学腐蚀方法对基质进行刻蚀来改善 VECSEL 的散热性能,在此基础上对量子阱的自发辐射谱、DBR 的反射谱,以及 VECSEL 的输出功率、激光波长和光束质量进行实验研究。

1 实验装置

实验中所用半导体外延片用金属有机化学气相沉淀方法生长,先在约 $350 \mu\text{m}$ 厚的 GaAs 衬底上生长一层 GaAs 缓冲层,接下来是 $\text{In}_{0.49}\text{GaP}$ 刻蚀阻挡层,然后生长 GaAs 帽层、多量子阱有源区(用 $\text{GaAs}_{0.94}\text{P}$ 作为应变补偿层, $\text{In}_{0.16}\text{GaAs}$ 作为量子阱, $\text{Al}_{0.06}\text{GaAs}$ 作为势垒层)、抽运 DBR(30 对 $\text{Al}_{0.90}\text{GaAs}/\text{Al}_{0.12}\text{GaAs}$),最后用 40nm 的 GaAs 保护层结束外延生长。有源区的 12 对 $\text{In}_{0.16}\text{GaAs}/\text{GaAs}_{0.94}\text{P}/\text{Al}_{0.06}\text{GaAs}$ 应变多量子阱构成谐振周期增益(resonate periodic gain, RPG) 结构,为激光提高增益。其中, $\text{Al}_{0.06}\text{GaAs}$ 势垒层为吸收层,吸收 808nm 抽运光子能量,产生光生载流子,扩散到邻近的量子阱内并被其捕获,发生辐射跃迁。DBR 对所设计激光波长的反射率达到 99.5% 以上,在 VECSEL 激光器中作为谐振腔的一个反射镜。GaAs 保护层的作用是防止外延片被空气氧化。

VECSEL 的结构简图见图 1。首先用液体毛细键合方法将逆序生长的半导体外延片与高热导率的碳化硅散热窗口键合,然后用化学腐蚀方法将外延片的

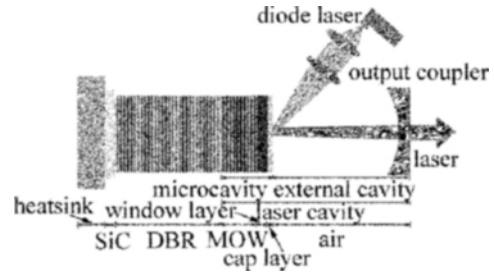


Fig. 1 Schematic of a VECSEL

基质层刻蚀掉,最后把经过化学腐蚀后的 VECSEL 外延片用导热硅脂粘贴在铜热沉上,并利用水冷散热器与铜热沉相连,带走 MQW 产生的热量。

从结构上看,VECSEL 外延片中的 DBR 与外延片-空气界面构成微腔,激光场在其中呈驻波分布;设计中使每个量子阱均处于微腔中激光驻波场的波腹位置,形成周期谐振增益(periodic resonate gain, PRG) 结构,从而提供最大的纵向限制因子,亦即为激光器提高最大的模增益。

实验中用波长为 808nm 的半导体激光器作为抽运光源,并用两个焦距分别为 30mm 和 15mm 的平凸透镜组成抽运的准直聚焦系统,将输出光纤直径为 $400 \mu\text{m}$ 的半导体激光压缩成直径为 $200 \mu\text{m}$ 的抽运光斑, 45° 角聚焦在 VECSEL 外延片上。曲率半径为 67mm,对 1015nm 波长透射率为 3% 的平凹镜作为输出耦合镜,与 DBR 一起构成激光谐振腔。谐振腔中的 MQW,为激光提供光增益。通过外腔镜控制激光的振荡模式,对激光器输出的横模进行选择。调节外腔镜可获得低发散角、圆形、近衍射极限的 TEM_{00} 模的高质量激光光束。

2 结果与讨论

2.1 增益材料特性

VECSEL 外延片的反射谱和自发辐射谱可有效的表示其 DBR 和量子阱增益区的结构特性。用 U-4100 Spectrophotometer 分光光度计测得逆序生长的 VECSEL 外延片背面 DBR 的反射谱见图 2,用 APE WaveScan 激光光谱分析仪测量所得的腐蚀后的 VECSEL 外延片的自发辐射谱见图 3。

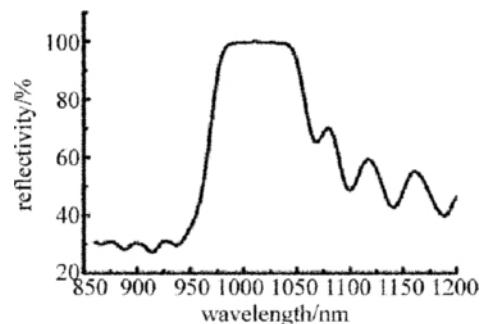


Fig. 2 Reflectivity of the DBR in semiconductor wafer

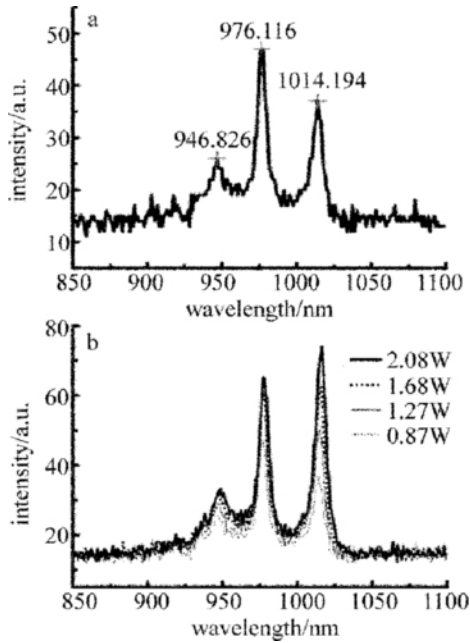


Fig. 3 Spontaneous emission of the semiconductor wafer
a—0.87 W pump power b—with different pump power

由于是面发射结构,激光垂直于外延片表面和多量子阱的生长平面,而多量子阱有源区的厚度很薄,只有几个微米,因此 VECSEL 的激光模体积小,单程光增益也较小,最多只有百分之几。这要求 DBR 对设计激光波长的反射率必须达到 99% 以上,才能保证激光器有尽可能低的损耗和尽可能高的增益,支持振荡出光。若外延片 DBR 的反射带偏移或反射率不足,将直接影响激光器的工作波长、激光器的斜效率、输出功率等主要性能指标。

由图 2 可知,VECSEL 外延片背面 DBR 的反射率达到近 100% 的波长范围约为 990nm ~ 1040nm,带宽约为 50nm。反射中心波长为 1015nm,与设计值 980nm 比较,反射谱的中心波长向长波长方向漂移了约 35nm,这主要源于在 VECSEL 外延片生长过程中,DBR 各层的厚度难以精确控制,致使各参量产生一些漂移。图 2 说明,VECSEL 的工作波长只有在 990nm ~ 1040nm 范围内才具备前文所述的振荡出光条件。

VECSEL 的自发辐射谱是量子阱自发辐射谱经过外延层结构的纵向限制因子的调制而形成的,它反映了多量子阱有源区的结构特性。图 3a 是抽运功率为 0.87W 时 VECSEL 外延片的自发辐射谱。从图 3a 可以看出,自发辐射谱范围为 930nm ~ 1030nm,带宽约为 100nm。自发辐射谱有 3 个峰值波长,分别为主极大 976nm,两个次极大 1014nm 和 947nm。波长为 976nm 的发射峰强度最大,与设计荧光波长 980nm 大致符合,说明多量子阱 MQW 在生长过程中发生的参量漂移并不大,生长质量良好。

图 3b 是不同抽运功率下,VECSEL 外延片的自发

辐射谱。当抽运功率较低时,976nm 处的发射峰为主峰,1014nm 和 947nm 为次极大。随着抽运功率的增加,自发辐射的强度也不断增强。但是 1014nm 发射峰的增强速率比 976nm 发射峰更快。当抽运功率增加到一定值时,1014nm 发射峰的强度将超过 976nm,成为主峰。此外,随着抽运增强,峰值波长都红移了约 2nm。

综合考虑图 2 的 DBR 反射谱和图 3 的量子阱自发辐射谱,波长为 976nm 对应的 DBR 反射率仅仅只有 89% 左右,远远低于波长为 1014nm 对应的近 100% 的反射率,因此,976nm 模式的增益要远小于 1014nm 模式的增益。在模式竞争中,976nm 的模式不能起振,而是 1014nm 的模式起振,产生激光输出。

2.2 激光器输出特性

按图 1 所示搭建 VECSEL 激光器,测得不同抽运功率下输出的激光光谱见图 4。当抽运功率分别为 1.19W,1.44W,1.92W,2.23W 和 2.96W 时,激光输出波长分别为 1014nm,1015nm,1016nm,1017nm 和 1018nm。随着抽运功率的增强,激光波长以约 2.3nm/W 的速率红移。激光光谱的半峰全宽 (full width half maximum, FWHM) 约为 2nm。

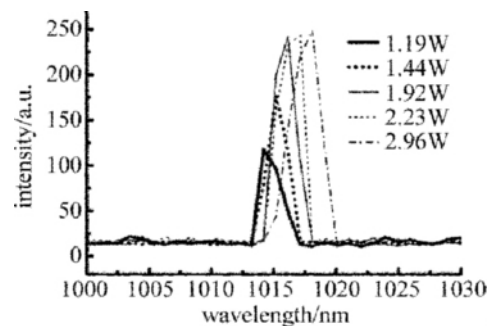


Fig. 4 Laser spectrum of the VECSEL

VECSEL 的主要优势是可直接输出高质量的近衍射极限 TEM₀₀ 模高斯光束。实验中用 M²-200Beam Propagation Analyzer 测量输出光束的 M² 因子。图 5a 和图 5b 分别显示了 x 方向和 y 方向的 M² 因子约为 1.01 和 1.00,对应的发散角为 13.97mrad 和 14.60mrad 时激光光斑的 2 维和 3 维光强分布图。由图 5 可知,VECSEL 的激光光束为近衍射极限的 TEM₀₀ 模高斯光束。

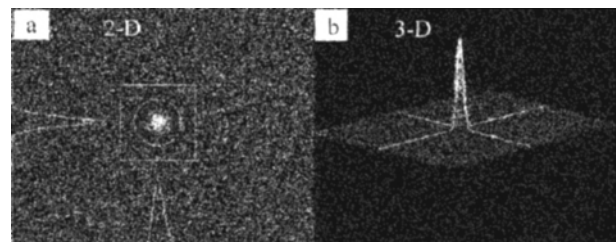


Fig. 5 2-D and 3-D intensity of the laser beam

图6展示了输出镜反射率为97%时,VECSEL的 TEM_{00} 模激光的输出功率与吸收抽运功率的关系曲线。由图可知,VECSEL的 TEM_{00} 模输出的光光转换效率约为20%,斜效率约为28%,阈值功率约为0.8W。随着吸收抽运功率的增强,激光输出功率也随之大致线性提高。当吸收抽运功率为2.63W时,激光输出功率达到最大值0.52W。如果抽运功率继续上升,激光输出功率将随着抽运功率的增加迅速下降,直至激光器熄灭。这是由于抽运功率超过一定值后,VECSEL有源区产生的热量来不能及时散失,热量的不断累积使量子阱的温度迅速升高,导致量子阱的增益系数急剧减小;同时,热致折射率改变使得DBR的反射谱和量子阱的发射波长都发生了红移,且两者的红移速率不一致,导致周期谐振增益结构失谐;上述两个因素均会使激光器的模增益迅速减小,导致了激光的热熄灭。

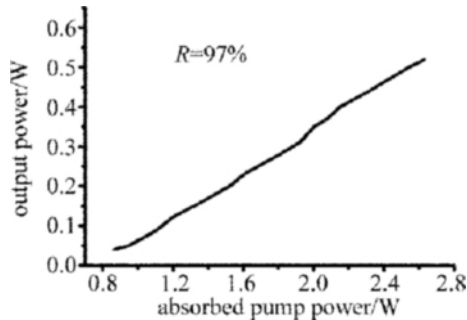


Fig. 6 Output power of the VECSEL

实验中所得 VECSEL 的最大输出功率局限在 0.52W,分析主要有以下几个因素:首先是半导体外延片的生长结果与设计参量发生了一些漂移,导致激光器量子效率不高;其次是 SiC 热沉是用导热硅脂粘贴在铜热沉上,这会较大程度地降低散热速率;三是受实验条件的限制,耦合输出镜的透过率没有最优化;另外,化学腐蚀的表面可能不够理想,会引入一定的散射损耗。

3 结论

利用化学腐蚀的方法,对 VECSEL 半导体外延片的基质进行了刻蚀去除。用基质去除的外延片搭建 VECSEL 激光器,获得了波长为 1018nm、最大功率 0.52W、光光转换效率 20%、斜效率 28% 的激光输出。输出光束为近衍射极限的 TEM_{00} 模高斯光束,其 x 方向与 y 方向的 M^2 因子分别为 1.01 和 1.00。今后的工作主要是进一步提高外延片生长质量,改善激光器的散热性能,优化键合、腐蚀等各步骤的工艺技术,提高 VECSEL 的输出功率。

参考文献

- [1] KUZNETSOV M, HAKIMI F, SPRAGUE R, *et al.* High power ($> 0.5W$ -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] KUZNETSOV M, HAKIMI F, SPRAGUE R, *et al.* Design and characteristics of high power ($>0.5W$ -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.
- [3] SONG Y R, ZHANG P, ZHANG X P, *et al.* Intracavity frequency-doubled green vertical external cavity surface emitting laser [J]. Chinese Optics Letters, 2008, 6(4): 271-273.
- [4] SONG Y R, ZHANG P, ZHANG X P, *et al.* Intracavity frequency-doubled green optically pumped semiconductor vertical external cavity surface emitting laser [J]. Chinese Journal of Lasers, 2007, 34(12): 1763 (in Chinese).
- [5] CALVEZ S, HASTIE J E, GUINA M, *et al.* Semiconductor disk lasers for the generation of visible and ultraviolet radiation [J]. Laser Photonics Reviews, 2009, 3(5): 407-434.
- [6] KELLER U, TROPPER A C. Passively mode-locked surface-emitting semiconductor lasers [J]. Physics Reports, 2006, 429(2): 67-120.
- [7] HARING R, PASCHOTTA R, ASCHWANDEN A, *et al.* High-power passively mode-locked semiconductor lasers [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2002, 38(9): 1268-1275.
- [8] ZHANG P, YU W M, SONG Y R, *et al.* Technology of SESAM mode-locked OP-VECSELs [J]. Laser Technology, 2007, 31(3): 291-294 (in Chinese).
- [9] LI F. Tunable high-power high-brightness vertical-external-cavity surface-emitting laser and applications [D]. Tucson, USA: The University of Arizona, 2006: 1-96.
- [10] LEE J H, KIM J Y, LEE S M, *et al.* 9.1W high-efficient continuous-wave end-pumped vertical-external-cavity surface-emitting semiconductor laser [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2006, 18(20): 2117-2119.
- [11] SONG Y R, ZHANG P, ZHANG X P, *et al.* Theoretical analyses and experimental studies on semiconductor disk lasers [J]. Optical Quantum Electronics, 2009, 41(1): 39-45.
- [12] CHEN B Z, DAI T L, LIANG Y P, *et al.* Finite element analysis of thermal management in optical pumping semiconductor vertical-external cavity surface-emitting laser [J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36(10): 2745-2750 (in Chinese).
- [13] LU G G, HE C F, QIN L, *et al.* 980nm optically pumped semiconductor disk laser [J]. Chinese Optics Letters, 2007, 5(1): 151-153.
- [14] ZONG N, CUI D F, LI C M, *et al.* Numerical simulation of intracavity second harmonic generation for optically pumped semiconductor vertical-external-cavity surface-emitting lasers [J]. Acta Physica Sinica, 2009, 58(6): 3903-3908 (in Chinese).
- [15] ZHANG P, SONG Y R, TIAN J R, *et al.* Gain characteristics of the InGaAs strained quantum wells with GaAs, AlGaAs, and GaAsP barriers in vertical-external-cavity surface-emitting lasers [J]. Journal of Applied Physics, 2009, 105(5): 053103/1-053103/8.
- [16] ZHANG P, SONG Y R, DAI T L, *et al.* Structural optimization of quantum wells used in a 1 μ m vertical-external-cavity surface-emitting laser [J]. Journal of Nanophotonics, 2011, 5(1): 059502/1-059502/6.