

高功率 976nm VECSEL 激光器的制备及性能研究

王彦照 宁吉丰 陈宏泰 房玉龙

中国电子科技集团第十三研究所 河北 石家庄 050051

【摘要】：高功率兼高光束质量的光泵浦垂直外腔面发射激光器（VECSEL）在激光显示、生命科学、国防军事、激光光谱学等许多方面具有重要的应用。为实现大功率光泵浦激光器需求，设计了 976 nm 的周期增益多量子阱结构以及反射率达到 99.9% 以上的多层布拉格反射镜（DBR）；为减小应变，采用 GaAsP 张应变垒层来补偿 InGaAs 量子阱的压应变；利用金属有机化学气相沉积（MOCVD）完成了外延结构制备，最终研制出 976 nm VECSEL 激光器。使用 808 nm 激光器泵浦，峰值位于 980 nm 左右，泵浦功率 10 W 时激光输出功率 > 1 W，温漂系数 < 0.1 nm/K，光束质量 $M2x < 1.1$ ， $M2y < 1.1$ ，有潜力应用在对潜通信、流式细胞仪等领域。

【关键词】：半导体激光器；光泵浦；金属有机化学气相沉积（MOCVD）

DOI:10.12417/2705-0998.26.11.040

引言

半导体激光器作为核心光电子元器件，长期以来在光纤通信、光学传感、数据存储及激光印刷等领域发挥着关键作用。^[1]相较于气体和固体激光器，半导体激光器的突出特点是可同时支持电注入和光注入两种泵浦方式，因而具备更高的能量转换能力——电泵浦和光泵浦器件的电光效率普遍可达 50% 以上。进入本世纪以来，得益于外延技术的持续进步，半导体激光器的输出功率水平不断提升，其角色也从单纯的信息载体转变为直接能量工具，逐步拓展至国防、医疗和工业加工等大功率场景。^[2]在这些新兴应用中，高输出功率成为刚性需求，因此实现兼具高功率与高光束质量的器件始终是该领域追求的核心目标，围绕这一目标已开展了大量研究工作。

然而，单片式电泵浦二极管激光器面临一个固有矛盾：能够输出高功率的宽条器件光束质量较差，而近衍射极限输出的单模器件又难以实现瓦级以上的功率。^[3]因此，在电泵浦单片架构下同时满足高功率与近衍射极限光束质量的要求，仍是一项极具挑战的技术难题。

垂直外腔面发射激光器（VECSEL）是半导体激光技术领域的一类新型面发射光源，凭借高功率容量、优良的光束品质以及便于二维阵列集成等优势，在显示技术、自由空间光通信、激光制造、生物医学及军事光电系统方向展现出突出的应用潜力。VECSEL 的一个显著特点是外腔结构为非线性频率变换提供了便利条件，通过腔内倍频即可获得高光束质量的可见光乃至紫外波段输出，这使其在光纤耦合泵浦、固体激光抽运及非线性光学频率转换方向颇具吸引力。^[4]相关技术一旦成熟，将带来显著的经济与社会价值^[9]。

在 VECSEL（Vertical-External-Cavity Surface-Emitting Laser）架构中，通常采用光纤耦合半导体激光模块作为激励源，泵浦光束经准直和聚焦后以倾斜角度辐照于半导体增益芯片表面。^{[2][5]}增益芯片的核心结构包括前端的 InGaAs/GaAsP 多量子阱（MQWs）有源区和底部的高反射率分布布拉格反射镜（DBR），该 DBR 充当激光谐振腔的端面反射镜。外部耦合输出镜与 DBR 镜面共同构成开放式谐振腔，兼具稳定腔模和纵模选择双重功能。^[6]为有效导出废热，增益芯片的背面键合有高热导率热沉。横向对比其他激光器方案——固体薄片激光器、VCSEL 及边发射半导体激光器——VECSEL 在波长调谐范围、单位面积功率密度和输出光束品质三个维度均具有独到的优势^[10]。

本文通过仿真对 976nm VECSEL 的 DBR 对数进行了优化计算，并采用 MOCVD 生长了相应的材料，材料的反射率与计算值吻合，并最终制备了光束质量较好的 VECSEL 激光器，泵浦功率 10W 时激光输出功率 > 1W，温漂系数 < 0.1nm/K，光束质量 $M2x < 1.1$ ， $M2y < 1.1$ ，有潜力应用在对潜通信、流式细胞仪等领域^[13]。

1 结构设计及仿真研究

通过分析应变量子阱的增益，我们可以用电子、轻空穴和重空穴的传输矩阵元来计算 OPS-VECSEL 的增益^{[2][3]}。

$$g(E) = \frac{e^2 \pi \hbar}{\epsilon_0 m_0^2 n c E} \int_{-\infty}^{\infty} \rho_c(E_c) \rho_v(E_v) M_{ij}^2 (f_c + f_v - 1) \cdot dE$$

器件工作时，波长 808 nm 的泵浦光子被 GaAsP 层吸收并激发电子-空穴对，这些光生载流子经扩散进入 InGaAs 量子阱区域后发生辐射复合，产生中心波长约 980 nm 的受激辐射。

外延结构采用底发射构型：在 GaAs 衬底上依次生长 In_{0.49}Ga_{0.51}P 窗口层，该层一方面抑制载流子在前表面的非辐射复合，另一方面提供湿法腐蚀的选择性停止界面。随后沉积 GaAs 缓冲层以调整 In_{0.49}Ga_{0.51}P 与后续 Al_{0.06}Ga_{0.94}As 层之间的晶格失配。有源区设计为 GaAsP/InGaAs 多量子阱，阱层与垒层交替堆叠 10 至 16 个周期以确保充足的模式增益。GaAsP 垒层还兼作谐振腔长度调节层，使每个量子阱周期均处于驻波场的波腹位置，构成谐振周期增益（RPG）配置，以最大化提取效率。

GaAs/AlAs 二元体系因其高达 0.5 以上的折射率对比度，仅需少量周期即可实现近单位反射率，是 DBR 镜的经典选材。^[4]然而在实际外延中，在 GaAs/AlAs 镜面上方继续沉积量子阱有源层时，表面形貌容易劣化，不利于后续高质量生长。为此本工作舍弃 GaAs/AlAs 组合，改用 Al_{0.1}Ga_{0.9}As 与 Al_{0.98}Ga_{0.02}As 的配对方案。该材料体系在 976 nm 处具有良好透过性，只需沉积 25 至 30 个周期即可使 DBR 在目标波长处的反射率突破 99.9%^[12]。

对于 VECSEL 谐振腔而言，腔内往返损耗极为敏感——即使仅有几个百分点的额外衰减也足以使受激振荡终止，因此光学薄膜的精准制备直接决定了器件能否出光。此外，镀膜还可用于选择性抑制非目标波长的寄生振荡。各光学界面均需根据功能镀制相应膜系：增益芯片的出射面（A 面）需同时满足 808 nm 泵浦光和 976 nm 激光光的双波段增透条件，两波段的透射率均须超过 99%；外腔耦合镜的凹面（B 面）则需兼顾双波段高反射，其中对 808 nm 的反射率不低于 99%，同时保留约 4% 的 976 nm 输出耦合透过率（对应 R≈96%）；此外，增益芯片的衬底面（C 面）还需单独制备 976 nm 增透膜，同样要求透射率高于 99%。

2 实验

器件制备采用 MOCVD 技术，以 GaAs（100）晶片为起始衬底进行全结构外延。生长序列依次为：In_{0.49}Ga_{0.51}P 窗口层、Al_{0.6}GaAs 载流子限制层、16 个周期的应变补偿 In_{0.14}GaAs/GaAsP_{0.02} 量子阱有源区、30 对 Al_{0.98}GaAs/Al_{0.1}GaAs DBR 反射镜堆栈，以及顶部的 GaAs 保护盖层。外延完成后对晶片进行背面工艺：将 GaAs 衬底从约 600μm 研磨减薄至 100μm，随后蒸发 Ti/Pt/Au 多层金属形成欧姆接触电极，再通过划片将整片分割为 4 mm×4 mm 的独立管芯。此后在管芯的外延面制备光学薄膜，最终将其焊接于铜热沉上进行封装，以确保泵浦过程中的有效散热^[11]。

对外延片以及制作完成的 976nm VECSEL 芯片进行了光致荧光谱（PL）测试，以及在 808nm 不同光功率泵浦下的光谱和输出功率测试。

3 分析与讨论

图 1 是外延片的腔模 mapping 图和与模拟值的对比曲线，由图中可以看出，腔模位于 970nm 左右，整个外延片的分布的标准差是 0.62%，说明外延层厚度非常均匀。腔模（FP-Dip）的曲线与模拟值进行了对比，两者吻合的非常好，实际测试中由于 CCD 探测器在 900nm 以上波段灵敏度会越来越差，所以光谱中相应的位置有一个下降的趋势。

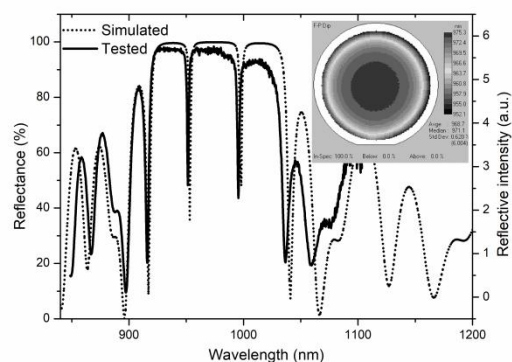


图 1 腔模模拟值与测试值对比与 mapping 图

实验室测得量子阱面发射光谱如图 2。面发射谱再次说明量子阱的自发辐射波长是符合设计要求的。由图可见，泵浦功率增加到 3.9W 之后，自发辐射强度不再增强，说明此时芯片内温度已经较高。泵浦从 0.1W 增加到 5.6W 的过程中，根据峰值波长的红移情况，估计芯片内部温度升高了约 30℃。剩余 100 μm 厚的基质及前端散热窗口的缺失导致了这个比较严重的热效应。

激光光谱波长随泵浦光功率增加会突然增大，可能原因是由于生长过程中的生长速度会随生长厚度发生变化，导致量子阱均匀性不够理想，总的自发辐射谱太宽，发射峰值随温度变化红移速度过大，约 10W 泵浦时波长即红移到 1000nm 以上。

通过进一步改善热沉键合工艺及衬底腐蚀均匀性，在 808 nm 泵浦激励下获得了超过 1 W 的 976 nm 激光输出。

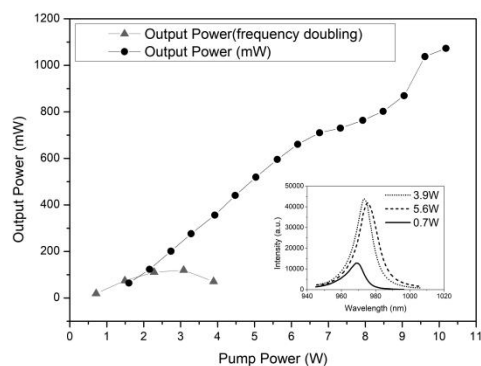


图2 976nm 激光输出功率与泵浦功率关系曲线

使用该芯片进行了倍频试验,将 976nm 波长倍频至 488nm 蓝光波段,输出功率如图9所示。由于上面提到的较为严重的热效应,加上芯片表面形变的影响,倍频蓝光在泵浦功率大于 3W 后即开始下跌,蓝光的输出功率最大为 120mW。测试光斑质量较好,光束质量因子 $M2x \approx 1.08$ 、 $M2y \approx 1.09$ ^[14]。

3 结论

本文通过设计周期增益多量子阱以及对 DBR 进行优化设计,通过 MOCVD 进行外延并制备了 976nm VECSEL 激光器,激光器在 808nm 泵浦下输出功率 >1W,光斑质量好,光束质量 $M2x$ 、 $M2y < 1.1$,有望应用于对潜通信和流式细胞仪等领域的光源^[15]。

参考文献:

- [1] 江剑平.半导体激光器,第一版,电子工业出版社,2000,pp.330-334
- [2] 何春风,路国光,单肖楠,秦丽,王立军,等,高功率 980 nm 垂直外腔面发射激光器(VECSEL)的理论研究[J].光学精密工程,2005,13(3):247-252
- [3] M.Fukuda,M.Okayasu,J.Temmyo,and J.Nakano,Degradation behavior of 0.98- μ m strained quantum well InGaAs/AlGaAs lasers under high-power operation[J]IEEE Journal of Quantum Electronics,1994, vol.30,pp.471-476
- [4] C.Yan,Y.Ning,L.Qin,D.Cui,Y.Liu,Y.Sun,Z.Jin,H.Li,G.Tao,C.Wang,L.Wang,and H.Jiang,High-power vertical-cavity surface-emitting laser with an extra Au layer[J]IEEE Photonics Technology Letters,2005, vol.17,pp.1599-1601
- [5] S.R.Chinn,J.A.Rossi,C.M.Wolfe,and A.Mooradian,Optically pumped roomtemperature GaAs lasers[J]IEEE Journal of Quantum Electronics,1973, vol.QE-9,pp294-300
- [6] 许冠杰,舒永春,刘如彬,舒强,王占国,许立军,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, Vol.30,No.4,pp.351-354
- [7] M.Kuznetsov,F.Hakimi,R.Sprague,and A.Mooradian,"High power(>0.5 W cw)diode-pumped verticalexternal-cavity surface-emitting semiconductor lasers with circular TEM00 beams,"IEEE Photon.Technol.Lett.9(8),1063-1065(1997).
- [8] A.C.Tropper and S.Hoogland,"Extended cavity surface-emitting semiconductor lasers,"Progress in QuantumElectronics 30,1-43(2006).
- [9] M.Guina,"VECSEL technology:the semiconductor materials perspective,"Proc.SPIE 12868,Vertical External Cavity Surface Emitting Lasers(VECSELs)XIII,1286802(2024).
- [10] S.Yu,G.Hou,C.Tong,Y.Wang,Z.Zhang,J.Wang,"High-Power Narrow-Linewidth tunable 980nm VECSEL based on Off-Axis multi-chip birefringent filters,"Optics&Laser Technology,186,112693(2025).
- [11] M.R.Butaev,Ya.K.Skasyrsky,V.I.Kozlovsky,A.Yu.Andreev,I.V.Yarotskaya,A.A.Marmalyuk,"Semiconductor disk laser with a wavelength of 780 nm based on a MOCVD-grown AlGaAs/AlGaAs heterostructure with optical and electron beam pumping,"Quantum Electronics,52(4),362-366(2022).
- [12] A.R.Albrecht,Z.Yang,M.Sheik-Bahae,"DBR-free Optically Pumped Semiconductor Disk Lasers,"in Vertical External Cavity Surface Emitting Lasers(VECSELs),Ch.6,Wiley(2021).
- [13] Y.Kaneda,D.Mitten,M.Hart,S.H.Warner,J.-P.Penttinen,M.Guina,"Longitudinal scaling of VECSEL output power maintaining narrow linewidth,"Proc.SPIE 11263,Vertical External Cavity Surface Emitting Lasers(VECSELs)X,1126307(2020).
- [14] H.-Y.Liu,H.-D.Ma,Q.Bian,Y.Bo,D.-F.Cui,Q.-J.Peng,"Microsecond pulsed yellow emission by intracavity doubled optically pumped two-chip VECSEL,"Laser Physics Letters,20(5),055001(2023).
- [15] M.J.Eshghi,M.H.Yavari,"Optically pumped passively mode-locked VECSEL with output peak power of 1.32 KW,"Optics&Laser Technology,174,110577(2024).