

光泵浦垂直外腔面发射激光器的结构优化设计

秦 莉¹, 何春风^{1,2}, 李 军^{1,2}, 梁雪梅^{1,2}, 路国光^{1,2}, 宁永强¹, 王立军¹

- (1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 激发态重点实验室, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要: 实验中发现, 传统结构的光泵浦垂直外腔面发射半导体激光器, 随着泵浦功率密度的增加, 器件的温升现象严重。这是由于传统结构中, 势垒和量子阱间小的带隙差造成的。为了解决温升问题, 采用 PICS3D 软件对传统结构进行优化设计。在吸收层中引入对泵浦光和激光透明的 AlGaAs 层, 提高对量子阱中的载流子的限制作用。计算结果表明, 在增益和自发发射特性上, 优化后的结构都有了很大提高。

关键词: 光泵浦; 垂直腔面发射激光器; 结构设计

中图分类号: TN284

文献标识码: A

文章编号: 1007-2276(2007)增(激光)-0081-04

Optimized structure designing of OPS-VECSEL

QIN Li¹, HE Chun-feng^{1,2}, LI Jun^{1,2}, LIANG Xue-mei^{1,2}, LU Guo-guang^{1,2},
NING Yong-qiang¹, WANG Li-jun¹

- (1. The Key Laboratory of Excited State Processes, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 130039, China)

Abstract: In experiment, it was found that temperature increasing of original OPS-VECSEL is very serious with increasing pumping power a new type of semiconductor laser. This phenomenon was from the smaller energy offset between barrier and quantum well. In order to reduce the temperature increasing of VECSEL, we adopted PICS3D software to optimize the original structure designing. The carriers in quantum well are well confined through setting a non-absorbing AlGaAs layer which is transparent to pumping and lasing wavelength. The calculated results show that the gain and spontaneous emission are enhanced after the structure of VECSEL is optimized.

Key words: OPS; VECSEL; Structure design

0 引言

光泵浦垂直外腔面发射激光器 (OPS-VECSEL) 是近年来发展迅速的一种新型激光器, 它兼备了二极管泵浦固体激光器和半导体垂直腔面发射激光器的

优点, 如高功率、单模、输出圆对称光斑和易于腔内倍频等。近红外 OPS-VECSEL 用于泵浦光纤激光器、光纤放大器、生物分析技术等; 此波段 OPS-VECSEL 倍频后输出的蓝光在显示、探测、高密度光存储、水下通信、激光阅读、印刷工业中有着广泛的应用前景。

收稿日期: 2007-04-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (60577003, 60636020, 60476029, 60676034)

作者简介: 秦莉(1969-), 女, 黑龙江鹤岗人, 副研究员, 主要从事垂直外腔面发射半导体激光器的研究。Email: qinlicomp@yahoo.com.cn

长波长 OPS-VECSEL 在大气光通信、空间光通信和环境监测等方面具有很大的应用市场。德国 Osram Opto Semiconductor 公司与美国 Coherent 公司正在采用 OPS-VECSEL 技术联合研发激光显示器件, 如激光电视和小型投影仪等。

对于 OPS-VECSEL, 随着泵浦功率密度的增加, 器件的工作温度升高, 导致载流子直接跳出量子阱进入势垒^[1], 产生非辐射复合, 引起输出功率下降。同时温度升高, 产生的光生载流子迁移率大大降低, 致使部分光生载流子不能扩散到量子阱, 而是在势垒或吸收层发生复合。

目前采用两种方法解决器件的温升: 一是将去掉衬底的 $6 \sim 7 \mu\text{m}$ 超薄器件焊到高导热热沉上^[2]; 二是在出光面键合高导热的散热片^[3], 再将整个器件键合到高导热热沉上。尽管采用上述散热技术, 有源区的温升依然存在, 而且是限制 OPS-VECSEL 获得高功率输出的主要因素。这种现象在 $900 \sim 1060 \text{ nm}$ 波段 OPS-VECSEL 中更显著, 这是由于势垒和量子阱之间小的带隙差 ($3kT$) 造成的。因此需要对传统的 VECSEL 器件结构进行改进和优化设计。

1 传统器件结构

在 GaAs 衬底上生长 AlGaAs 或 InGaP 窗口层作为表面限制层, 阻止产生的载流子在表面复合, 同时也作为刻蚀阻挡层。Al_{0.08}Ga_{0.94}As 作为吸收层, 吸收泵浦光, 产生光生载流子。GaAsP 和 InGaAs 构成量子阱结构, 它们与 Al_{0.08}Ga_{0.94}As 层构成增益区, 一般生长 $12 \sim 14$ 个周期, 保证有足够的光增益。每个周期的 Al_{0.08}Ga_{0.94}As 层的厚度是一样的, 但是对于泵浦光的吸收能力按指数规律递减, 第一个周期可吸收 9% 左右的泵浦光, 最后一个周期只能吸收 2% ~ 3% 的泵浦光。Al_{0.5}Ga_{0.5}As 作为填充层用来调节谐振腔长, 形成谐振周期增益 (RPG) 结构, 来获得高的量子效率。由 Al_{0.9}Ga_{0.1}As 和 Al_{0.12}Ga_{0.88}As 交替生长 $25 \sim 30$ 对 DBR 高反射膜, 反射率为 99.9%, 作为谐振腔的一组高反射镜。图 1 为上述结构的导带简图。

传统结构中采用势垒泵浦方式, 808 nm 泵浦光在 AlGaAs 吸收层内被吸收, 产生光生载流子, 扩散进入 InGaAs 量子阱区复合产生 $900 \sim 1060 \text{ nm}$ 的光。

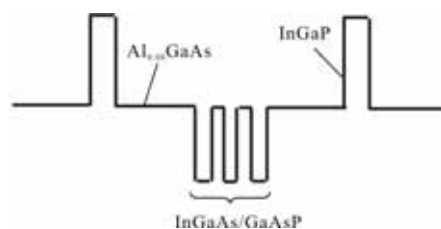


图 1 势垒泵浦的 OPS-VECSEL 导带图

Fig.1 Conduction band diagram of barrier-pumping OPS-VECSEL

2 实验及结果

采用传统 OPS-VECSEL 结构进行了材料生长、器件制作及实验测量。利用 MOCVD 设备在 GaAs 衬底上依次生长 GaAs 缓冲层, InGaP 层, AlGaAs、GaAsP 和 InGaAs 多周期层, DBR 反射层, 盖层。在 DBR 层上蒸镀 Ti/Pt/Au 层, 作为与热沉键合的表层。与热沉焊接前, 把衬底化学机械减薄至合适的厚度, 然后焊接在铜热层上; 焊接后的外延片采用 $1\text{NH}_4\text{OH}$ 系的腐蚀液, 腐蚀液温度控制在 20°C 时腐蚀掉衬底。腐蚀后的样品厚度为 $7 \mu\text{m}$ 左右, 在出光面镀 808 nm 、 980 nm 的增透膜, 以减弱半导体表面的微腔效果, 增强 DBR 反射镜与外腔镜之间的谐振。

实验中, 将传统结构的 OPS-VECSEL 键合到高导热散热片上, 在 12°C 时测试了不同泵浦功率密度下的光致发光谱, 见图 2。

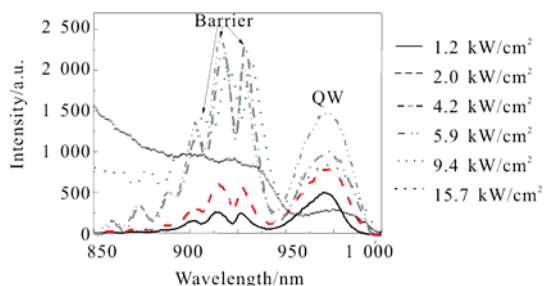


图 2 OPS-VECSEL 的光致发光谱

Fig.2 PL spectrum of OPS-VECSEL

OPS-VECSEL 的激射阈值在 $3.0 \sim 10 \text{ kW/cm}^2$ (与发光波段、器件结构及工艺条件有关)。图 2 中, 泵浦功率密度 $P_{\text{pump}} < 2.0 \text{ kW/cm}^2$, 量子阱 (QW) 的发

光占主要地位； $P_{\text{pump}} = 4.2 \text{ kW/cm}^2$ ，来自势垒（Barrier）的发射强度超过了量子阱的发射强度，此泵浦功率密度是激射阈值下限的 1.4 倍，这说明尽管采用了散热技术，VECSEL 也很难获得高功率输出； $P_{\text{pump}} = 15.7 \text{ kW/cm}^2$ ，量子阱的发射非常微弱而吸收层的发射增强。光致发光谱是材料增益特性的体现。理论上讲：增加泵浦功率密度，一是引起量子阱中的载流子热逸出；二是由于泵浦功率密度的增加，在吸收层产生的大部分光生载流子没有扩散进量子阱区，而是进入势垒层或在吸收层发生非辐射复合。此现象是由传统结构对载流子限制不利造成的，因此需要对传统器件结构进行重新设计。

3 结构优化

根据测量结果，利用 Crosslight 公司的 PICS3D 软件对传统结构的 OPS-VECSEL 进行了优化设计。传统结构在设计上的缺陷就是量子阱和势垒间的带隙差过小，这是由于泵浦源的波长限制造成的。优化的原则就是增强对量子阱中的载流子的限制。由于泵浦波长的限制，吸收层的禁带宽度不能增加，势垒和量子阱的带隙差的改变量也很有限；为了增大带隙差，在吸收层中引入一层对泵浦光和激射光都透明的 AlGaAs 层，作为载流子限制层。AlGaAs 材料的带隙宽度随 Al 组分的增加而增大，通过控制 Al 组分及 AlGaAs 层的厚度达到限制载流子的作用。图 3 为优化后的 OPS-VECSEL 导带结构简图。

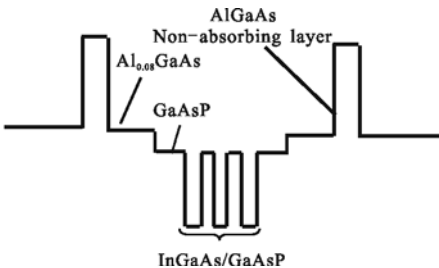


图 3 优化后的导带简图
Fig.3 Optimized conduction band diagram

4 计算结果

对于传统结构和优化后的结构，采用 Crosslight

公司的 PICS3D 软件计算器件的材料增益、自发发射、模式增益在优化前后的变化。计算结果见图 4 ~ 图 6。

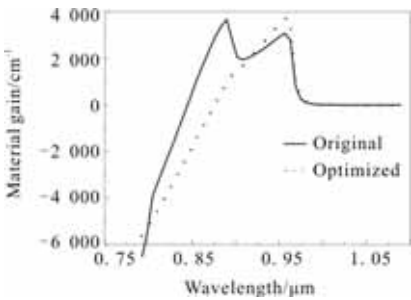


图 4 材料增益谱
Fig.4 Material gain spectrum

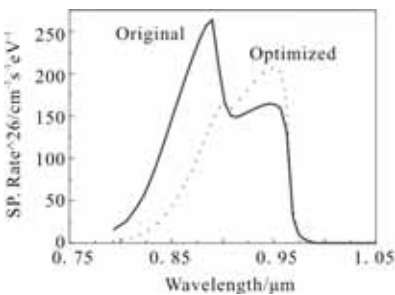


图 5 自发发射谱
Fig.5 Spontaneous emission spectrum

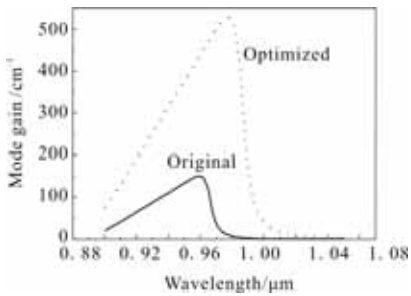


图 6 模式增益谱
Fig.6 Mode gain spectrum

计算中考虑了温度引起的增益和自发发射的变化。结果表明，传统结构的 OPS-VECSEL 的材料增益和自发发射谱中来自势垒的发射都要强于量子阱的发射，相应的模式增益也较低。而优化后的 OPS-VECSEL，在材料增益、自发发射特性都有了改进，抑制了来自势垒的发射，增强了量子阱中载流子的复合几率。模式增益较传统结构，提高了 3 ~ 4 倍。

5 结 论

热逸出是量子阱激光器中普遍存在的现象,实验中发现,此现象在传统结构的 OPS-VECSEL 中表现的更明显。尽管采用了高导热的散热片,仍然无法从根本上解决热逸出问题,激光器难于获得高的输出功率。为了解决此问题,采用加拿大 Crosslight 公司的 PICS3D 软件对增益区的结构进行了设计和优化。

参考文献：

- [1] ANDREW P O et al. Carrier lifetime saturation in InGaAs single quantum wells [J]. Appl Phys Lett, 1995, 66: 2730-2732.
- [2] CHILLA J. et al. High power optically pumped semiconductor laser [C]// Proc of SPIE, 2004, 5332: 143.
- [3] ALFORD W J et al. High power and good beam quality at 980 nm from a vertical external-cavity surface-emitting laser[J]. Opt Soc Am B, 2002, 19 (4): 663-666.