

氧化孔径限制垂直腔面发射激光器的电极优化

吴翔宇, 崔碧峰

北京工业大学信息学部, 北京 100022

摘要 垂直腔面发射半导体激光器(VCSEL)限制电流流入的方式有许多种,其中氧化孔径(电流注入孔径)限制法制备工艺简单,成为普遍选用的方式。模拟结果显示,对于氧化孔径限制 VCSEL,在氧化孔径边缘处电流密度最大。模拟 P 型电极内环半径对注入孔径电流密度的影响,结果表明 P 型电极内环半径越大,器件氧化孔径边缘的电流密度越大,对应的器件工作电压越大,输出光功率越低。综合考虑器件结构的光场分布和发散角分布,计算器件表面光斑面积,得到 P 型电极内环半径的最优值为 $8\ \mu\text{m}$ 。

关键词 激光器;垂直腔面发射激光器;氧化孔径;电流密度

中图分类号 TN248.4 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP54.101402

Electrode Optimization of Oxide Aperture Confined Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers

Wu Xiangyu, Cui Bifeng

Faculty of Information, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China

Abstract There are many ways to limit the current flowing in the vertical-cavity surface-emitting laser (VCSEL), in which the preparation technology of oxide aperture (current injection aperture) confining method is simple. So the oxide aperture confining method becomes a universal choice. The simulation result shows that the maximum current density is at the edge of the oxide aperture for the oxide aperture confined VCSEL. The influence of the inner radius of the P-type electrode on the current density of the injection aperture is also simulated. The results show that when the inner radius of the P-type electrode increases, the current density at the edge of the device oxide aperture increases, the corresponding device working voltage increases, and the output optical power declines. The device surface spot area is calculated with optical field distribution and divergence angle distribution of the device structure comprehensively considered. The optimal inner radius of the P-type electrode is $8\ \mu\text{m}$.

Key words lasers; vertical-cavity surface-emitting laser; oxide aperture; current density

OCIS codes 140.7260; 230.5590; 120.6780

1 引言

近年来,垂直腔面发射半导体激光器(VCSEL)以其低成本、低驱动电流、低发散角、圆形光束,及输出功率更高、线宽更窄从而可实现一维、二维高密度集成等优点,在自由空间光通信、光信息处理、全光通信和激光抽运等领域备受青睐^[1-4]。目前垂直腔面发射半导体激光器在激光显示、激光测距、激光雷达、高密度存储、海底光通信以及生物分析等方面得到广泛应用^[5-8]。

VCSEL 在器件表面出射光,而金属电极对出射光有显著的吸收,因此在制备 VCSEL 时,通常需要制备不被电极覆盖的出射窗口,同时需要对电流注入进行引导和限制,氧化孔径限制法因其工艺简单成为常用的

收稿日期: 2017-04-21; 收到修改稿日期: 2017-05-16

基金项目: 国家自然科学基金(11204009)、北京市自然科学基金(4142005)、北京市教委创新能力提升计划(TJSHG201310005001)

作者简介: 吴翔宇(1995—),男,本科生,主要从事半导体光电子器件方面的研究。E-mail: wxydads@163.com

导师简介: 崔碧峰(1972—),女,博士,副教授,主要从事半导体光电子器件方面的研究。E-mail: cbf@bjut.edu.cn

工艺方法。对于氧化孔径法,一直以来人们关注的重点是氧化孔径对模式特性^[9]以及功率特性的影响,对器件内部电流分布鲜有研究。本文使用 Crosslight PICS3D 软件模拟 P 型电极内环半径不同时氧化孔径边缘处的电流密度,分析了氧化孔径对器件的影响。同时模拟了器件的光场分布和发散角,进而计算出光面的光斑,得到既能保证氧化孔径边缘处电场强度小,又不吸收出射光的 P 型电极内环半径。

2 器件外延结构及制备工艺

设计了一个激射波长为 1550 nm 的 VCSEL,其基本结构如表 1 所示(P-cladding 和 N-cladding 分别是 P 型和 N 型限制层)。VCSEL 外延片是利用金属氧化物化学气相沉积法(MOCVD)生长而成的。VCSEL 量子阱的势阱材料为 $\text{In}_{0.48}\text{Ga}_{0.52}\text{As}_{0.82}\text{P}_{0.18}$,阱宽为 6 nm;势垒材料为 $\text{In}_{0.76}\text{Ga}_{0.24}\text{As}_{0.82}\text{P}_{0.18}$,势垒宽度为 8 nm;量子阱的数量为 6。为了减小串联电阻,器件底部和顶部分布的布拉格反射镜(DBR)都由具有渐变层的 $\text{Al}_{0.6}\text{GaAs}/\text{AlAs}$ 周期重复性结构组成。其中 N 型 DBR 掺杂硅(掺杂原子数为 $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$),周期为 28 对;P 型 DBR 掺杂碳(掺杂原子数为 $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$),周期为 29 对。有源区与两侧的 GaAs 层构成一个波长的谐振腔,在 GaAs 层与 P 型 DBR 之间是厚度为 122 nm 的 $\text{Al}_{0.98}\text{Ga}_{0.02}\text{As}$ 氧化层。整体厚度经过模拟设计符合 VCSEL 激射条件。

表 1 器件外延结构

Table 1 Epitaxial structure of device

Item	Logarithm	Material	Doping concentration / (10^{18} cm^{-3})	Thickness / nm
N-DBR	28	$\text{Al}_{0.6}\text{GaAs}$	2	115
N-DBR		AlAs	2	134
N		GaAs	2	50
N-cladding		InP	5	257
Barrier		$\text{In}_{0.76}\text{Ga}_{0.24}\text{As}_{0.82}\text{P}_{0.18}$		8
Quantum well		$\text{In}_{0.48}\text{Ga}_{0.52}\text{As}_{0.82}\text{P}_{0.18}$		6
P-cladding		InP	1	257
P		GaAs	0.6	140
P		$\text{Al}_{0.98}\text{Ga}_{0.02}\text{As}$	0.6	122
P-DBR	29	$\text{Al}_{0.6}\text{GaAs}$	2	115
P-DBR		AlAs	2	134

实验中采用传统的氧化限制结构。首先,利用金属氧化物化学气相沉淀法进行外延生长,刻蚀台面后,露出高铝组分的氧化层以便进行湿法氧化,形成高阻限制区。然后,制备 P 型和 N 型电极。氧化限制结构如图 1 所示。

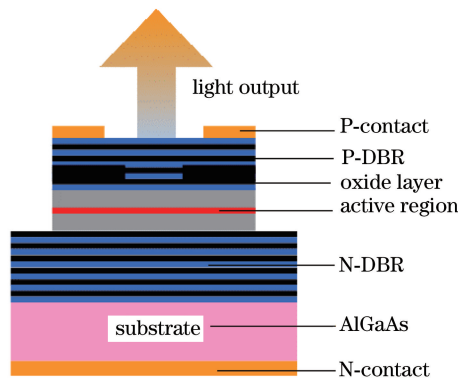


图 1 氧化限制 VCSEL 示意图

Fig. 1 Schematic of oxide confined VCSEL

3 器件电极的模拟优化

将器件层结构输入 Crosslight PICS3D 模拟软件,由于器件为轴对称结构,所以只需模拟其中的半径部

分。出光孔半设定为 $6\ \mu\text{m}$, 即氧化孔径半径为 $6\ \mu\text{m}$ 。图 2 为 Crosslight PICS3D 软件模拟的器件结构示意图, 左右两列分别表征非氧化区(电流流入区)和氧化区(电流阻挡区), 其中上下黑色部分分别为 P 型和 N 型电极位置。在其他参数不变的情况下, 对 P 型电极的位置进行模拟优化。

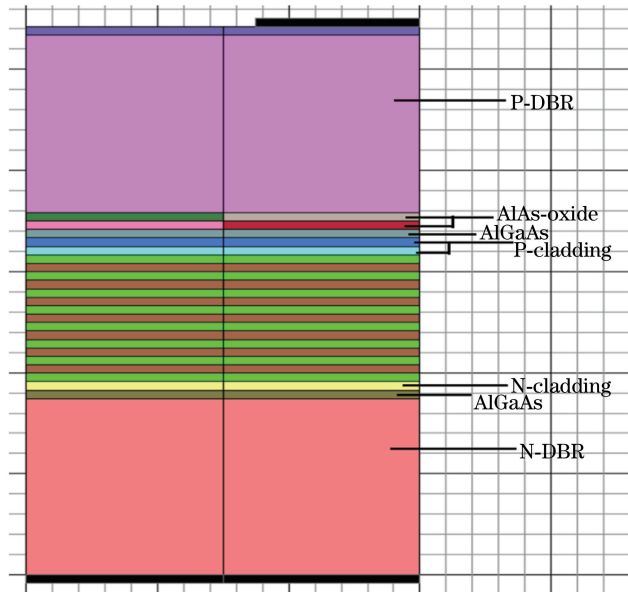


图 2 器件模拟结构示意图

Fig. 2 Schematic of device simulation structure

注入电流选取 $30\ \text{mA}$, 模拟该半导体激光器在不同 P 型电极内环半径条件下注入孔径边缘电流密度的变化特性。

网格数为 9 时的模拟网格分布如图 3 所示, 网格数选取越多, 实验数据越精确。为了保证精度并节约计算时间, 对网格进行疏密设置。X 方向上, 氧化孔径边缘附近网格较密, 其他区域网格较疏; Y 方向上, 有源区附近网格较密, 其他区域网格较疏。

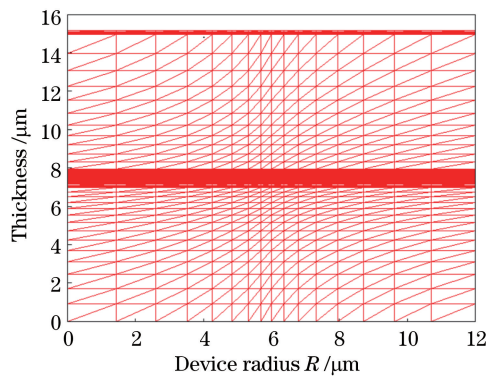


图 3 网格数为 9 时的模拟网格分布示意图

Fig. 3 Schematic of simulated mesh distribution when mesh count is 9

模拟结果表明, 在氧化孔径边缘处的电流密度最大, 电场强度最强, 如图 4 所示。氧化孔径是电流的注入通道, 其边缘是由高 Al 组分经氧化产生的 Al_2O_3 层边缘, Al_2O_3 层与 AlGaAs 分属不同的晶体结构, 在连接处必然引入多种缺陷。在高电流密度作用下, 此处容易毁坏, 进而对电流分布以及光场吸收产生影响。因此, 氧化孔径处的电流强度过大成为器件输出功率降低以及器件损坏的主要原因。

当注入电流为 $30\ \text{mA}$ 时, 改变器件的 P 型电极内环尺寸, 分别计算得到器件在 P 型内环半径为 $6.0, 6.5, 7.0, 8.0, 9.0, 10.0, 11.0\ \mu\text{m}$ 时, 氧化孔径边缘 X 方向和 Y 方向的电流密度。同时模拟器件的工作电压和输出功率, 如表 2 所示。

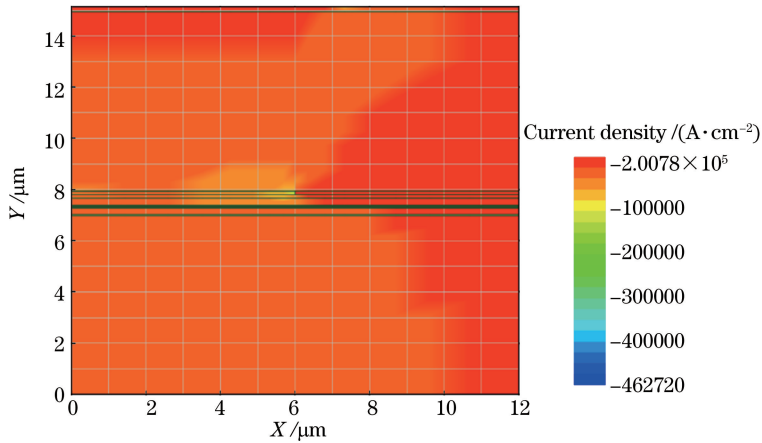


图4 器件电流密度图

Fig. 4 Current density of device

表2 注入孔径电流密度模拟数据

Table 2 Simulation data of injection aperture current density

Inner radius of P-type electrode / μm	6.0	6.5	7.0	8.0	9.0	10.0	11.0
Current_X /($\text{A} \cdot \text{cm}^{-2}$)	1394.38	1399.77	1403.11	1410.60	1414.15	1416.95	1418.39
Current_Y /($\text{A} \cdot \text{cm}^{-2}$)	60120.21	60292.45	60398.16	60631.74	60742.00	60829.20	60873.09
Working voltage /V	4.60	4.65	4.70	4.84	4.96	5.14	5.55
Output power /mW	8.45	8.43	8.42	8.40	8.39	8.38	8.37

从表2可知,P型电极内环半径越小,器件性能越好。氧化孔径处电场强度小,工作电压低,输出功率大。当P型电极内环半径与出光孔完全重合时,器件性能最优。但是对于P型电极,还要考虑器件表面光斑尺寸。P型电极内环半径若小于表面光斑尺寸,会带来吸收,降低输出光功率并使热特性恶化,因此还需对光场分布以及发散角分布进行模拟。

图5为模拟的出光场分布,表征了量子阱有源区光场强度分布。由于出光孔径为 $12\ \mu\text{m}$,所以模式为二阶模激光。出光光斑为环光斑,在量子阱处光斑外环半径已经达到 $6.45\ \mu\text{m}$,光环中心在 $3.52\ \mu\text{m}$ 处。

图6为模拟的发散角情况,整体器件发散角为 12.8° 。在器件表面,光斑外环半径由器件的整体发散角决定,计算得出光斑外环半径可以达到 $7.32\ \mu\text{m}$ 。考虑到模拟误差,P型电极内环半径选择 $8\ \mu\text{m}$ 时,器件性能最优。

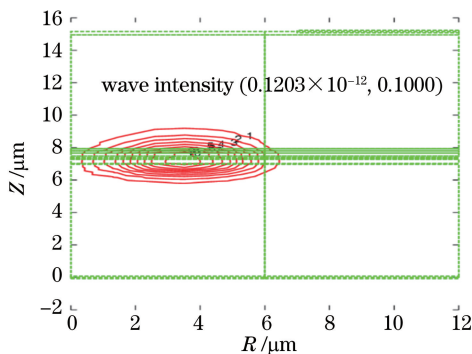


图5 激光光场分布图

Fig. 5 Lasing field distribution

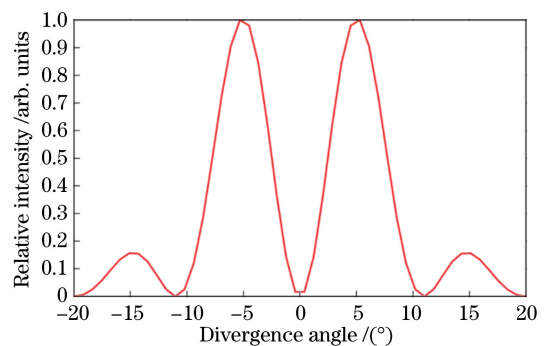


图6 发散角示意图

Fig. 6 Schematic of divergence angle

4 结 论

运用 Crosslight PICS3D 软件模拟半导体激光器件台面半径为 $12\ \mu\text{m}$,内环半径为 $6.0, 6.5, 7.0, 8.0,$

9.0,10.0,11.0 μm 时,氧化孔径边缘 X 方向和 Y 方向的电流密度、工作电压及输出光功率。比较与分析实验数据可得,P 型电极内环半径越大,器件氧化孔径边缘的电流密度越大,对应的器件工作电压越大,输出光功率越低。器件光斑外环半径可以达到 7.32 μm ,考虑到模拟误差,选择 P 型电极内环半径为 8 μm 时,器件性能最优,此时电场强度最小,器件工作电压最低,且输出功率最大。此次模拟工作电流设为 30 mA,可以观察到器件性能的变化趋势。当工作电流加大时,优化电极参数后特性变化将更加明显。

参 考 文 献

- [1] Zhang Juan, Liu Liren, Zhou Yu, *et al.* Design of a new type interleaver[J]. Acta Optica Sinica, 2003, 23(12): 1424-1428.
张娟, 刘立人, 周煜, 等. 一种新型的光交错复用器的设计[J]. 光学学报, 2003, 23(12): 1424-1428.
- [2] Cui Ming, Han Jun, Deng Jun, *et al.* Epitaxial growth of 980 nm vertical-cavity surface-emitting laser [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2015, 36(1): 38-41.
崔明, 韩军, 邓军, 等. 980 nm 垂直腔面发射激光器的外延生长[J]. 半导体光电, 2015, 36(1): 38-41.
- [3] Shi Jingjing, Tian Zhenhua, Qin Li, *et al.* 850 nm high power vertical-cavity surface-emitting lasers [J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2010, 21(10): 1445-1448.
史晶晶, 田振华, 秦莉, 等. 850 nm 大功率垂直腔面发射激光器[J]. 光电子 • 激光, 2010, 21(10): 1445-1448.
- [4] Huang Shouwen, Chen Jianjun, Xia Guangqiong, *et al.* Polarization bistability characteristics of 1550 nm vertical-cavity surface-emitting laser under optoelectronic feedback [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(7): 071405.
黄守文, 陈建军, 夏光琼, 等. 光电反馈 1550 nm 垂直腔表面发射激光器偏振双稳特性 [J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(7): 071405.
- [5] Tian Kun, Zou Yonggang, Jiang Xiaowei, *et al.* Wavelength tuning range of inter cavity subwavelength grating MEMS VCSELs [J]. Chinese J Lasers, 2016, 43(7): 0701009.
田锬, 邹永刚, 江孝伟, 等. 内腔亚波长光栅 MEMS VCSELs 的波长调谐范围 [J]. 中国激光, 2016, 43(7): 0701009.
- [6] Li Xiushan, Ning Yongqiang, Cui Jinjiang, *et al.* Polarization properties of rectangle-shape VCSEL with asymmetrical current injection [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(7): 071402.
李秀山, 宁永强, 崔锦江, 等. 非对称电流注入对矩形台面激光器的偏振分析 [J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(7): 071402.
- [7] Zhang Yan, Ning Yongqiang, Zhang Jinsheng, *et al.* Structural design of 808 nm InGaAlAs vertical-cavity surface-emitting laser [J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(9): 0902007.
张艳, 宁永强, 张金胜, 等. 808 nm InGaAlAs 垂直腔面发射激光器的结构设计 [J]. 中国激光, 2011, 38(9): 0902007.
- [8] Wang Lijun, Ning Yongqiang, Qin Li, *et al.* Development of high power diode laser [J]. Chinese Journal of Luminescence, 2015, 36(1): 1-19.
王立军, 宁永强, 秦莉, 等. 大功率半导体激光器研究进展 [J]. 发光学报, 2015, 36(1): 1-19.
- [9] Bajaj R, Mishra H K, Goyal P, *et al.* Design of oxide-confined and temperature stable long wavelength vertical cavity surface emitting laser for optical interconnects [J]. Optik-International Journal for Light and Electron Optics, 2016, 131: 506-514.