

高铝 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 氧化层对垂直腔面发射激光器的影响

康香宁 宋国峰 叶晓军 侯识华 陈良惠

(中国科学院半导体研究所 光电子器件国家工程中心, 北京 100083)

摘要: 针对可见光垂直腔面发射激光器的制备, 通过湿氮氧化实验和测量微区光致发光谱分别研究了高铝组分 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 的氧化特性及氧化产物的收缩应力对有源区的影响, 结合器件结构设计确定了氧化限制层 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 的铝组分和最佳位置, 并制备出了低阈值电流的 AlGaInP 系垂直腔面发射激光器。

关键词: $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 湿氮选择氧化; 微区光致发光谱; 垂直腔面发射激光器

PACC: 8160C; 4255P

中图分类号: TN 248.4

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2004)05-0589-05

1 引言

由于 AlAs 形成的氧化层性能稳定, 电绝缘性好, 折射率低于半导体材料, 能同时在垂直腔面发射激光器(VCSEL)等器件中形成很好的电流限制和光学限制^[1], 因此 AlAs 湿氮氧化技术已经成为目前 VCSEL 及其阵列研制中最广泛的工艺, 氧化限制 VCSEL 也成为挑战极小尺寸和极低阈值电流 VCSEL 的主要途径^[2,3]。

对高铝 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 选择性湿氮氧化工艺中的氧化过程动力学问题和氧化产物的成分与微观结构、氧化后的体积收缩以及界面情况等问题已经开展了很多研究^[4,5]。实验中也大量报道了高铝组分 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 的氧化速率同铝组分、氧化层厚度、氧化炉反应室温度等工艺条件的关系^[6,7]。AlAs 氧化后体积将减少 10%~20%^[5], 因此所产生的收缩应力会对器件性能产生一定的影响^[8], 关于氧化产物对器件寿命的影响也有报道^[9], 但是由于 VCSEL 器件结构复杂, 氧化层对器件整体特性的影响还有很多问题都有待于进一步研究^[10,11]。

为了能在 VCSEL 器件中制备出质量较好的氧化层, 我们在前人研究的基础上首先对高铝组分 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 的氧化速率进行了实验研究, 确定了合

适的铝组分并应用于 AlGaInP 系 VCSEL 中, 然后在此基础上通过测量有源区的光致发光(PL)谱进一步研究氧化过程产生的收缩应力对 VCSEL 性能的影响, 并在实验中给出解决方法。

2 实验

对于 AlGaInP 系的 VCSEL, 为尽可能地减小 DBR 材料对出射光的吸收, 在保证分布布拉格反射器(DBR)的极高反射率的前提下, 应选用铝含量大于 50% 的 AlGaAs 和 AlAs 作为 DBR 的高低折射率层。为在 VCSEL 中引入理想的电流注入通道, 需要对 DBR 中的高铝层和氧化限制层的 Al 组分进行优化选择, 以降低注入区的电阻和电流密度。由于高铝组分 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 的氧化速率对 Al 组分非常敏感, 为此我们首先进行了高铝组分 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 的湿氮氧化实验, 以确定实际器件中氧化限制层和 DBR 中高铝组分层的 Al 组分。所用的材料是采用 MOCVD 生长的含有不同铝组分和掺杂浓度的实验片, 结构如图 1 所示, 各氧化层的厚度均为 50nm, 以避免厚度不同对氧化速率的影响, 其间用 10nm 的 GaAs 层隔开, 同时为探讨掺杂对氧化速率的影响, 对组分相同的氧化层改变了掺杂浓度。实验中我们先固定影响氧化速率的几个因素, 如反应室温度、

通气量、水温等,对湿氮氧化系统的氧化速率进行校准,然后选择合适的氧化工艺条件,使得氧化深度随氧化时间线性变化,并保证氧化的均匀性和重复性。实验中采用的条件是:反应室温度为420℃,通气量为50mL/s,水温为95℃,具体的氧化速率取决于 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 的厚度和其中的Al组分。氧化过程产生的收缩应力对垂直腔面发射激光器量子阱有源区影响也是在上述的实验条件下进行的。器件的基本结构如图2所示,其中氧化限制层紧挨着有源区,厚度为 $\lambda/4n$,(n 为折射率)。为降低器件的串联电阻,p型DBR采用线性渐变结构。

GaAs 覆盖层		
95% AlGaAs	50nm	p 10^{17}cm^{-3}
GaAs	10nm	
95% AlGaAs	50nm	p $5 \times 10^{18}\text{cm}^{-3}$
GaAs	10nm	
98% AlGaAs	50nm	p 10^{17}cm^{-3}
GaAs	10nm	
98% AlGaAs	50nm	p $5 \times 10^{18}\text{cm}^{-3}$
GaAs	10nm	
AlAs	50nm	p 10^{17}cm^{-3}
GaAs	10nm	
AlAs	50nm	p $5 \times 10^{18}\text{cm}^{-3}$
GaAs 衬底		

图1 实验样片结构图

Fig. 1 Schematic diagram of the sample



图2 器件结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of VCSEL

3 结果和分析

3.1 高铝组分的AlGaAs 氧化速率同组分和掺杂浓度的关系

我们对结构如图1所示的实验片进行了湿氮氧化实验,氧化后的截面如图3所示,图中的深色黑线是氧化层,白色线大概指出氧化深度。由于氧化后氧

化层的折射率和未氧化的材料差别较大,因此通过选择性腐蚀我们可以用普通光学显微镜测出每层的氧化深度。实验中我们发现氧化速率同掺杂浓度也有一定的关系,掺杂浓度高的氧化速率比掺杂浓度低的较快些。这是因为:杂质影响了费米能级分布,降低了氧化时的反应激活能;高掺杂增加了缺陷的浓度,有利于氧化反应的运输过程。这与异性掺杂所造成氧化速率的不同是一致的^[12],但是这种氧化速率的差别对单面氧化限制器件影响不大。

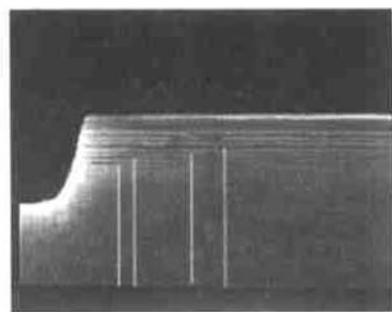


图3 台面结构中各层氧化深度

Fig. 3 Oxidized layers in the mesas

图4是实验中测量的不同铝组分AlGaAs的氧化深度,在氧化进行15min时氧化速率接近线性,这时测得的95% AlGaAs和98% AlGaAs及AlAs的氧化速率分别为0.15, 1.02和1.4μm/min,氧化速率比约为1:7:9。这与文献上报道的有些差别,主要是由于样品制备和实验条件的差别引起的。实验结果也说明95% AlGaAs和98%的AlGaAs有很

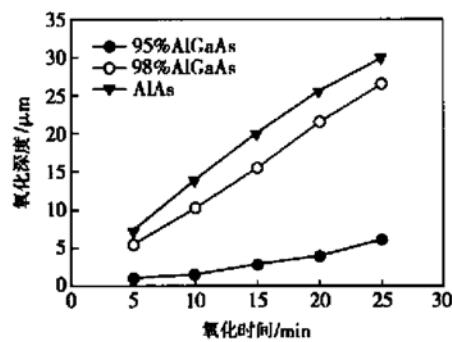


图4 AlGaAs 的氧化深度与时间的关系

Fig. 4 Dependence of oxide rate on time for AlGaAs

好的选择比,而98%的AlGaAs和AlAs的氧化速率差别不是很大。但是由于AlAs氧化产物体积的缩小较 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 的更严重,氧化后将产生较大的应力,退火后极易产生分层现象,从而对器件的可靠

性产生影响。因此对于实际的可见光 VCSEL 器件, 在不影响 DBR 反射率的前提下, DBR 中的低折射率层选为 95% AlGaAs, 氧化限制层采用 98% AlGaAs 可以得到较为理想的电流限制和光学限制。

3.2 AlGaAs 氧化层对有源区发射波长的影响

我们所研制的可见光 VCSEL 采用的是应变量子阱有源区, 高铝 Al_xGa_{1-x}As 氧化后体积也会收缩产生应力, 这种收缩应力在空间上的分布会使有源区材料的能带带隙发生变化, 使发射波长向短波方向漂移。采用微区 PL 谱对氧化前后的有源区进行测试, PL 谱的激发光斑为 3 μm, 误差 1 μm, 激发波长 532 nm。实验测得氧化后有源区的最短发射波长向短波方向漂移了近 12 nm, 同时发光强度减弱, 光谱变宽, 实验结果如图 5(a) 所示, 曲线 a 是氧化前所测的 PL 谱, 曲线 b 是氧化后测量的 PL 谱。如果带隙的变化和应变量成正比, 通过计算可知氧化附加给有源区应变约为 0.06%, 因此可知氧化不但对

有源区造成了不可忽视的破坏, 而且还会造成 VCSEL 的模式波长和激射波长的失配。VCSEL 的器件结构见图 2, 氧化限制层距量子阱区 100 nm。为了减缓氧化造成的收缩应力对有源区的影响, 我们将氧化限制层的位置进行了调整, 在有源区外生长一对 DBR 后再加入氧化限制层, 这虽然会加剧氧化限制层下载流子的横向扩散但是缓解了氧化层对有源区的影响, 因此要综合考虑氧化层的位置, 得到的实验结果如图 5(b) 所示, 同样曲线 a, b 分别表示氧化前后的谱线。氧化后最短的 PL 谱和氧化前基本没有变化, 这时氧化层位于距量子阱 210 nm 处, 这里需要指出的是由于外延片本身的均匀性问题, 会对实验结果有一定的影响, 所以实验结果只能用作定性的分析。

3.3 可见光垂直腔面发射激光器的制备

根据上面的实验结果, 我们采用湿氮氧化工艺制备了 AlGaInP 系的可见光垂直腔面发射激光器, VCSEL 外延片采用 MOCVD 生长, 包括 35 对含有线性渐变层的 Al_{0.95}Ga_{0.05}As/Al_{0.5}Ga_{0.5}As p 型 DBR、55 对 AlAs/Al_{0.5}Ga_{0.5}As n 型 DBR 以及由三个 GaInP/AlGaInP 应变量子阱有源区和 AlGaInP 限制层构成的单波长谐振腔。高铝的 Al_xGa_{1-x}As 氧化限制层位于距有源区 210 nm 处以充分释放氧化层所产生的收缩应力。经过光刻和化学湿法腐蚀以后, 对台面侧壁中暴露的氧化层进行选择性湿氮氧化, 形成电流限制层。根据校准的氧化速率, 精确控制氧化时间得到设计中的氧化限制孔径, 完整的 VCSEL 器件结构如图 6 所示。我们所制备器件的电流注入孔直径约为 3 μm, 激射波长为 670 nm, 室温连续工作下的注入电流和输出光功率及电压的关系如图 7 所示, 阈值电流为 0.9 mA。

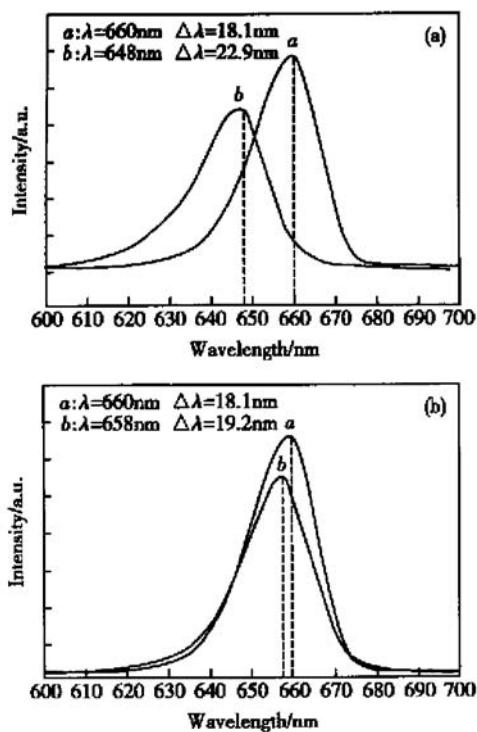


图 5 氧化前后的光致发光谱 (a) 氧化层紧接有源区; (b) 氧化层距有源区 210 nm

Fig. 5 Photoluminescence spectra of oxide device and unoxide device (a) Oxide layer next the active region; (b) 210 nm between the oxide layer and active region

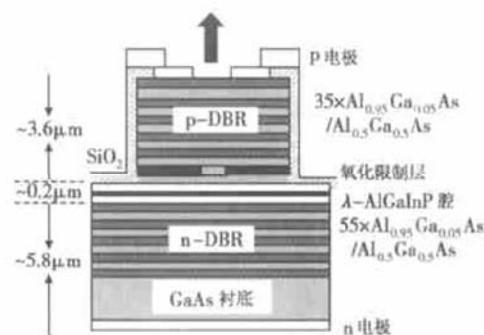


图 6 可见光 VCSEL 器件结构示意图

Fig. 6 Schematic diagram of visible VCSEL

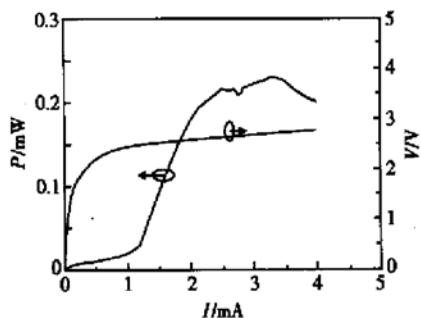


图 7 选择氧化工艺制备的可见光 VCSEL 的 P - I 及 V - I 曲线

Fig. 7 Light power and forward voltages as functions of drive current for selectively oxidized visible VCSEL

4 结论

通过具体的湿氮氧化实验,在一定的氧化条件下得到了不同铝组分 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 的氧化特性和氧化速率之间的关系,95% 和 98% AlGaAs 的氧化速率比约为 1:7,具有很好的选择性。通过调整氧化限制层的位置减小了氧化层收缩应力对有源区发光波长的影响,结合器件结构设计确定了应用于 AlGaInP 系可见光垂直腔面发射激光器中合适的氧化层位置和组分,根据这些实验结果制备出了低阈值电流的 AlGaInP 系垂直腔面发射激光器。

参考文献

- [1] Dallesasse J M, Holonyak N Jr, Sugg A R, et al. Hydrolyzation oxidation of $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}-\text{AlAs}-\text{GaAs}$ quantum well heterostructures and superlattices. *Appl Phys Lett*, 1990, 57 (26): 2844
- [2] Huffaker D L, Graham L A, Deng H, et al. Sub- $40\mu\text{A}$ continuous-wave lasing in an oxidized vertical-cavity surface-emitting laser with dielectric mirrors. *IEEE Photonics Technol Lett*, 1996, 8: 974
- [3] Huffaker D L, Deppe D G. Low threshold vertical-cavity surface-emitting lasers based on high contrast distributed Bragg reflectors. *Appl Phys Lett*, 1997, 70: 1781
- [4] Tweten R D, Follstaedt D M, Choquette K D, et al. Microstructure of laterally oxidized $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ layers in vertical-cavity lasers. *Appl Phys Lett*, 1996, 69(1): 19
- [5] Takamori T, Takemasa K, Kamijoh T. Interface structure of selectively oxidized AlAs/GaAs . *Appl Phys Lett*, 1996, 69 (5): 659
- [6] Nickel H. A detailed experimental study of the wet oxidation kinetics of $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ layers. *J Appl Phys*, 1995, 78 (8): 5201
- [7] Koley B, Dagenais M, Jin R, et al. Dependence of lateral oxidation rate on thickness of AlAs layer of interest as a current aperture in vertical-cavity surface-emitting laser structures. *J Appl Phys*, 1998, 84(1): 600
- [8] Hatori N, Mukaihara T, Abe M, et al. Characterization of residual stress in active region due to AlAs native oxide of vertical-cavity surface-emitting lasers. *Jpn J Appl Phys*, 1996, 35: 6108
- [9] Choquette K D, Geib K M, Ashby C I H, et al. Advances in selective oxidation of AlGaAs alloys. *J Special Topics Quantum Electron*, 1997, 3: 916
- [10] Choquette K D, Geib K M, Chui H C, et al. Selective oxidation of buried AlGaAs versus AlAs layers. *Appl Phys Lett*, 1996, 69(10): 1385
- [11] Choquette K D, Lear K L, Schneider R P, et al. Cavity characteristics of selectively oxidized vertical-cavity laser. *Appl Phys Lett*, 1995, 66(25): 3413
- [12] Kish F A, Maranowski S A, Höfler G E, et al. Dependence on doping type (p/n) of the water vapor oxidation of high-gap $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$. *Appl Phys Lett*, 1992, 62(25): 3165

Effect of High Aluminum AlGaAs Oxidized Layers on Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers

Kang Xiangning, Song Guofeng, Ye Xiaojun, Hou Shihua and Chen Lianghui

(Institute of Semiconductors, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

Abstract: The characterization of high Al containing AlGaAs oxidized layers and the compressive strain effect of oxide layer on the active region are discussed for the fabrication of visible vertical cavity surface emitting lasers (VCSEL) by wet oxidation and micro-photoluminescence spectrum measurement respectively. The optimal position and Al mole fraction of oxide layer are presented. AlGaN_xP VCSELs with low threshold current are fabricated successfully.

Key words: Al_xGa_{1-x}As wet oxidation; micro-photoluminescence; VCSEL

PACC: 8160C; 4255P

Article ID: 0253-4177(2004)05-0589-05