

离子注入方法形成电流限制孔径及其对器件 光电特性的影响^{*}

刘 成^{1,2} 曹春芳¹ 劳燕锋¹ 曹 萌¹ 吴惠桢^{1,†}

(1 中国科学院上海微系统与信息技术研究所 信息功能材料国家重点实验室, 上海 200050)

(2 上海空间电源研究所, 上海 200233)

摘要: 采用离子注入方法和后续的退火工艺制作了 1.3 μm 面发射电致发光(EL)器件结构的电流限制孔径, 通过对此结构的电学和光学特性进行测试分析, 获得了离子注入和退火温度的优化参数, 工艺参数为离子注入剂量 $5 \times 10^{14} \text{cm}^{-2}$ 和 450 $^{\circ}\text{C}$ 退火 1min. 结果显示随着电流限制孔径的缩小, 器件的电阻呈线性增大; 电流限制孔径的形成显著增强 1.3 μm 面发射器件结构的电致发光强度, 孔径为 15 μm 的样品是有限制孔径样品的 4 倍(注入电流 3mA), 并就电流限制孔对 EL 器件结构电致发光的影响进行了物理解释.

关键词: 电致发光器件结构; 电流限制孔径; 离子注入

EEACC: 2550A; 4320J

中图分类号: TN248.4

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2008)04-0765-05

1 引言

垂直腔面发射激光器(vertical-cavity surface-emitting laser, VCSEL)有许多独特的优点, 如阈值电流低、单纵模工作、发散角度小、易于与光纤耦合、易实现二维阵列和光电集成等, 在光纤通信、光存储、光信息处理等领域有着广阔的应用前景^[1]. 为使 VCSEL 能够激射并获得较好的工作性能, 除了要有能提供足够光增益的量子阱有源层、反射率很高的反射镜和较好的散热设计外, 电流和光场的限制也是必不可少的. 电流限制孔径的意义在于: 控制发射区面积和芯片尺寸, 加强载流子注入区与光增益区的重叠, 同时能降低 VCSEL 的阈值电流, 从而使器件性能获得提高.

常见的电流限制孔径制作方法有氧化、侧向腐蚀和离子注入等. 在 850 和 980nm 波段的 VCSEL 结构中, 常用氧化 AlAs 或 AlGaAs 层使其形成 Al_2O_3 的方法来获得电流和光场限制^[2]. 但在长波长(1310 或 1550nm)波段 VCSEL 结构中, 不容易采用氧化方法获得电流和光场的限制孔径, 与 InP 材料匹配的 InAlAs 材料的氧化速率很慢^[3]; 也有研究小组在键合的 GaAs 基 DBR 反射镜中制作 AlAs 的氧化层, 但由于键合界面位于电流限制孔径和量子阱有源层之间, 存在电势差和较大阻抗的键合界面, 将会使电流限制孔径的作用很有限^[4], 相比之下, 侧向腐蚀技术的适用性更广, 但侧向腐蚀工艺复杂、稳定性较差^[5].

离子注入是当前 850 和 980nm 波段的 VCSEL 器件常用的制作方法, 此种方法具有简化器件工艺、降低

制作成本、提高成品率、适用于工业生产等优点^[6]. 在长波长(1310 或 1550nm)波段 VCSEL 器件制作中, 采用离子注入方法制作电流限制孔径的报道不多^[7].

如何评价电流限制孔径对长波长 VCSEL 器件性能的影响? 一种简易可行的方法是制作与 VCSEL 器件量子阱有源层相同的电致发光(electroluminescence, EL)器件结构, 其中采用离子注入方法制作电流限制孔径. 这样在不外延生长多对(通常为 30~50 对) DBR 反射镜的情况下, 就能够分析电流限制孔径对 VCSEL 器件性能的影响, 并且能够获得最佳的工艺参数, 对制作出高性能的器件有较强的参考价值^[8].

本文采用离子注入方法和后续的退火工艺制作了 1.3 μm 面发射电致发光器件结构的电流限制孔径, 通过对此结构的电学和光学特性进行测试分析, 获得了离子注入和退火温度的优化参数. 电流限制孔径的形成显著增强了 1.3 μm 面发射器件结构的电致发光强度, 本文就电流限制孔径对 EL 器件结构电致发光的影响进行了物理解释.

2 实验

本文中所述的器件结构是采用气态源分子束外延方法(GSMBE)生长的. 在 InP 基材料中采用离子注入进行隔离, 常采用的离子有 H^+ , O^+ , He^+ 等. 我们将离子注入工艺应用于 1.3 μm VCSEL 器件中电流限制孔径的制作, 根据 VCSEL 结构对注入离子的深度和隔离效果的要求, 采用了 H^+ 进行实验. 所采用的设备为 IM-200 型离子注入机, H^+ 能量为 170keV, 剂量为 $5 \times 10^{14} \text{cm}^{-2}$.

^{*} 国家重点基础研究发展规划资助项目(批准号: 2003CB314903)

[†] 通信作者. Email: hzhu@mail.sim.ac.cn

2007-09-14 收到, 2007-11-04 定稿

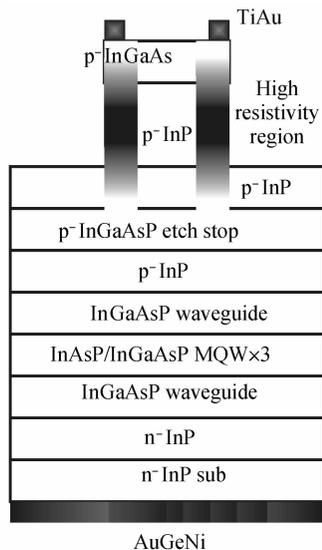


图 1 1.3 μm EL 器件结构图

Fig.1 Schematic structure of the 1.3 μm EL device

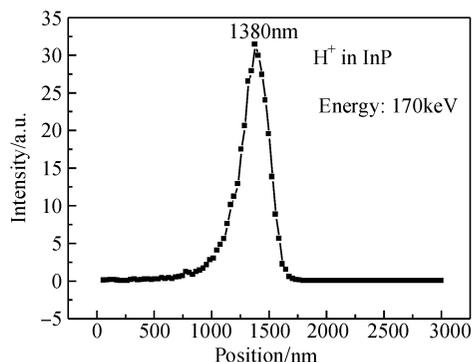
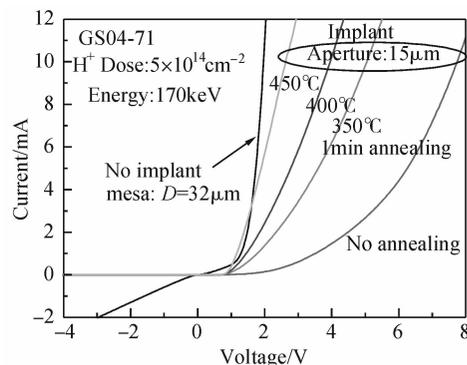
实验样品的结构如图 1 所示,衬底是 n 型 InP ($n = 2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$),在衬底上由 GSMBE 生长的外延层为:1 组 InAsP/InGaAsP 应变补偿多量子阱(3 个),其上下分别为 p 型和 n 型的 InGaAsP 和 InP 波导层;在这些层之上为 p 型 InGaAsP 腐蚀截止层;然后是约 $2 \mu\text{m}$ 的 p 型 InP 层;最顶部为重掺杂的 300 nm 的 p 型 InGaAs 层($p = 1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$).通过光刻、离子注入、湿法腐蚀、溅射金属等工艺,我们在直径为 $32 \mu\text{m}$ 的单元中制作了直径为 $6 \sim 15 \mu\text{m}$ 的电流限制孔径,此电致发光器件结构从顶部出光.为了激活注入样品中的 H,对其中 3 片在快速退火炉中分别进行了 $350, 400$ 和 450°C 的 1 min 时间的退火.在完成上述工艺后,对此结构进行了电学和电致发光特性测试.

3 结果与讨论

3.1 电流限制孔径对 1.3 μm 电致发光器件结构电学特性的影响

在顶发射激光器结构中,出于电流和光场限制的考虑,需要离子注入形成的高阻层距离外延片表面有一定距离.我们用 trim 软件模拟了能量为 170 keV ,剂量为 $5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ 的 H^+ 在 EL 器件结构中的分布情况,如图 2 所示.其分布峰值在 $1.38 \mu\text{m}$,位于 EL 器件结构中 $2 \mu\text{m}$ 厚的 p 型 InP 层中.

图 3 给出了经离子注入,并经不同退火温度处理后测得的电流-电压特性,我们发现离子注入后未退火时,EL 器件结构的开启电压为 $4 \sim 5 \text{ V}$,在 $350 \sim 450^\circ\text{C}$ 高温退火后均减小至约 1 V ,与未离子注入的结构相同.图 4 给出了不同限制孔径、不同退火温度下样品的电阻值,我们发现随着电流注入孔径减小,串联电阻逐渐增大,这符合截面积减小电阻增大的规律,同时在退火温度升高后,同一退火温度下各注入孔径单元的串联电阻值的

图 2 注入能量为 170 keV 时 H^+ 在 EL 器件结构中的模拟分布情况Fig.2 Simulated H^+ distribution in EL device structure图 3 不同退火温度下 EL 器件结构的 I - V 特性Fig.3 I - V characterizations of the 1.3 μm implanted EL device for different temperatures

差值逐渐减小,例如在 350°C 退火后,注入电流孔径为 $6, 9, 12$ 和 $15 \mu\text{m}$ 的单元串联电阻值分别为 $1017, 805, 325$ 和 194Ω ,而在 450°C 退火后,相应孔径的串联电阻值分别为 $269, 188, 160$ 和 121Ω . 450°C 退火后的电阻值较小,与国际上类似结构的电阻值相近,能够符合高性能 VCSEL 器件的要求.

下面分析影响离子注入形成电流限制孔径结构的电阻变化的原因.根据文献[9, 10],含有电流限制孔径的 VCSEL 电阻为以下 3 部分的总和:欧姆接触、有源区等垂直方向的电阻 R_c ,电流限制孔径处电阻 R_a ,电

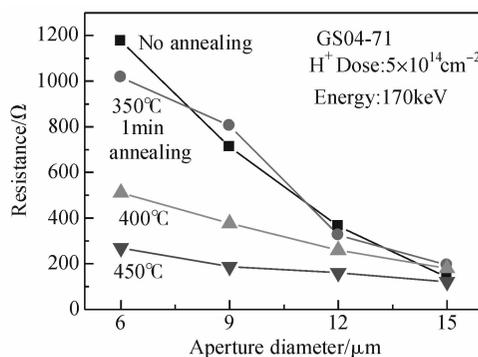


图 4 不同电流限制孔径和退火温度下 EL 器件结构电阻值

Fig.4 Resistances of the 1.3 μm implanted EL device for different apertures and temperatures

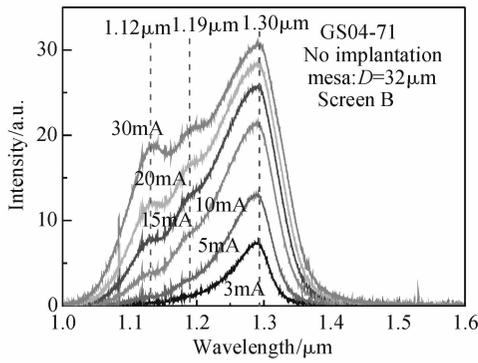


图 5 未注入不同电流下 EL 器件结构的 EL 谱

Fig.5 EL spectra of the 1.3 μm EL device without implantation at different currents

流限制孔径上方横向电阻 R_{sp} , 即

$$R = R_c + R_a + R_{sp} = A + \frac{B}{r_a^2} + C \ln \frac{r_0}{r_a} \quad (1)$$

式中 r_a 为电流限制孔径半径; r_0 为顶部环型电极内径.

通过对 450°C 退火后各孔径的电阻值进行拟合, 我们得出 $A = 87.0 \Omega$, $B = 596.4 \Omega \cdot \mu m^2$, $C = 95.4 \Omega$. 考虑电流孔径内的电阻受注入影响较小, 主要与 r_a 有关, 因此在拟合 400°C 退火后电阻时固定 $B = 596.4 \Omega \cdot \mu m^2$, 从而得出 $A = 88.3 \Omega$, $C = 303.4 \Omega$.

从以上两组值可以看出, 不同退火温度下 EL 器件结构电阻值的主要差别在于横向电阻 R_{sp} . 而 R_{sp} 主要与电流孔径所在的一层材料有关, 在我们的结构中为 p-InP 材料, 根据外延层厚度和离子注入分布, 我们估计与 R_{sp} 有关的 p-InP 材料厚度为 $0.9 \mu m$. C 值与掺杂浓度有以下关系:

$$C = \frac{\rho}{2t\pi} = \frac{1}{2t\pi nq\mu} \quad (2)$$

其中 ρ 为电阻率; t 为顶上一层材料的厚度; n 为掺杂浓度; μ 为迁移率 (p-InP 为 $150 \text{ cm}^2 / (\text{V} \cdot \text{s})$). 从上式计算出其等效掺杂浓度为 $7.8 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ (450°C 退火) 和 $2.5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ (400°C 退火). 与外延结构中 p-InP 的掺杂浓度 $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 相比, 450°C 退火后回复较好, 而 400°C 退火后回复的效果有限.

3.2 电流限制孔径对 1.3 μm 电致发光器件结构发光特性的影响

图 5 给出了未作离子注入的电致发光器件结构在不同注入电流情况下的 EL 谱. 从图中看到, 随着注入电流增大, 位于 1.12 和 1.19 μm 处的两个峰的强度比 1.30 μm 附近的峰增长得快: 当注入电流为 3mA 时, 只能看见 1.30 μm 处的峰, 而注入电流为 30mA 时 3 个峰的强度比为 0.61 : 0.68 : 1.00. 并且随着注入电流增大, 1.30 μm 处的峰发生“红移”, 如电流由 3mA 增加到 15mA 时, 峰位共移动了 3nm (从 1.288 到 1.291 μm). 通过有效质量模型 4×4 Luttinger-Kohn 哈密顿量矩阵方法计算 InAsP/InGaAsP 应变补偿多量子阱的能带结

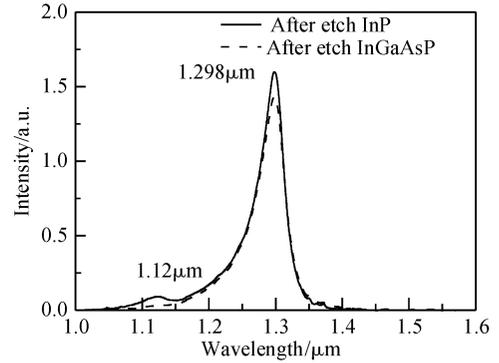


图 6 EL 器件结构表面腐蚀后的 PL 谱

Fig.6 PL spectra of the etched 1.3 μm EL device

构^[11], 得到位于 1.30 μm 处的发光峰是量子阱导带 $n = 1$ 电子到重空穴价带 $n = 1$ 空穴的跃迁. 位于 1.19 μm 处的发光峰, 则与量子阱导带 $n = 2$ 电子到重空穴价带 $n = 2$ 空穴的跃迁接近. 在所有光致发光谱 (PL) 测量结果中, 都未能观察到 1.19 μm 处的峰, 因为光致发光光谱所能激发的光生载流子密度往往要比电注入低得多, 激发态的跃迁不容易被观察到.

为了探究 1.12 μm 处峰产生的原因, 我们对此器件结构的外延片进行逐层腐蚀剥离, 并逐层测试 PL 谱, 图 6 给出了 PL 谱的结果. 在腐蚀掉 InGaAsP 腐蚀截止层 (图 1 中 etch stop 层) 后, 1.12 μm 的峰消失, 说明该峰起源于该 InGaAsP 腐蚀截止层发光.

在阐明了 EL 谱中 3 个峰的产生机理后, 图 7 至图 9 给出了离子注入后的器件结构在不同注入电流、不同电流限制孔径和不同离子注入后退火温度下的 EL 谱.

图 7 中给出了电流限制孔径为 15 μm, 400°C 退火后, 在不同注入电流情况下测得的 EL 谱. 从图中可见, 随着注入电流增大, 位于 1.12 和 1.19 μm 处的两个峰的强度比 1.30 μm 处的峰增长得更快, 如注入电流为 3mA 时, 1.12, 1.19 和 1.30 μm 3 个峰的强度比为 0.48 : 0.66 : 1.00, 而当注入电流大于 10mA 时, 3 个峰的强度已接近相等. 并且随着注入电流增大, 1.30 μm 处的峰发生“红移”, 如电流由 3mA 增加到 15mA 时, 峰位共移动了 7nm (从 1.296 到 1.303 μm).

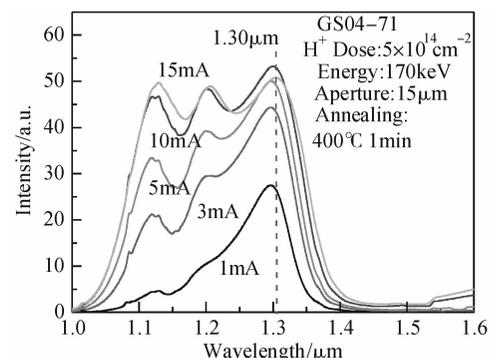


图 7 离子注入后不同电流下 EL 器件结构的 EL 谱

Fig.7 EL spectra of the 1.3 μm implanted EL device at different currents

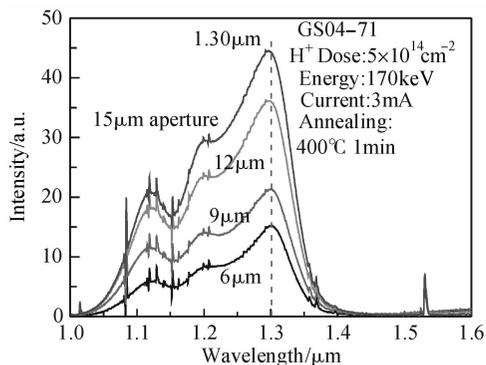


图 8 不同电流孔径 EL 器件结构的 EL 谱

Fig.8 EL spectra of the 1.3 μm implanted EL device for different apertures

由于 InP 基半导体材料的电子迁移率要比空穴高很多, n 型一侧(即衬底边)注入的热电子(hot electron)的漂移速度比空穴高得多, 一部分电子越过了量子阱到达 InGaAsP etch stop 层与 p 型一侧的空穴复合发光, 使得 1.12 μm 处的发光峰迅速增强。

图 8 给出了离子注入并 400 $^{\circ}\text{C}$ 退火后, 注入电流 3mA 时不同电流限制孔径的 EL 谱. 从图中可看出, 随着限制孔径变大, 发光强度逐渐增加, 孔径为 9, 12 和 15 μm 的单元其 1.30 μm 处的发光峰强度分别是孔径为 6 μm 的单元的 1.39, 2.34 和 2.86 倍. 这一现象产生的原因是高能量的离子注入不仅在离子注入区会导致晶体中产生大量的缺陷, 而且 H 离子会在晶体中进行扩散和隧穿^[12], 隧穿和扩散具有一定的长度分布, 一般在离子注入区与非注入孔径的界面向中心延伸, 密度呈指数规律衰减. 因此非注入区的孔径越小, 隧穿和扩散进入电流限制孔径内的 H 离子密度越高, 即点缺陷密度越大, 影响器件结构的发光强度。

从图 8 可以看出, 随着电流限制孔径的变小, 1.30 μm 处的发光峰发生“红移”, 从孔径为 15 μm 样品的 1.295 μm 移到了孔径为 6 μm 样品的 1.301 μm , “红移”了 6nm. 导致“红移”的原因: 在保持注入电流不变的情况下, 电流限制孔径减小, 电流密度增大, 一方面导致发光区温升增大, 从而使量子阱的带隙变窄; 另一方面, 孔径减小, 注入的载流子密度增大, 载流子的相互作用增大也会引起发光波长的红移。

图 9 给出电流限制孔径 15 μm , 不同温度退火后, 注入电流 3mA 时测得的 EL 谱. 可见离子注入并分别在 350, 400 和 450 $^{\circ}\text{C}$ 退火后, 1.3 μm 处的电致荧光峰强度相比未作离子注入时均有显著增强, 分别为 1.98, 3.05 和 4.15 倍. 在未作离子注入的情况下, 电流从顶部环型电极注入, 在此器件结构中环型电极与量子阱间距离相对比较短(约 2 μm), 在量子阱层附近电流仍主要分布于环型电极以下区域, 顶部出光孔以下区域电流较小^[13], 因此发光强度较高的区域正好被环形金属电极所阻挡, 所以出射光强弱; 当离子注入形成 15 μm 孔径后, 即在量子阱上方形成了电流注入孔径, 电流只能从此孔径处进入量子阱, 孔径处的电流密度要远大于未作注入的情

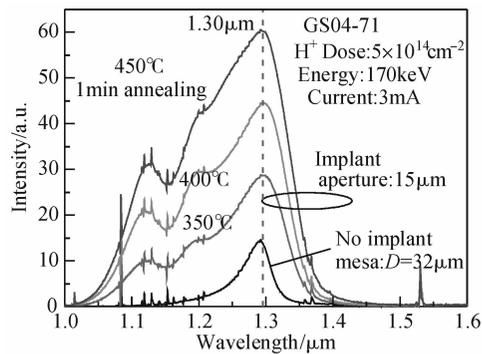


图 9 不同退火温度下 EL 器件结构的 EL 谱

Fig.9 EL spectra of the 1.3 μm implanted EL device annealed at different temperatures

况, 所形成的电致发光大部分由无金属电极阻挡的出光孔出射, 因此在离子注入形成电流限制孔径后, 电致发光得到明显增强. 离子注入会对晶体结构造成损伤, 退火过程能够部分修复离子注入对晶体所造成的损伤, 随着退火温度的升高, 电流限制孔径内由离子注入所产生的点缺陷密度减少, 使得电致发光增强. 但是退火温度也不是越高越好, 温度太高晶体材料会分解、升华, 反而使晶体质量下降。

从以上电学和电致发光特性可以看出, 450 $^{\circ}\text{C}$ 退火后器件结构的性能最佳. 在本实验中, 也曾实验在 500 $^{\circ}\text{C}$ 下进行快速退火, 发现半导体表面的金属出现“起皮”、脱落现象, 其主要原因估计与金属和半导体材料在快速退火的升温 and 降温过程中的热应力有关. 因此我们今后将采取 450 $^{\circ}\text{C}$ 为最优退火工艺条件。

4 结论

采用离子注入方法和后续的退火工艺制作了 1.3 μm 面发射电致发光器件结构的电流限制孔径, 通过对此结构的电学和光学特性进行测试分析, 获得了离子注入和退火温度的优化参数, 得出在离子注入剂量 $5 \times 10^{14} \text{cm}^{-2}$ 和 450 $^{\circ}\text{C}$ 退火 1min 获得了最小的器件电阻. 结果显示随着电流限制孔径的缩小, 器件的电阻呈线性增大; 电流限制孔径的形成显著增强了 1.3 μm 面发射器件结构的电致发光强度, 孔径为 15 μm 的样品是有限制孔径样品的 4 倍(注入电流 3mA), 并就电流限制孔对 EL 器件结构电致发光的影响作了物理解释. 本文中的结果对长波长 VCSEL 器件的研制是有意义的: 有无孔径, 发光强度是 4 倍之差(15 μm 孔径); 但是孔径不能过小, 因为 H 离子会隧穿和扩散到发光区, 形成缺陷, 同时孔径太小电阻会显著增大; 退火工艺有最佳的参数。

参考文献

- [1] Karim A, Björclin S, Piprek J, et al. Long-wavelength vertical-cavity lasers and amplifiers. IEEE J Sel Top Quantum Electron, 2000, 6(6):1244
- [2] Yang G M, Macdougall M H, Pudikov V, et al. Influence of mirror

- reflectivity on laser performance of very-low-threshold vertical-cavity surface-emitting lasers. *IEEE Photonics Technol Lett*, 1995,7(11):1228
- [3] Ohnoki N, Koyama F, Iga K. Superlattice AlAs/AlInAs-oxide current aperture for long wavelength InP-based vertical-cavity surface-emitting laser structure. *Appl Phys Lett*, 1998,73(22):3262
- [4] Margalit N M, Babić D I, Streubel K, et al. Laterally oxidized long wavelength CW vertical-cavity lasers. *Appl Phys Lett*, 1996, 69(4):471
- [5] Hall E, Nakagawa S, Almuneau G, et al. Selectively etched undercut apertures in AlAsSb-based VCSELs. *IEEE Photonics Technol Lett*, 2001,13(2):97
- [6] Liu Ying, Du Guotong, Jiang Xiuying, et al. Room temperature CW novel vertical-cavity surface-emitting semiconductor lasers. *Chinese Journal of Semiconductors*, 1995, 16(12):651 (in Chinese) [刘颖, 杜国同, 姜秀英, 等. 室温连续的新结构垂直腔面发射半导体激光器. *半导体学报*, 1995, 16(12):651]
- [7] Qian Y, Zhu Z H, Lo Y H, et al. Low-threshold proton-implanted 1.3- μm vertical-cavity top-surface-emitting lasers with dielectric and wafer-bonded GaAs-AlAs Bragg mirrors. *IEEE Photonics Technol Lett*, 1997,9(7):866
- [8] Wang Hongsheng, Forrest S R. Helium ion-implanted InGaAsP tunnel junction current blocking layers. *Appl Phys Lett*, 2002, 81(6):984
- [9] Dang G, Luo B, Ren F, et al. Device series resistance calculations for vertical cavity surface emitting lasers. *Electrochem Solid-State Lett*, 2001,4(12):G112
- [10] Hall E M. Epitaxial approaches to long-wavelength vertical-cavity lasers. University of California at Santa Barbara, 2001:87
- [11] Lao Yanfeng, Wu Huizhen. Design of GaInAs/InGaAsP quantum wells for 1.44 μm semiconductor lasers. *Chinese Journal of Rare Metals*, 2004, 28(3):511 (in Chinese) [劳燕锋, 吴惠贞. 用于 1.44 μm 半导体激光器的 GaInAs/InGaAsP 量子阱结构的设计. *稀有金属*, 2004, 28(3):511]
- [12] Cao Meng. Studies of dry etching and ions implantation on the luminescence property of III-V group semiconductor quantum wells. Doctorial Dissertation of Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, 2007:59 (in Chinese) [曹萌. 干法刻蚀和离子注入影响 III-V 族半导体量子阱发光特性研究. 中国科学院上海微系统与信息技术研究所博士学位论文, 2007:59]
- [13] Sekiguchi S, Miyamoto T, Kimura T, et al. Improvement of current injection uniformity and device resistance in long-wavelength vertical-cavity surface-emitting laser using a tunnel junction. *Jpn J Appl Phys*, 2000,39(7A):3997

Electrically Confined Aperture Formed by Ion Implantation and Its Effect on Device Optoelectronic Characteristics*

Liu Cheng^{1,2}, Cao Chunfang¹, Lao Yanfeng¹, Cao Meng¹, and Wu Huizhen^{1,†}

(1 State Key Laboratory of Functional Materials for Informatics, Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China)

(2 Shanghai Institute of Space Power Sources, Shanghai 200233, China)

Abstract: 1.3 μm surface-emitting electroluminescence (EL) device structures are fabricated. The electrically confined apertures are formed by ion implantation and thermal annealing technology. By studying electrical and optical characteristics of the device structure, we found that the optimized thermal annealing temperature is 450 $^{\circ}\text{C}$ when the ion implantation dose is $5 \times 10^{14} \text{cm}^{-2}$. The resistance of the device structure linearly increases with the decrease of aperture diameters. EL spectra intensities are remarkably enhanced after the electrically confined aperture is formed. For instance, the intensity of the sample with 15 μm aperture is 4 times that without aperture. Finally, the effects of the electrically confined aperture on the EL spectra of the structure are physically explained.

Key words: EL device structure; electrical confined aperture; ion implantation

EEACC: 2550A; 4320J

Article ID: 0253-4177(2008)04-0765-05

* Project support by the State Key Development Program for Basic Research of China (No.2003CB314903)

† Corresponding author. Email: hzhu@mail.sim.ac.cn

Received 14 September 2007, revised manuscript received 4 November 2007