

量子阱无序的窗口结构 InGaAs/GaAs/AlGaAs 量子阱激光器

徐遵图^{1,2} 徐俊英¹ 杨国文¹ 张敬明¹ 李秉臣² 陈良惠¹ 沈光地²

¹ 中国科学院半导体研究所 北京 100083

² 北京工业大学电子工程系和北京市光电子技术实验室 北京 100022

提要 对 SiO₂ 薄膜在快速热退火条件下引起的空位诱导 InGaAs/GaAs 应变量子阱无序和 SrF₂ 薄膜抑制其量子阱无序的方法进行了实验研究。并将这两种技术的结合(称为选择区域量子阱无序技术)应用于脊形波导 InGaAs/GaAs/AlGaAs 应变量子阱激光器,研制出具有无吸收镜面的窗口结构脊形波导量子阱激光器。该结构 3 μm 条宽激光器的最大输出功率为 340 mW,和没有窗口的同样结构的量子阱激光器相比,最大输出功率提高了 36%。在 100 mW 输出功率下,发射光谱中心波长为 978 nm,光谱半宽为 1.2 nm。平行和垂直方向远场发散角分别为 7.2°和 30°。

关键词 量子阱无序,窗口结构,应变量子阱,半导体激光器

1 引 言

由于量子阱结构的出现,使得在同一外延片上通过诱导量子阱无序(quantum well disordering)或互混(intermixing)^[1~3]来调整量子阱材料的带隙成为可能。无序化的量子阱不仅可改变材料的带隙,而且还可改变材料的折射率,因此在光电子学中得到了广泛的应用,如低损耗光波导、半导体外腔激光器、激光器和调制器的集成器件、分布反馈激光器等。实现量子阱无序的方法有多种,主要分为杂质诱导量子阱无序^[4]、无杂质空位诱导量子阱无序^[5]和激光诱导量子阱无序等。量子阱无序技术应用的典型范例之一就是在半导体激光器的腔面处形成具有无吸收腔面的窗口,以解决影响大功率半导体激光器长期可靠性的腔面光学灾变损伤(catastrophic optical damage 简称 COD)技术。已有文献^[6]报道了杂质诱导无序技术在这方面的应用。本文报道了空位诱导量子阱无序技术及其在大功率量子阱激光器中的应用,并成功地研制出具有窗口结构的脊形波导 InGaAs/GaAs/AlGaAs 应变量子阱激光器。

2 空位诱导 InGaAs/GaAs 应变量子阱无序和抑制其无序的实验研究

2.1 InGaAs/GaAs/AlGaAs 应变量子阱激光器结构

InGaAs/GaAs/AlGaAs 应变量子阱半导体激光器材料是用分子束外延(MBE)生长而成的。其生长结构及各层生长厚度如下:在 *n*-GaAs 衬底上生长 500 nm 厚的 GaAs 缓冲层;100

nm 厚的组分缓变过渡层; 1500 nm 厚的 $n\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 下限制层; 80 nm 厚 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 下组分缓变波导层(Al 的 x 值从 0.4 下降到 0.1); $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}/\text{GaAs}$ 应变单量子阱, GaAs 层厚度为 15 nm, $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$ 量子阱厚度为 7.5 nm, In 组分 y 为 0.2; 80 nm 厚的 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 上组分缓变波导层(Al 的 x 值从 0.1 上升到 0.4); 1100 nm 厚的 $p\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 上限制层, 100 nm 厚的组分缓变过渡层; 200 nm 厚的 $p^+\text{-GaAs}$ 欧姆接触层。

2.2 空位诱导量子阱无序和抑制其无序的方法

对 $\text{GaAs}/\text{AlGaAs}$, $\text{InGaAs}/\text{GaAs}$ 等二元或三元材料而言, 不同的薄膜覆盖层在快速热退火过程中对量子阱无序的作用不同。 SiO_2 覆盖层起到增强量子阱无序的作用^[6], 氟化锶(SrF_2) 薄膜起到抑制量子阱无序的作用^[7]。 SiO_2 在快速热退火过程中增强量子阱无序的机理普遍认为: 在高温热退火过程中, 与 SiO_2 接触的 GaAs 或 AlGaAs 中的 Ga 原子向外扩散进入 SiO_2 中, 从而在样品表面的 GaAs 或 AlGaAs 中产生 Ga 空位。 Ga 空位向内部扩散到 $\text{InGaAs}/\text{GaAs}$ 量子阱区, 增强了阱和垒中三族原子的互扩散, 从而实现量子阱组分无序。关于 SrF_2 抑制量子阱无序的机理目前还不是很清楚, 推测可能是由于氟原子很活泼, 在 GaAs 表面形成了某种化合物起到了抑制 Ga 原子外扩散所造成的。这一现象已用俄歇分析得到了验证。我们针对覆盖 SiO_2 和 SrF_2 的 $\text{InGaAs}/\text{GaAs}$ 应变量子阱激光器结构进行了快速热退火实验研究, SiO_2 薄膜的厚度为 250 nm, SrF_2 薄膜的厚度为 120 nm, 退火温度为 950°C , 退火时间为 15 s, 30 s 和 45 s。退火之后在 10 K 下进行光荧光测量。测量结果如图 1 所示。从图 1 可以看出, 覆盖 SiO_2 薄膜的样品, 退火后量子阱的光致发光峰值波长发生蓝移, 随着退火时间的加长蓝移量增大, 最大蓝移量可达 50 nm; 覆盖 SrF_2 的样品在 950°C 退火条件下, 其光荧光峰值波长的蓝移量小于 10 nm, 量子阱无序得到了很好的抑制。

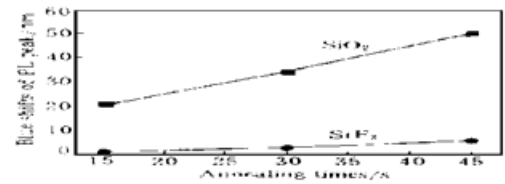


图 1 在 950°C 退火条件下, $\text{InGaAs}/\text{GaAs}$ 应变量子阱 PL 峰值波长的移动与退火时间的关系

●: 覆盖 SrF_2 的样品; ■: 覆盖 SiO_2 的样品
Fig. 1 Blue shifts of PL peak for $\text{InGaAs}/\text{GaAs}$ strained quantum wells capped with SiO_2 (■) and SrF_2 (●) respectively at 950°C

图 1 在 950°C 退火条件下, $\text{InGaAs}/\text{GaAs}$ 应变量子阱 PL 峰值波长的移动与退火时间的关系

●: 覆盖 SrF_2 的样品; ■: 覆盖 SiO_2 的样品

Fig. 1 Blue shifts of PL peak for $\text{InGaAs}/\text{GaAs}$ strained quantum wells capped with SiO_2 (■) and SrF_2 (●) respectively at 950°C

3 窗口结构脊形波导 $\text{InGaAs}/\text{GaAs}/\text{AlGaAs}$ 应变量子阱激光器的研制

脊形波导 $\text{InGaAs}/\text{GaAs}/\text{AlGaAs}$ 应变量子阱激光器在大功率条件下工作时, 常常会发生突然死亡现象, 经观察分析是腔面处发生了 COD。产生 COD 的根源是端面处光吸收导致的非辐射复合所产生的热。目前国际上针对消除 COD 这一课题, 采用了多种技术方案, 包括: (1) 采用特殊材料进行端面钝化, 如 ZnSe , Ca_2O_3 等; (2) 真空解理镀膜技术; (3) 端面处形成具有无吸收镜面窗口结构等等。我们根据现有的实验条件, 在研究了空位诱导量子阱无序和 SrF_2 抑制量子阱无序的基础上, 研制了具有无吸收镜面的窗口结构量子阱激光器, 如图 2 所示。其制备过程如下: (1) 在样品表面蒸发一层 120 nm 厚的氟化锶薄膜, 然后按一定的周期光刻出 $50\ \mu\text{m}$ 宽的条形, 并腐蚀掉该区的氟化锶; (2) 在整个样品表面淀积一层 250 nm 厚的

SiO₂; (3) 将覆盖这两种薄膜的样品进行快速热退火处理, 退火条件为 940℃, 40 s。在这一工艺过程中覆盖 SiO₂ 的区域发生量子阱无序, 使量子阱材料带隙提高, 形成窗口区; (4) 表面 Zn 扩散, 减小欧姆接触电阻; (5) 脊形波导条形半导体激光器的制备, 其中脊形台面条宽为 3 μm; (6) 解理镀膜。在 50 μm 窗口区域中心解理成两端各有 25 μm 窗口区的激光器, 并在两个腔面分别镀反射率为 95% 的高反射膜和反射率为 7% 的增透膜。为了进行比较还制作了不含窗口结构的脊形波导激光器, 该激光器采用了与窗口结构激光器相同的量子阱材料、相同的器件结构和器件长度。腔面镀膜是和含窗口结构的量子阱激光器一起进行的。

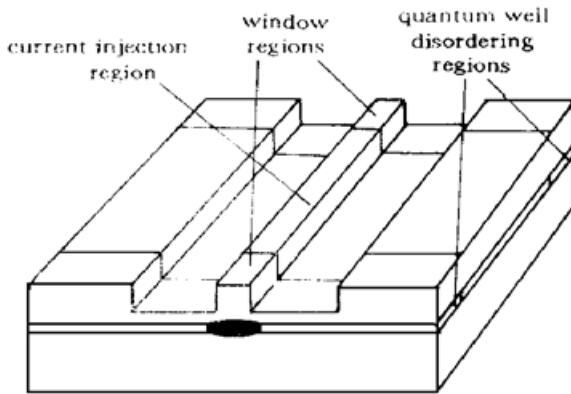


图 2 窗口结构量子阱激光器示意图

Fig. 2 Schematic diagram of window structure lasers

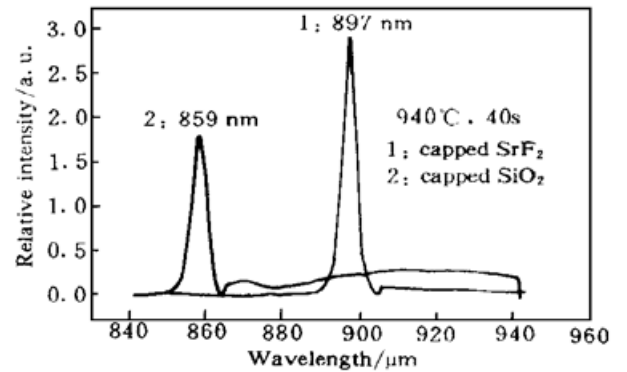


图3 940℃, 40 s 退火条件下, 分别覆盖 SiO₂ 和 SrF₂ 的 InGaAs/GaAs 应变量子阱的 PL 谱

Fig. 3 PL spectra of InGaAs/GaAs strained quantum wells capped with SiO₂ and SrF₂ respectively annealed at 940℃, 40 s

为了检测两种不同覆盖薄膜区域在快速退火过程中形成的带隙差, 在第三步工艺过程中, 放入了覆盖 SiO₂ 和 SrF₂ 薄膜的两种相同结构材料的样品作为陪片, 与制备器件的样品一起进行退火。退火后进行光荧光测量, 测量结果如图3所示。可以看出两个区域的峰值波长相差 38 nm 左右, 相当于 50 meV 的带隙差, 足以形成透明窗口, 减小端面处对输出激光的吸收, 从而减小热的产生。

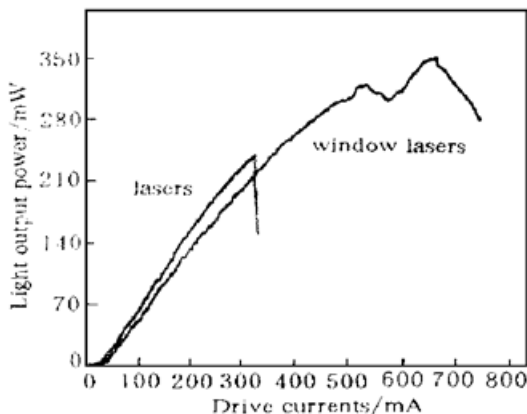


图 4 具有和没有窗口结构的 InGaAs/GaAs/ AlGaAs 应变量子阱激光器的光功率电流曲线

Fig. 4 Light output power-current characteristics for lasers with and without windows

我们比较了两种结构半导体激光器的特性, 结果见表1, 从表中看出窗口结构量子阱激光器的阈值电流 I_{th} 略有提高, 微分量子效率 η_d 略有下降, 串联电阻 R_s 基本保持不变, 但最高输出功率 P_{max} 有了大幅度提高, 典型值从 250 mW 提高到 340 mW, 提高了 36%。图4中给出了两种结构激光器的典型光功率电流曲线, 从图中可以看出, 没有窗口结构的激光器在最大输出功率处发生了 COD. 而具有窗口结构的激光器, 在最大输出功率处并没有发生 COD, 而是受到热饱和的限制。

表1 两种结构激光器的特性比较

Table 1 A comparison between lasers with windows and without windows

Type	I_{th}/mA	$\eta_D/\text{mW}/\text{mA}$	R_s/Ω	P_{max}/mW
window structure laser	20~ 25	0.7~ 0.8	2~ 3	340
lasers without windows	15~ 20	0.75~ 0.85	2~ 3	250

图 5 为窗口结构脊形波导量子阱激光器的远场特性和激射光谱,可以看出在 100 mW 输出功率下,发射光谱的中心波长为 978 nm,光谱半宽为 1.2 nm。平行和垂直方向远场发散角分别为 7.2° 和 30° 。

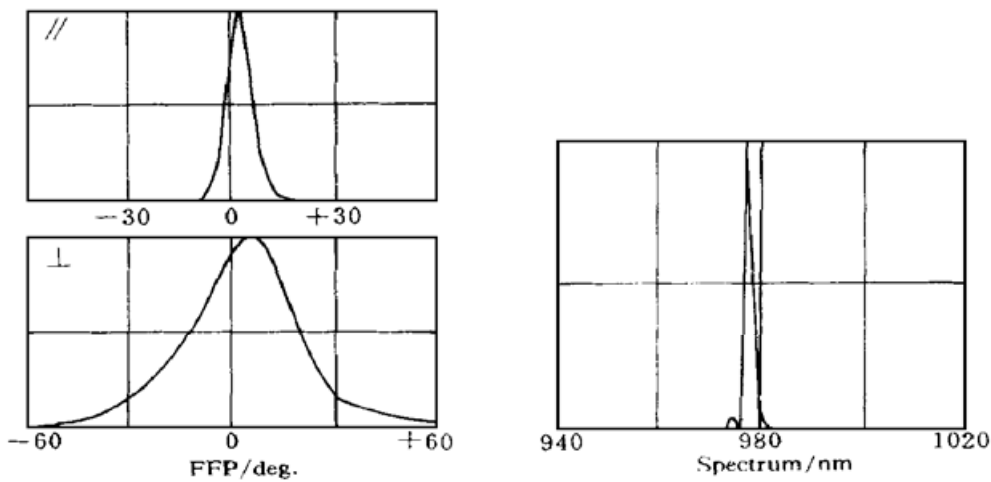


图 5 窗口结构激光器的远场分布和发射光谱

Fig. 5 The far-field patterns and emission spectrum of window structure lasers

4 结 论

实验研究和测试分析表明: SiO_2 薄膜是一种很好的促进量子阱无序的薄膜, SrF_2 薄膜覆盖在量子阱材料表面可起到抑制量子阱无序的作用。这两种不同的薄膜结合在一起经过高温快速热退火,可在同一样品的不同区域形成不同的带隙,称其为选择区域量子阱无序。将选择区域量子阱无序技术应用于量子阱激光器是成功的范例,所研制的窗口结构量子阱激光器是克服 COD 或提高发生 COD 时的输出功率的有效方法。

参 考 文 献

- 1 W. D. Laidig, N. Holonyak Jr., M. D. Camras *et al.*. Disorder of an AlAs-GaAs superlattice by impurity diffusion. *Appl. Phys. Lett.*, 1981, **38**(10): 776~ 778
- 2 J. Werner, T. P. Lee, E. Kapon *et al.*. Single and double quantum well lasers with a monolithically integrated passive section. *Appl. Phys. Lett.*, 1990, **57**(8): 810~ 812
- 3 H. Ribot, K. W. Lee, R. J. Simes *et al.*. Disorder of GaAs/AlGaAs multiple quantum well structures by thermal annealing for monolithic integration of laser and phase modulator. *Appl. Phys. Lett.*, 1989, **55**(7): 672~ 674
- 4 L. J. Guido, K. C. Hsieh, N. Holonyak *et al.*. Impurity induced layer disordering of Si implanted

- Al_xGa_{1-x}As-GaAs quantum well heterostructures: Layer disordering via diffusion from extrinsic dislocation loops. *J. Appl. Phys.*, 1987, **61**(4): 1329~ 1334
- 5 I. Gontijo, T. Krauss, J. H. Marsh *et al.*. Postgrowth control of GaAs/AlGaAs quantum well shapes by impurity free vacancy diffusion. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1994, **30**(5): 1189~ 1195
- 6 D. F. Welch, W. Streifer, R. L. Thornton *et al.*. 2.4 W CW, 770 nm laser arrays with nonabsorbing mirrors. *Electron. Lett.*, 1987, **23**(10): 525~ 527
- 7 J. Beauvais, J. H. Marsh, A. H. Kean *et al.*. Suppression of bandgap shift in GaAs/AlGaAs quantum well using strontium fluoride caps. *Electron. Lett.*, 1992, **28**(17): 1670~ 1672

InGaAs/GaAs/AlGaAs Strained Quantum Well Lasers with Window Regions Fabricated by Impurity-free Vacancy Disordering

Xu Zuntu^{1,2} Xu Junying¹ Yang Guowen¹

Zhang Jingming¹ Li Bingchen¹ Chen Lianghai¹ Shen Guangdi²

¹*Institute of Semiconductor, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083;*

²*Department of Electronic Engineering, Beijing Polytechnic University, and Beijing Optoelectronics Technology Laboratory, Beijing 100022*

Abstract This paper reports the experimental researches on impurity-free vacancy disordering (IFVD) of the InGaAs/GaAs strained quantum well capped by a SiO₂ film and the suppression effect on IFVD with a SrF₂ film. This technology was applied to ridge waveguide InGaAs/GaAs/AlGaAs strained quantum well lasers and fabricated window structure lasers with nonabsorbing mirrors. The maximum output power is 340 mW for 3 μm-width ridge waveguide lasers with windows. Compared with that of the conventional quantum well lasers, this maximum output power has an increase of 36%. The emission wavelength is 978 nm and FWHM is 1.2 nm at 100 mW. The far-field angles are 7.2° and 30° in junction-parallel and perpendicular directions, respectively.

Key words quantum well disordering, window structure, strained quantum well, semiconductor laser