

# 基于快速热退火量子阱无序技术的 新型半导体激光器\*

姜艾庆 郝智彪 孙长征 罗毅 王健华

(清华大学电子工程系 集成光电子学国家重点联合实验室 北京 100084)

**摘要** 本文首先研究了 GaAlAs/GaAs 多量子阱材料在不同快速热退火(RTA)条件下的量子阱无序,然后利用该技术研制了两种具有新颖结构的半导体激光器。一种是克服端面损伤的有窗口结构的半导体激光器,实验测得最大输出光功率比无窗口结构器件平均增加约 18%。另一种是利用了无序化量子阱材料的折射率变化,具有简单横模限制结构的半导体激光器,获得了 4 倍阈值下仍保持基模工作的良好结果

EEACC: 0510D, 2550A, 2530C, 4320J

## 1 引言

光子集成电路的发展,需要能对平行于衬底方向的不同空间位置的材料能带和折射率进行加工,在实现这种加工的各种技术中,量子阱无序技术以其工艺简单、使用灵活而受到了很大的关注<sup>[1]</sup>。量子阱无序技术的本质是采用一定的方法使阱中与垒中的组分发生混合,由于材料组分的改变,会引起材料光学性质的改变。一方面,阱中材料的带隙增大,另一方面,材料的折射率会发生变化。这是该技术最引人注目的两个方面。已经有报道利用多量子阱的无序技术制作无源波导<sup>[2]</sup>、F-P 调制器<sup>[3]</sup>、低阈值激光器<sup>[4]</sup>。实现量子阱无序的方法有很多,主要分两类:杂质诱导无序(Impurity Induced Disorder, ID)和无掺杂空位扩散无序(Impurity Free Vacancy Diffusion, IFVD)技术<sup>[1,5~7]</sup>。

本文将研究快速热退火(Rapid Thermal Annealing, RTA)引起的量子阱无掺杂空位扩散无序,以及利用该量子阱无序技术制作的窗口结构半导体激光器和简单横模限制结构半导体激光器

## 2 经无序处理的量子阱的理论模型及实验研究

对 GaAlAs/GaAs 材料, SiO<sub>2</sub> 掩膜快速热退火量子阱无序是典型的无掺杂空位扩散无

\* 本研究得到了国家自然科学基金杰出青年基金(69525407),国家“863”高技术计划(863-307-04-06)的资助

郝智彪 男,1974 年出生,博士生,研究方向为新型 MBE 生长技术

罗毅 男,1960 年出生,清华大学教授、博士生导师,从事半导体光电子学方面的研究 E-mail: luoyi@mails-  
inghua.edu.cn

1998-02-25 收到,1998-04-23 定稿

序,国际上普遍承认的机理是,在 850 nm 以上时,由于 Ga 扩散进入 SiO<sub>2</sub> 覆盖层,在 GaAs 层产生大量的空穴,这些空穴在向量子阱区扩散的过程中,极大地增强阱和垒中 Ga 和 Al 的互扩散系数<sup>[8,9]</sup>,从而实现量子阱无序,引起量子阱材料带隙和折射率的改变

我们利用国产分子束外延设备生长了如图 1 所示的多量子阱材料,其中的非掺杂多量子阱层由 5 个 10nm 宽的 GaAs 阱和 10nm 宽的 Ga<sub>0.78</sub>Al<sub>0.22</sub>As 垒组成,上下分别是 150nm 的非掺杂 Ga<sub>0.78</sub>Al<sub>0.22</sub>As 导波层,然后是 1μm 的 p 型和 n 型 Ga<sub>0.56</sub>Al<sub>0.44</sub>As 上下光限制层,欧姆接触层为 p<sup>+</sup>-GaAs

之后在外延片上溅射了 200nm 的 SiO<sub>2</sub> 膜,并分别进行了 1000 、 30s, 1020 、 30s 和 1040 、 30s 三种条件下的 RTA 实验,然后将 SiO<sub>2</sub> 膜去掉 对这三种样片以及未经过 RTA 处理的样片进行了光致发光谱和光压谱的测试 从光致发光的测试结果看,未退火样片的谱上可以分辨出轻重空穴的荧光峰,经过退火后,已无法分辨轻重空穴,而且光谱

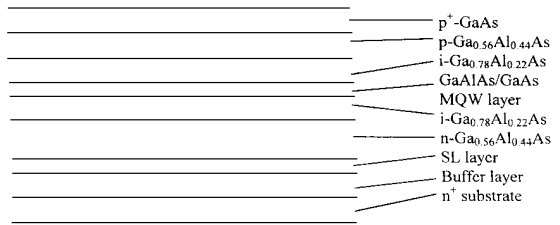


图 1 GaAlAs/GaAs 多量子阱材料结构示意图

有一定的展宽 在四种样片的光压谱上,都表现出了明显的吸收边特征,只是在退火后,激子吸收峰略有展宽、减弱 而从光致发光谱看出材料的发光特性不仅没有变坏,发光强度还略有增加 退火后量子阱材料的吸收边发生蓝移,在退火时间相同的条件下,随退火温度的增加,吸收边蓝移量逐渐增大 在 1040 、 30s 的条件下,吸收边蓝移 31nm. 这些实验结果表明,RTA 处理可以实现较大的材料带隙变化

量子阱无序的另一个效应是折射率的变化 我们计算了不同退火条件下材料的折射率变化 对于上述多量子阱材料,经过 RTA 处理后,沿生长方向的 Al 组分可以表示为<sup>[10]</sup>

$$C(z) = \frac{C_0}{2} \left\{ 2 - \operatorname{erf} \left( \frac{z - c_1}{2\sqrt{Dt}} \right) + \operatorname{erf} \left( \frac{z - c_2}{2\sqrt{Dt}} \right) + \sum_{i=1}^N \left[ \operatorname{erf} \left( \frac{z - a_i}{2\sqrt{Dt}} \right) - \operatorname{erf} \left( \frac{z - b_i}{2\sqrt{Dt}} \right) \right] \right\}$$

其中  $D$  是与温度有关的扩散系数; $t$  是 RTA 处理的时间; $N$  和  $C_0$  分别为量子阱的个数和退火前垒中的 Al 组分 由此可计算材料的带隙和折射率 计算表明,经过 1040 、 30s 的 RTA 处理,材料的有效折射率大约减小  $1 \times 10^{-3}$ .

### 3 窗口结构半导体激光器的研制与制作

大功率半导体激光器作为泵浦源已引起人们极大的关注,其在光存储、测量等方面的应用也越来越广泛 对 GaAlAs/GaAs 材料系来说,激光器输出功率受到端面损伤 (Catastrophic Optical Damage, COD) 的限制<sup>[11~13]</sup>. 端面损伤是指当激光器端面上的光功率密度超过临界值时,由于光吸收而产生端面的严重损坏 窗口结构 (Window Structure),即在激光器两端制作非吸收的区域,是克服 COD 的一种非常有效的方法 以前曾有人利用杂质诱导无序技术在器件两端制作带隙增大的无序区域以形成窗口<sup>[14~16]</sup>,但该方法工艺相对复杂 利用 RTA 技术形成量子阱无序的工艺简单,且可获得较大的带隙移动 我们用图 1 所示的多量子阱材料,在 1040 、 30s 的条件下退火以形成窗口结构

我们提出的器件结构如图 2 所示 活性层中两处有阴影的部分是经 SiO<sub>2</sub> 掩膜 RTA 处

理所得的量子阱无序区。为保护未覆盖 SiO<sub>2</sub> 的电注入区, 在退火时样片上面盖有 GaAs 盖片, 根据我们已有的实验经验, 这样可以保证退火前后, 该部分材料的性能几乎不变。两部分退火区的材料带隙增大, 光吸收减小, 可作为光输出口, 提高 COD 阈值光功率密度, 从而提高激光器的大功率工作能力。器件为脊宽 3 μm 的脊波导结构。为了进行比较, 我们还制作了不含窗口结构的脊波导激光器, 该激光器采用与窗口结构激光器相同的多量子阱材料, 相同的器件结构和器件长度。

我们对两种激光器的最大输出功率(指器件刚发生 COD 现象时的功率值)进行了对比, 两种器件的输出功率-注入电流特性如图 3 所示。新结构器件的阈值电流略有增大, 这是因为它的两端窗口为无源区, 但是新结构器件的最大输出功率较之不含窗口结构的器件增大了 20%。我们比较了 9 组器件, 含窗口结构的激光器的最大输出功率平均增大了约 18%。

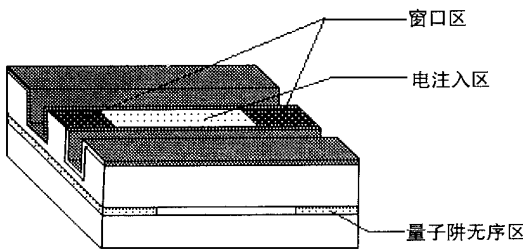


图 2 窗口结构激光器示意图

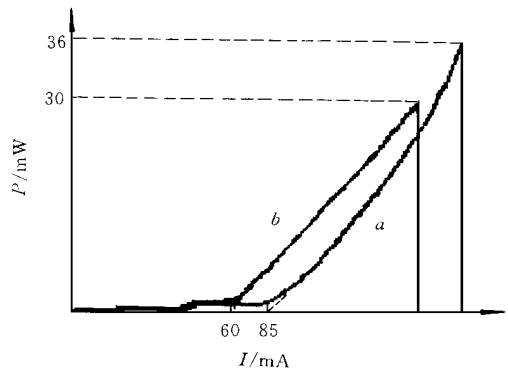


图 3 窗口结构激光器 (a) 与普通激光器 (b) 的 P-I 曲线

### 4 具有简单横模限制结构的半导体激光器

目前, 人们对量子阱无序技术的研究主要着眼于它在带隙改变方面的应用, 而对其在折射率改变方面的应用的研究还非常少。以前曾有人利用杂质诱导无序引起的折射率变化制作了无源波导<sup>[17, 18]</sup>, 但利用无掺杂空位扩散无序引起的折射率变化制作的器件还未见报道。本文尝试利用 RTA 技术引起的量子阱无序制作具有简单横模限制结构的半导体激光器。

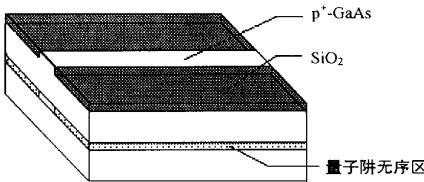


图 4 横模限制氧化膜条形激光器结构示意图

我们提出的新器件结构如图 4 所示, 为氧化膜条形结构。器件用图 1 所示的多量子阱材料。图 4 活性层中有阴影的部分为 RTA 量子阱无序区, 这两部分的有效折射率变化用来实现横模限制。退火工艺同前。由前面得到, 在 1040 °C、30s 的退火条件下, 上述多量子阱材料的有效折射率约减小  $1 \times 10^{-3}$ , 这一折射率差足够用来实现横模限制。我们计算了条形激光器在该折射率差下为实现单模工作所需的条宽。计算

结果表明, 光条宽小于 5.5 μm 时, 满足单模工作条件。实际采用的条宽为 4 μm。必须特别强

调的是该结构实现起来十分容易,采用传统的氧化膜条形器件的制作工艺即可。

器件制作工艺与氧化膜条形激光器相同。但是为了减小注入电流的扩散,我们用对 GaAs 和 GaAlAs 有很强的腐蚀选择性的柠檬酸蚀液将条两侧的  $p^+$ -GaAs 去掉,然后溅射  $SiO_2$ ,并将条上的  $SiO_2$  去掉。之后进行 RTA 处理。有  $SiO_2$  覆盖膜的部分就实现了量子阱的无序化。最后蒸上正电极和背电极,完成器件的制作。

我们还制作了未经过 RTA 处理的激光器,它除了未经过 RTA 处理以外,具有与新结构激光器完全相同的材料结构和工艺制作步骤。我们测量了两种器件的输出光功率-注入电流 ( $P-I$ ) 曲线,并测量了它们的远场图,如图 5、图 6 所示。

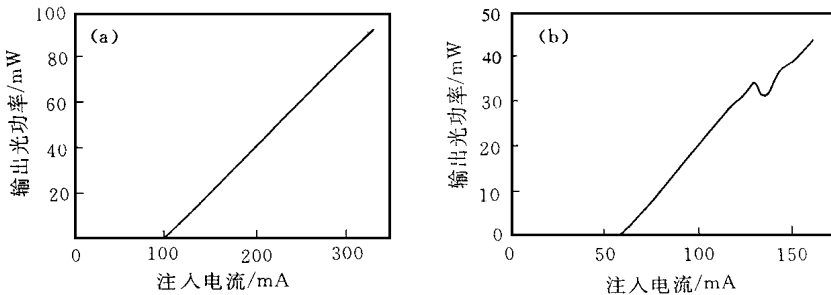


图 5 横模限制条形激光器(a)与普通条形激光器(b)的  $P-I$  曲线

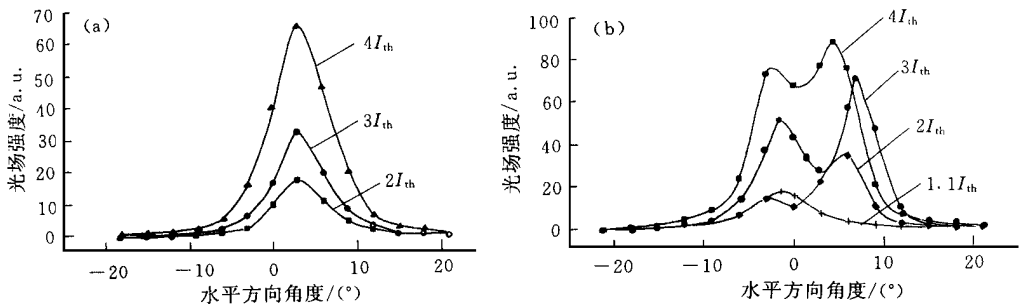


图 6 横模限制条形激光器(a)与普通条形激光器(b)的远场测试图

从图 5 的  $P-I$  曲线可以看出,新结构激光器表现出很好的线性,而未经 RTA 处理的激光器在大于两倍阈值的时候就出现扭折。图 6 的 (a) 和 (b) 的分别是  $I=2I_{th}$ ,  $3I_{th}$  和  $4I_{th}$  时新结构激光器和  $I=1.1I_{th}$ ,  $2I_{th}$ ,  $3I_{th}$  和  $4I_{th}$  时未经 RTA 处理的激光器的远场测试结果。从远场图的对比可以看出,经过 RTA 处理的激光器,在电流达到 4 倍阈值时,仍旧可以保持单峰。而对于未经 RTA 处理的氧化物条形激光器,  $I>2I_{th}$  以后,就出现了双峰。这一结果表明我们的新结构具有横模限制机制。

## 5 结论

本文首先对用  $SiO_2$  掩膜快速热退火技术引起的 GaAlAs/GaAs 多量子阱材料的无序进行了研究。在此基础上,设计和制作了两种具有新颖结构的半导体激光器。一种是为克服端面损伤而利用量子阱无序技术制作的窗口结构的激光器,另一种是利用该技术制作的具

有简单横模限制结构的激光器 对于前者, 输出功率平均增加约 18%, 对于后者, 4 倍阈值时仍能保持基横模工作

## 参 考 文 献

- [ 1 ] D. Hofstetter, H. P. Zappe *et al* , IEEE Photon Technol Lett , 1995, 7(9): 1022~ 1024
- [ 2 ] A. M. Kan'an, P. Li-Kam-Wa *et al* , " Integrated optical waveguide devices achieved by the disordering of multiple quantum wells, " Proceedings of the 1996 Conference on Lasers and Electro-Optics, CLEO '96, Anaheim, CA, U SA , 1996, 251~ 252
- [ 3 ] E. H. Li and W. C. H. Choy, Jpn. J. Appl Phys , 1996, 35(4B):L496~ L498
- [ 4 ] S. Y. Hu, M. G. Peters *et al* , IEEE Photonics Technol Lett , 1995(7), 7: 712~ 714
- [ 5 ] I. V. Bradley, B. L. Weiss, Opt Quantum Electron , 1991, 23(7): S823~ S828
- [ 6 ] D. G. Deppe and N. Holonyak, Jr. , J. Appl Phys , 1988, 64: R93~ R113
- [ 7 ] J. H. Marsh, Semicond Sci Technol , 1993, 8(7): 1136~ 1155
- [ 8 ] E. S. Koteles, B. Eiman *et al* , Opt Quantum Electron , 1991, 23(6): S779~ S787
- [ 9 ] S. Sudo, H. Onishi, Y. Nakano *et al* , Jpn. J. Appl Phys , 1996, 35(2B): 1276~ 1279
- [ 10 ] J. Crank, The Mathematics of Diffusion, 2nd ed. , Oxford, U. K. Oxford Univ. , 1975, P15
- [ 11 ] Y. Ueno *et al* , IEEE J. Quantum Electron , 1981, 17(6): 2113~ 2122
- [ 12 ] C. H. Henry, P. M. Petroff *et al* , J. Appl Phys , 1979, 50(11): 3721~ 3732
- [ 13 ] T. Kamejima and H. Yonezu, Jpn. J. Appl Phys , 1979, suppl 19-1: 425~ 429
- [ 14 ] J. Ungar, N. Bar-Chaim and I. Ury, Electron Lett , 1986, 22(5): 279~ 280
- [ 15 ] Y. Ueno, K. Endo *et al* , Electron Lett , 1990, 26: 1726~ 1728
- [ 16 ] Y. Ueno, H. Fujii *et al* , Jpn. J. Appl Phys , 1990, 29:L1666~ L1668
- [ 17 ] S. K. Han *et al* , Appl Phys Lett, 1994, 64(6): 760~ 762
- [ 18 ] T. Wolf, C. L. Shieh *et al* , Appl Phys Lett, 1989, 55(14): 1412~ 1414

## Novel Laser Structures Made by Rapid Thermal Annealing Technique

Jiang Aiqing, Hao Zhibiao, Sun Changzheng, Luo Yi, Wang Jianhua

(State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, Department of Electronic Engineering,  
Tsinghua University, Beijing 100084)

Received 25 February 1998, revised manuscript received 23 April 1998

**Abstract** In this paper experimental results for GaAlAs/GaAs multiple quantum well (MQW) interdiffusion using rapid thermal annealing (RTA) technique under different processing conditions are presented and discussed. Two kinds of novel laser structures based on such technique are also proposed and fabricated. First, a laser diode with window region for high power operation is designed and fabricated. The maximum output power of such a device shows an increase by 18% over laser diodes without interdiffused window region. Then a transverse mode controlled laser structure taking advantages of the refractive index change induced by MQW interdiffusion is realized using RTA technique. Single mode operation up to 4 times the threshold current has been demonstrated for this RTA treated laser diode.

EEACC: 0510D, 2550A, 2530C, 4320J