

快速热处理对应变 $\text{InGaAs}/\text{GaAs}$ 单量子阱激光二极管电子发射和 DX 中心的影响^{*}

卢励吾^{1)†} 张砚华¹⁾ 徐遵图²⁾ 徐仲英³⁾ 王占国¹⁾ J. Wang⁴⁾ Weikun Ge⁴⁾

¹⁾ 中国科学院半导体研究所半导体材料科学开放实验室 北京 100083)

²⁾ 中国科学院半导体研究所光电子工程中心 北京 100083)

³⁾ 中国科学院半导体研究所半导体超晶格国家重点实验室 北京 100083)

⁴⁾ 香港科技大学物理系 香港九龙清水湾)

(2001 年 5 月 19 日收到 2001 年 8 月 28 日收到修改稿)

研究分子束外延 (MBE) 生长的应变 $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{GaAs}$ 折射率梯度变化异质结单量子阱激光二极管的快速热处理 (RTA) 效应. 结果表明, RTA 移除了 $\text{InGaAs}/\text{GaAs}$ 界面非辐射中心, 提高 77K 光致发光效率和有源层电子发射. 同时 Al 和 Ga 原子互扩散, 也增加了 AlGaAs 波导层 DX 中心浓度. RTA 处理后样品电流冲击老化实验证明 DX 中心浓度呈现出相应的增加. 这表明 DX 中心可能是激光二极管性能退化的原因之一.

关键词: 量子阱, 快速热处理, 电子发射, DX 中心

PACC: 7155, 7280E, 7340C

1 引 言

作为掺铒玻璃光纤放大器的抽运源, 波长 $0.98\mu\text{m}$ 应变 $\text{InGaAs}/\text{GaAs}$ 量子阱 (QW_s) 半导体激光器引起人们普遍的关注^[1]. 然而人们对它的长期稳定性和工艺兼容性并没有较好的了解^[2,3].

关于 QW_s 的退火效应, 大多数研究集中在 QW_s 的混合引起的能带结构改变. 与此同时, 人们也观察到^[4,5]快速热处理能够增强 $\text{InGaAs}/\text{GaAs}$ QW 的 PL 效率, 降低其阈值电流密度和延迟时间. 上述结果被认为是 RTA 移除 $\text{InGaAs}/\text{GaAs}$ 界面非辐射缺陷和改善 III 族原子在 InGaAs 里的合金序^[5]. 本文提出 RTA 改善 $\text{InGaAs}/\text{GaAs}$ 单量子阱 (SQW) 的光学性质和有源层的电子发射, 但也增加了 AlGaAs 波导层的 DX 中心浓度.

2 实 验

本工作所采用的样品是应用分子束外延技术在掺硅 (100) 晶向 $n^+ - \text{GaAs}$ 衬底上生长. 其外延层结

构如图 1 所示. 7nm 厚 $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ 应变 SQW 有源层上、下被 3nm GaAs 垒和 $0.15\mu\text{m}$ $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 波导层 (x 值从 0.1 到 0.4 线性梯度改变) 夹在中间. 这些层是非故意掺杂的. InGaAs SQW 生长温度为 550°C , 而其他层为 620°C . RTA 是在 KG-32E 系统里进行. 退火条件为 900°C , 10s 或 30s, 氩气为保护气氛. RTA 期间温度在头 10s 里从室温升到 900°C , 在 900°C 维持 10 或 30s, 然后在 5s 内降到 400°C , 最后回到室温. 为期一个月时间室温下 180mA 恒流和从 0 到 350mA 连续电流对经 RTA 处理过的样品进行电流老化实验.

为研究 RTA 对 SQW 电子发射和 DX 中心的影响, 退火和未退火的样品分别在 77K 下使用波长为 632.8nm 氦-氖激光激发进行 PL 测量. 激光功率密度为 $0.9\text{W}/\text{cm}^2$. PL 测量之前, 腐蚀掉样品 $P^+ - \text{GaAs}$ 接触层和 $P - \text{AlGaAs}$ 盖层, 以便激光能到达 InGaAs SQW 有源层. $C - V$ (表观载流子浓度分布) 和 DLTS 测量在高灵敏度 [$10^{-7} (N_D - N_A) < N_T < 10^{-5} (N_D - N_A)$] 深能级瞬态傅里叶谱 Bio-Rad DL8000 系统上完成. DL-8000 是数字 DLTS 系统, 它是作为温度函数的瞬态傅里叶分析^[6], 称之为 DLTFs. DLTS 测量

^{*} 国家自然科学基金 (批准号: 60076008), 国家重点基础研究发展项目 (批准号: G20000683) 和香港科技大学 HKUST6135/97P 资助的课题.

[†] E-mail: jlwlu@red.semi.ac.cn

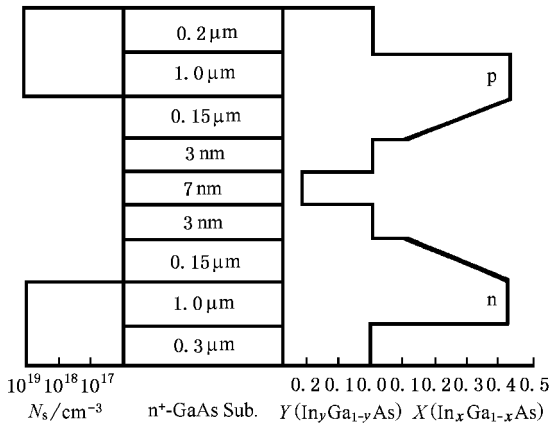


图 1 MBE 生长的 $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{GaAs}$ SQW 激光二极管样品结构

温度范围为 77 到 400K. 样品反向偏压为 1.5V ,而用于填充陷阱的正向脉冲电压为 0V.

3 结果和讨论

未退火和经 900℃ ,10s 或 30s 处理的样品典型的 PL 谱如图 2 所示.

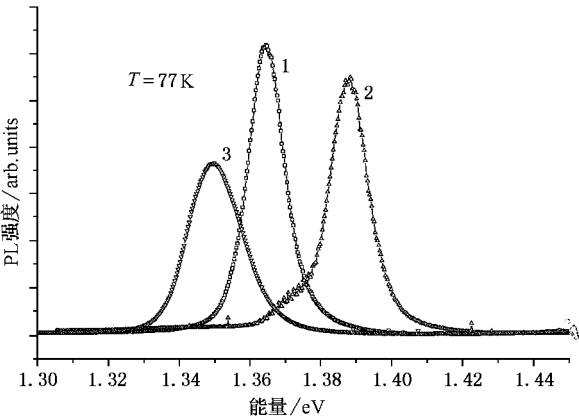


图 2 退火和未退火处理的激光二极管样品 77K PL 谱 (1) RTA900℃ ,10s (2) RTA900℃ ,30s (3) 没有 RTA

由图可见 ,1.349 ,1.365 和 1.388eV 的 PL 峰清晰可见.相对于未退火样品 ,RTA(900℃ ,10 和 30s)样品的 PL 峰分别有 16 和 39meV 的蓝移.文献 [5 ,7] 报道 ,PL 峰能量移动是 $\text{InGaAs}/\text{GaAs}$ 界面 Ga 和 In 相互扩散造成.不同退火时间(10 和 30s)样品的 PL 峰强度大约是未退火的 1.4—1.7 倍. PL 峰强度增加主要是由于 InGaAs SQW^[4] 的非辐射寿命 τ_n 改变造成的. PL 结果表明 ,未退火激光二极管样品在 SQW 里有较多的非辐射中心. PL 强度增加说明退火

能移除 SQW 和 $\text{InGaAs}/\text{GaAs}$ 界面的非辐射中心. 虽然我们样品应变 InGaAs 层厚度是在弹性应变平衡理论^[8]提出的临界层厚度以下 ,但少量位错可能还会存在^[9 ,10]. 同时也可看到 ,PL 发射峰线宽几乎不变(图 2)说明 $\text{InGaAs}/\text{GaAs}$ 界面 Ga 和 In 混合过程是近似均匀. Zhang 等^[11]研究了 QW 样品的 PL 特性与 RTA 时间关系 ,发现 PL 峰强度在 RTA 开始的 5s 内迅速增加 ,达到最大值 ,表明在退火开始时缺陷能迅速从 QW 移除.随进一步退火 ,PL 强度降低 ,这是因为具有梯度界面收集载流子的 QW 容量较小 ,以及量子限制态向上移动造成的.

为了使 SQW 和 AlGaAs 波导层处在本实验所加的反向偏压的耗尽层里 ,我们精确控制样品的 n 和 p 型 $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$ 盖层、 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ($x = 0.1—0.4$)波导层和 $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{GaAs}$ SQW 的掺杂浓度和厚度. 该样品的设计有如下一些好处 ,即 p- $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 波导层没有 DX 中心 ,而 GaAs 和应变的 $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ 里的深中心已被研究过^[12 ,13]. 没有其他的陷阱中心能涉及到来自 SQW 的电子发射. 900℃ ,30s 退火样品的电容-电压曲线的耗尽-积累峰如图 3(b)所示. 相应于 SQW 位置的多数载流子积累峰(图 3(b)) ,它正是反向偏压为 1.5V 时耗尽层的宽度.

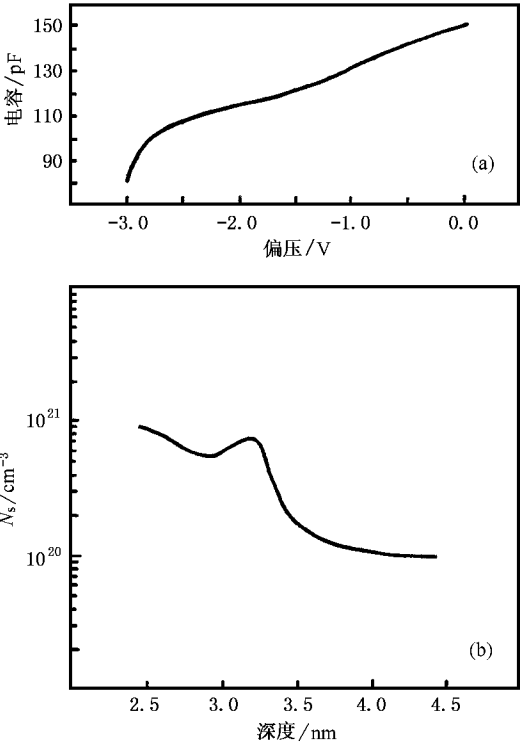


图 3 经 900℃ ,30s 快速热处理样品的耗尽层电容变化曲线 (a)和表观载流子浓度分布(b)

DLTFS 温度扫描获得的未退火样品典型谱图如图 4(a)所示.由图可观察到三个主要的电子陷阱发射峰 E_1 、 E_2 和 E_3 .其激活能由 Arrhenius plots 求出,分别为导带下 0.18、0.23 和 0.30eV,浓度为 1.25×10^{16} 、 1.72×10^{16} 和 $4.92 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$,俘获截面为 6.0×10^{-15} 、 2.0×10^{-16} 和 $2.0 \times 10^{-15} \text{ cm}^2$.为便于比较,我们采用与图 4(a)未退火样品相同的结构,唯一区别是移除 SQW 有源层,进行相关的 DLTFS 测量,其结果如图 4(b)所示.值得注意的是,对于移除 SQW 的样品来说,来自 SQW 电子发射的 E_2 (实线)峰消失了(虚线),证实 E_2 确实是与 SQW 有关联的.与已发表的发射时间常数 Arrhenius plots 相关结果^[14]比较, E_1 (0.18eV)和 E_3 (0.3eV)可认为分别是与 IV 族和 VI 族施主杂质的 DX 中心有关.

典型的 DLTFS 谱(图 4(b))是来自 900℃、30s 退火的样品.可观察到两个主要的电子陷阱(E_2 和 E_3).其能级位置分别位于导带下 0.23 和 0.30eV,浓度为 1.3×10^{20} 和 $2.0 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$,俘获截面为 6.0

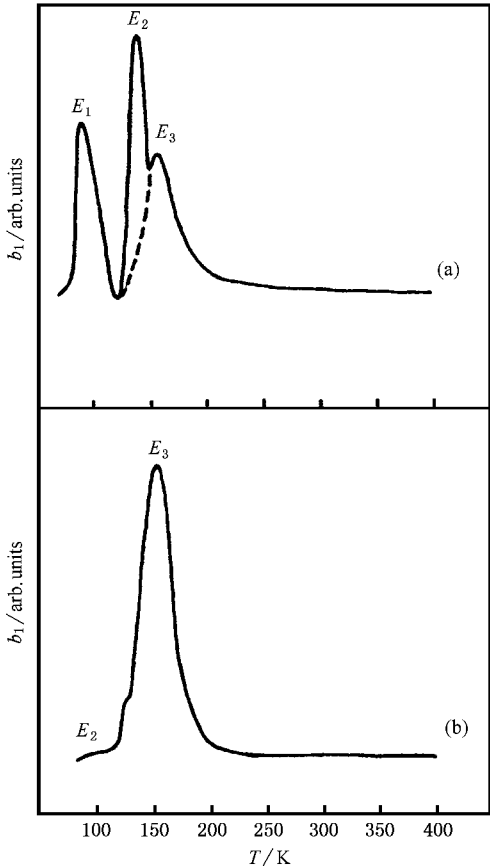


图 4 (a)未退火样品的 DLTFS 谱(虚线部分的数据来自于移除 SQW 的同一样品)(b)900℃、30s 退火样品的 DLTFS 谱

$\times 10^{-16}$ 和 $6.0 \times 10^{-15} \text{ cm}^2$.对于 900℃、30s 退火的样品来说, E_2 和 E_3 (图 4(b))具有与未退火样品 E_2 和 E_3 (图 4(a))相似的 DLTFS 参数(能级位置, E_T ,和俘获截面, σ_n)表明它们均属于相同的深中心,即 E_2 和 E_3 分别来自 SQW 电子发射和与 VI 施主杂质有关的 DX 中心.我们注意到 E_2 浓度(图 4(b))明显高于图 4(a)的 E_2 .它们之间的浓度差别表明 RTA 后来自 SQW 电子发射的增强.在 RTA 期间 Ga 和 In 原子相互扩散导致形成梯度的 InGaAs/GaAs 界面,有效地降低了界面缺陷的密度. DLTFs 测量过程中正向脉冲期间注入的电子填充了 SQW,由于 RTA 处理 SQW 里非辐射中心减少,使得来自 SQW 电子发射有了明显的增加(即从 1.72×10^{16} 到 $1.32 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$).77K PL 效率的提高和 SQW 电子发射的增强均与 InGaAs/GaAs 界面非辐射中心减少有关.我们也观察到 DX 中心(E_3)浓度由于 AlGaAs 波导层里 Ga 和 Al 相互扩散而增加.这与 Lang 等^[15]的 AlGaAs DX 中心的有关结果一致,即 DX 中心浓度随 Al 组分从

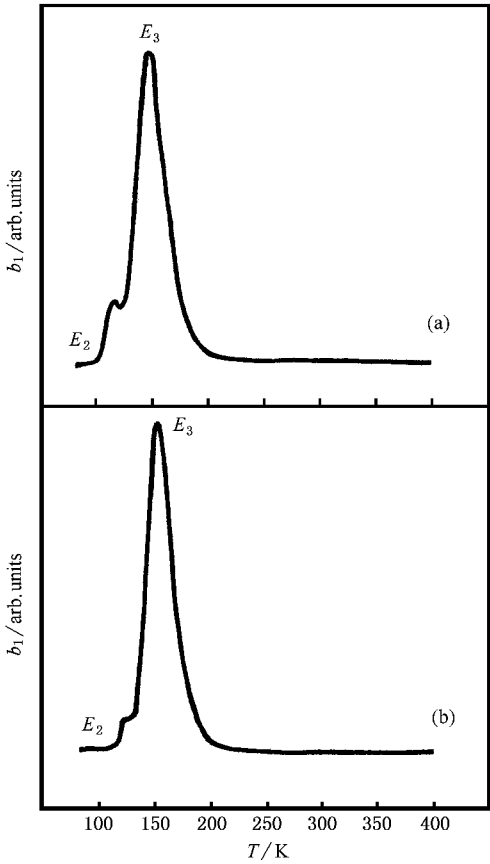


图 5 电流冲击老化样品的 DLTFS 谱 (a)室温下为期一个月的 180mA 电流老化 (b)室温下为期一个月的从 0 到 350mA 电流老化

0.2 到 0.4 增加而增加.

RTA 处理后样品经受二类不同电流冲击老化实验.图 5(a)代表样品在室温下为期一个月的 180mA 恒流老化实验后的 DLTS 谱. DLTS 温度扫描表明有二个主要电子陷阱(E_2 和 E_3),它们能级位置为导带下的 0.23 和 0.30eV. E_2 和 E_3 的 DLTS 参数与图 4(b)退火后观察到的 E_2 和 E_3 相同,表明 E_2 和 E_3 (图 5(a))是来自 SQW 的电子发射和与 VI 族施主杂质有关的 DX 中心.

图 5(b)为样品在室温下为期一个月连续电流(从 0 到 350mA)老化实验的 DLTS 谱.两个电子陷阱 E_2 和 E_3 (能级位置为导带下的 0.23 和 0.30eV)被观察到. E_2 和 E_3 的 DLTS 参数与图 4(b)退火后样品观察到的 E_2 和 E_3 相同,表明它们属于同一类型的缺陷中心.由图 4(b),5(a)和 5(b)可看到这样一个事实,即 E_2 浓度几乎没有改变($1.3 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$)

而 E_3 浓度却逐渐增加(从 2.0×10^{20} (图 4(b))到 2.6×10^{20} (图 5(a))到 $3.24 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ (图 5(b)))表明虽然电流老化实验并不影响 SQW 电子发射,但它却严重影响 AlGaAs 波导层里的 DX 中心浓度.这表明 DX 中心可能是激光二极管特性退化的原因之一.

4 结 论

实验结果表明,由于降低了 InGaAs/GaAs 界面非辐射中心密度,RTA 改善 77K PL 效率和有源层 AlGaAs 的电子发射.另一方面,RTA 也增加了 AlGaAs 波导层里的 DX 中心浓度.这是由于 RTA 期间 AlGaAs 波导层里 Ga 和 In 互扩散的结果.样品电流老化实验表明,DX 中心可能是激光二极管特性退化的原因之一.

- [1] Laiding W D, Caldwell P J, Lin Y F, Peng C K 1984 *Appl. Phys. Lett.* **44** 653
- [2] Shieh C, Lee H, Mantz J, Ackley D, Engelman R 1988 *Electron. Lett.* **25** 1226
- [3] Okayasu M, Fukuda M, Takeshita T, Uehara S 1990 *IEEE Photon. Tech. Lett.* **2** 689
- [4] Yamada N, Roos G, Harris Jr J S 1991 *Appl. Phys. Lett.* **59** 1040
- [5] Offsey S D, Schaff W J, Lester L F, Eastman L F, McKernan S K 1991 *IEEE J. Quantum. Electron.* QE-27 1455
- [6] Weiss S, Kassing R 1988 *Solid State Electron.* **31** 1973
- [7] Sadwick L P, Streit D C, Jones W L, Kim C W, Hwu R J 1991 *IEEE J. Electron. Devices* ED-39 50

- [8] People R, Bean J C 1985 *Appl. Phys. Lett.* **47** 322
- [9] Gourley P L, Fritz I J, Dawson L R 1988 *Appl. Phys. Lett.* **52** 377
- [10] Bour D P, Martinnelli R U, Gilbert D B, Elbaum L, Harvey M G 1989 *Appl. Phys. Lett.* **55** 1501
- [11] Zhang G, Nappi J, Ovtchinnikov A, Asonen H, Pessa M 1992 *J Appl. Phys.* **72** 3788
- [12] Lang D V, Cho A Y, Gossard A C, Illegems M, Wiegmann W 1976 *J. Appl. Phys.* **47** 2558
- [13] Dhar S, Das U, Bhattacharya P K 1986 *J. Appl. Phys.* **60** 639
- [14] Hashizume T, Hasegawa H, Ohno O 1990 *J Appl. Phys.* **66** 3394
- [15] Lang D V, Logan R A 1979 *Phys. Rev.* **B19** 6

Effect of rapid thermal annealing on electron emission and DX centers in strained InGaAs/GaAs single quantum well laser diodes *

Lu Li-Wu¹⁾ Zhang Yan-Hua¹⁾ Xu Zun-Tu²⁾ Xu Zhong-Ying³⁾ Wang Zhan-Guo¹⁾ J. Wang⁴⁾ Weikun Ge⁴⁾

¹⁾ *Laboratory of Semiconductor Materials Science ,Institute of Semiconductors , Chinese Academy of Sciences , Beijing 100083 ,China)*

²⁾ *Institute of Semiconductors ,Chinese Academy of Sciences ,Beijing 100083 ,China)*

³⁾ *National Laboratory of Semiconductor Superlattices and Micorstructures ,Institute of Semiconductors ,Chinese Academy of Sciences ,Beijing 100083 ,China)*

⁴⁾ *Department of Physics ,The Hong Kong University of Science and Techonology ,Kowloon ,Hong Kong ,China)*

(Received 19 May 2001 ; revised manuscript received 28 August 2001)

Abstract

Thermal processing of strained In_{0.2}Ga_{0.8}As/GaAs graded-index separate confinement heterostructure single quantum well laser diodes grown by molecular beam epitaxy is investigated. It is found that rapid thermal annealing can improve the 77K photoluminescence efficiency and electron emission from the active layer ,due to the removal of nonradiative centers from the InGaAs/GaAs interface. Because of the interdiffusion of Al and Ga atoms ,rapid thermal annealing increases simultaneously the density of DX centers in the AlGaAs graded layer. The current stressing experiments of postgrowth and annealed laser diodes are indicative of a corresponding increase in the concentration of DX centers ,suggesting that DX centers may be responsible for the degradation of laser diode performance .

Keywords : quantum well , rapid thermal annealing , electron emission , DX centers

PACC : 7155 , 7280E , 7340

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China(Grant No. 60076008) , State Key Program for Basic Research and Development of China(Grant No. G20000683) and the Hong Kong University of Science and Technology (Grant No. HKUST6135/97P).