

MOCVD 生长的硅衬底上 GaAlAs/GaAs 单量子阱和多量子阱激光器深能级研究*

卢励吾 周 浩

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

庄婉如

(集成光电子学联合实验室半导体所实验区,中国科学院半导体研究所,北京)

梅野正義

(日本名古屋工业大学電気情報工学科)

1991年2月22日收到,1991年4月22日修改定稿

应用深能级瞬态谱(DLTS)技术研究经MOCVD生长的硅衬底上GaAlAs/GaAs单量子阱和多量子阱激光器深能级。样品的DLTS谱表明,在激光器的量子阱和n-GaAlAs限制层里均存在着一个浓度和俘获截面较大的高温电子陷阱,该陷阱可能与MOCVD生长工艺和质子轰击引进的损伤有关,它直接影响激光器的性能。DX中心和高温电子陷阱在量子阱里可能局域在GaAlAs/GaAs层的界面附近。

PACC: 7340L,7360,7155,6865

一、引言

近年来,硅上外延生长砷化镓(GaAs/Si)及其异质结和量子阱激光器引起人们普遍的关注^[1]。但目前还存在一些问题,例如激光器阈电流高、输出功率和量子效率低,特别是激光器性能的急剧退化^[2]。这表明激光器的量子阱和GaAlAs限制层里尚存在着许多缺陷和应力。本实验采用MOCVD在硅上生长GaP/GaAs_{0.5}P_{0.5}及GaAs_{0.5}P_{0.5}/GaAs应变超晶格作中间过渡层,然后生长GaAlAs/GaAs单量子阱和多量子阱激光器结构,用质子轰击形成高阻隔离,制成10μm宽的条形激光器。应用深能级瞬态谱(DLTS)技术详细研究和报告了量子阱激光器中有关深能级及其参数,并对其产生机制和在量子阱里的空间分布进行分析和讨论。

二、样品制备和实验条件

本实验采用MOCVD法在n型Si(100)往(110)偏2°的表面上生长和图1所示的

* 本文 MOCVD 工作在日本名古屋工业大学进行, 激光器制备和深能级测量在中国科学院半导体研究所进行。

多层结构样品。典型生长过程为：先把硅片在 950°C $H_2 + PH_3$ 中焙烧 10 分钟，在 900°C 生长 50nm GaP，在 680°C 生长各为五个周期的 $GaP/GaAs_{0.5}P_{0.5}$ （每层 20nm）和 $GaAs_{0.5}P_{0.5}/GaAs$ （每层 20nm），上述各个超薄层组成了应变超晶格结构。再在 650°C 生长 $2\mu m$ N^+ GaAs 缓冲层，接着进行五个周期的从 650°C 到 200°C 的加热及冷却的热循环处理，以形成热应力缓冲层。然后生长 $1\mu m$ 厚掺 Se 的 n 型 $Ga_{0.5}Al_{0.5}As$ 限制层（浓度 $1 \times 10^{17} cm^{-3}$ ），接着生长单量子阱和多量子阱结构，它们分别由 15nm 未掺杂 GaAs 势阱和两旁 20nm $Ga_{0.7}Al_{0.3}As$ 势垒及三层 15nm 未掺杂 GaAs 势阱和四层 20nm $Ga_{0.7}Al_{0.3}As$ 势垒相间组成。然后在其上生长 $1\mu m$ 厚掺 Zn p 型 $Ga_{0.5}Al_{0.5}As$ 限制层（浓度 $1 \times 10^{18} cm^{-3}$ ）和 $2\mu m$ 厚 P 型 GaAs 顶层（浓度 $5 \times 10^{18} cm^{-3}$ ），最后在样品的 n 面蒸 Au-Sb-Au，p 面蒸 Cr-Au 做电极，采用质子轰击造成的高阻隔离作成 $10\mu m$ 宽的条形激光器。

使用带有 IBM PC 计算机作为数据采集和处理系统的匈牙利 Semitrap 公司生产的高灵敏度锁相深能级瞬态谱仪 DLS-82E 进行 DLTS 研究。分别利用多数载流子和少数载流子注入测量激光器量子阱和 $GaAlAs$ 限制层里的深能级。DLTS 测量的温度范围为 77—380K。采用温度和频率扫描二种途径并通过 Arrhenius Plots 验证有关深能级位置^[3]，而能级的俘获截面则通过改变样品上所加的脉冲宽度来获得。

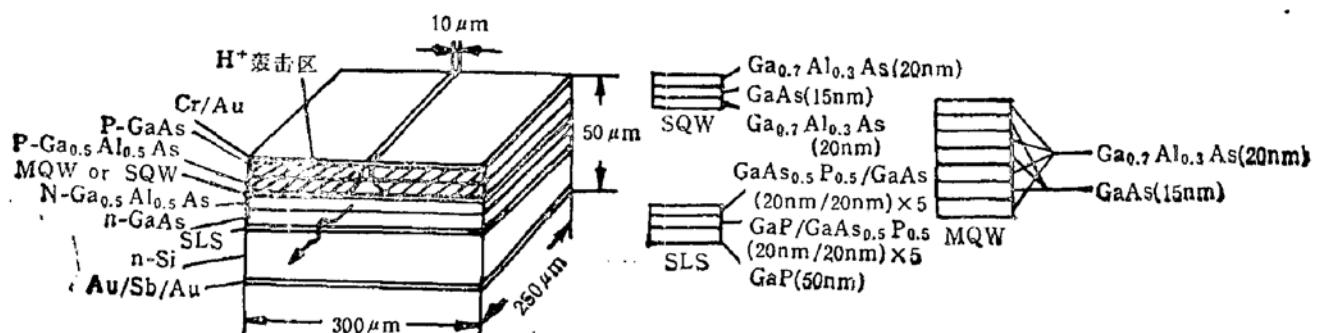


图 1 硅衬底上单量子阱和多量子阱激光器结构示意图

三、实验结果

1. 深能级浓度 N_T 计算的修正

对通常的样品，例如二极管（其中深能级浓度远小于载流子浓度），可从 DLTS 讯号得到深能级浓度^[4]。但对条形激光器结构来说，情况就不是这样。瞬态电容测量对有源条形区和质子轰击区都是灵敏的，因此人们必须知道 DLTS 讯号究竟来自 P-N 结条形区还是质子轰击区边缘的深能级。若 DLTS 讯号来自 P-N 结条形区，则

$$N_T \approx 2 \cdot \left(\frac{\Delta C_D}{C_D} \right) \cdot N_D \quad (1)$$

其中 N_D 为浅施主浓度， C_D 为 P-N 结耗尽电容。若 DLTS 讯号来自质子轰击区边缘，这类似于 MIS 电容。样品总电容 C 是绝缘层电容 C_I 和半导体耗尽电容 C_D 的串联组合。在 $C_I \ll C_D$ 且 $\Delta C_I = 0$ 时，

$$\frac{\Delta C}{C} \approx \frac{C_i}{C_D} \cdot \frac{\Delta C_D}{C_D} \quad (2)$$

考虑到条形激光器是一个 MIS 电容与 P-N 结电容并联的情形, 设 $C_D \approx 10C_i(1\text{MHz})$, 从(1)、(2)式可得 $N_T \approx 20 \cdot \frac{\Delta C}{C} \cdot N_D$.

2. 单量子阱激光器

图 2 为单量子阱激光器中典型的少子注入 DLTS 谱。由图可清楚观察到一个少子陷阱 H1 (正峰) 和多子陷阱 E1 (负峰)。H1、E1 的能级位置分别在价带上 0.30eV 和导带下 0.86eV 处。其浓度分别为 $6 \times 10^{16}\text{cm}^{-3}$ (H1) 和 $1.2 \times 10^{16}\text{cm}^{-3}$ (E1), 俘获截面 E1 为 $\sim 10^{-14}\text{cm}^2$, 而 H1 则小于 10^{-19}cm^2 。根据耗尽层宽度的计算公式, 当偏压 $U_R = -0.1$ — -0.2V 时耗尽层宽度则大约在 350 — 500\AA 之间, 这表明测得的 H1 和 E1 均处在激光器的单量子阱的空间范围里。由图 2 可见随着偏压的改变 H1 峰值出现的温度和峰高几乎没有发生变化, 电子陷阱 E1 峰值出现的温度也没有移动, 唯峰高略有增加, 这说明 H1 和 E1 的热发射速率与电场无关。

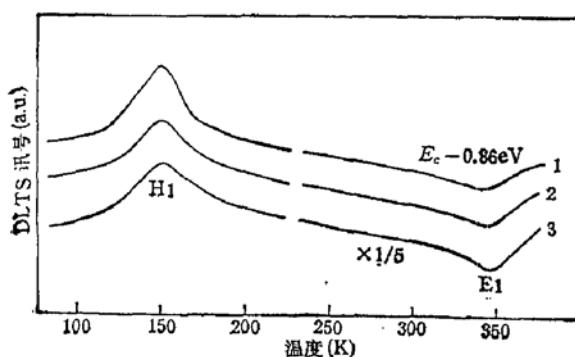


图 2 典型的少子注入 DLTS 谱

1. $U_R = 0\text{V}, U_i = 0.8\text{V}$
 2. $U_R = -0.1\text{V}, U_i = 0.8\text{V}$
 3. $U_R = -0.2\text{V}, U_i = 0.8\text{V}$
- $f = 1050\text{Hz}$

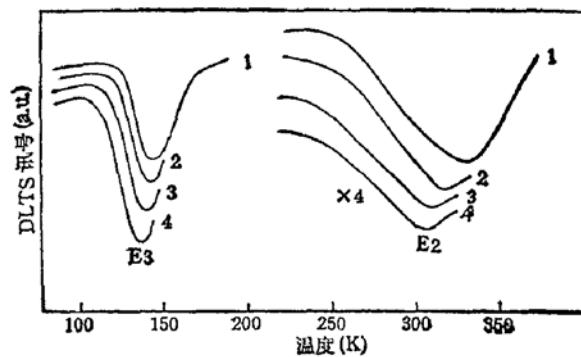


图 3 典型的多子注入 DLTS 谱

1. $U_R = -3.5\text{V}, U_i = -0.5\text{V}$
 2. $U_R = -4.0\text{V}, U_i = -0.5\text{V}$
 3. $U_R = -4.4\text{V}, U_i = -0.5\text{V}$
 4. $U_R = -4.6\text{V}, U_i = -0.5\text{V}$
- $f = 1050\text{Hz}$

图 3 为典型的多子注入 DLTS 谱。由图可看到一个热电子发射峰 E3 和高温电子陷阱 E2。在偏压 $U_R = -3.5\text{V}$ 时, E3、E2 的能级位置分别在导带下 0.28eV 和 0.84eV 处, 其浓度分别为 $4 \times 10^{15}\text{cm}^{-3}$ (E3) 和 $1.6 \times 10^{16}\text{cm}^{-3}$ (E2), 俘获截面 E3 小于 10^{-19}cm^2 , 而 E2 则在 10^{-14} — 10^{-15}cm^2 之间。当偏压 U_R 从 -3.5V 改变到 -4.6V , E3、E2 的峰值向低温方向移动, 表明有明显的电场效应影响存在。同时我们也注意到这样的现象, 即: 在低偏压 $U_R = -0.1\text{V}$ 或 -0.2V 的多子谱中并没有出现 E3、E2 缺陷能级。在少子和多子注入的 DLTS 谱中(图 2 和图 3)分别出现的 H1 和 E3, 以及它们能在低温下热激发、具有大的浓度且电子俘获截面很小等特点, 这正是由 Lang 论述的 DX 中心特有性质决定^[3], 这些说明 H1 和 E3 可能就是量子阱里 GaAlAs 层材料的特殊缺陷 DX 中心在 DLTS 少子和多子谱中的反映。其中 H1 正是 GaAlAs 材料中由于 DX 中心存在而产生的电子俘获峰, E1 则是热电子发射峰。

3. 量子阱激光器的比较

为与量子阱激光器相比较, 利用同一 MOCVD 条件在 GaAs 衬底上生长 GaAlAs/GaAs DH (double Heterojunction) 样品进行少子注入的 DLTS 测量。在该样品中用 P-GaAs 有源层代替量子阱, 并且不采用质子轰击的工艺。图 4 为 GaAlAs/GaAs DH 样品结构和少子注入的 DLTS 谱。

由图可清楚观察到 E4、E5 电子陷阱。E4 电子陷阱的能级位置在导带下 0.88eV 处, 其浓度和俘获截面分别为 $1.5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 和 $10^{-14}-10^{-15} \text{ cm}^2$ 。E4 峰值出现温度和峰高与样品所加偏压的大小没有明显依赖关系, 可以认为 E4 电子陷阱是在 n-GaAlAs 层里。这个结果与 Martin^[7] 在具有大量子阱 GaAs 的 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}-\text{GaAs}-\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ($x \sim 0.35$) DH 样品中观察到的 $E_c - 0.88 \text{ eV}$ 电子陷阱一致, 而 LPE 生长的 GaAlAs/GaAs DH 样品中却没能观察该能级, 表明 $E_c - 0.88 \text{ eV}$ 电子陷阱可能与 MOCVD 生长过程有关。从 E5 陷阱的能级位置 ($E_c - 0.28 \text{ eV}$), 浓度 ($1.5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$) 和俘获截面(小于 10^{-19} cm^2) 等参数看, 它可能是单量子阱激光器中出现的 DX 中心。

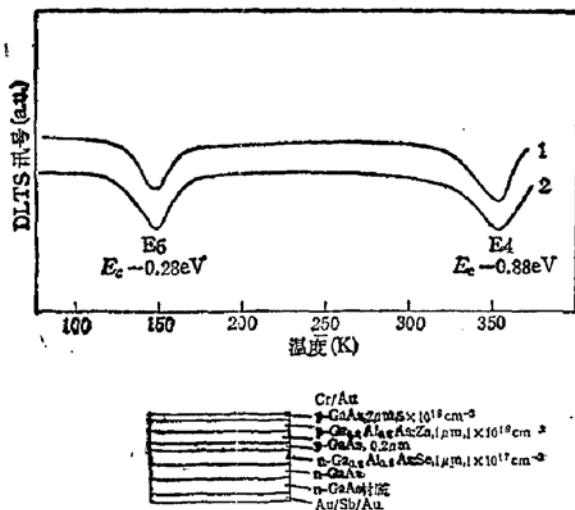


图 4 GaAs 衬底上 GaAlAs/GaAs DH
样品结构和少子注入的 DLTS 谱

1. $U_R = -0.2 \text{ V}, U_i = 0.8 \text{ V}$
2. $U_R = -0.5 \text{ V}, U_i = 0.8 \text{ V}$
 $f = 1050 \text{ Hz}$

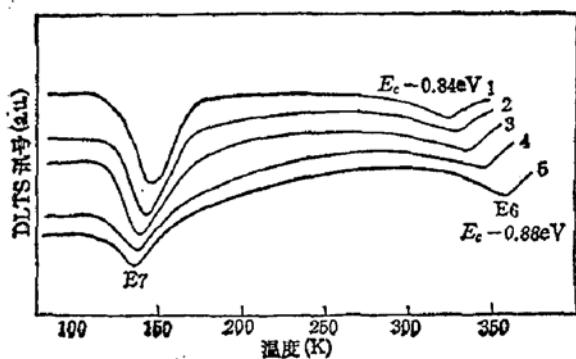


图 5 典型的少子注入 DLTS 谱

1. $U_R = -0.2 \text{ V}, U_i = 0.8 \text{ V}$
2. $U_R = -0.5 \text{ V}, U_i = 0.8 \text{ V}$
3. $U_R = -1 \text{ V}, U_i = 0.8 \text{ V}$
4. $U_R = -2 \text{ V}, U_i = 0.8 \text{ V}$
5. $U_R = -3.5 \text{ V}, U_i = 0.8 \text{ V}$
 $f = 1050 \text{ Hz}$

4. 多量子阱激光器

图 5 为多量子阱激光器中典型的少子注入 DLTS 谱。

由图所示在温度 $\sim 150 \text{ K}$ 处可见到 E7 陷阱和在高温出现的 E6 电子陷阱。E7 陷阱出现的峰值温度 ($\sim 150 \text{ K}$), 能级位置 ($E_c - 0.28 \text{ eV}$), 浓度 ($3 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$) 和俘获截面(小于 10^{-19} cm^2) 等参数与单量子阱激光器中出现的 DX 中心很相似。当样品所加偏压从 -0.2 V 改变到 -3.5 V 时, 由图可见, E6 (浓度 $1.0 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, 俘获截面 $\sim 10^{-14}-10^{-15} \text{ cm}^2$) 峰值向高温方向移动, 结果能级位置由 $E_c - 0.84 \text{ eV}$ 逐渐增加到 $E_c - 0.88 \text{ eV}$, 恢复到 MOCVD 法生长的 GaAlAs/GaAsDH 参考样品中出现的 $E_c - 0.88 \text{ eV}$ 高温电子陷阱。这与电场效应影响的结果相反。

而对样品进行多子注入 DLTS 测量时, 可以观察到如下的现象, 即: 在较低偏压 $U_R = -0.2V$ 下, DLTS 谱是平线 (表明深能级浓度在 DLTS 仪器探测灵敏度 $\sim 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ 以下), 而 $U_R = -0.2V$ 少子注入 DLTS 谱中却可以观察到 E7—DX 中心和 E6 高温电子陷阱。在单量子阱激光器里也观察到同样的现象。

在偏压 U_R 从 $-0.5V$ 改变到 $-3.5V$ 时样品多子注入的 DLTS 谱如图 6 所示。

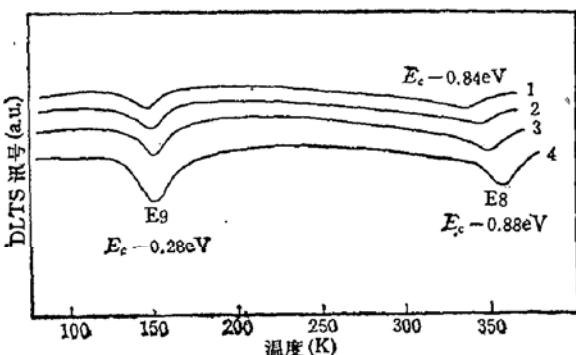


图 6 典型的多子注入 DLTS 谱

- | | |
|-------------------------------|-------------------------------|
| 1. $U_R = -0.5V, U_i = -0.2V$ | 3. $U_R = -2V, U_i = -0.5V$ |
| 2. $U_R = -1V, U_i = -0.5V$ | 4. $U_R = -3.5V, U_i = -0.5V$ |
- $f = 1050 \text{ Hz}$

由图可以看到在温度 $\sim 150\text{K}$ 附近出现的 E9 陷阱和高温处出现的 E8 电子陷阱。其中 E9 陷阱 ($E_c - 0.28\text{eV}$) 与我们前面所说的 DX 中心相似。而 E8 电子陷阱能级位置由 $E_c - 0.84\text{eV}$ ($U_R = -0.5\text{V}$) 增加到 $E_c - 0.88\text{eV}$ ($U_R = -3.5\text{V}$)，这与“少子”谱中观察到的现象相类似。在偏压 $U_R = -0.5\text{V}$ 时测到的 E8 电子陷阱的浓度为 $1.0 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ，俘获截面为 $\sim 10^{-14} - 10^{-15} \text{ cm}^2$ 。

四、讨 论

1. 单量子阱和多量子阱激光器中的高温电子陷阱

Lang 等^[6]研究了 GaAlAs DH 质子轰击条形激光器中的深能级, 观察到一个位于质子轰击损伤层和 n-GaAlAs 波导层之间, 由质子轰击损伤引进的深电子陷阱 $E_c - 0.89 \text{ eV}$ 。它具有大约 $\sim 10^{-20} \text{ cm}^2$ 的俘获截面, 其浓度在空间区域里分布不均匀并且能级位置随 GaAlAs 波导层中铝含量而改变。该陷阱若运动到激光器的 P 型有源层, 将是引起激光器性能退化的主要原因之一。Martin 等^[7]测量了 MOCVD 生长无质子轰击的带有大量子阱有源区 ($\sim 800\text{\AA}$) 的 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}-\text{GaAs}-\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ($x \sim 0.35$) DH 样品的电容谱, 在 n-GaAlAs 层里观察到 $E_c - 0.88\text{eV}$ 电子陷阱(浓度 $5 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$, 俘获截面 $7.3 \times 10^{-13} \text{ cm}^2$)。我们在 MOCVD 生长的 GaAs 衬底上 GaAlAs/GaAs DH 参考样品 (P-GaAs 有源层, 无质子轰击) 的 n-GaAlAs 层中也观察到 $E_c - 0.88\text{eV}$ 电子陷阱(浓度 $1.5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, 俘获截面 $\sim 10^{-14} - 10^{-15} \text{ cm}^2$)。而在 LPE 生长的 GaAlAs/GaAs DH 结构中没能观察到该陷阱^[8], 这说明 $E_c - 0.88\text{eV}$ 电子陷阱可能与 MOCVD 生长工艺有关。因此在单量子阱激光器的“少子”谱中出现的量子阱中 E1 电子陷阱 (能级位置 $E_c - 0.86 \text{ eV}$, 浓度 $2.4 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$; 俘获截面 $\sim 10^{-14} \text{ cm}^2$) 可能是 MOCVD 生长工艺引进的 $E_c -$

0.88eV 电子陷阱(浓度 $1.5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, 俘获截面 $\sim 10^{-14}-10^{-15} \text{ cm}^2$) 和质子轰击引进的位于量子阱中的深电子陷阱迭加的产物, 从 E1 深能级参数来看 MOCVD 生长工艺引进的 $E_c - 0.88\text{eV}$ 电子陷阱可能起着主导作用。而“多子”谱中由于电场效应的影响, 无法得到 GaAlAs 层中高温电子陷阱 E2 精确的信息, 本文对它不作进一步的讨论。在多量子阱激光器的“少子”和“多子”谱中随着偏压改变(从 -0.2V 到 -3.5V), 样品耗尽层由量子阱延伸到 n-GaAlAs 层, 而高温电子陷阱的能级位置则从 $E_c - 0.84\text{eV}$ 增加到 $E_c - 0.88\text{eV}$ 。由于质子轰击损伤引起的电子陷阱主要产生在质子轰击损伤层和 n-GaAlAs 限制层之间且分布不均匀, 即: 随着质子轰击深度的增加, 其浓度越小。因此在 n-GaAlAs 限制层里随着偏压的增加质子轰击损伤对样品高温电子陷阱的影响减弱, 相反地, MOCVD 生长工艺引进的电子陷阱 $E_c - 0.88\text{eV}$ 逐渐起到主导作用。单量子阱和多量子阱激光器样品中出现的高温电子陷阱(图 2 的 E1 和图 5、6 的 E6 和 E8, 它们能级位置的差别除与 MOCVD 生长工艺引进的高温电子陷阱 $E_c - 0.88\text{eV}$ 有关外, 还与质子轰击程度有关, 在单量子阱激光器中质子轰击深度离量子阱 $0.8\mu\text{m}$, 而在多量子阱激光器中则为 $0.4\mu\text{m}$ 。)由于具有较高的浓度($10^{15}-10^{16} \text{ cm}^{-3}$)、大的俘获截面($10^{-14}-10^{-15} \text{ cm}^2$), 它将影响激光器的性能, 对激光器光荧光响应的退化和高电流阈值等有直接的责任。

本文获得的电子陷阱中, 由于电场效应的影响, 无法得到 E2, E3 和 E7 精确的信息, 其原因有待于进一步研究。

2. DX 中心和高温电子陷阱在激光器量子阱中的分布

由实验结果可知, 在单量子阱和多量子阱激光器的 DLTS 谱中可以看到在较小的外加偏压 $U_R = -0.1\text{V}$ 或 -0.2V 时, DX 中心和高温电子陷阱均出现在“少子”谱中而“多子”谱却不能看到它们。可以推测 DX 中心和高温电子陷阱在空间上可能局域在量子阱里 GaAlAs/GaAs 层界面附近。进行“多子”谱扫描时, 正向脉冲只是将结偏压瞬时地减小到零, 多数载流子仍达不到界面, 不能改变这些能级上的填充状态, 从而得不到这些能级的发射信号。而做“少了”测量时, 不但有少了注入, 多了也能到达界面, 填充这些能级。

五、结 论

应用 DLTS 技术系统研究了 MOCVD 生长的硅衬底上 GaAlAs/GaAs 单量子阱和多量子阱激光器中的深能级。实验结果表明在量子阱和 n-GaAlAs 限制层里存在着一个大的浓度和俘获截面的高温电子陷阱, 它与激光器的性能有着直接的关系。DX 中心和高温电子陷阱在量子阱里可能局域在 GaAlAs/GaAs 层的界面附近。

参 考 文 献

- [1] T. H. Windham and G. M. Metze, *Appl. Phys. Lett.*, **47**, 1031(1985).
- R. Fisher et al., *Appl. Phys. Lett.*, **48**, 1360(1986).
- R. D. Dupuis et al., *Appl. Phys. Lett.*, **50**, 407(1987).
- S. Sakai, H. Shiraishi and M. Umeno, *IEEE J. Quantum Electronics*, **QE-23**, 211(1987).

- [2] 庄婉如,石志文,杨培生,梅野正義,神保孝志,曾我哲夫,半导体学报,10,12,960(1989).
- [3] G. Ferenczi, J. Boda and T. Pavelka, *Phys. Stat. Sol.*, 94, K119(1986).
- [4] D. V. Lang, *J. Appl. Phys.*, 45, 3023(1974).
- [5] D. V. Lang and R. A. Logan, *Phys. Rev. B.*, 19, 2, 1015(1979).
- [6] D. V. Lang, R. L. Hartman, and N. E. Schumaker, *J. Appl. Phys.*, 47, 11, 4986(1976).
- [7] P. A. Martin, K. Meehan, P. Gavrilovic, K. Hess, N. Holonyak, Jr. and J. J. Coleman, *J. Appl. Phys.*, 54, 8, 4689(1983).
- [8] 高季林,石志文,田慧良,余金中,鞠静丽,半导体光电,2,121(1981).

Deep Level Studies of GaAlAs/GaAs Single Quantum and Multiple Quantum Well Lasers Fabricated on Si Substrate by MOCVD

Lu Liwu Zhou Jie

(National Laboratory for Superlattices and Microstructures, Institute of Semiconductors, Academia Sinica, Beijing)

Zhuang Wanru

(Semiconductor Institute Region, Integrated Optoelectronics Laboratories of China, Institute of Semiconductors, Academia Sinica, Beijing, 100083)

M. Umeno

(Department of Electrical and Computer Engineering, Nagoya Institute of Technology, Nagoya, Japan)

Abstract

The deep levels of GaAlAs/GaAs single quantum and multiple quantum well lasers fabricated on Si substrate by MOCVD have been studied using DLTS technique. The majority and minority carrier DLTS spectra show that a deep electron trap, having larger capture cross section and concentration, is measured in the quantum well and n-GaAlAs confining layer of lasers. This deep electron trap may correlate strongly with MOCVD growth parameters and damage induced by proton-bombardment. It may be responsible for the degradation of laser performance. DX center and deep electron trap in quantum well of lasers may spatially localize in interfaces between GaAlAs/GaAs layers.

PACC: 7340L, 7360, 7155, 6865