

InGaAs/GaAs 应变层量子阱 激光器深中心行为*

卢励吾 封松林 周洁

(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)

杨国文 徐俊英

(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 100083)

郭春伟

(北京四通办公设备有限公司 北京 100091)

摘要 应用深能级瞬态谱(DLTS)技术研究分子束外延(MBE)和二次液相外延(LPE)生长的 InGaAs/GaAs 应变层量子阱激光器深中心行为. 在 MBE 激光器的 $n\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 组分缓变层和限制层里, 除众所周知的 DX 中心外, 还观察到有较大俘获截面的深(空穴、电子)陷阱及其相互转化. 这些陷阱可能分布在 x 从 0 到 0.40 和 $x=0.40$ 的 $n\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 层里 x 值不连续的界面附近. 而在 LPE 激光器的 $n\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 组分缓变层和限制层里, DX 中心浓度明显减少, 且深(空穴、电子)陷阱消失, 这表明 LPE 掩埋结构工艺可能对激光器深中心的消除或减少有一定作用. 深中心的变化与样品阈值电流密度的改善是相符的.

PACC: 6170, 7155, 7280E, 7340

1 引言

1.54 μm 掺 Er 光纤放大器具有高增益、低噪音、无偏振选择性能, 能与低损耗光纤波长匹配等特点引起人们的关注. 掺 Er 光纤放大器的提出, 为利用 1.54 μm 波长的长距离光纤通讯系统提供了一种理想、简便的中继信号放大器. 半导体激光器是这种光纤放大器理想的实用化泵浦源. 具有较高的泵浦效率和低的噪音的波长为 980nm 的半导体激光器是一种理想的泵浦源. 人们可以利用 InGaAs/GaAs 量子阱结构, 通过调整 In 组分和阱宽, 使应变层量子阱激光器的激射波长能够复盖在 0.9~1.1 μm 范围.

* 本工作得到国家集成光电子学联合实验室的资助

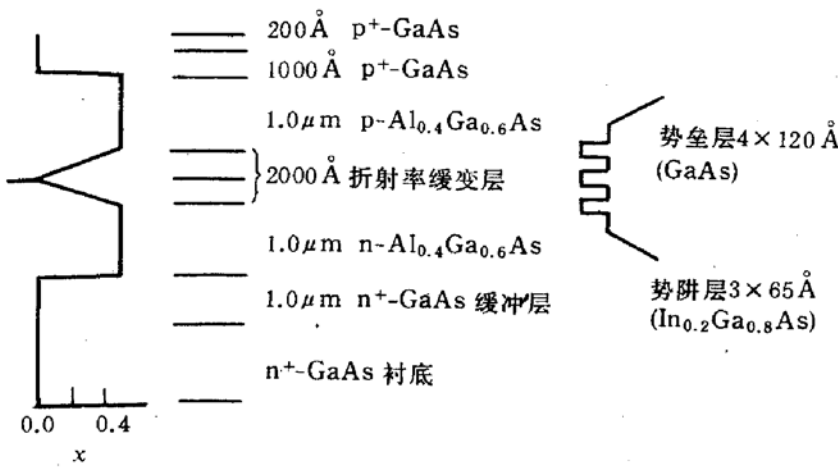
卢励吾 男, 1946 年生, 副研究员, 从事超晶格和超薄层材料杂质和缺陷的研究
1995 年 1 月 25 日收到初稿, 1995 年 6 月 7 日收到修改稿

关于 InGaAs/GaAs/AlGaAs 激光器材料的深能级,人们了解得并不多.除众所周知的 DX 中心外,近来还观察到 AlGaAs 材料里的深(空穴,电子)陷阱^[1~3].这些陷阱具有复合中心行为,影响着少数载流子器件的特性.本工作的目的是应用 DLTS 技术详细研究 InGaAs/GaAs/AlGaAs 应变量子阱激光器中深中心的电学性质,相互转化及其空间分布.

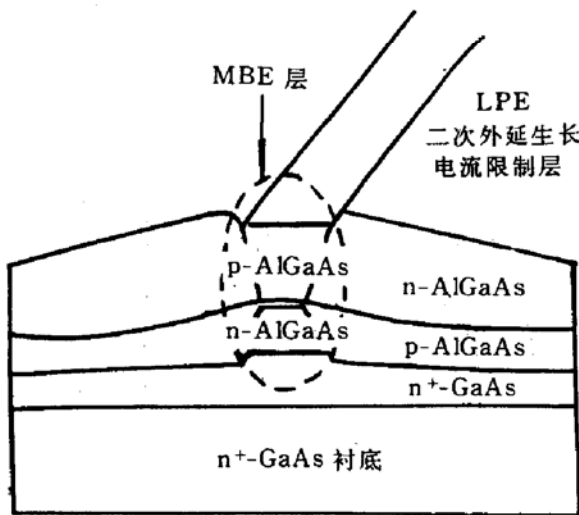
2 样品制备和实验条件

本实验所用的激光器为 InGaAs/GaAs 折射率分别限制应变多量子阱结构 (GRIN-SCH-STL-MQW) 和应变多量子阱掩埋异质结构 (GRINSCH-STL-MQW-BH). 其中

GRINSCH-STL-MQW 结构由 MBE 生长, GRINSCH-STL-MQW-BH 结构则由 MBE 和 LPE 生长. 首先,用 MBE 方法在 n^+ -GaAs (100) 衬底上生长量子阱异质结构, 生长次序为: $1\mu\text{m}$ n^+ -GaAs 缓冲层, $1\mu\text{m}$ $n\text{-Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$ 下限制层 ($n=5\times 10^{17}\text{cm}^{-3}$), 不故意掺杂的 $0.1\mu\text{m}$ $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 组分缓变层 (x 从 0.4 到 0, 浓度为 10^{15}cm^{-3} 左右), 应变量子阱有源区 (非掺), 其结构为: 阱和垒材料分别为 $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ 和 GaAs, 阱宽 65\AA , 垒宽 120\AA , 共有三个阱. 不故意掺杂的 $0.1\mu\text{m}$ $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 组分缓变层 (x 从 0 到 0.4, 浓度为 10^{15}cm^{-3} 左右), $1\mu\text{m}$ $p\text{-Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$ 上限制层 ($p=5\times 10^{17}\text{cm}^{-3}$), $0.1\mu\text{m}$ p^+ -GaAs 顶层 ($p=1\times 10^{19}\text{cm}^{-3}$) 和 200\AA p^+ -GaAs 欧姆接触层. GRINSCH-STL-MQW 结构和 LPE 的 BH 结构如图 1 所示.



(a) MBE 生长的 GRINSCH-STL-MQW 结构



(b) LPE 生长的 BH 结构

图 1 InGaAs/GaAs 应变层量子阱激光器结构示意图

MBE 生长之后,在衬底上化学腐蚀出台阶,有源区宽度为 $2\sim 3.5\mu\text{m}$. 然后进行二次液相外延生长. 再生长温度为 780°C , 依次生长 $p\text{-Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$ ($p=5\times 10^{17}\text{cm}^{-3}$) 和 $n\text{-Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$ ($n=5\times 10^{17}\text{cm}^{-3}$) 电流

限制层. 之后制备 BH 激光器^[4].

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里的深能级. DLTS 测量的温度范围为 77~380K. 测量的灵敏度为 $\Delta C/C \sim 10^{-5}$. 采用温度和频率扫描两种途径, 并通过 Arrhenius plot 验证有关深中心位置^[5]. 而深中心的俘获截面则通过改变样品上所加的脉冲宽度来获得.

3 实验结果

3.1 InGaAs/GaAs GRINSCH-STL-MQW 激光器

图 2 为典型的少数载流子注入的 DLTS 谱图. 由图 2 可以在样品的 DLTS 低温区观察到一个主要的峰 E_1 电子陷阱. E_1 能级位置在导带下的 0.30eV. 除此之外在曲线 1~6 样品的 DLTS 高温区有一明显的深空穴陷阱 H_1 出现. H_1 能级位置由曲线 1 的 $E_v + 0.56eV$ 逐渐增加到曲线 6 的 $E_v + 0.90eV$.

在曲线 7~9 样品的 DLTS 高温区里, H_1 消失了, 代之的是 E_2 深电子陷阱, 其能级位置为导带下的 0.85eV. E_1 、 E_2 和 H_1 能级位置、浓度和俘获截面如表 1 所示.

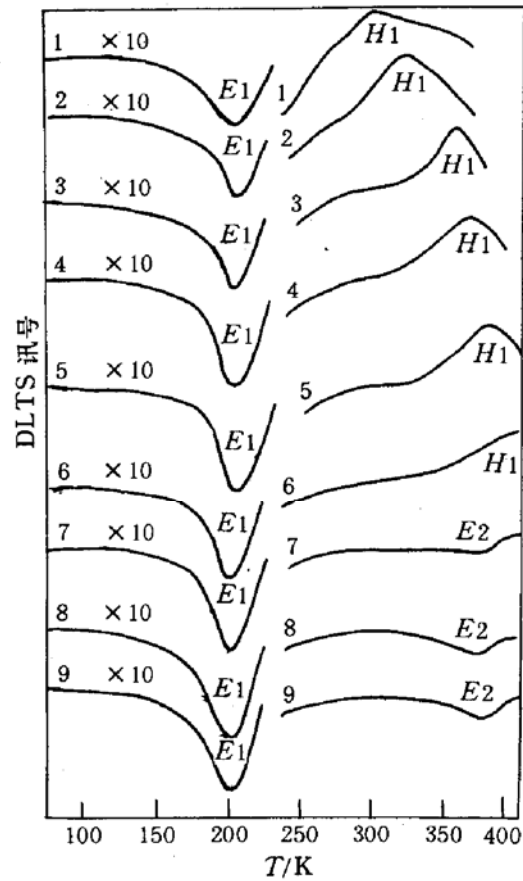


图 2 少数注入的 DLTS 谱

曲线 1: $U_R = -0.01V, U_1 = 0.8V$; 曲线 2: $U_R = -0.2V, U_1 = 0.8V$; 曲线 3: $U_R = -0.4V, U_1 = 0.8V$; 曲线 4: $U_R = -0.5V, U_1 = 0.8V$; 曲线 5: $U_R = -0.6V, U_1 = 0.8V$; 曲线 6: $U_R = -0.7V, U_1 = 0.8V$; 曲线 7: $U_R = -0.8V, U_1 = 0.8V$; 曲线 8: $U_R = -1.2V, U_1 = 0.8V$; 曲线 9: $U_R = -1.5V, U_1 = 0.8V; f = 260Hz$.

表 1

U_R/V	$E_1(E_c - 0.30eV)$		H_1			$E_2(E_c - 0.85eV)$	
	N_T/cm^{-3}	σ/cm^2	$E_T - E_v/eV$	N_T/cm^{-3}	σ/cm^2	N_T/cm^{-3}	σ/cm^2
-0.01	2×10^{15}		0.56	2.0×10^{14}		/	/
-0.2	2.1×10^{15}		0.62	2.1×10^{14}		/	/
-0.4	2.4×10^{15}		0.75	2.1×10^{14}		/	/
-0.5	2.5×10^{15}		0.80	2.0×10^{14}	3.0×10^{-14}	/	/
-0.6	2.5×10^{15}	$< 10^{-19}$	0.85	1.9×10^{14}		/	/
-0.7	2.5×10^{15}		0.90	1.8×10^{14}		/	/
-0.8	2.6×10^{15}		/	/		4.0×10^{13}	/
-1.2	2.6×10^{15}		/	/		6.0×10^{13}	$\sim 10^{-15}$
-1.5	2.6×10^{15}		/	/		8.0×10^{13}	

有关文献表明^[6]在 AlGaAs 样品里能观察到与 E_1 相似的低温峰. 把 E_1 的能级位置和

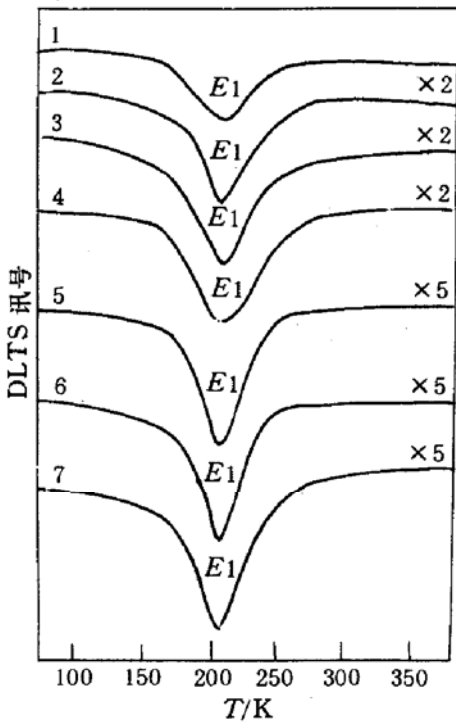


图3 多子注入的 DLTS 谱

曲线 1: $U_R = -0.2V, U_1 = 0V$;

曲线 2: $U_R = -0.4V, U_1 = 0V$;

曲线 3: $U_R = -0.5V, U_1 = 0V$;

曲线 4: $U_R = -0.7V, U_1 = 0V$;

曲线 5: $U_R = -1.2V, U_1 = 0V$;

曲线 6: $U_R = -1.5V, U_1 = 0V$;

曲线 7: $U_R = -2V, U_1 = 0V; f = 260Hz$.

与图 2 中出现的 $E1$ 陷阱相似这个事实,可以初步认为图 2 和图 3 分别观察到的 $E1$ 电子陷阱可能属于同一类型的缺陷,即 AlGaAs 材料中与 VI 族杂质有关的 DX 中心^[7]. 表 1, 2 还表明多子谱获得的 $E1$ 陷阱浓度明显小于少子谱的 $E1$ 陷阱.

表 2

U_R/V	$E1(E_c - 0.30eV)$	
	N_T/cm^{-3}	σ/cm^2
-0.2	2.0×10^{14}	$< 10^{-19}$
-0.4	4.8×10^{14}	
-0.5	5.2×10^{14}	
-0.7	7.0×10^{14}	
-1.2	1.2×10^{15}	
-1.5	1.3×10^{15}	
-2.0	1.4×10^{15}	

3.2 InGaAs/GaAs GRINSCH-STL-MQW-BH 激光器

图 4 为典型的少数载流子注入的 DLTS 谱图. 由图 4 可观察到 $H2$ 、 $H3$ 空穴陷阱和 $E3$ 电子陷阱. 它们的能级位置分别位于价带上的 $0.20eV$ ($H2$), $0.30eV$ ($H3$) 和导带下的 $0.22eV$ ($E3$). 在曲线 1~3 中出现的 $H2$ 陷阱, 在曲线 4~6 中却消失了, 代之的是 $E3$ 陷阱, 而 $H3$ 陷阱在曲线 1~6 中却一直存在. $H2$ 、 $H3$ 和 $E3$ 陷阱浓度和俘获截面数值可见表 3 所示.

俘获截面同已发表的数据相比较^[7], 可以认为 $E1$ ($0.30eV$) 可能是与 VI 族施主杂质有关的 DX 中心. 当外加偏压 $U_R = 0V$ 时, 由于样品自身的结构 (p 型区和 n 型区浓度相当) 和自建势的存在, 空间耗尽层可能已越过 $In_{0.2}Ga_{0.8}As/GaAs$ 量子阱区, 进入上、下不故意掺杂的 $0.1\mu m$ AlGaAs 组分缓变层. 随着 U_R 的增加, 它可能逐渐进入 AlGaAs 限制层. 由表 1 可看到 $E1$ 陷阱浓度起初随反向偏压缓慢增加, 随后则基本保持不变. 这与 Lang 的 DX 中心浓度随 x 值的增加而增加 (x 从 0.22 到 0.43) 的结论相一致^[8]. $E1$ 的出现及其浓度变化的规律反映在一定反偏下, 其耗尽层已进入 AlGaAs 组分缓变层和限制层. 表 1 和图 2 还表明, $H1$ 浓度基本不随反向偏压的改变而变化, 但其能级位置则从 $E_v + 0.56eV$ 逐渐改变到 $E_v + 0.90eV$. 而 $E2$ 深电子陷阱则相反, 能级位置 ($E_c - 0.85eV$) 基本不变, 而浓度则有所增加.

图 3 为典型的多数载流子注入的 DLTS 谱图. 从图 3 的曲线 1~7 可明显观察到 $E1$ ($E_c - 0.30eV$) 电子陷阱的存在. 表 2 列出了 $E1$ 陷阱的浓度和俘获截面数值. 从 $E1$ 电学参数 (能级位置 $E_c - 0.30eV$ 和俘获截面 $< 10^{-19}cm^2$)

表 3

U_R/V	$H2(E_V+0.20eV)$		$H3(E_V+0.30eV)$		$E3(E_C-0.22eV)$	
	N_T/cm^{-3}	σ/cm^2	N_T/cm^{-3}	N_T/cm^{-3}	N_T/cm^{-3}	σ/cm^2
-0.02	2×10^{14}		6×10^{14}		/	/
-0.4	1×10^{14}	$< 10^{-19}$	5×10^{14}		/	/
-0.6	8×10^{13}		4×10^{14}		/	/
-1	/	/	3×10^{14}	$< 10^{-19}$	2×10^{14}	
-1.5	/	/	3×10^{14}		3×10^{14}	$< 10^{-15}$
-2	/	/	3×10^{14}		2×10^{14}	

图 5 为典型的多数载流子注入的 DLTS 谱图. 在图 5 的曲线 1~2 中, 没有任何明显的缺陷能级被观察到(其浓度小于该 DLTS 仪器的探测灵敏度 $\Delta C/C \sim 10^{-5}$, 对本样品来说即 $< 10^{12} cm^{-3}$). 而在曲线 3~5 中样品反向偏压在 $U_R = -1, -1.5, -2V$ 的情况下可观察到 $E3$ 缺陷能级的存在. $E3$ 能级位置在导带下的 $0.22eV$. 其浓度则随反向偏压的增加从 $1 \times 10^{14} cm^{-3}$ ($-1V$), $1.5 \times 10^{14} cm^{-3}$ ($-1.5V$) 增加到 $1.8 \times 10^{14} cm^{-3}$ ($-2V$). $E3$ 的俘获截面小于 $10^{-15} cm^2$. 从图 4 和图 5 分别观察到的 $E3$ 缺陷电学参数相近的事实可初步认为 $E3$ 可能属于同一类型的缺陷.

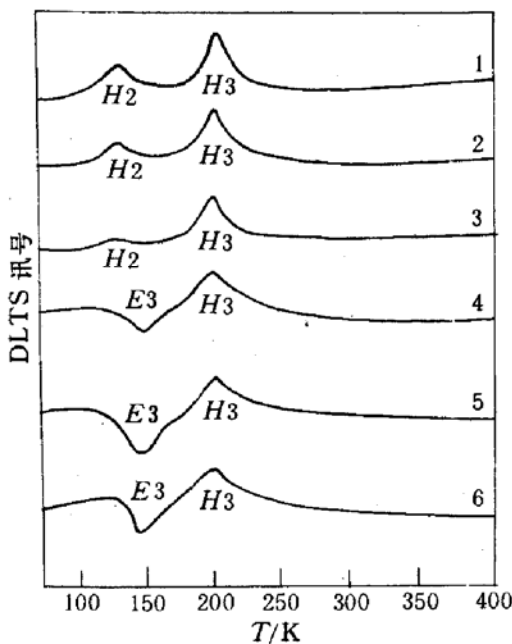


图 4 少子注入的 DLTS 谱
 曲线 1: $U_R = -0.02V, U_1 = 0.8V$;
 曲线 2: $U_R = -0.4V, U_1 = 0.8V$;
 曲线 3: $U_R = -0.6V, U_1 = 0.8V$;
 曲线 4: $U_R = -1V, U_1 = 0.8V$;
 曲线 5: $U_R = -1.5V, U_1 = 0.8V$;
 曲线 6: $U_R = -2V, U_1 = 0.8V; f = 260Hz$.

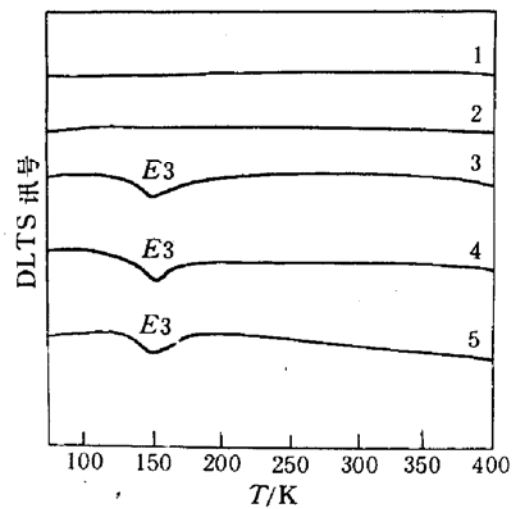


图 5 多子注入 DLTS 谱
 曲线 1: $U_R = -0.1V, U_1 = 0V$;
 曲线 2: $U_R = -0.4V, U_1 = 0V$;
 曲线 3: $U_R = -1V, U_1 = 0V$;
 曲线 4: $U_R = -1.5V, U_1 = 0V$;
 曲线 5: $U_R = -2V, U_1 = 0V; f = 260Hz$.

4 讨论

4.1 InGaAs/GaAs GRINSCH-STL-MQW 激光器

在 DLTS 的多子和少子谱中均可观察到 $E1$ 电子陷阱. 把 $E1$ 能级的 Arrbenius plots

同已发表的数据相比较,可认为 $E1$ 是与Ⅵ族施主杂质有关的 DX 中心. 随着反向偏压 U_R 增加,空间耗尽层则越过 InGaAs/GaAs 量子阱区进入 $Al_x Ga_{1-x} As$ 组分缓变层(x 从 0 到 0.40 和 x 从 0.40 到 0). 在少子谱中 $E1$ 浓度从 $2.0 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$ 增加到 $2.6 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$,而在多子谱中, $E1$ 则从 $2.0 \times 10^{14} \text{cm}^{-3}$ 增加到 $1.4 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$. 这与 Lang 关于 DX 中心浓度随 x (从 0.22 到 0.43) 增加而增加的结论是一致的^[8]. 我们也注意到这样一个事实:多子和少子谱中 $E1$ 浓度有明显的不同,且少子谱中的 $E1$ 浓度明显高于多子谱. 这表明 $E1$ 在空间上可能部分局域在 $n-Al_x Ga_{1-x} As$ (x 从 0 到 0.40) 层里 x 值不连续的界面附近. 因为进行多子谱扫描时,正向脉冲只是将结偏压瞬时减小到零,多子仍达不到界面,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. 而做少子谱测量时,不但有少子注入,多子也能到达界面,填充这些能级. 与多子谱不同在 $U_R = -0.01 \text{V}$ 的少子谱中空穴陷阱 $H1$ 出现,随着 U_R 的增加, $H1$ 浓度逐渐减小. 当 $U_R = -0.8 \text{V}$ 时 $H1$ 消失, $E2$ 出现,而 $E2$ 浓度则随反向偏压增大而增加. $H1$ 、 $E2$ 仅在少子谱中出现而不在多子谱里产生表明 $H1$ 和 $E2$ 在空间上可能局域在 $Al_x Ga_{1-x} As$ (x 从 0 到 0.40 和 $x=0.40$) 层里 x 值不连续的界面附近. Al-GaAs 缓变层和限制层里较大浓度的 $E1$ (DX 中心) 和较大俘获截面的 $H1$ 和 $E2$ 深陷阱的存在影响着激光器的有关电学参数. 激光器特性测试结果表明样品的阈值电流密度 $J_{th} \sim 1200 \text{A/cm}^2$.

4.2 InGaAs/GaAs GRINSCH-STL-MQW-BH 激光器

$H2$ 、 $H3$ 空穴陷阱仅在少子谱而不在多子谱中出现,能在低温热激发且俘获截面很小等特点,这些符合 Lang 所论述的 DX 中心特有性质^[8]. 这说明 $H2$ 和 $H3$ 可能是激光器是 AlGaAs 的特殊缺陷 DX 中心的 DLTS 少子谱中的反映. $H2$ 、 $H3$ 陷阱空间上则可能局域在 $Al_x Ga_{1-x} As$ (x 从 0 到 0.40 和 x 到 0.40) 层里 x 值不连续的界面附近. $H2$ 、 $H3$ 浓度小于 InGaAs/GaAs GRINSCH-STL-MQW 激光器里观察到的 DX 中心浓度(约小于一个数量级). 另外在 InGaAs/GaAs GRINSCH-STL-MQW 激光器少子谱中出现的深空穴($H1$)和深电子($E2$)陷阱,在此都消失了. 在反向偏压 $U_R = -1 \text{V}$ 的少子谱中 $H2$ 消失, $E2$ ($E_c - 0.22 \text{eV}$) 陷阱出现,与此同时该陷阱在 $U_R = -1 \text{V}$ 的多子谱中也观察到. $E3$ 同时多子谱和少子谱中出现表明 $E3$ 在空间上可能分布在 $Al_x Ga_{1-x} As$ (x 从 0 到 0.40 和 $x=0.40$) 层里. $E3$ 陷阱产生的原因目前还不清楚,有可能与 $H2$ 陷阱和 BH 工艺相互作用有关. 深(空穴、电子)陷阱 $H1$ 、 $E2$ 的消失, $E1$ (DX 中心) 浓度的降低,这些深中心的变化表明二次液相外延生长工艺(相当于对 GRINSCH-STL-MQW 激光器结构进行 780°C 、2 小时的热处理)可能是其变化的原因之一. 深中心的变化影响着激光器有关电学参数. 激光器特性测试结果表明样品的阈值电流密度 $J_{th} \sim 350 \text{A/cm}^2$. 比前者下降了约 3~4 倍.

5 结论

应用 DLTS 技术详细研究了 InGaAs/GaAs 应变层量子阱激光器里深中心. 结果表明在 InGaAs/GaAs GRINSCH-STL-MQW 激光器观察到较大浓度的 $E1$ (DX 中心) 和较大俘获截面的 $H1$ 和 $E2$ 深(空穴、电子)陷阱及其相互转化. 在 InGaAs/GaAs GRINSCH-STL-MQW-BH 激光器却观察不到 $H1$ 和 $E2$ 深陷阱是 $E1$ (DX 中心) 浓度大为降低,这些变化可能与二次液相外延的掩埋异质结构工艺有关,它改善了激光器的电学参数.

参 考 文 献

- [1] 卢励吾,周洁,庄婉如,等,半导体学报,1992,13:155~161.
 [2] 卢励吾,周洁,梁基本,孔梅影,物理学报,1993,42:817~823.
 [3] 卢励吾,周洁,徐俊英,等,物理学报,1993,42:66~71.
 [4] 肖建伟,徐俊英,杨国文,等,半导体学报,1992,13:258~261.
 [5] G. Ferenczi, J. Boda and T. Pavelka, Phys. Stat. Sol., 1986, 94:K119.
 [6] T. Hashizume, H. Hasegawa and O. Ohno, J. Appl. Phys., 1990, 66:3394~3400.
 [7] O. Kumagai, H. Kawai, Y. Mori and K. Kaneko, Appl. Phys. Lett., 1984, 45: 1322~1325.
 [8] D. V. Lang and R. A. Logan, Phys. Rev., 1979, B19:1015.

Behaviour of Deep Centers in InGaAs/GaAs Strained Layer Quantum Well Lasers

Lu Liwu, Feng Songlin and Zhou Jie

*(National Laboratory for Superlattices and Microstructures,
Institute of Semiconductors, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083)*

Yang Guowen and Xu Junying

*(Semiconductors Institute Region, Integrated Optoelectronic Laboratory,
Institute of Semiconductors, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083)*

Guo Chunwei

(Beijing Stone Office Equipment Technology Co. Ltd., Beijing 100097)

Received 25 January 1995, revised manuscript received 6 June 1995

Abstract The behaviour of deep centers in InGaAs/GaAs GRINSCH-STL-MQW lasers grown by MBE and InGaAs/GaAs GRINSCH-STL-MQW-BH lasers grown by MBE and LPE have been studied by using DLTS technique, respectively. In the former, DLTS spectra detect deep levels, having larger capture cross-sections and concentrations in Al-GaAs graded layer and confining layer of lasers, in addition to the well-known DX center. These traps may spatially localize in the interface regions of discontinuous variation Al mole fraction of $n\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ layers with x from 0 to 0.40 and $x=0.40$. In the latter, DLTS spectra show that deep (hole, electron) traps disappear and the concentration of DX center is reduced in AlGaAs graded layer and confining layer of lasers. This fact shows that LPE buried heterostructure technique can annihilate or reduce the deep centers of InGaAs/GaAs strained layer quantum well lasers.

PACC: 6170, 7155, 7280E, 7340C