

(Ga,Al)As/GaAs 及 GaInAsP/InP 激光器中的深能级

高季林 吴荣汉 李照银 高淑芬

(中国科学院半导体研究所)

1984年2月24日收到

采用深能级瞬态谱技术(DLTS),测定了用水平液相外延法生长的四层结构 $\text{Ga}_{0.74}\text{Al}_{0.26}\text{As}/\text{GaAs}$, $\text{Ga}_{0.26}\text{In}_{0.74}\text{As}_{0.6}\text{P}_{0.4}/\text{InP}$ 宽接触及质子轰击条形双异质结激光器中的深能级,对于这些深能级所引起的激光器退化问题进行了初步研究和讨论。

一、引言

在条形激光器制备中,质子轰击是一种简便易行的方法。它可以较好地对注入电流进行横向限制,从而使激射阈电流降低。但是,质子轰击的这种限制作用是基于质子对晶体结构的破坏,它不可避免地在半导体中引起缺陷深能级。由于这些高浓度深中心的强烈补偿作用,在激光器有源层及相邻层两侧形成高阻横向电流限制区,从而降低阈值电流。可以推想,即使激光器是大注入电流器件,这些深中心也应对器件的激射特性,特别是激光器的退化起作用^[1-3]。近年来,对(Ga,Al)As/GaAs材料及激光器的深能级问题,已有不少作者进行了研究^[4-6]。但对于GaInAsP/InP的报道不多^[5-8],特别是质子轰击深能级研究更是如此。我们的实验表明:对于四元系体材料,采用DLTS方法,不易测出具有一定浓度的深中心,但质子轰击却产生为数较多,具有峰貌展宽的多子及少子陷阱;对于三元系,则存在浓度较高的深中心,这些深中心以及质子轰击所引起的新的深中心影响激光器的退化。

二、测量设备及样品制备

我们使用自制的DLTS设备,采用锁相模式进行测量。电容分辨率可达 $5 \times 10^{-14} \text{ Pf}$ 。响应时间约为0.2ms,最快率窗为 $5 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$,测量温度范围为80—400 K。为了某些对照实验,也采用了导纳谱技术^[9],对部分样品中的多数载流子能级进行了测量,测量温度范围15—350 K。

采用一般水平液相外延法(LPE)生长多层激光器,两种异质材料对的激光器标准层次及载流子浓度参数如图1所示。对于四元系, $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ ($x = 0.26$, $y = 0.6$, 对应 $E_g = 0.95 \text{ eV}$),有源层未故意掺杂,在生长过程中,由于Zn从p-InP限制层向四元层扩散,有源层变为P型。从一般C-V及电化学C-V测量表明有源层空穴浓度为(1.5—

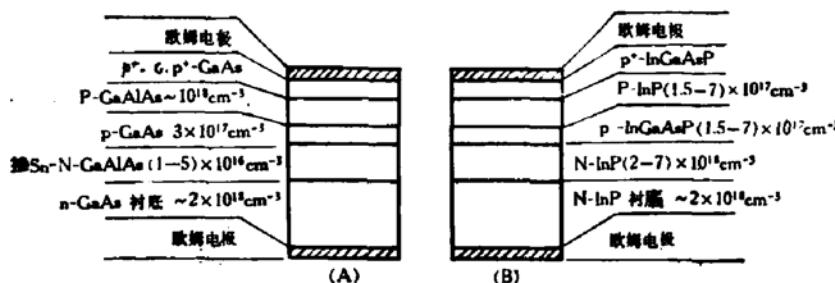


图 1 样品结构及掺杂参数
(A) $(\text{Al}, \text{Ga})\text{As}$ 三元系, (B) InGaAsP 四元系

$7) \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$. 两种激光器的 P-N 结空间电荷区主要存在于 $p\text{-InGaAsP}$ 及 $N\text{-GaAlAs}$ 层。四元系激光器质子轰击能量为 150—300 keV, 轰击剂量为 5×10^{14} — $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$; 对三元系, 为 400 keV, $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$. 从扫描电镜观察及单层材料肖特基结测量分析表明: 所测样品的质子轰击区别在于 $N\text{-GaAlAs}$ 或 $p\text{-InGaAsP}$ 层, 因此, 本文所给测量结果均对 $N\text{-GaAlAs}$ 及 $p\text{-InGaAsP}$ 而言。为比较起见, 也对原始生长的宽接触样品进行了测量。

如前所述, 由于整个结构中含有轰击破坏形成的半绝缘层 (其电阻率约为 10^3 — $10^8 \Omega \cdot \text{cm}$)。就电容而言, 等效于在一般 PN 结上附加一个数值较小的 MIS 电容, 具有分布不均匀的电容值; 在靠近电流区边缘, 其值较大。相对而言, DLTS 方法对于高阻样品的测量是困难的^[2], 因此, 探测到的新生成能级主要来源于电流区与限制区的交界层。这样, 确定质子轰击引起的深能级浓度是较为困难的。但是, 对于激光器限制区而言, 我们所需的正是其高浓度深能级补偿, 因此, 主要的兴趣是确定能级的位置及能级参数诸如俘获截面等而不是深能级浓度。至于在研究激光器退化中的浓度变化, 则具有相对的含意。

三、实验结果和讨论

(1) 对外延生长后未经轰击处理的宽接触四元激光器 $\text{GaInAsP}/\text{InP}$, 在 80—400 K 测量温度范围, 未测出任何深能级 (所用最快率窗时间常数 $t = 500 \mu\text{s}$)。这表明外延材料 $p\text{-InGaAsP}$ 的深中心浓度低于 10^{14} cm^{-3} , 与文献 [7] 的报道一致, 与文献 [5, 6, 8] 不同。也说明所用材料晶格匹配良好 (从双晶衍射实验也证明此点), 不致因晶格失配而引起如 [6] 所述的高浓度深中心。

为对照 DLTS 实验结果, 将相同器件进行了导纳谱对比测量 (温度范围 15—350 K), 其多子陷阱结果和 DLTS 结果一致。

(2) 在质子轰击条形四元激光器 $\text{GaInAsP}/\text{InP}$ 中, 电子及空穴能级如图 2 所示。这些能级的外推俘获截面值 σ_{∞} 都较大 ($> 10^{-17} \text{ cm}^2$), 并且, 类同于电子辐照产生的缺陷^[7]; 发射谱峰很宽, 如图 3 中的 HL0, HL1, HL2, HL3, 并且, 有的能级的发射峰位置随注入宽度而移动 (我们按注入脉冲宽度为 $20 \mu\text{s}$ 时的峰位来定义能级位置), 例如 EL1 等。这说明这些能级具有复杂的特性, 也可能是若干能级的叠加。参照 1 MeV 电子轰击的结果^[7] HL1 ($E_e + E_h = 0.38 \text{ eV}$) 可能与 [7] 中的 H2 能级对应。

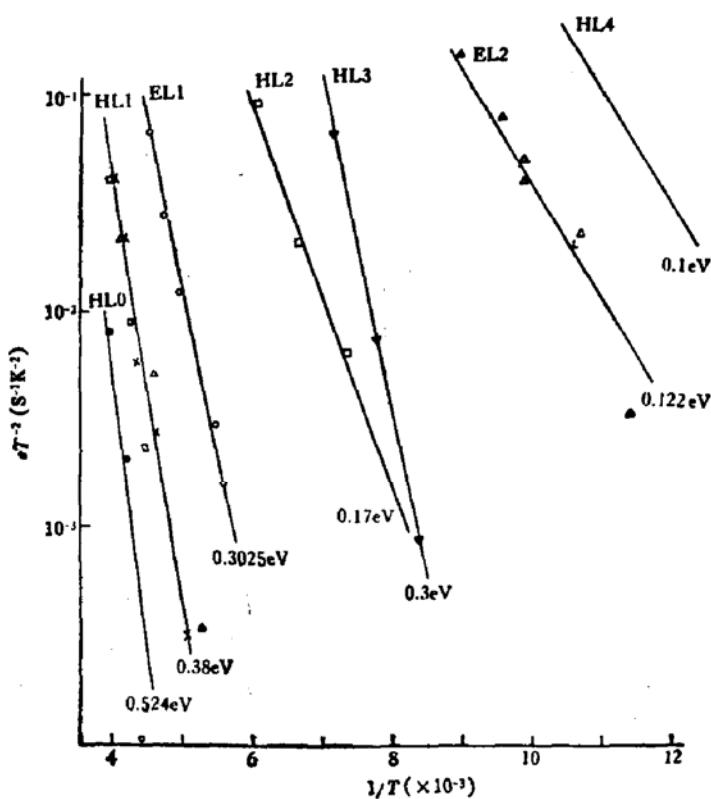


图 2 质子轰击在四元系激光器中产生的缺陷能级

(3) $\text{Ga}_{0.7}\text{Al}_{0.3}\text{As}$ 体材料中的深能级已有较多的研究^[2-4]。在我们的实验中, 典型 DLTS 谱如图 4 所示, LE_1 对应于 N-GaAlAs (Sn) 中特有的 DX 能级^[1], LH_1 对应于 [4] 中的 LH_1 能级 ($E_T + E_V = 0.15\text{eV}$), 而 LE_2 ($E_c - E_i = 0.37\text{eV}$) 也是常在 GaAlAs 中出现的, 但其来源, 以前并没有深入研究, 我们的单层 $\text{Ga}_{0.7}\text{Al}_{0.3}\text{As}$ 生长实验表明, 随着外延过程中氧含量的增加, 该能级浓度也相应增加, 如图 5 所示。因此, 它是一个与氧有关的能级。

(4) 图 4 给出质子轰击的 GaAlAs/GaAs 的 DLTS 谱, 新出现的能级为: (a) $E_c - E_i = 0.89\text{eV}$, 这与 [2] 所得结果一致。可以认为它是质子轰击引起的 GaAlAs 的特征能级, 具有复合增强缺陷特性^[2], 我们的结果也表明该能级对激射阈电流密度和退化有较大的影响, (b) 在某些样品中, 存在有只在少子谱上才能发现的 LE_D ($E_c - E_i = 0.5\text{eV}$) 多子能级。并且随器件的劣化, 该能级浓度增加, 但在多子谱上仍探测不到, 这说明 LE_D 定域于界面区域, 与界面性质有一定联系^[10], 也不因浓度的增加而改变。 (c) 质子轰击造成 LH_1 展宽, 并出现难以区分的新能级, 它对应于 [4] 文中所述的决定长寿命退化的 LH_2 ($E_T + E_V = 0.24\text{eV}$)。但 [4] 中所用为平面条形器件, 没有质子轰击处理, 因此, 质子轰击可引起该能级, 说明这个能级至少应与缺陷有关。

(5) 对于 GaAlAs/GaAs 激光器, 随着老化时间的增加, 上述各能级浓度均有所增加。图 6 给出追踪老化实验过程中 LE_2 , LE_4 测量结果, 器件选自同一生长片。经过数百小时的老化 (老化温度 80°C), LE_4 具有饱和趋势, LE_2 的浓度因器件寿命的夭折而大为增加, 联系于生长过程中氧含量对该能级的影响, LE_2 应是一个与氧有关的结构缺陷, 器件退化与之有较大联系 (器件外推室温工作寿命在 $(2-4) \times 10^4$ 小时范围)。

比较三元系及四元系激光器材料,可以认为:原始生长的未经轰击的材料,从深能级角度考虑,对于用 DLTS 及导纳谱方法所敏感的深能级而言,四元系材料优于三元系材料。由于 GaAlAs/GaAs 材料制备中固有的晶格失配及难于控制的氧化沾污等问题,使该材料存在浓度较高的本底深能级,它将不可避免地影响器件原始材料的质量,最终影响激光器的使用寿命^[1,2,4]。而

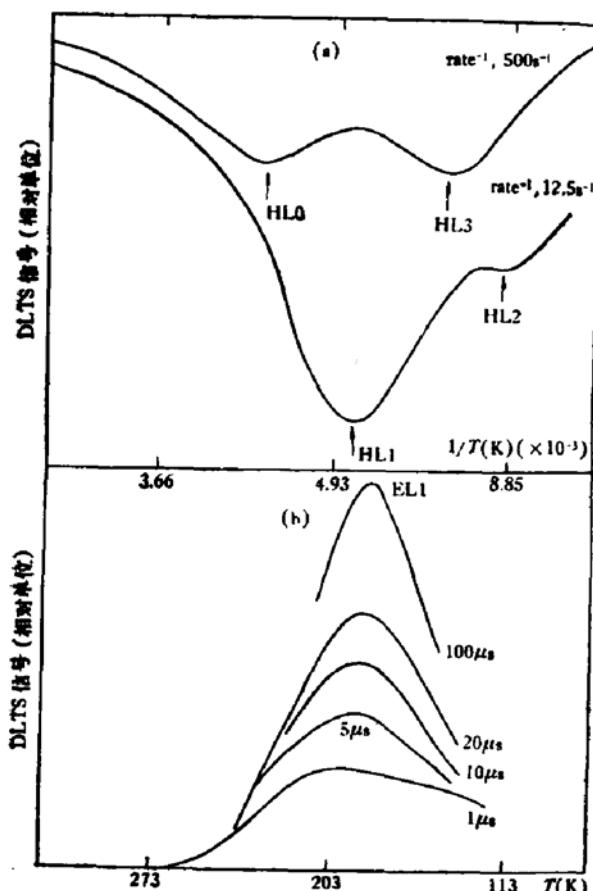


图 3 (a) 质子轰击在四元系激光器中产生的深能级的 DLTS 谱 (b) 电子能级 EL_1 的 DLTS 谱峰随注入脉冲宽度的变化

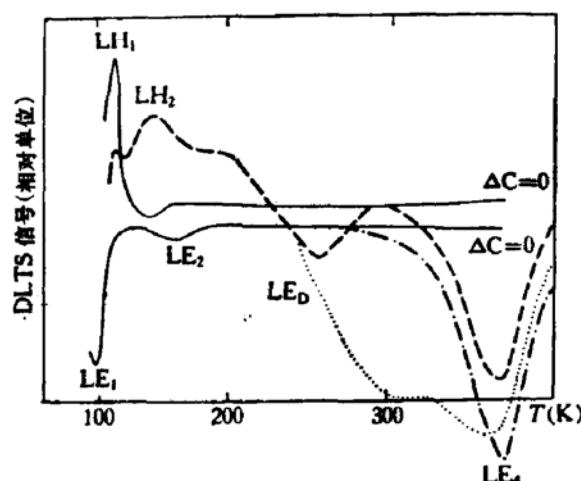


图 4 GaAs/GaAlAs 激光器中深能级的 DLTS 谱
——宽接触 ---质子轰击后(少子谱)
……200hr cw 不再激射(少子谱)

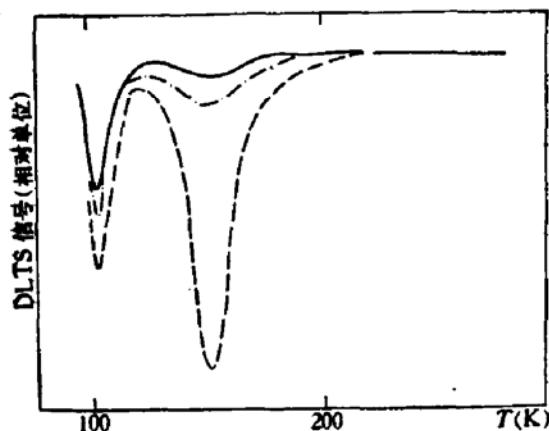


图 5 外延生长过程中氢气氛内氧含量对 EL_1 能级浓度的影响,图中的 DLTS 谱是从 N-(Al, Ga)As 外延层中测到的,用肖特基结。图中实线及点划线氧含量 0.2 ppm,虚线氧含量达 0.8 ppm。

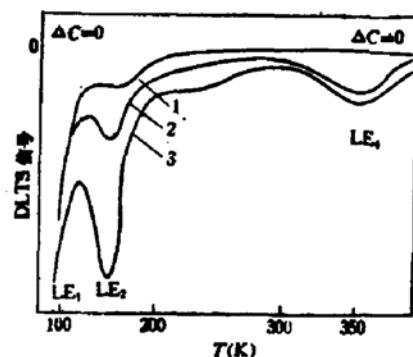


图 6 追踪老化过程中,三元系激光器向 EL_1 , EL_4 能级浓度的变化:①老化前(器件 1, 2) $\Delta C/C \approx 0.2\%$ ② $80^\circ\text{C} \times 500$ 小时(器件 1)无明显衰退 ③ $80^\circ\text{C} \times 360$ 小时(器件 2)老化后器件已失效。

在四元系 GaInAsP/InP 生长中,晶格匹配有自调节作用,输运气体中的不纯物(例如氧等)对生长的影响不如 GaAlAs/GaAs 明显,这些都可能是四元激光器易于长期工作的原因。但两种材料受质子轰击都引起较多的晶格缺陷,特别是四元系 GaInAsP/InP,能级状态更

为复杂。无论这些缺陷的本质如何(如空位、填隙、络合物等),都可能形成复合中心。并且,有些能级在室温下,当电子空穴复合时,还具有可移动特性^[9],这些因素对于激光器的长期工作都是不利的。

联系于激光器退化的深能级问题是复杂的,我们的初步工作也说明此点。各方面的说法也很不一致,但从非辐射复合的角度,从载流子与晶格的相互作用等方面来考虑,长期工作的激光器退化终究不能不与这些体内深能级有关。

在本工作中,得到本所七室激光器件研制组许多同志以及阮圣央、周洁等同志的支持和帮助,在此表示深深的谢意。

参 考 文 献

- [1] I. Hayashi, Proceedings of the 15th Conference on the Physics of Semiconductors. Kyoto. Sept. 1980; *J. Phys. Soc. Jpn.*, **49**, Supplement A, 39(1980).
- [2] D. V. Lang, R. L. Hartman and N. E. Schumaker, *J. Appl. Phys.*, **47**, 4986(1976).
- [3] T. Uji, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **17**, 729(1978).
- [4] T. Uji *et al.*, *Appl. Phys. Letters*, **36**, 655(1980).
- [5] Y. Sasai, Y. Yamazoe, M. Okuyama, T. Nishino and Hamakawa, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **18**, 1415(1979).
- [6] Shirafuji, A. Tamura, M. Inoue and Inuishi, *J. Appl. Phys.*, **52**, 4704(1981).
- [7] M. Levinson and H. Jemkin, *Appl. Phys. Letters*, **42**, 604(1983).
- [8] P. K. Bhattacharya *et al.*, *Electronics Letters*, **15**, 753(1979).
- [9] D. V. Lang and R. A. Logan, *Inst. Phys. Conf. Ser.*, **43**, 433(1979).
- [10] 林世鸣,王启明,杜宝勋,石忠诚,高季林,半导体学报, **3**, 175(1982).

Deep Levels in (Ga, Al)As/GaAs and GaInAsP/InP Lasers

Gao Jilin, Wu Ronghan, Li Zhaoyin and Gao Shufen

(Institute of Semiconductors, Academia Sinica)

Abstract

By use of Deep Level Transient Spectroscopy (DLTS), the deep levels in (Ga, Al)As/GaAs and GaInAsP/InP lasers with broad and proton-bombarded stripe contacts have been detected. The laser wafers with four layers are grown by LPE technique. A preliminary discussion is given to the laser degradation caused by these deep levels.