

浅杂质注入 LEC 半绝缘 GaAs

γ 射线辐照缺陷*

陈开茅 金泗轩

(北京大学物理系, 北京 100871)

邱素娟 吕云安 何梅芬

(电子工业部第十三研究所, 石家庄 050051)

兰 李 桥

(北京师范大学低能核物理研究所, 北京 100875)

(1993 年 9 月 15 日收到)

用深能级瞬态谱 (DLTS) 和恒温电容瞬态等技术研究了浅杂质注入 LEC 半绝缘 GaAs 的 γ 射线辐照缺陷。在 Be-Si 共注的 LEC 半绝缘 GaAs 中, γ 射线辐照引入一电子陷阱 E_1 , 并且大大增强了原有的 $E_{01}(0.298)$ 和 $E_{02}(0.341)$ 等缺陷, 同时明显地瓦解了原有的少子陷阱 H_{03} 。在单纯注 Si 的 LEC 半绝缘 GaAs 中, γ 射线辐照引进了 $E'_{01}(0.216)$, $E'_{02}(0.341)$, E'_1 , E'_2 和 $E'_3(0.608)$ 等缺陷。其中 E_{01} 和 E'_{01} 是新发现的和 γ 辐照有关的 GaAs 缺陷。和低阻衬底同质外延 GaAs 相比, Be-Si 共注 LEC 半绝缘 GaAs 具有较低的 γ 射线辐照缺陷引入率, 与此相反, 单纯注 Si 的 LEC 半绝缘 GaAs 具有较高的 γ 射线辐照缺陷的引入率。

PACC: 7155; 6180; 6170

引 言

在核辐射环境中, 半导体材料、半导体元件和电子设备会因中子和 γ 射线的辐照而损伤, 严重者会使元件和整机设备不能工作, 因此研究辐照损伤的规律以及减少或防止辐照损伤的方法是个具有理论价值和技术实践意义的重要课题。关于 γ 射线对低阻衬底同质外延 GaAs 的损伤已有比较系统的研究工作发表^[1-6]。但是关于 γ 射线对浅杂质注入(如 Si 单注或 Be-Si 共注)的半绝缘 GaAs 的损伤的研究工作, 目前尚很少报道。本文着重报道了单注 Si 和 Be-Si 共注的两类 LEC 半绝缘 GaAs 的 γ 射线辐照缺陷的研究。为了对比起见, 文中也比较详细地研究了低阻衬底同质外延 GaAs 的 γ 射线辐照缺陷。

* 国家自然科学基金资助的课题。

2 实验和结果

本文的实验样品有三种: Al/低阻衬底同质外延 GaAs、Al/Be-Si 共注 LEC 半绝缘 GaAs、AuPtTi/Si 单注 LEC 半绝缘 GaAs 等三种肖特基势垒。在第一种样品中, GaAs 外延层厚度约为 $10\mu\text{m}$, 浅施主浓度约为 $5 \times 10^{14}\text{cm}^{-3}$, 欧姆接触由背面上的金锗镍在 400°C 的氢气中合金化 20min 制作而成, 在室温环境中做 γ 射线辐照, 辐照剂量为 $1.93 \times 10^6\text{GY}$ 。在后两种样品中, 衬底均为不掺 Cr 的 LEC 半绝缘 GaAs。在 Be-Si 共注样品中, 先用能量为 160keV 的 Be 离子注入, 注入剂量为 $7 \times 10^{11}\text{cm}^{-2}$, 接着用能量为 180keV 和 64keV 的 (Si) 离子依次注入, 注入剂量分别为 6.4×10^{12} 和 $1.4 \times 10^{12}\text{cm}^{-2}$ 。注入后, 样品经氮气保护下 980°C 快速退火 3.6s。在做成 Al/Be-Si 共注 LEC SI GaAs 肖特基势垒后, 让样品在室温下做 γ 射线辐照, 辐照时间 1046h, 辐照剂量为 $1.276 \times 10^7\text{GY}$ 。在 Si 单注样品中, 用 180keV 和 10keV 两种能量的 Si 离子依次注入, 注入剂量分别为 4.6×10^{12} 和 $3 \times 10^{12}\text{cm}^{-2}$ 。接着让样品在 As 饱和气氛中在 790°C 下退火 16min。在制成 AuPtTi/Si 单注 LEC SI GaAs 肖特基势垒后, 也是在室温下, 让样品暴露于 γ 射线源 1877.3h, 辐照剂量为 $1.314 \times 10^7\text{GY}$ 。

2.1 Be-Si 共注 LEC SI GaAs γ 射线辐照缺陷

图 1 示出多数载流子脉冲引进电子对电子陷阱饱和和填充的条件下, Be-Si 共注 LEC 半

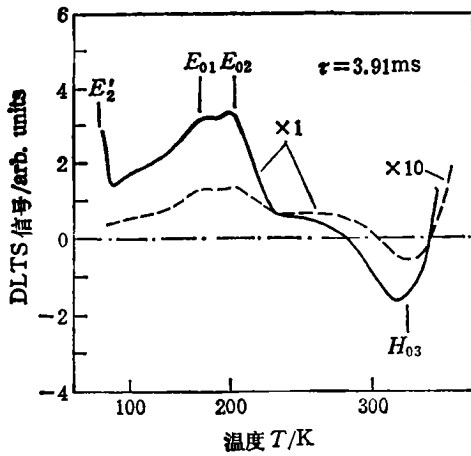


图 1 980°C 快速退火的 Be-Si 共注 LEC SI GaAs γ 射线辐照缺陷 DLTS 谱, 虚线和实线分别代表辐照前后情况, 剂量 $1.276 \times 10^7\text{GY}$, 偏置 $V_R = -1\text{V}$, $V_p = 1\text{V}$; $t_p = 1\text{ms}$, 率窗 $\tau = 3.91\text{ms}$

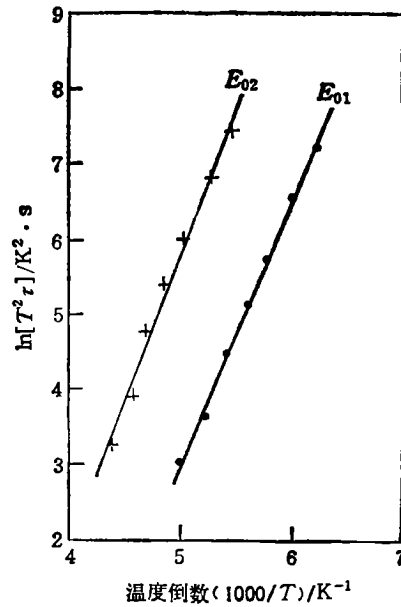


图 2 Be-Si 共注 LEC SI GaAs γ 射线辐照缺陷的电子热发射率与温度的关系

绝缘 GaAs γ 射线辐照缺陷 DLTS 谱。由图可见, 在 γ 射线辐照之前, 在 980°C 下退火 3.6s 的 Be-Si 共注样品中仍然明显存在着两个电子陷阱 E_{01} 和 E_{02} 和一个空穴陷阱 H_{03} 。关于这些缺陷的特性, 文献 [7, 8] 已有较详细的研究。在 γ 射线辐照以后, 样品的

表 1 Be-Si 共注 LEC SI GaAs γ 射线辐照缺陷参数(轴照剂量为 $1.276 \times 10^7 \text{GY}$)

缺陷	电子(空穴)表观 激活能/eV	电子俘获截面 σ_n/cm^2	总浓度 N_{TT}/cm^{-3}	γ 射线辐照缺陷浓 度 $\Delta N_{TT}/\text{cm}^{-3}$	缺陷产生率 $G/\text{GY}^{-1} \cdot \text{cm}^{-3}$
E_{01}	0.298	1.5×10^{-18}	2.78×10^{14}	6.2×10^{13}	4.9×10^6
E_{02}	0.341	1.5×10^{-18}	2.91×10^{14}	5.3×10^{13}	4.2×10^6
H'_{03}	0.54	—	$\sim 10^{16}$	—	—
H''_{03}	0.57	—	$\sim 10^{16}$	—	—

DLTS 谱发生明显地变化,在 77K 附近出现 E'_2 缺陷峰的尾巴, E_{01} 和 E_{02} 缺陷峰的位置虽没有明显变化,但它们的峰高明显地上升了,少子(空穴)陷阱 H_{03} 的峰高明显降低,而且峰的位置向低温方向移动。由不同率窗的温度扫描求出 E_{01} 和 E_{02} 两缺陷的热发射率 τ^{-1} 与温度的关系示于图 2。由此求出两陷阱的电子表观激活能分别为 0.298 和 0.341eV。

只要详细观测,就可以发现少子陷阱 H_{03} 的 DLTS 峰实际上是由两个能级相近的缺陷 H'_{03} 和 H''_{03} 的峰迭加而成的。由于少子陷阱的少子填充的不饱和性^[9],使得不能用传统的 DLTS 方法确定它们的少子表观激活能,故不在此给出 H_{03} 的空穴表观激活能的测量。这个问题将在后面的第三节作详细讨论。

表 1 给出 Be-Si 共注 LEC SI GaAs γ 射线辐照缺陷的电学参数。其中的电子俘获截面是利用缺陷在某一温度下的 DLTS 信号强度随脉冲宽度的变化直接测量出来的,以及缺陷浓度是根据 DLTS 测量、样品的高频 $C-V$ 分析和文献[9]的公式(6)计算出来的。

2.2 Si 单注 LEC SI GaAs γ 射线辐照缺陷

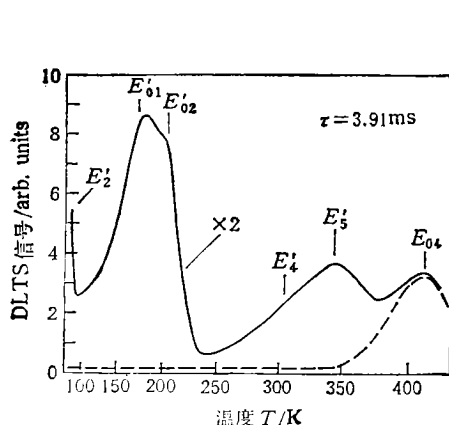


图 3 Si 单注 LEC SI GaAs γ 射线辐照缺陷的 DLTS 谱,虚线和实线分别表示辐照前后曲线,剂量为 $1.314 \times 10^7 \text{GY}$, 偏置: $V_R = -1\text{V}$ $V_F = 1\text{V}$, $t_p = 1\text{ms}$ 率窗 $\tau = 3.91\text{ms}$

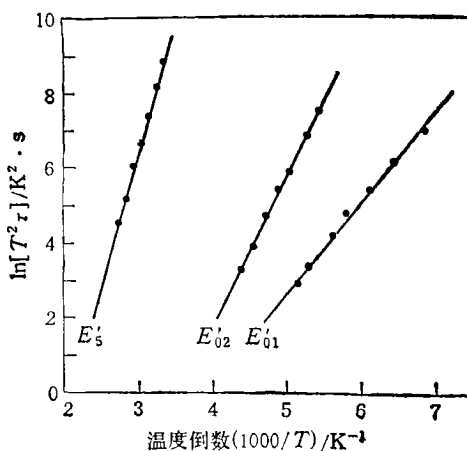


图 4 Si 单注 LEC SI GaAs γ 射线辐照缺陷的电子热发射率与温度的关系

图 3 示出 Si 单注 LEC SI GaAs γ 射线辐照缺陷的 DLTS 谱。图中的虚线表示辐照前样品的谱线,即在谱线的高温段呈显 E_{04} (类 EL_2 缺陷)的电子热发射峰,除此之

外,未见其它缺陷峰存在,这表明样品中的 Si 离子注入所引起的晶格损伤已很好地被在 790℃下退火所消除。

大剂量 γ 射线辐照(剂量为 $1.314 \times 10^7 \text{GY}$)后,样品的谱线发生了复杂的变化,在液 N_2 温度附近出现了 E_2' 缺陷峰的尾部,在 160—210K 温度范围内,出现了 E_{01}' 和 E_{02}' 缺陷峰,在高温段出现了 E_4' 和 E_5' 缺陷峰。

从不同率窗的温度扫描中得到上述大部分缺陷的电子热发射率与温度的关系,见图 4。由图中的实验数据经最小二乘法处理得到 E_{01}' , E_{02}' , E_4' 等缺陷电子表观激活能分别为 0.216, 0.341 和 0.608eV。表 2 给出上述缺陷的电学参数。

表 2 Si 单注 LEC Si GaAs γ 射线辐照缺陷参数(辐照剂量为 $1.314 \times 10^7 \text{GY}$)

缺陷	电子表观激活能/ eV	电子俘获截面 σ_a/cm^2	γ 辐照缺陷浓度 N_{TT}/cm^{-3}	缺陷产生率 $G/\text{GY}^{-1} \cdot \text{cm}^{-3}$
E_2'	—	—	—	—
E_{01}'	0.216	4.9×10^{-19}	1.17×10^{15}	8.9×10^7
E_{02}'	0.341	4.1×10^{-19}	1.03×10^{15}	7.8×10^7
E_4'	—	—	8.8×10^{13}	6.7×10^9
E_5'	0.608	1.27×10^{-19}	5.45×10^{14}	4.1×10^7

2.3 低阻衬底同质外延 GaAs γ 射线辐照缺陷

图 5 示出低阻衬底同质外延 GaAs γ 射线辐照缺陷 DLTS 谱。在谱线的低温端,也就是在液 N_2 温度附近,存在着 E_2 缺陷的峰的尾部。在 209K 温度处出现 E_3 缺陷峰。在 320—370K 温度范围内明显存在着 E_4 和 E_5 缺陷峰。从不同率窗的温度扫描中获得上述缺陷 (E_2 除外)的电子热发射率与温度的关系,见图 6。由图中的实验数据算出这些

缺陷的电子表观激活能依次分别为 0.358, 0.555 和 0.861eV。表 3 示出这些缺陷的电学参数,其中电子俘获截面的测量方法与

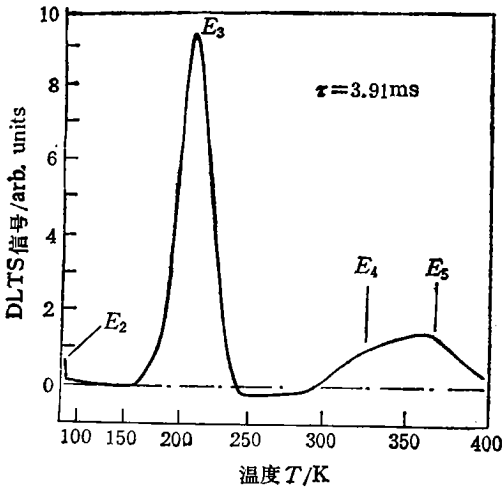


图 5 低阻衬底同质外延 GaAs γ 射线辐照缺陷 DLTS 谱,率窗 $\tau = 3.91 \text{ms}$,辐照剂量为 $1.93 \times 10^6 \text{GY}$

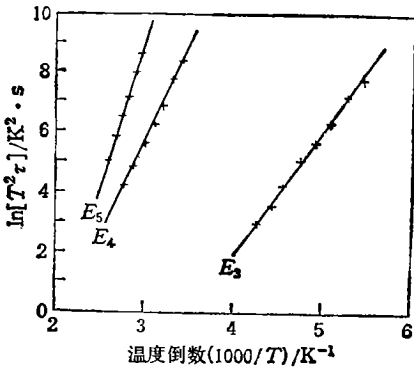


图 6 低阻衬底同质外延 GaAs γ 射线辐照缺陷电子热发射率与温度的关系

表 1 和表 2 的相同,但同类缺陷的截面对不同材料有巨大的差别。

表3 低阻衬底同质外延 GaAsr 辐照缺陷参数(剂量为 1.93×10^4 Gy)

缺陷	电子表观激活能 /eV	电子俘获截面 σ_n/cm^2	缺陷浓度 N_{TT}/cm^{-3}	缺陷产生率 $G/\text{GY}^{-1} \cdot \text{cm}^{-3}$
E_i	—	—	—	—
E_1	0.358	1.6×10^{-16}	6.4×10^{13}	3.3×10^7
E_4	0.555	2.2×10^{-16}	5.8×10^{12}	3.0×10^6
E_5	0.861	1.4×10^{-16}	8.6×10^{12}	4.5×10^6

3 讨 论

Be-Si 共注 LEC SiGaAs 中的 H_{03} 是少子陷阱,它具有多子陷阱经常没有的若干特点^[6],比如,它的电容(电流或电压)瞬态初值(或 DLTS 峰高度)强烈地依赖于温度,…等等。为了说明 γ 射线辐照能使 H_{03} 的 DLTS 峰向低温方向移动,我们将引用文献[8]的一些论点。从表达式的形式上说,少子陷阱和多子陷阱两者的电容瞬态是类似的,但实质上,它们之间是有本质的差别的。电容瞬态的表达式为

$$\Delta C(t_p, t) = \Delta C(t_p, 0) \exp(-t/\tau_e) \quad (1)$$

和瞬态初值的表示式为

$$\Delta C(t_p, 0) = e_p \tau_e [C_R^2 / A^2 \epsilon_s^2 N_D(X_R) \int_{a_r}^{a_0} \{1 - \exp[-t_p/\tau_r(x, T)]\} N_{TT}(x) dx] \quad (2)$$

其中 t_p 和 t 分别是脉冲宽度和少子热发射时间, C_R 是反向偏压 V_R 对应的金属/半导体接触势垒电容, A 是接触面积, ϵ_s 是半导体的介电常数, X_R 是反向偏压 V_R 对应的空间电荷区宽度, $N_D(X_R)$ 是偏置电压 V_R 时空间电荷区边界处的浅施主浓度, N_{TT} 为少子陷阱浓度, 积分下限 a_r 和上限 a_0 分别为反向偏置 V_R 和零偏置时少子费密能级 ζ_p 与少子陷阱能级的交点, τ_e 是陷阱的热发射时间常数,它与电子和空穴的热发射率 e_n 和 e_p 的关系为

$$\tau_e = 1/(e_n + e_p). \quad (3)$$

τ_r 是陷阱俘获少子的时间常数,它与空穴(少子)俘获系数 C_p 以及空穴浓度 $p(x, T)$ 的关系为

$$\tau_r = 1/[e_p + e_n + C_p p(x, T)] \quad (4)$$

在空间电荷区中,空穴浓度可以表示为

$$p(x, T) = (N_V N_C / n_0) \exp \left[-\frac{E_g + q\phi(x)}{kT} \right] \quad (5)$$

由此可见,空穴浓度强烈地依赖于半导体的禁带宽度 E_g , 电位势 $\phi(x)$ 和温度 T , 而且与导带和价带的有效状态密度 N_C 和 N_V 以及多子浓度 n_0 有关。

在一般情况下,少子浓度比多子浓度低很多个数量级,尤其是在宽禁带半导体材料中,这种差别就更为突出。这将导致即使在非常宽的脉冲作用下,在脉冲期间,少子陷阱也难于为少子所饱和填充,即(2)式中的填充因子 $\{1 - \exp[-t_p/\tau_r(x, T)]\}$ 总是小于

1,而对于多子陷阱的多子填充来说,一般情况下不会有这个问题,可以使填充因子等于1。

在不饱和填充的情况下,填充的程度取决于载流子浓度和脉冲宽度,对于少子来说,填充程度将强烈地依赖于温度、多子浓度和脉冲宽度。图7示出 H_{03} 缺陷空穴(少子)热发射 DLTS 峰的位置与脉冲宽度的关系,即当脉冲宽度 τ_p 增宽,峰的位置向低温方向移动。这种现象是由填充不饱和性引起的。据此可以证明对于某一率窗和脉冲宽度不变的情况下,如果少子浓度增加了,也会出现少子峰向低温方向移动。图1 H_{03} 的 DLTS 峰在 γ 射线辐照以后向低温方向移动,正是因 γ 辐照使样品的多数载流子降低,相应地少数载流子浓度升高所造成的。

在不能饱和和填充的情况下,缺陷的能级是不能用传统的 DLTS 方法确定的^[10],再加上 H_{03} 不是单位缺陷,它是由两个能级相近的 H'_{03} 和 H''_{03} 缺陷组成的。这就增加了确定它们的能级位置的困难。我们用恒温电容瞬态技术测得 H_{03} 和 H'_{03} 的空穴表观激活能分别为 0.54 和 0.57eV。

浅杂质(如 Si, C, Be, ...) 注入并经高温退火的半绝缘 GaAs 中,经常存在着一些深能级,如在 Be-Si 共注样品中存在的 E_{01} (0.298), E_{02} (0.341), H'_{03} (0.54) 和 H''_{03} (0.57) 等。如何判断这些深能级的起源是个复杂而艰巨的工作。我们测量的 E_{01} 和 Mostero 等^[10]测量的能级一致,他们认为它可能是砷空位。我们的 γ 射线辐照实验使 E_{01} 的 DLTS 信号增强了,只能说明 E_{01} 不是单纯杂质引起的,是和晶格损伤有关。 E'_{01} (0.216) 是在单纯注 Si 的 LEC 半绝缘 GaAs 中观测到的 γ 射线辐照缺陷,它和 E_{01} 可能是同类的,但它们的电子表观激活能差别比较大,不大可能是测量误差。这可能意味着注 Be 会对 E'_{01} 缺陷有影响。考虑到 γ 射线辐照未在低阻衬底同质外延 GaAs 中产生类似于 E_{01} 或 E'_{01} 缺陷,我们认为 E'_{01} 可能是和半绝缘 GaAs 注硅有关的复杂缺陷,而 E_{01} 可能是和半绝缘 GaAs Be-Si 共注有关的杂质缺陷,而不可能是单纯的砷空位。

我们测量的 E_{02} (0.341) 和文献[11,12]的结果一致。Bhattacharya 等^[11]认为它可能是某一未知杂质引起的。我们的 γ 射线辐照实验使 E_{02} 的浓度增加了,这说明 E_{02} 不是单纯杂质引起,它肯定和晶格损伤有关。联系到这一缺陷的能级与低阻衬底同质外延 GaAs 中的 E_3 缺陷的相一致,因此它们可能都是基本缺陷 E_3 。关于 H'_{03} 和 H''_{03} , 文献[8]对它们已有详细讨论,认为它们是和 Be-Si 共注有关的 LEC SI GaAs 缺陷。

三种 GaAs 材料 γ 射线辐照结果表明,在 Si 单注 LEC SI GaAs 中观测到的 γ 射线辐照缺陷种类最多,有 $E'_1, E'_{01}, E_{02}, E_3$ 和 E'_3 共 5 个;在低阻衬底同质外延 GaAs 中观测到的 γ 射线辐照缺陷种类次之,有 E_2, E_3, E_4 和 E_5 共 4 个;在 Be-Si 共注 LEC SI

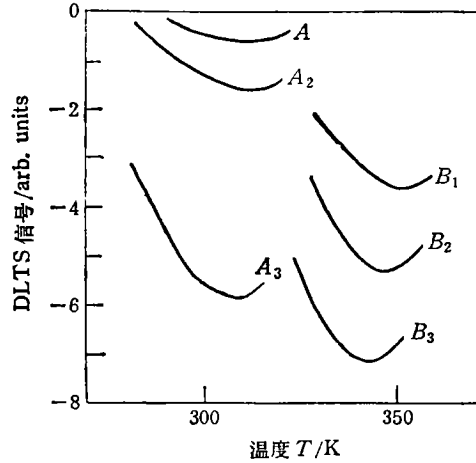


图7 Be-Si 共注 LEC SI GaAs 少子陷阱 H_{03} 的 DLTS 峰随脉冲宽度 τ_p 的变化, A 和 B 两组峰分别对应于率窗 $\tau_A = 7.82\text{ms}$ 和 $\tau_B = 0.782\text{ms}$, A 和 B 的足标 1, 2, 3 分别对应于 $\tau_p = 500, 1000, 10000\mu\text{s}$

GaAs 中观测到 γ 射线辐照缺陷种类最少, 有 E_1', E_{01} 和 E_{02} 共 3 个。再从缺陷产生率来看, 也是 Si 单注 LEC Si GaAs 中的最高; 低阻衬底同质外延 GaAs 中的次之; Be-Si 共注的 LEC Si GaAs 的最低。这些可能意味着在这三种材料中, Be-Si 共注 LEC Si GaAs 具有最好的抗 γ 射线辐照的能力, 低阻衬底同质外延 GaAs 次之; Si 单注 LEC Si GaAs 最差。

4 结 论

浅杂质注入并经高温退火的半绝缘 GaAs 中经常存在着若干个深能级。识别这些深能级是杂质引起的还是晶格损伤引起的是一个复杂而艰巨的工作。本文用 γ 射线辐照实验较容易地判别了 Be-Si 共注 LEC Si GaAs 中的退火余留深能级 E_{01} 和 E_{02} 不是纯杂质引起的, 而是和注入损伤缺陷有关。这就意味着合理的热退火有可能把它们清除掉。 γ 射线实验还表明, 在 Be-Si 共注 LEC Si GaAs, Si 单注 LEC Si GaAs 和低阻衬底同质外延 GaAs 等三种 GaAs 材料中, Be-Si 共注 LEC Si GaAs 的 γ 射线辐照引入的缺陷种类最少, 引入率最低, 而低阻衬底同质外延 GaAs 次之。

在实验样品的制作过程中得到邢妙香、张弼蕊和乔永平等的大力帮助, 在此表示致谢。

- [1] O. Yu. Borkovskaya, N. L. Dmitruk, R. V. Konakova, and Yu. A. Tkhorik, *Phys. Status Solidi* **A48**(1978), K55.
- [2] O. Yu. Borkovskaya, N. L. Dmitruk, R. V. Konakova, et al., *Sov. Phys. Semicond.*, **20** (1988), 1028.
- [3] V. I. Vovnenko, N. L. Dmitruk, and V. G. Litovchenko, *Sov. Phys. Semicond.*, **21**(1987), 95.
- [4] V. A. Ivanyukovich, V. I. Karas, and V. M. Lomako, *Sov. Phys. Semicond.*, **24**(1990), 111.
- [5] V. A. Ivanyukovich, V. I. Karas, and V. M. Lomako, *Sov. Phys. Semicond.*, **23**(1989), 1011.
- [6] T. I. Kolchenko, and V. M. Lomako, *Sov. Phys. Semicond.*, **24**(1990), 180.
- [7] 邱素娟、陈开茅、武兰青, 物理学报, **42**(1993), 1304.
- [8] 陈开茅、金泗轩、邱素娟, 本刊本期.
- [9] 陈开茅、钱思敏、兰李桥, 半导体学报, **7**(1986), 308.
- [10] V. F. Mosterov, and B. E. Samorukov, *Phys. Tech. Semicond.*, **4**(1978), 625.
- [11] P. K. Bhattacharya, J. W. Ku, and S. J. T. Owen, et al., *Appl. Phys. Lett.*, **36**(1980), 304.
- [12] Y. J. Chan and M. S. Lin, *J. Electron. Mater.*, **15**(1986), 31.

γ RADIATION DEFECTS IN SEMI-INSULATING LEC GaAs AFTER SHALLOW IMPURITY IMPLANTATION

Chen Kai-mao Jin Si-xuan

(Department of Physics, Peking University, Beijing 100871)

Qiu Su-juan Li Yun-an He Mei-feng

(13th Research Institute of Ministry of Electronics Industry, Shijiazhuang 050051)

Lan Li-qiao

(Institute of Low Energy Nuclear Physics of Beijing Normal University, Beijing 100875)

(Received 15 September 1993)

ABSTRACT

The γ radiation defects in shallow impurity implanted semi-insulating LEC GaAs have been studied by the deep level transient spectroscopy (DLTS) and the constant temperature capacitance transient technique. In Si- and Be-coimplanted semi-insulating LEC GaAs, there exists an electron trap E'_2 introduced by γ radiation, and both of the two original electron traps $E_{01}(0.298)$ and $E_{02}(0.341)$ are remarkably enhanced by the radiation, by contrast, the original hole trap H_{03} is greatly reduced. There exist five electron traps, $E'_{01}(0.216)$, $E'_{02}(0.341)$, E'_2 , E'_3 and $E'_4(0.608)$, which are caused by γ radiation in Si single-implanted semi-insulating LEC GaAs. The E_{01} and E'_{01} are newly observed. By comparison with the GaAs grown epitaxially on a substrate of GaAs with low resistivity, Si- and Be-coimplanted semi-insulating LEC GaAs possesses a smaller introduced rate of γ radiation defects, but the Si single-implanted semi-insulating LEC GaAs has a bigger one.

PACC: 7155; 6180; 6170