

MBE生长的PM-HEMT结构中深电子陷阱及其钝化/消除

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)

梁基本 孔梅影

(中国科学院半导体材料科学实验室 中国科学院半导体研究所 北京 100083)

摘要 应用 DLTS、SIMS 和 PL 技术详细研究 MBE 生长的 PM-HEMT 结构中深能级。样品的 DLTS 谱表明在 PM-HEMT 结构的 n-AlGaAs 层里存在着较大浓度和俘获截面的深电子陷阱,其能级位置分别位于导带下的 0.64eV 和 0.79eV 处。SIMS 和 PL 谱表明深电子陷阱与 AlGaAs 层里的氧含量和光致发光 (PL) 响应有直接的联系。它们影响 PM-HEMT 结构的电性能。应用氢等离子体对深电子陷阱进行处理,结果表明,在一定条件下,PM-HEMT 结构样品里的深电子陷阱能有效地被钝化/消除。

PACC: 6170,7155,7280E,7360

1 引言

由于高电子迁移率晶体管 (PM-HEMTs) 在高速和高频领域里有着广泛的应用前景而颇受人们的注意。但是低温下大的阈值电压移动和漏电流崩塌等现象的产生可能与 PM-HEMT 结构中 AlGaAs 层里深能级有关^[1]。关于 AlGaAs 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 MOCVD 生长的 AlGaAs 层里位于禁带中部的深电子陷阱^[2,3]。它们直接影响着材料的电参数。本工作目的是分别利用 DLTS、SIMS 和 PL 技术详细研究经 MBE 生长的 PM-HEMT 结构中深电子陷阱的电学性质及其来源。利用氢等离子体在特定条件下对其进行有效地钝化/消除。

2 样品制备和实验条件

采用传统 MBE 法在半绝缘的 GaAs 衬底上生长如图 1 所示的 PM-HEMT 结构的样品。样品生长温度为 520°C,以防止生长过程中铟的分解。

本实验中采用的 PM-HEMT 结构样品的有关电学参数如表 1 所示。

为进行 DLTS 测量,在 PM-HEMT 结构样品的 n⁺-GaAs 盖层上制备 Au-Sb 肖

特基结。

使用 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。DLTS 测量的灵敏度为 $\frac{\Delta C}{C} \sim 10^{-3}$, 测量的温度范围为 77—380

K。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^[4], 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。

光致发光 (PL) 测量系统由光栅单色仪、锁相放大器和记录仪组成。PL 测量的温度为 77K, 光激发由波长为 5145 Å 的 Ar⁺ 激光器提供。应用锗探测器收集来自样品的荧光。

使用法国 Riber 公司生产的超高真空二次离子质谱仪 (MIQ 156) 进行 SIMS 测量。该仪器的二次离子探测灵敏度 $> 10^6$ ions/s, 分析室极限灵敏度为 6.66×10^{-9} Pa。

为钝化/消除 PM-HEMT 结构样品里的深电子陷阱, 应用辉光放电(由频率为 16.5 MHz, 输出功率为 40W 的高频振荡器提供)产生的氢等离子体在放电电流为 80mA, 较低的温度(50—60°C)下对样品进行大约 30 分钟的钝化。

100 Å	n-GaAs	$2 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$
500 Å	n-Al _x Ga _{1-x} As	$1.5 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ $x = 0.2$
50 Å	ud-Al _x Ga _{1-x} As	$x = 0.2$
150 Å	ud-In _y Ga _{1-y} As	$y = 0.15$
1 μm	ud-GaAs	
S. I. GaAs		

图 1 PM-HEMT 样品结构示意图

表 1

样品编号	迁移率 $\mu(\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s})$		载流子浓度 n_s (cm^{-3})
	77K	300K	
CI034	8000	1636	4.6×10^{11}
CI030	11000	3445	1.7×10^{12}

3 实验结果与讨论

3.1 样品的 DLTS 谱

3.1.1 CI034 样品

图 2 为 CI034 样品典型的多数载流子注入的 DLTS 谱。

由图 2 可看到在曲线 1 的低温区, 仅有 E1 电子陷阱存在。随着反向偏压 V_R 的增加, 在曲线 2—5 中除 E1 外还有 E2, E3 和 E4 电子陷阱出现。E1、E2、E3 和 E4 陷阱的能级位置分别位于导带下的 0.22, 0.56, 0.64 和 0.79eV 处。它们的俘获截面分别为 $\sim 10^{-18} \text{cm}^2$ (E1)、 $\sim 10^{-17} \text{cm}^2$ (E2)、 $\sim 10^{-16} \text{cm}^2$ (E3) 和 $\sim 10^{-16} \text{cm}^2$ (E4)。当反向偏压 $V_R = -0.4 \sim -2\text{V}$ 时(考虑到样品材料本身的自建势)耗尽层宽度在样品表面下大约 300—500 Å 位置处。这表明实验测得的 E1、E2、E3 和 E4 电子陷阱均在 n-Al_{0.2}Ga_{0.8}As 层里。把 E1、E2、E3 和 E4 陷阱的能级位置和俘获截面同已发表的数据相比较, 可初步认

为 E1 是与 VI 族施主杂质 (S, Se, Te) 有关的 DX 中心^[5], E2 陷阱的来源, 目前还不清楚, 但可能是一种原生缺陷^[6]. E3 陷阱可能与氧有关^[7], 而 E3、E4 陷阱可能是 MOCVD 生长的 AlGaAs 材料中观察到的深电子陷阱^[2,3].

3.1.2 CI030 样品

图 3 为 CI030 样品典型的多子注入的 DLTS 谱.

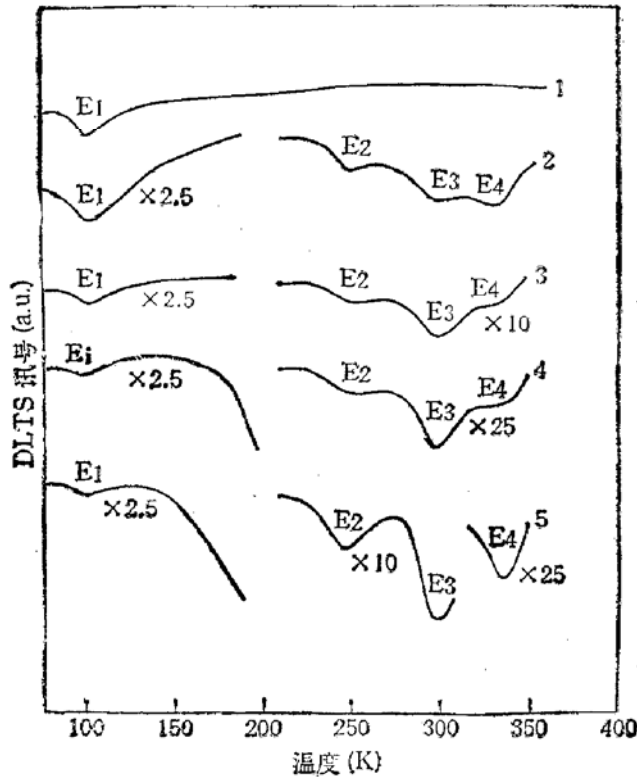


图 2 典型的多子注入的 DLTS 谱 ($f = 8.16\text{Hz}$)
 1. $V_R = -0.4\text{V}$ $V_i = -0.1\text{V}$ 2. $V_R = -0.5\text{V}$ $V_i = -0.1\text{V}$ 3. $V_R = -1\text{V}$ $V_i = -0.1\text{V}$ 4. $V_R = -1.5\text{V}$ $V_i = -0.1\text{V}$ 5. $V_R = -2\text{V}$ $V_i = -0.1\text{V}$

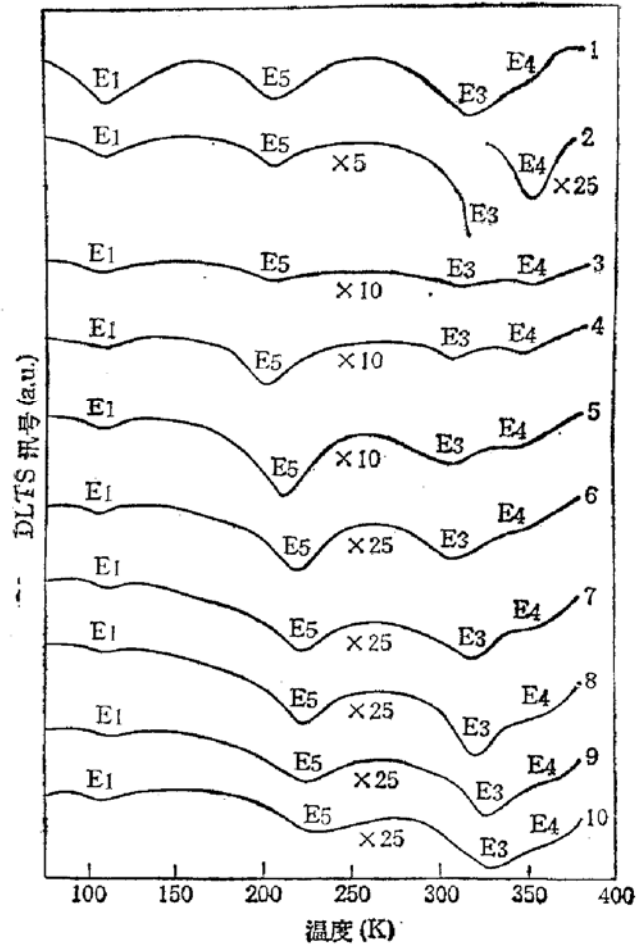


图 3 典型的多子注入的 DLTS 谱 ($f = 22.5\text{Hz}$)
 1. $V_R = -0.5\text{V}$ $V_i = -0.1\text{V}$ 2. $V_R = -1\text{V}$ $V_i = -0.1\text{V}$ 3. $V_R = -1.5\text{V}$ $V_i = -0.1\text{V}$ 4. $V_R = -2\text{V}$ $V_i = -0.1\text{V}$ 5. $V_R = -3\text{V}$ $V_i = -0.1\text{V}$ 6. $V_R = -4\text{V}$ $V_i = -0.1\text{V}$ 7. $V_R = -5\text{V}$ $V_i = -0.1\text{V}$ 8. $V_R = -5.5\text{V}$ $V_i = -0.1\text{V}$ 9. $V_R = -6\text{V}$ $V_i = -0.1\text{V}$ 10. $V_R = -6.5\text{V}$ $V_i = -0.1\text{V}$

由图 3 可观察到 E1、E5、E3 和 E4 电子陷阱。在曲线 4 (反向偏压 $V_R = -2\text{V}$) 中获得的 E1、E3、E4 和 E5 的能级位置分别位于导带下 0.22、0.64、0.79 和 0.42eV 处。其俘获截面分别为 $\sim 10^{-13}\text{cm}^2$ (E1)、 $\sim 10^{-16}\text{cm}^2$ (E3)、 $\sim 10^{-16}\text{cm}^2$ (E4) 和 $\sim 10^{-13}\text{cm}^2$ (E5)。其中 E1、E3 和 E4 与 CI034 样品中观察到的陷阱一样, 而 E5 仅在 CI030 样品中出现。把 E5 陷阱的能级位置和俘获截面同已发表的数据相比较^[8], 可认为 E5 是与硅杂质有关的 DX 中心, E5 (DX 中心) 仅在 CI030 而不在 CI034 样品中出现, 这可能是 CI030 样品中 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ($x = 0.2$) 的 x 值偏离的缘故造成的。由图 3 的曲线 4—10 可清楚观察到 E5 (DX 中心) 峰值出现的温度随样品施加反向偏压的增加 (从 -2V 到 -6.5V) 向 DLTS 谱的高温区发生了明显的移动。当 $V_R = -2\text{V}$ 时, E5 能级位置为 $E_C - 0.42\text{eV}$, 而 $V_R = -6\text{V}$ 时, E5 能级位置则从 $E_C - 0.42\text{eV}$ 移动到 $E_C - 0.46\text{eV}$, 变化量达 40meV。除此之外, 随反向偏压的加大, E5 陷阱还逐渐变成一个较宽且不对称

的峰,这说明 E5 陷阱除包括 DX 中心讯号外,还可能迭加上 AlGaAs/InGaAs/GaAs 系统在 AlGaAs 材料产生应力而引起的缺陷^[9]. E3 和 E4 随反向偏压的改变其峰值温度也有不同程度的移动,而 E1 则基本不动.

3.2 样品的 SIMS 和 PL 谱

图 4 为 PM-HEMT 结构样品中氧浓度的 SIMS 谱.

由图 4 中 CI030 和 CI034 样品 SIMS 谱的对比可看出,CI034 样品的 AlGaAs 层中氧含量明显高于 CI030. 这个结果与 CI034 和 CI030 样品中 E3 和 E4 深电子陷阱浓度的大小是一致的. Bhattacharge 等^[7]在含有微量氧的气氛中生长的 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ($x = 0.3$) 材料里观察到的 $E_c - 0.66\text{eV}$ (浓度为 $8 \times 10^{14}\text{cm}^{-3}$) 陷阱的存在. Hobson 等^[6]使用 $(\text{CH}_3)_3\text{N} \cdot \text{AlH}_3$ 作为铝源由 OMVPE 生长的 AlGaAs/GaAs 异质结构的 AlGaAs 层(具有较低的氧、碳含量 $\text{O} < 5 \times 10^{16}\text{cm}^{-3}$, $\text{C} < 3 \times 10^{16}\text{cm}^{-3}$)中也观察到 $E_c - 0.64\text{eV}$ 陷阱,但其浓度小于 $2 \times 10^{12}\text{cm}^{-3}$. 而我们样品的 AlGaAs 层中的氧浓度均比由传统的 MBE 生长的 AlGaAs 材料中观察到的最低氧浓度 ($4 \times 10^{17}\text{cm}^{-3}$)^[10] 高得多. 这表明过高的氧浓度可能与 AlGaAs 材料中深电子陷阱有关.

对在 DLTS、SIMS 测量中使用的 CI030 和 CI034 样品进行 PL 测量. 其典型的 PL 谱如图 5 所示.

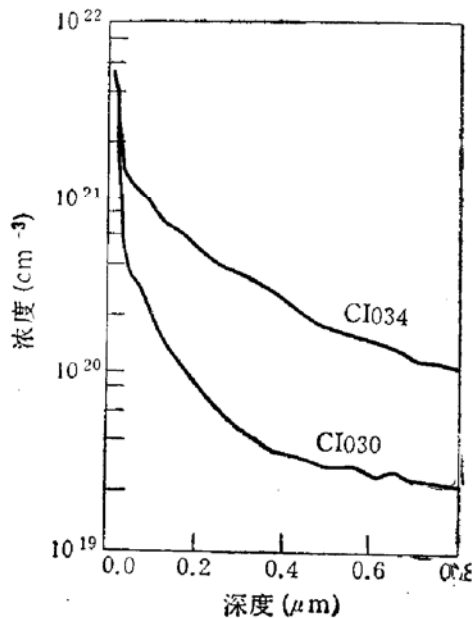


图 4 样品中氧浓度的 SIMS 分布

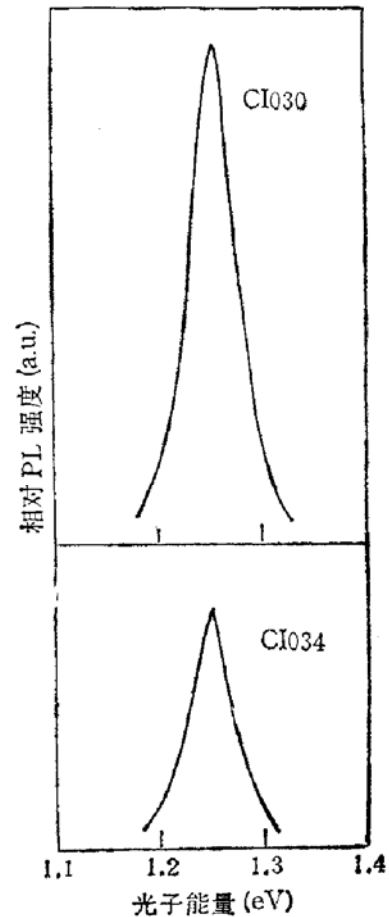


图 5 典型的样品的 PL 谱

由图 5 可见,CI034 样品的 AlGaAs 层里的氧含量较高,其深电子陷阱 (E3 和 E4) 浓度较大,相应的 PL 响应峰的高度较低. 而 CI030 样品的 AlGaAs 层里的氧含量较低,其深电子陷阱 (E3 和 E4) 浓度较小,相应的 PL 响应峰的高度较高. PL 响应峰除了深电子陷阱贡献外,还可能包含有 GaAlAs 和 InGaAs 材料不匹配引起的界面缺陷等,但相比之下,深电子陷阱对 PL 响应峰的影响要更大些. 这个现象说明 PL 响应与

样品的深电子陷阱 (E3 和 E4) 浓度大小有着直接的联系。

3.3 深电子陷阱 (E3 和 E4) 与样品电学参数的关系.

图 6 为具有不同电学参数 CI030 和 CI034 样品中深电子陷阱 (E3、E4) 浓度的比较。

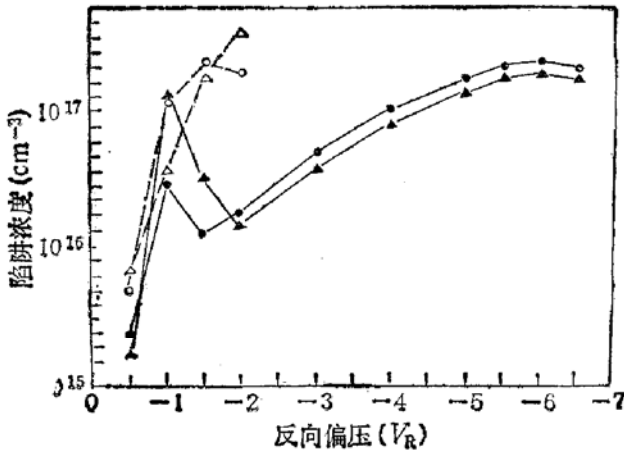


图 6 样品的深电子陷阱浓度的对比

● E3 } CI030 样品 ○ E3 } CI034 样品
▲ E4 } △ E4 }

较。

由图 6 可见深电子陷阱 (E3, E4) 浓度大小与样品的电学参数 (载流子浓度和迁移率) 有着直接的联系, 即 E3 和 E4 浓度越大, 该样品的载流子浓度和迁移率则越小。

3.4 氢处理后样品的 DLTS 谱

图 7 为典型的氢等离子体处理后样品的 DLTS 谱。

应用辉光放电产生的氢等离子体在放电电流为 80mA, 较低的温度 (50—60°C) 下对样品进行大约 30 分钟的处理,

其 DLTS 谱如图所示。结果表明氢等离子体能有效地钝化/消除 CI030 和 CI034 样品里的深电子陷阱 (E3、E4)。

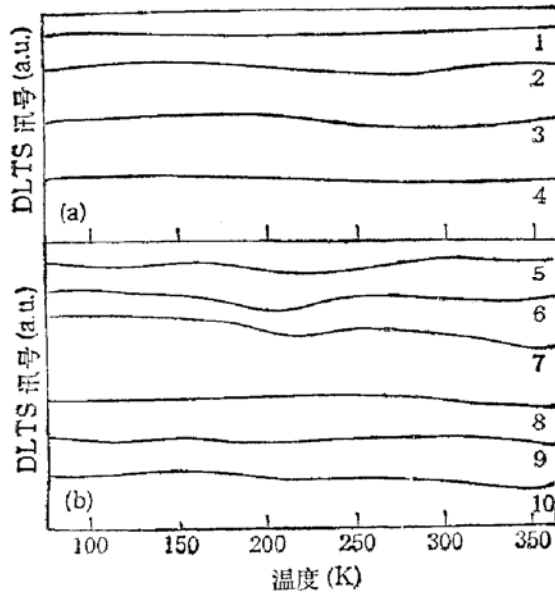


图 7 氢等离子体处理后的 DLTS 谱

(a) CI034 样品, 氢等离子体处理时间~30 分钟 ($f = 8.16\text{Hz}$)

1. $V_R = -0.5\text{V}$ $V_1 = -0.1\text{V}$ 2. $V_R = -1\text{V}$ $V_1 = -0.1\text{V}$ 3. $V_R = -1.5\text{V}$ $V_1 = -0.1\text{V}$
4. $V_R = -2\text{V}$ $V_1 = -0.1\text{V}$

(b) CI030 样品, 氢等离子体处理时间分别为~15 分钟 (曲线 5、6、7) 和~30 分钟 (曲线 8、9、10) ($f = 22.5\text{Hz}$)

5. $V_R = -1\text{V}$ $V_1 = -0.1\text{V}$ 6. $V_R = -2\text{V}$ $V_1 = -0.1\text{V}$ 7. $V_R = -3\text{V}$ $V_1 = -0.1\text{V}$
8. $V_R = -2\text{V}$ $V_1 = -0.1\text{V}$ 9. $V_R = -4\text{V}$ $V_1 = -0.1\text{V}$ 10. $V_R = -6\text{V}$ $V_1 = -0.1\text{V}$

4 结论

应用 DLTS、SIMS 和 PL 技术研究了 MBE 生长的 PM-HEMT 结构中的深电子

陷阱生长机理和其有关电学参数。实验结果表明,在 PM-HEMT 结构的 n-AlGaAs 层里存在着较大浓度和俘获截面的深电子陷阱 (E_3, E_4)。它们与材料的电学参数有着直接的联系。深电子陷阱可能与 AlGaAs 层里的氧含量和光致发光响应有密切的关系。实验还表明,在特定条件下氢等离子体能有效地钝化/消除深电子陷阱。

参 考 文 献

- [1] A.J. Valois, G.Y. Robinson, K. Lee and M.S. Shur, *J. Vac. Sci. & Technol.*, 1983, **B1**: 190.
- [2] T. Hashizume, H. Hasegawa and H. Ohno, *J. Appl. Phys.*, 1990, **68**(7):3394.
- [3] 卢励吾,周洁,庄婉如和 M. Umeno, *半导体学报*, 1992, **13**(3):155.
- [4] G. Ferenczi, J. Boda and T. Pavelka, *Phys. Stat. Sol.*, 1986, **94**: K119.
- [5] O. Kumagai, H. Kawai, Y. Mori and K. Kaneko, *Appl. Phys. Lett.*, 1984, **45**(12):1322.
- [6] W.S. Hobson, S.R. McAfee, K. S. Jones, N.G. Paroskevopoulos, C.R. Abernathy, S.K. Spitz, J.D. Harris, M. Lamont Schnoes and S.J. Pearton, *Materials Science Forum*, 1992, **83-87**: 1063-1068.
- [7] P.K. Bhattacharya, T. Matsumoto and S. Subramanian, *J. Cryst. Growth*, 1984, **68**: 501.
- [8] D.V. Lang and R.A. Logan, *Phys. Rev.* 1979, **B19**(2):1015.
- [9] 卢励吾,周洁,梁基本,孔梅影, *物理学报* 1993, **42**(5): 817.
- [10] T. Achnick, G. Burri and M. Illegems, *J. Vac. Sci. Technol.*, 1989, **A7**:2537.

Deep Electron Traps of PM-HEMT Structures Grown by MBE and Hydrogen Treatment

Lu Liwu and Zhou Jie

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

Liang Jiben and Kong Meiyong

(Semiconductor Materials Science Laboratory of Chinese Academy of Sciences, Institute of Semiconductors, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083)

Abstract The deep levels of PM-HEMT structures grown by MBE have been investigated by using DLTS, SIMS and PL techniques. From the analysis of DLTS spectra, the deep electron traps with the activation energies of $E_c - 0.64\text{eV}$ and $E_c - 0.79\text{eV}$ having larger capture cross sections and concentrations are measured in n-AlGaAs layer of PM-HEMT structures. These traps may correlate strongly with oxygen content and PL response of AlGaAs layer. To passivate/annihilate these traps, hydrogen plasma treatment was used to study the effect of hydrogen on the deep electron traps under given conditions. The experimental results show that hydrogen plasma can passivate/annihilate these deep electron traps.

PACC: 6170, 7155, 7280E, 7360