

n 型气相外延 GaAs 层中中子辐照感生缺陷的研究

吴凤美 汪 春 唐 杰

(南京大学物理系)

龚邦瑞

(南京电子器件研究所)

1987 年 7 月 2 日收到

本文研究了 1MeV 中子辐照在气相外延 n-GaAs 有源层中深能级缺陷的特性和热退火性能。结果表明,大多数感生缺陷是与两个以上原子位移有关的缺陷。另外,当 H_1 能级退火时,出现了一个新的缺陷能级 $E_s(E_s = 0.73\text{eV})$ 。研究表明 GaAs MESFET 参数的变化主要是由于载流子去除。

一、引 言

中子辐照能引起 GaAs 的晶格损伤,产生很多缺陷,它们影响着材料的电阻率、少子寿命等重要参数,进而改变了制成器件的性能^[1]。对辐照在 GaAs 中引入的缺陷虽已进行了许多研究^[2-3],但至今对这些缺陷的起因及结构未有肯定的结论^[4]。对 GaAs 金属半导体场效应管 (GaAs MESFET) 中子辐照在有源层中引入的深能级缺陷的研究,将有助于这方面工作的进展。在固体微波器件中 GaAs MESFET 占有极其重要的地位;由于微波单片集成正在变为现实, GaAs MESFET 将会给线性集成带来生气勃勃的发展前景。这些器件和电路在空间技术应用中将不可避免地受到电子、质子和中子等高能粒子的辐射,对器件受辐射后性能的变化及其物理机理的研究受到了国内外科学工作者的重视。

本文研究 1MeV 中子辐照在 GaAs MESFET 有源层中感生的缺陷及对器件性能的影响,并与电子辐照在 GaAs 中引入缺陷进行比较,对这些缺陷的形成机理也进行了探讨。

二、实 验

所用样品为南京电子器件研究所制造的 n 沟道微波 GaAs 功率场效应管。肖特基栅为 Ti-GaAs 接触,栅长 $1\mu\text{m}$, 势垒高度 V_{nb} 在 $0.76-0.78\text{eV}$ 范围内 (I-V 方法测得)。衬底为掺 Cr 半绝缘 GaAs 材料,有源层和衬底之间有厚为 $2-3\mu\text{m}$ 的未掺杂缓冲层。

(载流子浓度为 10^{13}cm^{-3} 左右), 有源层载流子浓度约为 $1 \times 10^{17}\text{cm}^{-3}$, 厚度 $0.3 \sim 0.4 \mu\text{m}$, 有源层和缓冲层均为气相外延 (VPE) 法生成, 器件在 8GHz 下输出功率可达 1W 。

器件用 1MeV 快中子在室温进行辐照, 总剂量达 $1.86 \times 10^{14}\text{n/cm}^2$ 。辐照前未观察到密度大于 10^{13}cm^{-3} 的缺陷能级。辐照后用 DLTS^[5] 法测定辐照感生缺陷的表观激活能 E_a , 俘获截面 σ 等参数。

退火是在 150°C 至 250°C 之间进行, 由于肖特基势垒特性在 300°C 时将变坏, 退火温度不宜过高。

三、结果与讨论

1. 中子辐照在 n 型 VPE GaAs 有源层内引入的缺陷

中子辐照后, 在 n 型 VPE GaAs 有源层内检测到中子感生电子陷阱有四个: $E_1(E_c - 0.31\text{eV})$, $E_2(E_c - 0.36\text{eV})$, $E_3(E_c - 0.59\text{eV})$ 和 $E_4(E_c - 0.82\text{eV})$; 空穴陷阱有两个: $H_1(E_v + 0.70\text{eV})$ 和 $H_2(E_v + 0.78\text{eV})$ 。其 DLTS 谱图如图 1 曲线 a 所示。测量样品源端加脉冲偏压: $V_r = +2.5\text{V}$, $V_p = +0.45\text{V}$, 栅端电压为 $+0.75\text{V}$ 。

所测电子和空穴陷阱的表观激活能 E_a 、电子(或空穴)俘获截面 σ_n (或 σ_p) 以及缺陷引入率 N_T/ϕ 如表 1 所示 (N_T 为缺陷密度、 ϕ 为辐照剂量)。表 1 中俘获截面 σ 对应温度为各 DLTS 峰所处的温度。

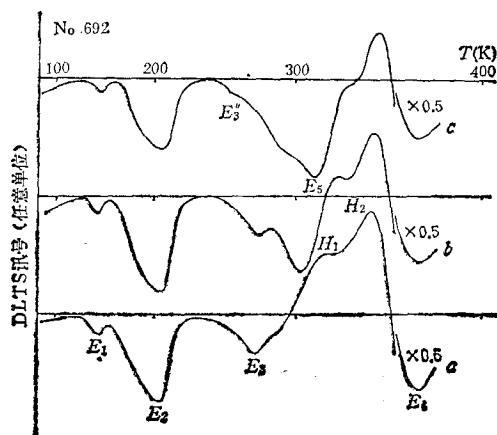


图 1 中子辐照在 n 型 VPE GaAs 有源层内感生缺陷的 DLTS 谱图 率窗 44.5s^{-1} , 1MeV 快中子辐照, 剂量 $\phi = 1.86 \times 10^{14}\text{n/cm}^2$; 未退火 (a) 200°C ; 20min 退火 (b) 250°C ; 20min 退火 (c)

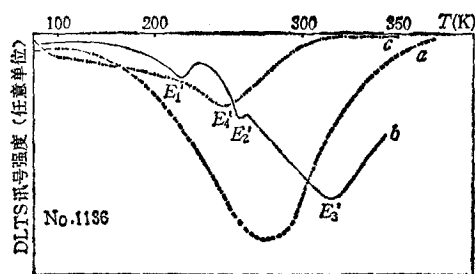


图 2 中子辐照 n 型 GaAs 有源层 DLTS 谱图
曲线 a 为未退火 DLTS 曲线, 率窗 44.4s^{-1} ;
曲线 b 为高精度 DLTS 曲线, 率窗 781s^{-1} ;
曲线 c 为 260°C , 20min 退火, 率窗 44.4s^{-1}

在某些样品中只观察到电子陷阱, 而且 DLTS 峰很宽 (见图 2 曲线 a), 经高精度 DLTS 测量, 可以看到该宽峰是由三个电子陷阱 E_1' , E_2' 和 E_3' 构成 (见图 2 曲线 b)。由于曲线 b 是在频率较高条件下测量, 谱峰向高温端移动。 E_1' , E_2' , E_3' 和 E_4' 的表观激活能和俘获截面如表 2 所示。图 2 中曲线 a 和 c 均为一般 DLTS 仪在同样条件下测量的。

在检测多子(电子)陷阱时还可观察到少子(空穴)陷阱, 这主要是由于势垒的边界(有

表 1 缺陷 E_1 - E_5 , H_1 - H_2 的 E_d , σ 和 N_T/ϕ 值

缺陷	E_1	E_2	E_3	E_4	E_5	H_1	H_2
$E_d(\text{eV})$	$E_c - 0.31$	$E_c - 0.36$	$E_c - 0.59$	$E_c - 0.82$	$E_c - 0.73$	$E_v + 0.70$	$E_v + 0.78$
$\sigma_n(\text{cm}^2)$	1.66×10^{-12}	6.40×10^{-13}	9.12×10^{-14}	1.45×10^{-13}	5.47×10^{-12}		
$\sigma_p(\text{cm}^2)$						5.01×10^{-13}	8.40×10^{-14}
$N_T/\phi(\text{cm}^{-1})$	0.036	0.192	0.069	0.285	0.204	0.112	0.201

表 2 E'_1 - E'_4 缺陷的 E_d 和 σ_n 值

缺陷	E'_1	E'_2	E'_3	E'_4
$E_d(\text{eV})$	$E_c - 0.35$	$E_c - 0.42$	$E_c - 0.57$	$E_c - 0.47$
$\sigma_n(\text{cm}^2)$	1.0×10^{-14}	8.3×10^{-13}	9.15×10^{-14}	2.2×10^{-14}

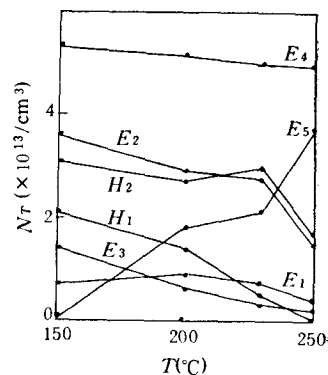
源层一边)有空穴积累所造成。Ti-GaAs 势垒高度为 0.75—0.80eV (I-V 测量), 大于一半的禁带宽度, n-GaAs 表层可能反型, 表层的空穴数大于电子数, 此处少子陷阱电荷就可能被 DLTS 电脉冲所调制。同时还可能形成空穴注入。DLTS 测量时, 如果 V_p 脉冲间隔里, 样品两端有正向电压, 由于表层有空穴积累, 样品沟道长度又小(约 $1\mu\text{m}$), 在较小的正向电压下可能有一定的空穴注入^[6], GaAs 有源层一定宽度范围内的少子陷阱能被检测出来。另外, DLTS 少子讯号也可能部份来源于界面态。

2. 缺陷的退火特性

为了更深入研究缺陷的特性, 我们进行了 150℃, 200℃, 230℃ 和 250℃ 的 20min 等时退火实验。200℃ 和 250℃ 退火后的 DLTS 谱图如图 1 曲线 b, c 所示。等时退火后缺陷密度随退火温度的变化如图 3 所示。

从图 1 和图 3 可以看到, 当在 150℃ 至 250℃ 20min 等时退火时, E_1 , E_2 , E_4 和 H_2 缺陷的 DLTS 峰高度变化不大, 也即缺陷密度 N_T 下降不多。 H_1 峰逐渐减低而消失。 E_3 峰略有下降, 峰位并向低温方向漂移至 E'_3 位置。引人注意的是, 在 H_1 退火的同时, 一个新峰 E_5 ($E_c - 0.73\text{eV}$) 出现, 并随温度升高而长大, 直至 250℃ 时其峰高为最大。图 2 样品退火时 (260℃, 20min), 其电子陷阱峰高下降, 并向低温区漂移, 其峰位至 E'_4 ($E_c - 0.47\text{eV}$), 但没有新峰产生, 退火后曲线如图 2 曲线 c 所示。

中子辐射的主要损伤机理是晶格原子受辐照后向间隙位置的位移, 形成空位和间隙原子。中子是电中性的, 不存在库仑作用, 因此可借用刚

图 3 20min 等时退火缺陷密度 N_T 随退火温度的变化

球模型来计算碰撞反应截面和能量转移关系。一般情况下,刚球碰撞反应截面较作用距离大的库仑作用的反应截面小得多,但通过碰撞交给晶格原子的平均能量却大得多。入射粒子能量 E 与原子获得的最大反冲能量 T_m 关系为

$$T_m = \frac{4Mm}{(M+m)^2} E, \quad (1)$$

式中 m 为中子质量, M 为晶格原子质量。Pons 等人^[7]测得对 GaAs T_m 约为 10V, 指出对电子辐照需要 0.25MeV 即可产生单原子位移缺陷。由 (1) 式可计算, 对中子辐照只要 2×10^{-4} MeV 能量即可产生同样的缺陷。1MeV 中子能量远大于产生单原子位移的能量, 因此能产生多原子位移缺陷, 同时使引入单原子位移缺陷的几率相对变小; 另外, 还可形成缺陷团及和杂质等结合为络合物。缺陷团内最初的缺陷是空位、间隙原子或简单的缺陷的复合体, 但当温度不很低时, 由于竞争反应, 缺陷可重新组合。1MeV 电子辐照在 GaAs 中引入的缺陷多半是单原子位移缺陷, 它们一般在 500K 退火就消失^[7]。在入射电子能量加大时, 能引入退火温度较高的电子陷阱, 标称为 P 缺陷, P 缺陷则反映了高能电子轰击产生的多原子位移, 它们在 550K 下相当稳定^[8-10]。

本工作用 1MeV 快中子辐照, 因此感生的缺陷中, 多原子位移和缺陷团所占比例较大。多原子位移缺陷退火温度较高, E_1, E_2, E_4, E_5 和 E'_4, E'_5 缺陷属于这类缺陷, 它们与 P 缺陷是类似的。图 1 中 E_3 缺陷退火时峰位向低温区漂移, 说明该缺陷含有单原子位移和多原子位移两类缺陷, 单原子位移缺陷退火消失后, 留下了退火温度较高的多原子位移缺陷(图 1, 曲线 c 中 E'_3)。图 2 曲线 a 也是两类缺陷作用的 DLTS 谱线, 退火后的 DLTS 峰高下降并移至 E'_4 。 E'_4 峰较宽, 它也与曲线 b 类似, 可能由几个缺陷组成。 H_1 和 H_2 缺陷多半是与杂质有关的络合物。值得注意的是, 在 150℃ 退火时, E_5 新峰出现, 这很可能是 H_1 退火转化而来的。在 GaAs 中的空穴陷阱往往是和杂质有关的复杂络合物, 它们有可能在较高温度下分解重新组合, 导致新缺陷的产生。在图 2 样品中没有 H_1 空穴陷阱, 也没有观察到新峰产生。 H_1 为空穴陷阱, 而 E_5 为电子陷阱, 说明在缺陷转化时, 荷电态也会发生改变。

Lang 发现^[11]用质子、氧离子等重粒子辐照能促进消耗孤立的缺陷而形成缺陷团, 它们的 DLTS 谱较宽, 并指出与杂质或较高次缺陷团有关的缺陷引入率分散性较大。本工作中中子辐照的结果与上述结论也是相符的。用中子辐照往往可观察到较宽的 DLTS 谱, 这些宽谱峰实际上是由几个缺陷能级混合形成, 我们利用自制的(孙勤生副教授研制)高精度 DLTS 谱仪很清楚地显示了这点。

3. 中子辐照缺陷的载流子去除效应

中子辐照在 GaAs 禁带中产生了很多缺陷能级, 它们将俘获载流子使自由多数载流子的密度减少, 此效应称为载流子去除。可以用辐照前后夹断电压 V_{p0} 和 V'_{p0} 的变化来求得载流子去除率 $\Delta n/\phi$ ^[12]

$$\frac{\Delta n}{\phi} = \frac{N_0}{\phi} \frac{V_{p0} - V'_{p0}}{V_{p0} + 0.7}, \quad (2)$$

式中 Δn 为载流子变化量, N_0 为起始自由载流子密度, 肖特基势垒高度近似为 0.7eV。表

3 列举了 V_{PO} , V'_{PO} 和 $\Delta n/\phi$ 的数值, 中子辐照的 $\Delta n/\phi$ 值在几十至二百之间. 我们用 12MeV 电子辐照同样类型的样品, 发现 $\Delta n/\phi$ 值为 20cm^{-1} 左右, 可见, 中子辐照载流子去除效应远为电子辐照明显^[12,13].

表 3 1MeV 中子辐照 n 型 VPE GaAs 的 $\Delta n/\phi$ 值

管 号	585	297	1188	1136	692	426
$V_{PO}(\text{V})$	7.0	5.0	5.0	7.0	5.0	3.5
$V'_{PO}(\text{V})$	5.0	4.0	4.0	4.0	4.0	3.0
$\frac{\Delta n}{\phi} (\text{cm}^{-1})$	139	94	94	209	94	64

ϕ 为 $1.86 \times 10^{14} \text{n/cm}^2$.

由于中子辐照载流子去除率高, 与载流子浓度有关的 MESFET 参数相应也发生明显的变化. 例如, 最大饱和电流和跨导下降, 源漏击穿电压升高. 在同样能量和剂量的条件下, 用电子辐照, 器件参数的退化较少. 用 $1.86 \times 10^{14} \text{n/cm}^2$ 剂量中子辐照, 跨导和饱和电流约下降 20%, 说明该器件抗辐照性能尚佳.

四、结 语

用 1MeV 快中子在室温辐照 GaAs MESFET, 在 n 型 VPE 有源层内引入了四个电子陷阱和两个空穴陷阱. 等时退火实验表明多数的感生缺陷退火温度高于 250°C , 它们是与多原子位移相联系的缺陷. H_i 退火温度较低, 在 250°C , 20min 退火后就完全消失. 与此同时, 一个新能级 E_i 产生. 可以认为, E_i 可能是 H_i 转化而来的. 用某些样品, 可观察到较宽的 DLTS 谱峰, 这些宽峰是由几个缺陷能级组成, 用高精度 DLTS 测量可清楚地显示. 实验也表明了, 1MeV 中子辐照往往在 GaAs 中形成缺陷团, 而使孤立的简单缺陷减少.

中子辐照载流子去除率较同样条件下的电子辐照为大, 影响 MESFET 器件的性能主要是载流子去除效应.

高精度 DLTS 谱由孙勤生副教授提供仪器, 并协助测试, 在此表示感谢.

- [1] J. M. Borrego, R. J. Gutmann, S. B. Moghe and M. J. Chudzicki, *IEEE Trans. Nuc. Sci.*, **NS-25** (1978), 1436.
- [2] A. Goltzene, B. Meyer and C. Schwab, *Semi-Insulating III-V Materials* (1984), p. 291.
- [3] T. Wörner, U. Kaufmann and J. Schneider, *J. Appl. Phys. Lett.*, **40**(1982), 141.
- [4] J. D. Collins, G. A. Gledhill and R. C. Newman, *Proceedings of the 14th International Conference On Defects in Semiconductors*, (1986), p. 1081.
- [5] D. V. Lang, *J. Appl. Phys.*, **45**(1974), 3023.
- [6] M. A. Green and J. Shewchun, *Solid state Electronics*, **16**(1973), 1141.
- [7] D. Pons, P. M. Mooney and J. C. Bourgoin, *J. Appl. Phys.*, **51**(1980), 2038.
- [8] D. Pons, A. Mircea and J. Bourgoin, *J. Appl. Phys.*, **51**(1980), 4150.
- [9] S. Loualiche, G. Guillot and A. Nouailhat, *Phys. Rev.*, **B26**(1982), 7090.

- [10] 吴凤美、赖启基、徐 岭、龚邦瑞、周欣耕, 见文献[4], p.1039.
[11] D. V. Lang, R. A. Logan and L. C. Kimerling, *Phys. Rev.*, **B15**(1977), 4874.
[12] 吴凤美、赖启基、徐 岭、龚邦瑞, 半导体学报, **8**(1987), 85.
[13] Masafumi Yamaguchi and Chikao Uemura, *J. Appl. Phys.*, **57**(1985), 604.

STUDY OF NEUTRON IRRADIATION-INDUCED DEFECTS IN n-TYPE VAPOR PHASE EPITAXY GaAs LAYERS

WU FENG-MEI WANG CHUN TANG JIE

(Department of Physics, Nanjing University)

GONG BANG-RUI

(Nanjing Electronic Device Institute)

ABSTRACT

The characterization and thermal annealing behavior of deep-level defects in 1 MeV neutron irradiated VPE n-GaAs layers have been studied. The results indicate that the majority of induced defects are associated with displacement of two or more neighboring atoms. In addition, a new defect level E_s ($E_c-0.73$ eV) emerges, as the H_1 level anneals out. It is found that the changes of GaAs MESFET parameters are mainly due to the carrier removal.