

SI GaAs 中 S^+ 注入的电学特性

夏冠群 关安民 耿海阳 王渭源

(中国科学院上海冶金研究所)

1988年3月19日收到

本文研究了经常规热退火和快速热退火后 SI GaAs 中 S^+ 注入的电学特性。热退火后, GaAs 中注入 S^+ 的快扩散和再分布不决定于 S^+ 或砷空位 V_{As} 的扩散而决定于离子注入增强扩散。使用快速热退火方法能抑制注入 S^+ 在 GaAs 中的增强扩散, 明显减小 S^+ 的再分布, 可以获得适合于制造 GaAs MESFET 器件的薄有源层。

主题词: 砷化镓, $^{75}S^+$, 离子注入, 快速热退火, 扩散, 再分布

一、引言

GaAs 中注入 S^+ 进行 n型掺杂研究国外曾有过大量报道^[1], 由于 S^+ 在 GaAs 中快扩散特性, 当用炉退火进行激活的同时, 发生了纵向浓度的严重再分布, 故未被用于 GaAs MESFET IC 中作薄有源层。再分布问题迄今尚未得到解决, 现在不少作者有兴趣用快速退火方法进行研究。

本文开展了不掺杂 SI GaAs 材料中的 S^+ 注入研究, 比较常规炉退火和红外石墨快速退火后的掺杂行为, 包括退火温度、时间和注入剂量对激活率、纵向浓度分布的影响, 最后讨论分析了 S^+ 注入 n型掺杂发生纵向浓度再分布的原因。

二、实验方法

衬底为 LEC 不掺杂 SI GaAs 单晶片, 晶向 $\langle 100 \rangle$, 电阻率大于 $10^7 \Omega \cdot cm$ 。经化学机械抛光后, 再用 50°C 的 $H_2SO_4:H_2O_2:H_2O = 3:1:1$ 溶液腐蚀 5 分钟以除去损伤层。注入在本所自制 600 keV 重离子注入机上进行, $^{75}S^+$ 由 CdS 蒸气放电得到。注入条件: 室温非沟道方向, 能量 600 keV, 剂量 $2 \times 10^{13} - 8 \times 10^{14} cm^{-2}$ 。 S^+ 的激活分别采用 As 压无包封炉退火^[2]和高频红外石墨快速退火^[3]。注入样品的损伤恢复、掺杂能级用背散射和光致发光测定, 载流子浓度分布、激活率、迁移率用电化学 C-V 法和范德堡方法测量。对比试验的样品均取自同一注入片。

三、实验结果

1. 注入 S^+ 的电激活和损伤恢复

图 1 给出了 S⁺ 经 900℃、15 分钟炉退火后 GaAs 中薄层载流子浓度 N_s 与注入剂量 ϕ 的关系。从图中可看出, 当 $\phi > 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ 时, N_s 趋向饱和即激活率 η 开始下降。本文得到的 N_s 饱和时的 ϕ 和 η 均优于文献[4]给出的结果。

表 1 列出了快速退火和炉退火样品的平均激活率 η 和迁移率 μ 数据。从中可知(1)随着炉退火温度上升 η 增大, μ 开始增加以后又降低, 最佳条件为 900℃、15 分钟。(2)快速退火样品的 η 高于炉退火, μ 与炉退火相近。

表 1 快速退火与炉退火样品比较

	快速退火	炉退火				
退火时间 t (s)	15	450				
退火温度 T (℃)	1040	600	700	800	900	1000
激活率 η (%)	70	/	5	17	58	68
迁移率 $\bar{\mu}$ ($\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$)	2800	/	/	2800	2950	1100
注入条件	$E = 600 \text{ keV } \phi = 8 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$					

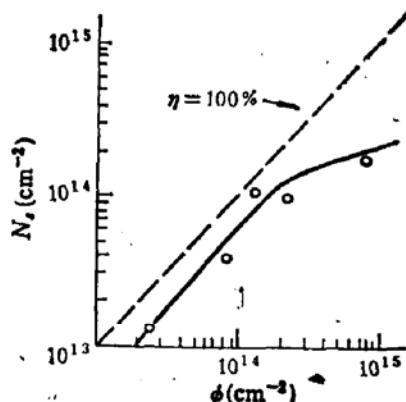


图 1 薄层载流子浓度与注入剂量关系
(600keV, 900℃ 15')

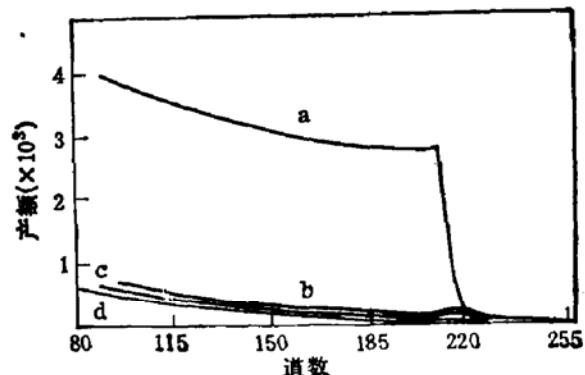


图 2 GaAs 中 S⁺ 注入的退火样品的背散射能谱
(a. 随机谱, b. 快速退火, c. 衬底单晶, d. 炉退火)

图 2 系背散射沟道分析谱。其中不但给出了 GaAs 中注 S⁺ 的快速退火、炉退火样品的定向谱, 还给出了经炉退火的衬底单晶定向谱以及随机谱。结果表明注 S⁺ 造成的损伤经 1040℃、15 秒钟快速退火或 900℃、15 分钟炉退火都已基本上消除。有趣的是炉退火的注 S⁺ 样品的定向谱比未注 S⁺ 的衬底单晶定向谱更低, 其原因有待进一步研究。

2. 载流子浓度纵向分布 $N(x)$

本文较深入地开展了不同退火温度 T 、时间 t 和注入剂量 ϕ 对 $N(x)$ 影响的研究, 获得了许多有关的数据, 部分结果见图 3。结果表明(1)900℃、15 分钟是 S⁺ 激活的最佳炉退火条件, 但实测 $N(x)$ 曲线严重偏离 LSS 理论值(图 3)。(2)在 900℃ 条件下, 峰值浓度、有源层深度均随 t 延长而增加, 当退火时间 t 为常数时, 它们随着 T 升高而增加, 但 1000℃、15 分钟的样品在衬底内出现 P型层(图 3)。(3)有源层深度不但与注入

能量、炉退火温度、时间有关，而且随 ϕ 增加显著展宽。（4）1040℃、15秒钟是高频红外石墨快速退火最佳条件，实测 $N(x)$ 曲线与LSS理论值较接近，扩展很小，而且峰值浓度高，明显优于炉退火。

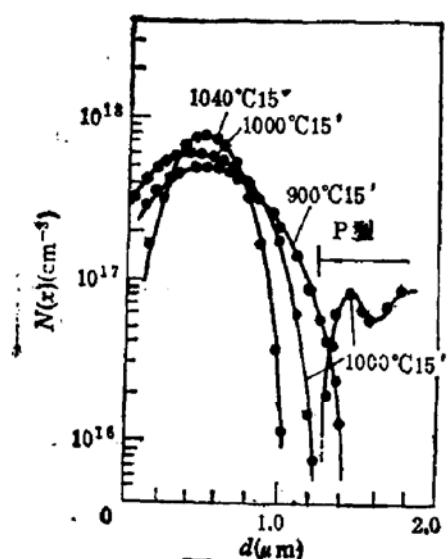


图3 载流子浓度纵向分布曲线
(600keV, $8 \times 10^{13} \text{cm}^{-2}$)

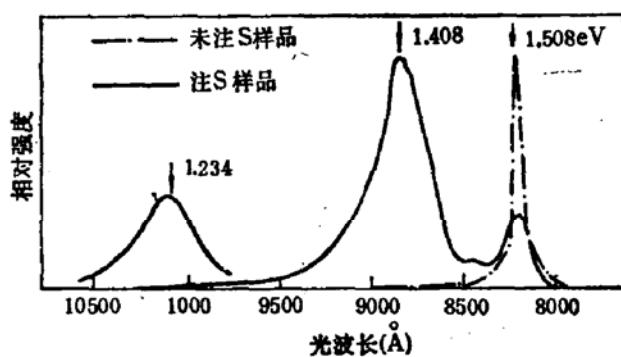


图4 注 S^+ GaAs 样品的光致发光谱
(600keV, $8 \times 10^{13} \text{cm}^{-2}$)

3. 光致发光谱

图4系经900℃、15分钟炉退火的注 S^+ 和衬底单晶样品的77K的PL谱线。相互比较注 S^+ 样品明显多了1.234和1.408eV二个强峰。1.234eV峰已有文献^[5]指出与S有关。1.408eV峰在注 Si^+ GaAs样品中出现过，起因众说纷云^[6,7,8]，尚未定论。本文测得的1.408eV峰的本质尚须深入研究。

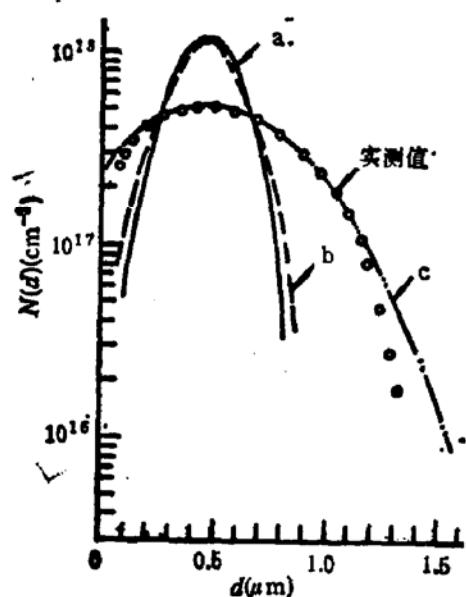


图5 计算值与理论值比较

其中， N 有效浓度， R_p 投影射程， ΔR_p 标准偏差， z 深度，

D 扩散系数， t 退火时间， η 电激活率， ϕ 注入剂量。

代入文献[10]给出的900℃S的扩散系数 $D2.64 \times 10^{-14} \text{cm}^2/\text{s}$ ，算得图5曲线b，远小于实验值的拟合曲线c（取 $D1.54 \times 10^{-12} \text{cm}^2/\text{s}$ ）。图5中曲线a为LSS理论值。文献[11]指出S的快扩散决定于 V_{A_s} 的扩散系数，但后者D仅为 $5.2 \times 10^{-14} \text{cm}^2/\text{s}$ （由[12]算

四、讨 论

退火过程中GaAs内注入 S^+ 的纵向扩展问题，假设可近似为限定源在无限空间中的扩散，其初始条件为高斯分布，文献[9]给出扩展后纵向浓度分布的近似公式：

$$N(x, z) = \frac{\eta \cdot \phi}{\sqrt{2\pi\Delta R_p^2 + 4Dt}} \times \exp\left[-\frac{(x - R_p)^2}{\sqrt{2\Delta R_p^2 + 4Dt}}\right]$$

出)也不足以说明快扩散行为。为更确切地证实, 我们专门做了 900℃、15 分钟的不加 As 压的半封闭炉退火和闭管 As 压炉退火的实验, 测得的 $N(x)$ 分布曲线与前文 As 压半封闭炉退火结果相近(图略), 纵向浓度的严重再分布状况并未得到改善, 这说明 GaAs 中 V_{As} 浓度与扩散系数大小不是造成 S 快扩散的主要原因。

1040℃、15 秒快速退火曲线拟合结果(取 $D = 2.0 \times 10^{-12} \text{ cm}^2/\text{s}$, 图略)表明与由文献[10]给出的 $D = 1.23 \times 10^{-12} \text{ cm}^2/\text{s}$ 相近。

以上计算结果说明常规热扩散产生的纵向浓度扩展极小, 它无法解释炉退火时 GaAs 中 S^+ 的纵向浓度再分布。根据文献[13]提出注入离子纵向再分布在损伤恢复之前为增强扩散, 在损伤恢复之后为常规扩散的观点, 可较好地解释炉退火和快速退火方法不同为何导致纵向浓度分布的显著差别。因为炉退火温度较低, 注入造成的损伤恢复缓慢, 在退火开始时替位率很小, 以损伤区扩散为主(属离子注入增强扩散), 故扩散速度就大大地高于替位式的常规扩散。而快速退火温度很高, 其损伤在瞬间得到恢复即 S^+ 已处在替代位置, 故与常规扩散较一致。炉退火时 S^+ 的增强扩散的机理有待进一步研究。

五、小结

1. 注 S^+ 造成 GaAs 注入区的辐照损伤经 900℃、15 分钟炉退火或 1040℃、15 秒钟高频红外石墨快速退火已基本消除。
2. 炉退火造成的 S^+ 的严重再分布不能简单用 S^+ 或 V_{As} 的常规热扩散来解释, 离子注入的增强扩散是其主要原因。
3. 使用快速退火方法能抑制注入 S^+ 在 GaAs 中的增强扩散, 明显减小 S^+ 的再分布, 可以获得适合于制造 GaAs MESFET 器件的薄有源层。

作者对本所高速电子器件组, 材料测试组王绍渤、朱福英等同志在实验中给予的帮助表示谢意。

参 考 文 献

- [1] P. L. Hemment, et al., in Ion Implantation in Semiconductors Science and Technology, Ed by S. Namba (1974), 27.
- [2] 夏冠群等,稀有金属,国外版,6,97(1987).
- [3] Wei Dong Fan, et al., 1986 GaAs & Related Compounds Symp. (1987), 277.
- [4] Y. K. Yeo, et al., J. Appl. Phys., 53, 1812(1982).
- [5] E. W. Williams, Phys. Rev., 168, 922(1968).
- [6] M. Oskima, et al., J. Electrochem. Soc., 131, 130(1984).
- [7] S. Y. Yin, et al., J. Appl. Phys., 54, 360(1983).
- [8] P. B. Klein, et al., J. Appl. Phys., 51, 4861(1980).
- [9] 李国辉等,半导体学报,4,374(1983).
- [10] B. Goldstein, Phys. Rev., 121, (1961), 1305.
- [11] 罗晋生,离子注人物理,上海科技出版社,(1984)69.
- [12] S. Y. Chiang, et al., J. Appl. Phys., 46, 2986(1975).
- [13] A. Chu, et al., Ion Implantation in Semiconductors 1976, Plenum Press, New York, F. Chernow Ed. (1977) 711.

Electrical Properties of S⁺ Implanted into SI GaAs

Xia Guanqun, Guan Anmin, Geng Haiyang and Wang Weiyuan

(Shanghai Institute of Metallurgy, Academia Sinica, Shanghai)

Abstract

The electrical properties of S⁺ implanted into SI GaAs after conventionally thermal annealing (CTA) and rapidly thermal annealing (RTA) have been studied. The rapid diffusion and redistribution of S⁺ implanted into GaAs after CTA depend not on conventional diffusion of S or arsenic vacancy V_{As}, but on enhanced diffusion by ion implantation. By RTA technique enhanced diffusion can be restrained, redistribution of S⁺ implanted can be decreased greatly and thin active layer suitable for fabricating GaAs MESFET devices can be obtained.

KEY WORDS: GaAs, ³²S⁺, Ion implantation, RTA, Diffusion, Redistribution