

掺 Cr 半绝缘 GaAs 中 Si 离子注入的 载流子分布尾研究

王渭源 夏冠群 卢建国 鄧永富 乔 塘

(中国科学院上海冶金研究所)

1984年3月12日收到

提 要

本文研究了掺 Cr 半绝缘 GaAs 中 $^{28}\text{Si}^+$ 注入后的载流子浓度分布尾,包括退火温度和时间的影响.应用计算机模拟了分布尾对 GaAs MESFET 器件输出特性的影响,与实测结果符合,表明分布尾会造成器件输出特性异常.

讨论了产生分布尾的原因,认为与 GaAs 衬底中残留 Si 等浅施主杂质和高温退火时 Cr 再分布有关.

一、引 言

离子注入掺杂具有精确控制浓度和分布以及重复性好等优点,近年来已应用于 GaAs MESFET 器件及其超高速集成电路.我们在 Si 全离子注入 GaAs MESFET 研究过程中,观察到一部分器件输出特性有些异常,表现为夹断电压偏高,小电流时跨导偏低.实验证实了当时的分析^[1],这一现象与注入后载流子分布尾有关.

本文研究了半绝缘 GaAs 中 $^{28}\text{Si}^+$ 注入后的载流子分布尾,以及退火温度和时间对载流子浓度分布尾的影响.根据实测载流子分布近似取双层分布模型,应用计算机模拟了载流子浓度分布尾对 MESFET 器件输出特性的影响.最后,基于 GaAs 高阻衬底中 Cr 杂质在高温退火时的再分布和残留 Si 等施主杂质讨论了产生分布尾的原因.

二、样品制备与测试

样品使用 $^{28}\text{Si}^+$ 直接地注入到半绝缘 GaAs 衬底中,经高温退火活化后制得.半绝缘衬底是横拉掺 Cr 的 GaAs 单晶,掺 Cr 量为 $4 \times 10^{16}\text{cm}^{-3}$,残留 Si 浓度为 $\sim 4 \times 10^{16}\text{cm}^{-3}$,晶向为 $\langle 100 \rangle$,经化学机械抛光后,再用 $\text{H}_2\text{SO}_4:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O} = 3:1:1$ 腐蚀 (50°C, 5min) 以去除抛光损伤层.离子注入机的最高注入能量为 200 keV,真空度小于 5×10^{-6} Torr,离子源工作物质用超纯氢气稀释的纯硅烷混合气体,注入时衬底偏离 $\langle 100 \rangle$ 约 10° ,注入用双重注入,其能量与剂量分别为 150keV, $5 \times 10^{12}\text{cm}^{-2}$ 和 50keV, $8 \times 10^{12}\text{cm}^{-2}$. 高温退火在电阻丝炉中进行,炉温由自动控温装置控制,样品舟置于恒温带中,温度波动范围

$\pm 1^\circ\text{C}$. 为防止 As 从 GaAs 表面挥发, 退火用注入面与抛光的石英片紧密接触的无包封退火法^[2], 在氢气气氛中进行.

不同温度或不同时间对比试验的样品, 用同一注入片分割成若干小块制得. 样品的载流子浓度纵向分布用电化学逐层腐蚀 C-V 法仔细测定, 并用光电化学法进行校验. 测试样品的欧姆接触是由真空蒸发 AuGeNi-Au 后, 在 450°C 下一分钟合金化而成.

三、实验结果与讨论

1. 载流子浓度分布与退火温度关系

图 1 表示注入 $^{31}\text{Si}^+$ 的 GaAs 片在 $600\text{--}850^\circ\text{C}$ 间不同温度下经过 30min 退火后, 测得的载流子浓度分布曲线. 900°C 时, 出现 P 型, 未在图上标出. 由图 1 可以看出: (1) 在 $600\text{--}800^\circ\text{C}$ 间, 有源层中激活率随温度升高而增大, 但超过 850°C 时, 激活率反而较 800°C 为小. 在 $600, 700, 800$ 和 850°C 时, Si 的激活率分别为 20, 30, 70 和 34%. (2) 仔细测定有源层外载流子浓度, 发现有一段分布尾, 而且随温度升高, 尾的浓度增高, 但浓度分布尾的谷峰位置变动不大.

不同衬底材料注入及退火后, 浓度分布与温度关系的测定结果与图 1 类同, 只是具体数值有些不同.

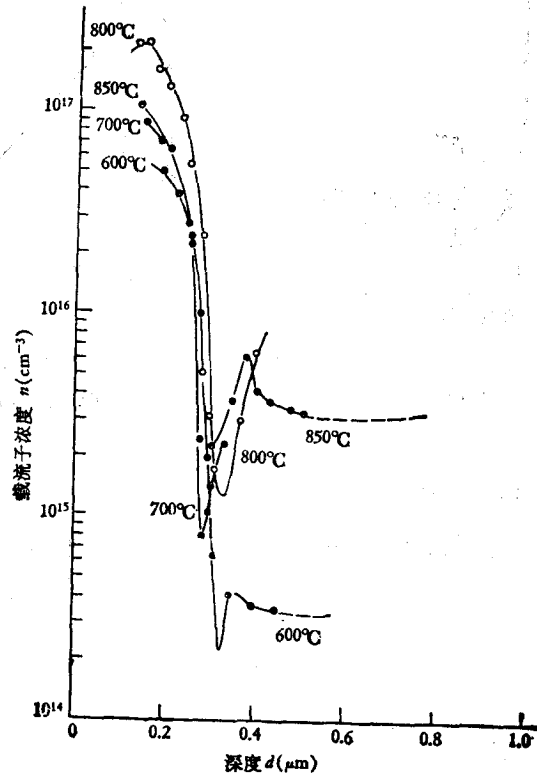


图 1

$150\text{keV } 5 \times 10^{12}\text{cm}^{-2}; 50\text{keV } 8 \times 10^{12}\text{cm}^{-2}$

2. 载流子浓度分布与退火时间关系

图 2 表示在退火温度 800°C 下分别经过 30, 90 和 180 min 退火后的载流子浓度分布

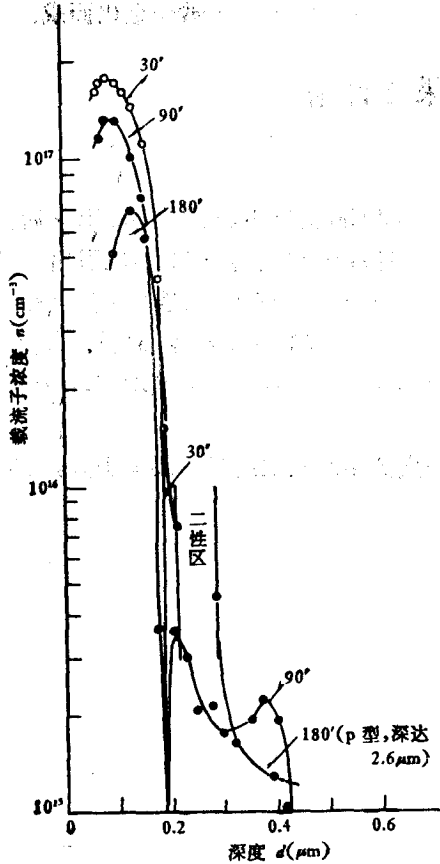


图 2
注入条件同图 1

曲线。可见,随着退火时间延长,载流子浓度分布尾明显变宽,退火至 3h,呈复杂的“n-二性区-p”结构,其中 p 层厚度深度达 $\sim 2\mu\text{m}$ 。图 3 系在退火温度 800°C 下有源层中峰值载流子浓度与退火时间关系,表明随着退火时间从 30min 到 180min,峰值浓度呈指数下降。

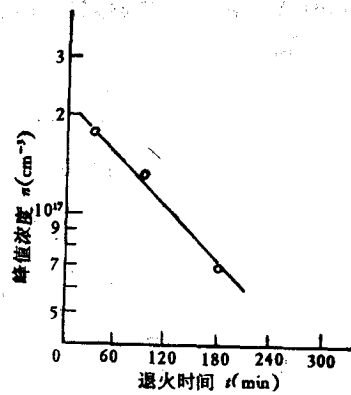


图 3
注入条件同图 1

3. 分布尾对MESFET输出特性影响

为了简化起见,把整个载流子浓度分布(包括分布尾)近似为双层分布模型。按照文献 [3] 给出的 GaAs MESFET 模型和分析程序对不同分布尾浓度和深度进行计算机模拟。双层分布模型示意图、计算结果和实测的器件特性均见图 4。计算结果表明,载流子浓度分布尾的存在引起夹断电压增加,输出特性曲线上疏下密,即小电流时跨导 g_m 下降,与实测的异常特性曲线相当符合。此外,模拟结果表明分布尾过长,零栅偏下的源漏电流 I_{DS} 几乎不能饱和,反映了输出阻抗下降。

可以预期,分布尾所造成的异常输出特性,将严重影响 GaAs IC 的工作参数和微波器件的增益及噪声。

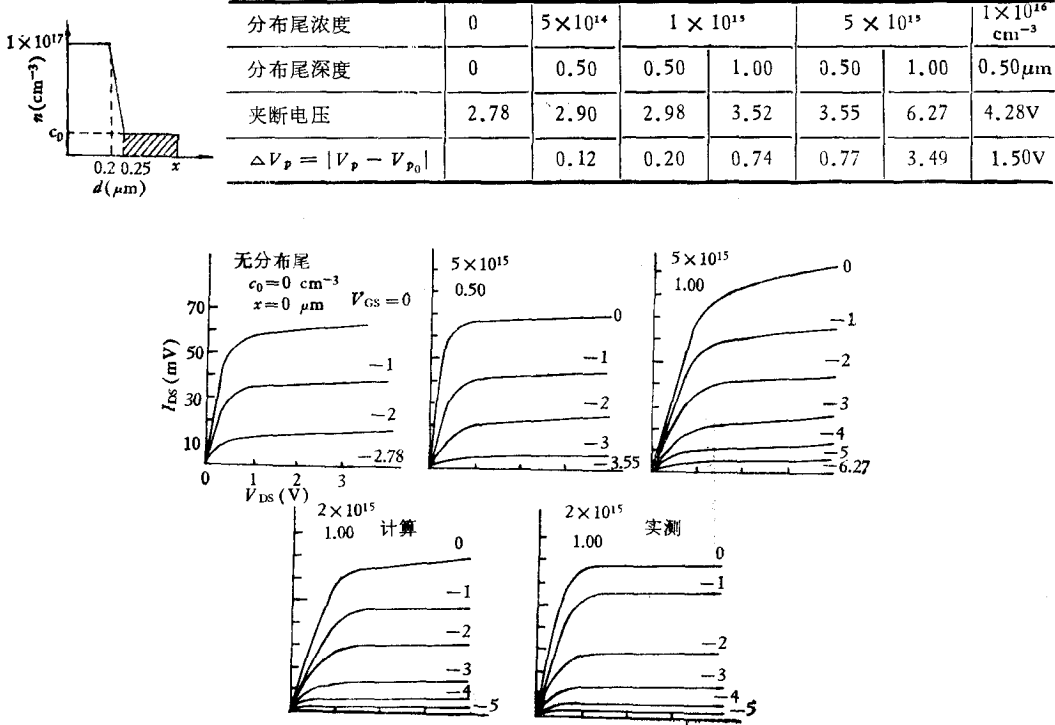


图 4

4. 载流子分布尾产生的原因

GaAs 中载流子浓度的电中性条件, 考虑到不均匀分布后可表示为

$$n(x) = \sum_p \eta_{D,p} N_{D,p}(x) - \sum_q \eta_{A,q} N_{A,q}(x) + p(x). \quad (1)$$

其中 $N_{D,p}(x)$, $N_{A,q}(x)$ 为施主和受主掺杂量, $\eta_{D,p}$, $\eta_{A,q}$ 分别为电离系数, $n(x)$, $p(x)$ 为电子和空穴浓度.

对于注 Si 掺 Cr 样品, 掺杂元素主要是注入的 Si ($N_{\text{Si},i}$)、掺入的 Cr (N_{Cr}) 以及背景 Si ($N_{\text{Si},b}$), 在忽略其它杂质情况下, 上式可改写为

$$n(x) = \eta_{\text{Si},i} N_{\text{Si},i}(x) + \eta_{\text{Si},b} N_{\text{Si},b}(x) - \eta_{\text{Cr}} N_{\text{Cr}}(x). \quad (2)$$

于是 $n(x)$ 与离子注入理论值之差 $\Delta n(x)$ 可写成

$$\Delta n(x) = n(x) - \eta_{\text{Si},i} N(x) = \eta_{\text{Si},b} N_{\text{Si},b}(x) - \eta_{\text{Cr}} N_{\text{Cr}}(x). \quad (3)$$

$\Delta n(x)$ 是衡量分布尾大小的一个量. $\Delta n(x) = 0$, 表示载流子浓度分布 $n(x)$ 仅由注入 Si ($\eta_{\text{Si},i} N_{\text{Si},i}(x)$) 决定. $\Delta n(x)$ 数值越正, 分布尾越严重. 假设原材料中 $N_{\text{Si},b}(x)$ 以及 $N_{\text{Cr}}(x)$ 均匀分布, 经离子注入和退火后 $N_{\text{Si},b}(x)$ 仍然均匀分布, 而只有 Cr 发生了再分布, 呈表面富集及内部有一耗尽区, $N_{\text{Si},i}(x)$ 由 LSS 理论分布^[4]决定. 当耗尽区内 Cr 深受主浓度不足以补偿背景 Si 施主杂质浓度时, 造成 $\Delta n(x)$ 正值即产生分布尾, 其程度随温度升高而增加. 此外, 温度升高后, As 空位 V_{As} 增加, 造成部分注入 Si 成为 Si_{As} 或与 V_{As} 结合成络合物而形成受主^[5,6], 从而 $\eta_{\text{Si},i}$ 变小, 使有源层内 $n(x)$ 下降, 甚至出现 P 型.

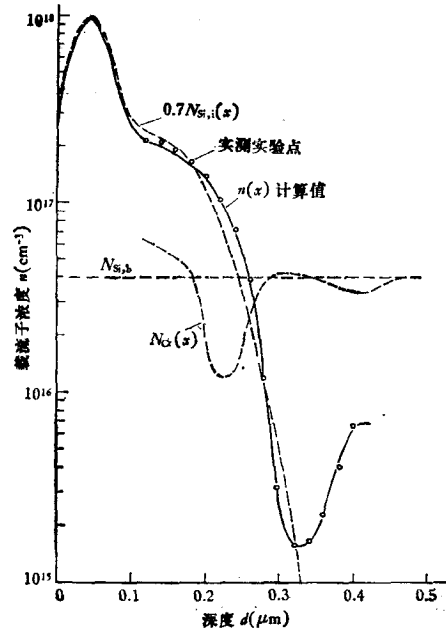


图 5

注入条件同图 1

基于这些考虑^[7-12], 假设了一定的 Cr 再分布曲线 $N_{Cr}(x)$ 和 $\eta_{Cr} = 1$, $N_{Si,i}(x)$ 由 LSS 理论分布决定和 $\eta_{Si,i} = 0.7$ (实测), 以及 $N_{Si,b} = 4 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ (实测) 和 $\eta_{Si,b} = 1$, 由 (2) 式计算了载流子浓度分布, 结果示于图 5 (退火条件 800°C , 30min), 可见与实测结果相当符合. 值得指出, 我们假设的 $N_{Cr}(x)$ 与文献 [12] 给出的实测结果在定性上是相符的. 对于其它温度, 假设不同的 $N_{Cr}(x)$, 也可得到与实测结果相当符合的计算曲线(从略). 因此, 我们认为载流子浓度分布尾与高温退火时 Cr 再分布和 GaAs 衬底中残留 Si 等施主杂质有关. 据此, 为了减小分布尾, 最好用不掺 Cr 的纯度 GaAs 单晶或 Si 沾污少、掺 Cr 量少的半绝缘单晶, 至少应选择合适的退火温度(如用较低温度).

程兆年同志协助进行分布尾对器件输出特性影响的计算机模拟计算, 在此谨表衷心的感谢.

参 考 文 献

- [1] 王渭源等, 砷化镓及其有关化合物会议论文集, (1981), 291页.
- [2] 王渭源等, 物理学报, **31**(1982), 71.
- [3] 程兆年, 王渭源, 砷化镓及其有关化合物会议论文集, (1981), 302页.
- [4] 程兆年, 米文玉, 王渭源, 物理学报, **31**(1982), 922.
- [5] S. Y. Yin and D. B. Wittky, *J. Appl. Phys.*, **54**(1982), 360.
- [6] H. Kressel *et al.*, *J. Appl. Phys.*, **39**(1982), 2006.
- [7] H. Yagita and T. Onuma, *J. Appl. Phys.*, **53**(1982), 1218.
- [8] M. Feng, S. P. Kwak, V. Eu and B. W. Henderson, *J. Appl. Phys.*, **52**(1981), 2990.
- [9] R. G. Wilson *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, **36** (1980), 215.
- [10] P. N. Favennce, H. L'haridon, *Appl. Phys. Lett.*, **35** (1979), 699.
- [11] T. J. Magee *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, **38**(1981), 559.
- [12] T. J. Magee *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, **39**(1981), 906.

CARRIER PROFILE TAIL IN SILICON IMPLANTED Cr-DOPED SEMI-INSULATING GaAs SUBSTRATE

WANG WEI-YUAN XIA GUAN-QUN LU JIAN-GUO SHAO YONG-FU QIAO YONG

(Shanghai Institute of Metallurgy, Academia Sinica)

ABSTRACT

We studied the carrier profile tail formed in GaAs materials of $^{28}\text{Si}^+$ implanting into Cr-doped semi-insulating substrate, including the effects of annealing temperature and time. The effects of carrier profile tail on GaAs MESFET output characteristics simulated by computer were in accord with measured results, indicating that the profile tail does make the abnormal output characteristics in MESFET. The origin of profile tail in connection with Si background in GaAs substrate and Cr redistribution during high temperature annealing was discussed.