

As⁺注入 Si_{1-x}Ge_x 的快速退火行为 *

邹吕凡 王占国 孙殿照 何 沙¹ 范缇文 刘学锋 张靖巍

(中国科学院半导体研究所 半导体材料科学实验室 北京 100083)

(¹中南民族学院 电子工程系 武汉 430074)

摘要 用二次离子质谱对 As⁺注入 Si_{1-x}Ge_x 的快速退火行为进行了研究。Si_{1-x}Ge_x 样品中 Ge 组分分别为 $x=0.09, 0.27$ 和 0.43 。As⁺注入剂量为 $2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$, 注入能量为 100 keV 。快速退火温度分别为 950°C 和 1050°C , 时间均为 18 秒。实验结果表明, Si_{1-x}Ge_x 中 As 的扩散与 Ge 组分密切相关, Ge 组分越大, As 扩散越快。对于 Ge 组分较大的 Si_{1-x}Ge_x 样品, As 浓度分布呈现“盒形”(box-shaped), 表明扩散与 As 浓度有关。Si_{1-x}Ge_x 样品中 As 的快扩散可能与未激活 As 的快速退火行为有关。就作者所知, 离子注入 As 在 Si_{1-x}Ge_x 中的扩散研究, 以前未见报道。

PACC: 6630J

从技术角度出发, 研究与集成工艺有关的物理现象, 如杂质扩散, 是非常重要的。对 Si 而言, 由于 Si 的集成工艺要求在 Si 中掺入高浓度的 As, 因而对 Si 中离子注入 As 的扩散和分凝已进行了大量研究^[1~3]。但是, As 在 Si_{1-x}Ge_x 中的扩散却研究得很少^[4]。近来, S. M. Hu 等^[5]研究了多晶硅中离子注入的 As 向 Si_{0.9}Ge_{0.1} 中的扩散, 指出 As 趋向于从 SiGe 合金中分凝出来。本文中, 我们首次报道了用二次离子质谱研究离子注入 As 在 Si_{1-x}Ge_x 合金中扩散的实验结果, 并对其扩散机构进行了讨论。

实验中所用的 Si_{1-x}Ge_x 样品是用气源分子束外延技术生长的, 所用气源为 Si₂H₆ 和 GeH₄。生长工艺如下(详细过程请参阅文献[6, 7]): 生长用衬底为 CZ p-Si, 晶向为 <100>, 电阻率为 $5 \sim 10 \Omega \cdot \text{cm}$ 。Si_{1-x}Ge_x 外延层的生长温度为 620°C 。生长 Si_{1-x}Ge_x 外延层前, 先生长组分渐变的 SiGe 缓冲层, 以保证 Si_{1-x}Ge_x 外延层中应变弛豫和很低的缺陷密度^[8]。Ge 组分由 Auger 电子能谱确定。本文所用的 Si_{1-x}Ge_x 样品的 Ge 组分分别为 9%, 27% 和 43%。

上述三种样品(Si_{0.91}Ge_{0.09}, Si_{0.73}Ge_{0.27} 和 Si_{0.57}Ge_{0.43})在室温下同时进行 As 离子注入, 注入能量为 100 keV , 注入剂量为 $2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ 。注入后, 将样品解理并分成两组, 每组均包

* 国家自然科学基金资助项目

邹吕凡 男, 博士生, 目前主要从事 SiGe 材料的生长, 性质及相关器件的研究

王占国 男, 中国科学院院士, 目前主要从事低维半导体异质结构材料及性质研究

何 沙 男, 讲师, 目前主要从事凝聚态物理的研究

1996年1月16日收到初稿, 1996年3月15日收到修改稿

括三个 Ge 组分的 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 样品 ($x = 0.09, 0.27$ 和 0.43)。两组样品分别在 950°C 和 1050°C 下快速退火 18 秒(包括升温时间 3 秒)。退火前后的 As 浓度分布用 Cameca IMS4f SIMS 系统分析获得。

图 1~3 是 $\text{Si}_{0.91}\text{Ge}_{0.09}$, $\text{Si}_{0.73}\text{Ge}_{0.27}$ 和 $\text{Si}_{0.57}\text{Ge}_{0.43}$ 样品退火前后的 As 浓度分布。由图可见, 退火后的 As 分布随 Ge 组分不同而不同。随着 Ge 组分从 9% 增加至 43%, 退火前的

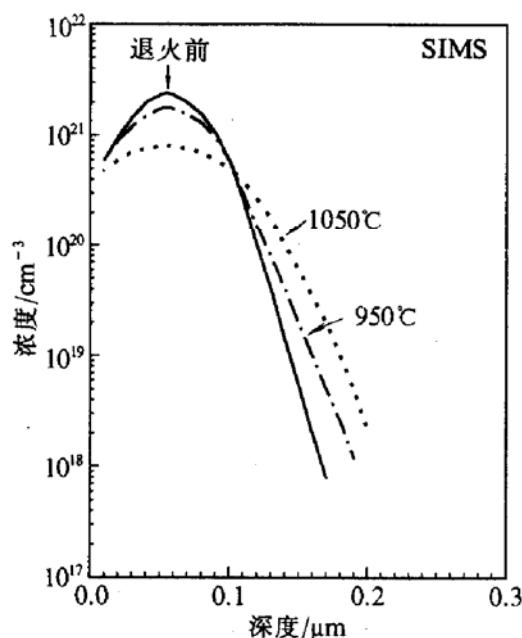


图 1 退火前后 As 在 $\text{Si}_{0.91}\text{Ge}_{0.09}$ 中的浓度分布
As 峰值深度从 56nm 减少至 37nm。这一现象是很好理解的, 因为能量为 100keV As^+ 主要通过核阻止机构消耗能量, 且投影射程反比于靶原子质量与入射离子质量的比率^[9, 10]。

根据图 1~3 所示, 对于不同的 Ge 组分, As 的浓度分布不同。对于 $x = 0.09$ 的样品

(图 1), 在 950°C 快速退火 18 秒后, As 的再分布是不明显的。然而, 当退火温度上升至 1050°C 时, As 的分布因扩散而展宽。对于 Ge 组分为 0.27 的样品(图 2), 950°C 退火后 As 的浓度分布有明显的展宽, 而在 1050°C 退火后, 其分布为“盒形”。当 Ge 组分增加至 0.43 时, 950°C 和 1050°C 退火后的 As 浓度分布均为“盒形”(图 3), 这表明 As 的扩散与浓度相关^[11]。由此可见, As 扩散因 Ge 组分的增加而明显加剧。

当剂量为 $2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ 的 As 离子注入 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 合金后, 注入层因辐照损伤而成为非晶层。在随后的退火过程中, 杂质的再分布与非晶层的再结晶过程(固相外延过程)有关。如果 As 浓度小于材料中 As 的电激活限, 在固相外延过程中, 掺杂杂质原子与基质原子一起进入晶格点阵, 因此可将杂质全部激活, 而对杂质分

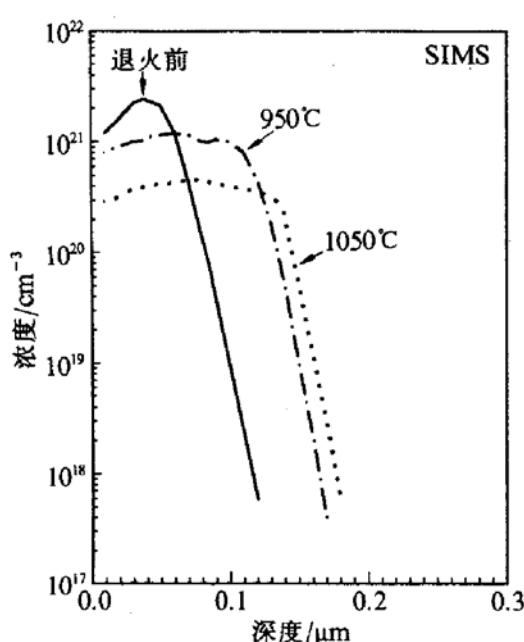


图 3 退火前后 As 在 $\text{Si}_{0.57}\text{Ge}_{0.43}$ 中的浓度分布

布的改变很小。然而,对于大剂量的 As 离子注入,除了一部分 As 被激活以外,还有一部分 As 未激活。这部分未激活 As 的快速退火行为与 As 在 Si_{1-x}Ge_x 合金中的快扩散有关。

由于 As 在 Si 中的固溶限 ($\sim 3 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$) 比在 Ge 中的固溶限 ($\sim 2 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$) 大得多^[12], 而且在 Si_{0.6}Ge_{0.4} 中形成 GeAs 沉淀时 As⁺ 的注入剂量也比在 Si 中形成 SiAs 沉淀时的注入剂量至少低一个数量级^[13], 这样, 我们可以合理地推论 As 在 Si_{1-x}Ge_x 样品中的固溶限可能会随着 Ge 组分的增加而降低。因此, 对于不同 Ge 组分的 Si_{1-x}Ge_x 样品, 若注入相同剂量的 As 离子, 就会导致未激活 As 随 Ge 组分的增加而增加。而没有包含在 GeAs 沉淀中的 As 在退火过程中可以扩散^[3]。对于 Ge 组分较小的样品 ($x \leq 0.09$), 它是一个富 Si 材料, 其特性与 Si 的相似, 即大部分未激活 As 是以 As 原子团 (cluster) 形式存在, 即使存在 GeAs 沉淀, 其量也是很少的。由于 As 原子团的分解温度高于 1100°C^[14], 这样, 低温 (950°C) 退火时, As 原子团没有分解, 而 As 原子团又是不运动的, 因而 As 浓度分布接近于退火前的分布, 而高温 (1050°C) 退火时, 因扩散加剧, As 浓度分布比退火前的有明显展宽。随着 Ge 组分的增加, GeAs 沉淀相增多。由于本工作中的退火温度高于 GeAs 的形成温度 ($\leq 900^\circ\text{C}$ ^[4,13]), 因此 GeAs 沉淀的形成和分解同时存在, 这将导致未激活 As 扩散得更深, 使得退火后的 As 分布呈现“盒形”分布 (见图 2 和图 3), 这表明了与浓度有关的扩散行为特征。如图 3 所示, 当 Ge 组分较高时, As 的峰值浓度更靠近表面, 这样, 随着退火温度的升高, As 的外扩散加剧, 导致 1050°C 退火后全部的 As 浓度比 950°C 退火后的少。以上只是我们对离子注入 As 在 Si_{1-x}Ge_x 样品中的扩散机构的初步讨论, 进一步的结果将另文研究。

综上所述, 离子注入 As 在 Si_{1-x}Ge_x 样品中的浓度分布随 Ge 组分的不同而不同。随着 Ge 组分的增加, Si_{1-x}Ge_x 样品中的 As 分布为“盒形”, 表明与浓度有关的 As 扩散。当 Ge 组分一定时, As 的扩散随温度的增加而加剧; As 的扩散与 Si_{1-x}Ge_x 样品中的 Ge 组分密切相关, Ge 组分越大, As 扩散越快。Si_{1-x}Ge_x 样品中 As 的快扩散可能与未激活 As 的快速退火行为有关。就作者所知, 离子注入 As 在 Si_{1-x}Ge_x 中的扩散研究, 以前未见报道。

参 考 文 献

- [1] A. N. Larsen, S. Yu. Shiryayev, E. S. Sørensen et al., Appl. Phys. Lett., 1986, **48**: 1805.
- [2] A. Armigliato and A. Parisini, J. Mater. Res., 1991, **6**: 1701.
- [3] D. Nobili, S. Solmi, A. Parisini et al., Phys. Rev., 1994, **B49**: 2477.
- [4] T. W. Fan, A. Nejim, J. P. Zhang et al., Appl. Phys. Lett., 1995, **66**: 1117.
- [5] S. M. Hu, D. C. Ahlgren, P. A. Ronsheim et al., Phys. Rev. Lett., 1991, **67**: 1450.
- [6] Lyu-fan Zou, Z. G. Wang, D. Z. Sun et al., in Proceedings of the Third International Conference on Nonlinear Optical Physics and Applications, Harbin(1995), p. 12.
- [7] Lyu-fan Zou, Z. G. Wang, D. Z. Sun et al., in Proceedings of the Third National Conference on Molecular Beam Epitaxy, Jiande (1995), p. 118.
- [8] E. A. Fitzgerald, Y.-H. Xie, D. Monroe et al., J. Vac. Sci. Technol., 1992, **10**: 1807.
- [9] S. M. Sze, Semiconductor Device, Physics and Technology (John Wiley & Sons, New York, 1985), Chap. 10, p. 409.
- [10] H. Maes, W. Vandervorst and R. Van Overstraeten, in Impurity Doping Processes in Silicon, edited by F. F. Y. Wang (North-Holland, Amsterdam, 1981), p. 474.

- [11] Cynthia. C. Lee, Michael. D. Deal, John. C. Bravman, Appl. Phys. Lett., 1995, **66**: 355.
- [12] F. A. Trumbore, Bell Syst. Tech. J., 1960, **38**: 205.
- [13] V. S. Tishkov, P. I. Gaiduk, S. Yu. Shiryaev *et al.*, Appl. Phys. Lett., 1996, **68**: 655.
- [14] T. E. Seidel, C. S. Pai, D. J. Lischner *et al.*, Mater. Res. Soc. Symp. Proc., 1985, **35**: 329.

Annealing Behavior of As⁺ Implant in Si_{1-x}Ge_x Epilayers by RTA

Zou Lyufan, Wang Zhanguo, Sun Dianzhao, He Sha¹,
 Fan Tiwen, Liu Xuefeng and Zhang Jingwei

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

(*1 Department of Electronic Engineering, South Central College for Nationalities, Wuhan 430074*)

Received 16 January 1996, revised manuscript received 15 March 1996

Abstract Diffusion of ion implanted As in relaxed Si_{1-x}Ge_x is studied as a function of Ge content over a wide range of Ge fractions (0~43%) and annealing temperature for the first time. The samples were implanted at an energy of 100keV with a dose of $2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ and subsequently rapid thermally annealed (RTA) for 18 second at 950°C and 1050°C, respectively. Arsenic concentration profiles measured by using secondary-ion-mass spectroscopy (SIMS)suggest that the behavior of implanted As in Si_{1-x}Ge_x after RTA is different from that in Si, and the Si_{1-x}Ge_x samples exhibit box-shaped, concentration-dependent diffusion profiles with increasing Ge content. Experimental results show that the arsenic diffusion is enhanced with increasing temperature for certain Ge content and strongly dependent on Ge content, and the higher Ge content, the faster As diffusion. Based on the experimental results, we have discussed the diffusion mechanism in Si_{1-x}Ge_x alloys and reasonably explained the faster As diffusion in Si_{1-x}Ge_x alloys compared to diffusion in Si.

PACC: 6630J