

高温注入离子的扩散和激活行为的研究

俞跃辉¹ R. Schork² H. Ryssel² 邹世昌¹

(¹中国科学院上海冶金研究所离子束开放室 上海 200050)

(²Fraunhofer-Arbeitsgruppe fuer Integrierte Schaltungen, 8520 Erlangen, Germany)

摘要 本文应用二次离子质谱(SIMS),微分霍尔效应和透射电镜(TEM)研究了硅中高温注入砷离子的扩散和激活行为。将 180KeV , $1 \times 10^{15}\text{cm}^{-2}$ 砷离子在 500°C 至 1000°C 的温度范围内注入硅。研究结果表明:在 500°C 至 850°C 注入时所发生的异常扩散和载流子浓度及迁移率深度分布与剩余缺陷的分布密切相关;而且随着注入温度的增高,砷的增强扩散亦增强,同时所形成的剩余缺陷减少。在注入温度高于 850°C 时,随着注入温度的增高,砷的增强扩散效应减弱。在 500°C 至 1000°C 的注入温度,与热扩散相比,砷的增强扩散效应显著;电激活率随着注入温度的增高而增大。

PACC: 6170T, 7280C, 6630L

1 引言

高温注入在半导体工艺技术和半导体物理基础研究中具有重要的应用价值。损伤的自退火效应和辐射增强扩散是高温离子注入的两个重要过程。作为技术应用,高温离子注入已被用于合成 SOI (Silicon-on-Insulator) 材料^[1]。为了合成 SOI 材料,大剂量的氧或氮离子必须在 500°C 至 700°C 的范围内注入硅中;在这一温度范围,由损伤的自退火效应使表层硅不处于非晶状态。从半导体物理基础研究方面看,高温注入为深入研究点缺陷的行为及点缺陷与杂质扩散相互作用过程提供了一个强有力的手段。而且,由于在高温下,点缺陷的迁移率相当大,它们可以互相湮灭或彼此之间相互作用或与注入离子相互作用形成剩余缺陷,这些缺陷对扩散、激活过程有巨大的影响^[2-7]。因此,研究高温注入过程中缺陷与注入离子间的相互作用及对扩散过程的影响是重要的。本工作中,我们研究了砷离子在高温条件下注入硅,砷的扩散和电激活行为及砷与剩余缺陷的相互作用过程。

2 实验条件

将能量为 180KeV 的砷离子,以 $1 \times 10^{15}\text{cm}^{-2}$ 的剂量,在 500°C 至 1000°C 范围内注入 $\langle 100 \rangle$ 取向,电阻率为 $20-25\text{cm}$ 的 P 型硅中,注入速率为 $5.55 \times 10^{11}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$;注入

温度以 50°C 和 100°C 间隔变化. 高温注入系统在以前文献^[8-9] 中已详细描述过. 为了进行比较, 还制备了室温注入并在与高温注入相对应的温度下, 退火 30 分钟的样品.

用二次离子质谱 (SIMS) 获得了砷原子浓度分布, SIMS 测量是在 Cameca IMS4F 系统中, 用 O 作为溅射离子进行的. 用 Van der Pauw 微分霍尔测量技术^[10] 得到了注入层区的载流子浓度和迁移率分布. 用透射电镜 (TEM) 观测了剩余缺陷. TEM 观测是在 Philips EM400T 系统中进行的.

3 结果和讨论

图 1 给出了在注入温度为 500°C , 700°C , 800°C 和 850°C 时的砷原子分布. 从图 1 中可见, 在高温注入过程中砷有明显的扩散. 在注入温度为 500°C 时, 砷分布中的峰值浓度为 $1.1 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$, 位于表面下 $0.12 \mu\text{m}$ 处, 扩散主要发生在这一分布的尾部. 在注入温度为 700°C 时, 砷分布存在双峰结构. 与 500°C 注入相比, 表面下 $0.12 \mu\text{m}$ 处的峰值浓度下降, 同时在表面下 $0.22 \mu\text{m}$ 处出现一个新峰, 浓度为 $7.5 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$. 在 800°C 注入时, 位于 $0.12 \mu\text{m}$ 处峰的浓度显著下降并同时在比 $0.22 \mu\text{m}$ 深的区域形成一个快速扩散尾. 在 850°C 注入时, 砷的扩散达到最大程度. 图 2 给出了 850°C 和 1000°C 注入时的砷原子分布. 从图中可见, 与 850°C 相比, 在 1000°C 时砷的扩散减小; 但与室温注入并经 1000°C , 30 分钟热退火的砷扩散相比, 1000°C 注入时砷的扩散增强效应仍很显著.

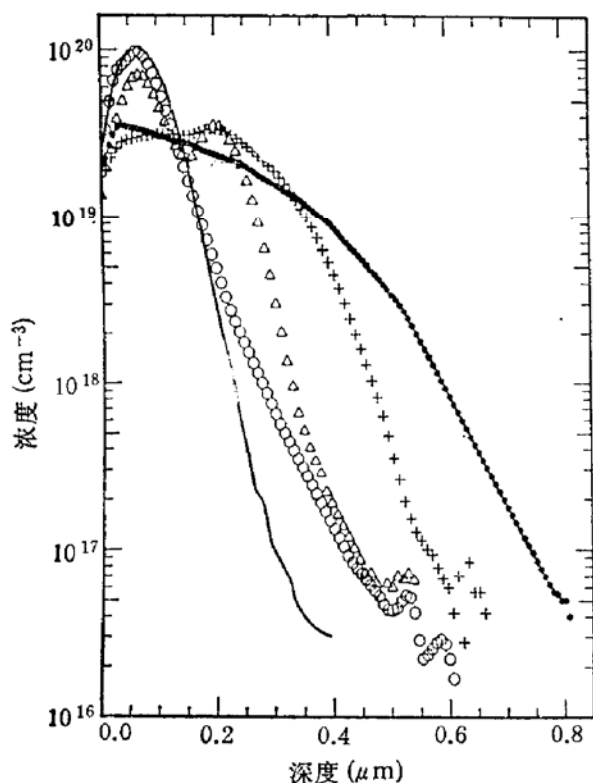


图 1 SIMS 分析所得的在注入温度为 500°C (○), 700°C (△), 800°C (+) 和 850°C (●) 的砷原子浓度分布. 实线为在室温注入并经 500°C , 30 分钟退火后的砷原子分布

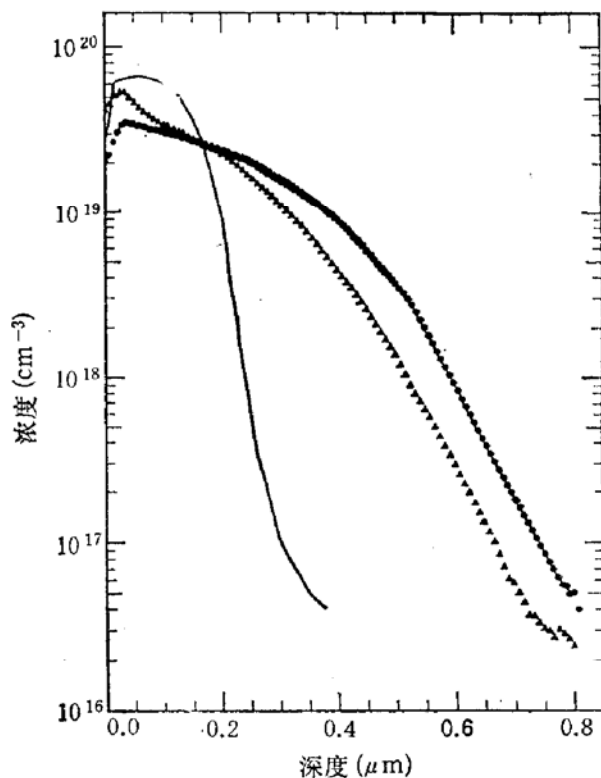


图 2 SIMS 分析所得的在注入温度为 850°C (●) 和 1000°C (▲) 的砷原子浓度分布. 实线为在室温注入并经 1000°C , 30 分钟退火后的砷原子分布

为了获得砷异常扩散与剩余缺陷的内在联系,我们还进行了 TEM 观测. 图 3(见图版 I) 为 500℃, 700℃ 和 800℃ 注入的样品的 TEM 照片. 从图 3(a) 中可见存在一个与砷原子分布相类似的高密度细小缺陷带. 在表面下 0.06μm 到 0.18μm 范围内, 缺陷密度为最高, 而这一深度范围与砷浓度分布的峰值(见图 1)位置相吻合. 图 3(b) 为 700℃ 注入的样品的 TEM 照片. 可以看出: 在 700℃ 时的剩余缺陷与 500℃ 时的缺陷显著不同: 大量细小缺陷消失, 出现许多分立直径为 10—20nm 的环状缺陷. 此类缺陷的最高密度存在于表面下 0.04μm 到 0.13μm 范围, 这一深度范围与图 1 中 700℃ 时砷分布的第一个峰值的深度位置相对应. 从图 3(b) 中还可见深度为 0.21μm 至 0.35μm 范围内存在许多长的棒状缺陷. 因此, 在与图 1 中 700℃ 时砷的分布的第二个峰值位置相对应的 0.16μm 至 0.26μm 的深度范围内: 许多环状缺陷存在于 0.16μm 至 0.2μm 深度范围内, 更多的棒状缺陷存在于 0.2μm 至 0.26μm 的深度范围内. 图 3(c) 为 800℃ 注入的样品的 TEM 照片. 从此照片中可见, 存在于注入温度低于 800℃ 样品中的分立缺陷消失, 仅在表面下 0.19μm 至 0.56μm 内有一些位错环. TEM 的结果还表明在 850℃ 和 1000℃ 注入的样品中不存在可观测的缺陷. 结合 SIMS 和 TEM 结果, 我们得知: 在注入温度为 500℃ 至 850℃ 范围内, 随着注入温度增高, 砷扩散显著增强, 同时由注入所致剩余缺陷减少. 一般掺杂原子是通过与点缺陷成对进行的, 由于剩余缺陷可成为俘获点缺陷的陷阱, 从而导致剩余缺陷附近的点缺陷过饱和度下降, 而减小了的过饱和程度导致掺杂原子与点缺陷对分解, 造成了在表面下 0.2μm 处位错高密度区的砷原子的积聚. 相反, 在高于 850℃ 注入时, 由于剩余缺陷的数量很少, 从而对砷扩散过程几乎不产生影响; 同时, 随着注入温度的进一步提高, 点缺陷的复合进一步加快, 从而导致砷扩散减小.

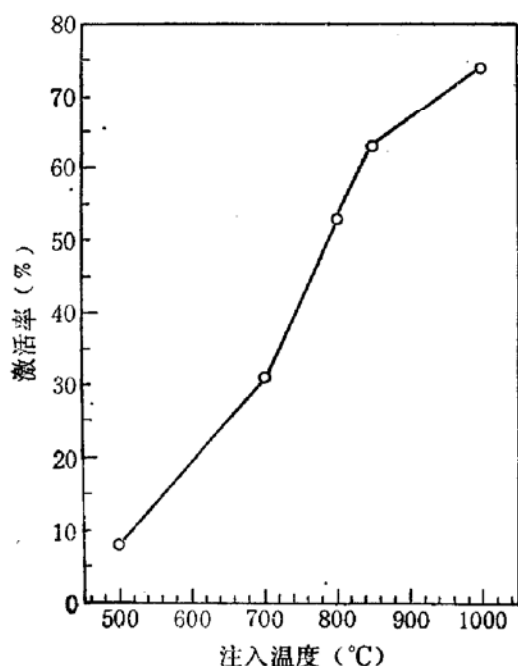


图 4 微分霍尔测量所得电激活率随注入温度的变化

图 4 给出了用霍尔效应测得的激活率与注入温度的变化关系. 随注入温度增高, 激活率增大很快, 在注入温度为 1000℃ 时, 激活率达最大为 74%. 还测得室温注入并经 1000℃, 30 分钟退火的样品的激活率为 70%. 这表明在此温度下, 这两种情况对应的电激活率是相近的.

为了深入研究高温注入层的电学性质, 我们用微分霍尔效应测试得到了载流子和迁移率的深度分布. 图 5(a) 为 500℃ 注入的样品的载流子和迁移率及相应的 SIMS 原子浓度分布. 载流子分布的形状与原子分布相似, 在 0.12μm 深度处的载流子浓度为 $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, 而同一深度的砷原子浓度为 $1.1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$, 这表明大部分砷原子是非电活性的. 将这些电学结果与图 3(a) 的 TEM 结果相比, 表明在高砷浓度区域中存在的高密度

细小缺陷是与非活性砷聚合团相关^[1]. 从图 5(a) 还可看到在载流子分布的峰值区域内

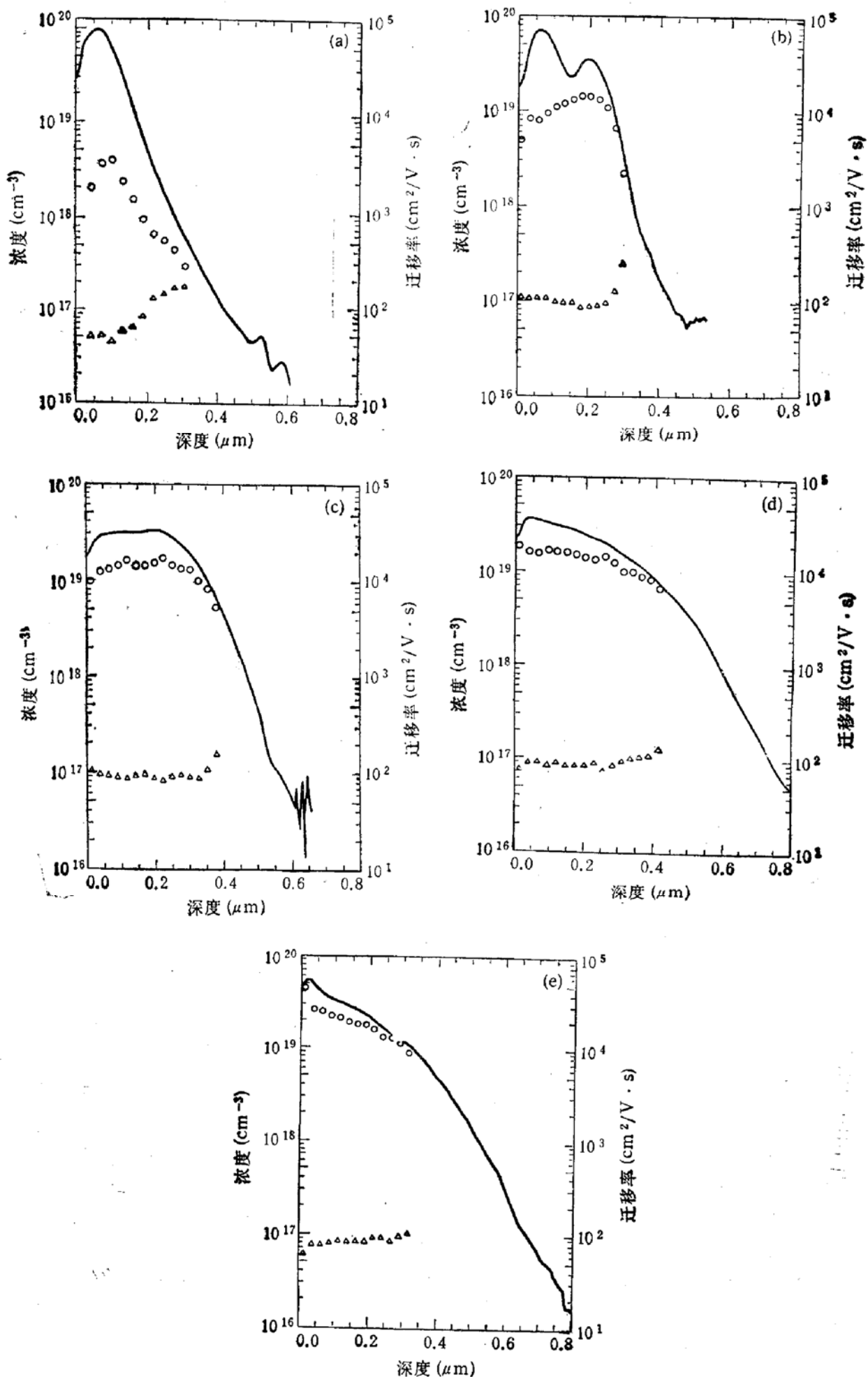


图5 微分霍尔测量所得的砷离子在 500°C (a), 700°C (b), 800°C (c), 850°C (d) 和 1000°C (e) 注入时的载流子浓度($\circ$)和迁移率(Δ)的深度分布, 实线为相应的原子浓度分布

的迁移率值比那些如图 5(c),(d),(e) 中所示在较高温度注入的样品的迁移率值为低. 在表面下 $0.06\mu\text{m}$ 至 $0.18\mu\text{m}$ 处的低迁移率还表明: 这些细小缺陷团起载流子散射中心作用.

图 5(b) 为 700°C 注入的样品的载流子和迁移率分布. 此图表明载流子不存在双峰结构, 而且在原子分布的双峰位置处的电激活率低.

TEM 结果表明在砷原子分布的第一个峰值区域内存在一个由环状缺陷组成的缺陷带, 而在第二个峰值区域内存在许多扩展细长位错环. 在高密度的环状缺陷和扩展细长位错环的区域内, 存在大量未激活的砷原子, 这一事实表明了这些缺陷俘获了大量砷原子. 这也是 700°C 注入的样品的载流子分布不存在双峰结构的原因.

在图 5(c),(d) 和 (e) 中分别为 800°C , 850°C 和 1000°C 注入的样品的载流子和迁移率分布. 从图中可见载流子分布与原子分布类似, 电激活率依赖于注入温度; 在 1000°C 注入时, 载流子分布接近原子分布, 同时电激活率达最大, 这也与 TEM 结果一致. 而且, 这时迁移率分布对载流子浓度分布的依赖关系与体硅中扩散掺杂的结果相一致^[12], 这表明主要的散射机制是施主散射.

4 结论

在 500°C 至 850°C 注入时, 砷的异常扩散与剩余缺陷的深度分布密切相关. 700°C 注入时原子浓度分布的双峰结构就是由注入原子与剩余缺陷相互作用所致. 此外, 在 500°C 至 800°C 注入时, 随注入温度升高, 砷扩散增强, 同时由注入所致剩余缺陷减少. 但在高于 850°C 注入时, 随注入温度增高, 砷扩散反而减小; 这是因为扩散增强效应与点缺陷的过饱和度成正比, 在较高温度下, 点缺陷复合加快使点缺陷的过饱和度下降, 从而导致砷扩散减小. 随着注入温度升高, 电激活率连续增大; 在 1000°C 注入时, 电激活率达最大, 为 74%. 总之, 我们的研究结果表明注入温度在形成缺陷的过程中起重要作用, 而且这些缺陷对高温注入砷的扩散和电激活行为有显著影响.

参 考 文 献

- [1] K. Izumi, M. Doken and H. Ariyoshi, *Electron. Lett.*, 1978, **14**:593.
- [2] F.L. Vook and H.J. Stei, *Rad. Eff.*, 1969, **36**:157.
- [3] J.C. Bourgoin and J.W. Corbett, *Rad. Eff.*, 1978, **36**:157.
- [4] M.L. Swanson, J.A. Davies, A.F. Quennnville, F.W. Saries and L.W. Wiggers, *Rad. Eff.*, 1978, **35**:51.
- [5] G.F. Cembali, P.G. Merli and F. Zignani, *Appl. Phys. Lett.*, 1981, **38**:808.
- [6] W. Akutagawa, H.L. Dunlap, R. Hart and O.J. Marsh, *J. Appl. Phys.*, 1979, **50**:777.
- [7] M. Bertti, A.V. Drigo, R. Lotti, G. Lulli and P.G. Merli, *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.*, Boston, 1989, **128**:569.
- [8] R. Schork, P. Pichler, A. Kluge and H. Ryssel, *Nucl. Instr. and Meth.*, 1991, **B59/60**:499.
- [9] R. Schork, H. Ryssel and C. Dehm, *Nucl. Instr. and Meth.*, 1989, **B39**: 220.
- [10] H. Ryssel, K. Schmid and H. Muller, *J. Phys. E: Sci. Instr.*, 1973, **6**:492.
- [11] N.R. Wu, D.K. Sadana and J. Washbarn, *Appl. Phys. Lett.*, 1980, **36**:765.
- [12] G. Masetti and S. Solmi, *Solid State and Electron Devices*, 1979, **3**:65.

Diffusion and Activation of Arsenic Implanted at High Temperature in Silicon

Yu Yuehui¹, R. Schork², H. Ryssel² and Zou Shichang

(¹*Ion Beam Laboratory, Shanghai Institute of Metallurgy, Academia Sinica, Shanghai 200050*)

(²*Fraunhofer-Arbeitsgruppe fuer Integrierte Schaltungen, 8520 Erlangen, Germany*)

Abstract The diffusion behavior and electrical activation of arsenic implanted at high temperatures in silicon are studied. For this purpose, arsenic ions have been implanted into $\langle 100 \rangle$ oriented silicon at 180keV to a dose of $1 \times 10^{15} \text{cm}^{-2}$ at temperatures in the range of 500°C to 1000°C. It is shown that there is significant diffusion taking place during implantation. The diffusion enhancement is considerable, compared to thermal diffusion. For implantation temperatures from 500°C to 800°C, the anomalous diffusion markedly correlates with the depth distribution of the residual defects; the enhancement of arsenic diffusion increases with temperature, accompanying the decreased formation of the residual defects. However, for implantation temperature above 850°C, the diffusion enhancement reduces with increasing temperature. Changes in carrier concentration and mobility also correlate with residual defects. The electrical activity increases with the implantation temperature in the range from 500°C to 1000°C.

PACC: 6170T, 7280C, 6630L