

n 型不純物および S が poly-Ge 中キャリア濃度に与える影響Effect of n -type Impurities and Sulfur on Carrier Concentrations in Poly-crystalline Ge

産業技術総合研究所 グリーン・ナノエレクトロニクスセンター

Green Nanoelectronics Center, AIST

○ 小池 正浩, 上牟田 雄一, 鎌田 善己, 黒澤 悦男, 手塚 勉

M. Koike, Y. Kamimuta, Y. Kamata, E. Kurosawa, and T. Tezuka

massahiro.koike@aist.go.jp

Poly-Ge は n 型化が難しいという問題があり、トランジスターに適用した場合、 n^+ Ge からなるソース・ドレインの形成が困難であることが予想される。欠陥がアクセプターライクに振る舞う傾向にあり [1, 2]、それに伴う濃度のホールが生成されるため、poly-Ge は通常 p 型の特性を示すからである。

そこで本研究では、poly-Ge に n 型不純物である P, As, Sb や欠陥を修復する効果があると言われている S をイオン注入することにより、poly-Ge 中のホール濃度を減らし、電子濃度を増やせるか調べた。また、Ge 結晶では P と S の両方を注入するといずれか一方よりも電子濃度が高くなるので [3]、poly-Ge においても P と S 注入の検討を行った。

Si(100) 基板上に熱 SiO₂ 膜を成膜し、スパッターによりアモルファス Ge (a-Ge) を堆積し、PECVD でキャップ層として SiO₂ を堆積して、SiO₂ (5 nm)/a-Ge (20 nm)/SiO₂ (100 nm)/Si(100) 構造を形成した。続いて、投影飛程が a-Ge 層の中央付近になるように加速エネルギーを調整して、P, As, Sb, S のいずれかをイオン注入した。加速エネルギーは、それぞれ 10, 15, 20, 10 keV, ドーズ量は $4 \times 10^{12} - 2.5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ である。また、P ドーズ量を固定 ($1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$) して、P と S 両方のイオン注入も行った。イオン注入後、600°C, 5 時間の熱処理を行い、poly-Ge を作製した。そして Hall 効果測定によって伝導型やキャリア濃度を評価した。また断面 TEM 観察によって構造、SIMS 分析によって不純物濃度プロファイル、ラマン分光測定によって結晶化の有無を調べた。

TEM 観察したところ、約 20 nm のほぼ様な厚さの poly-Ge が不純物の種類によらず形成されることを確認した。

また SIMS による不純物プロファイルから、高温長時間 (600°C, 5 時間) の熱処理後も、不純物が SiO₂ に挟まれた Ge 内部に高濃度で維持されていることが明らかになった。例えば、不純物をドーズ量 $5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ で注入した場合、Ge 中での不純物濃度は $> 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ である。

Hall 効果測定の結果、ホール濃度は、不純物をイオン注入していない poly-Ge では $\sim 3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ であるが、注入すると減少することがわかった。ドーズ量が高くなるほどホール濃度は減少する傾向にある。

n 型不純物の中では P が最もホール濃度を低減し、 $\sim 1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ 付近で p 型から n 型に変わり、 $2.5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ では $\sim 8 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ の電子が生成されることがわかった [図 1(a)]。 n 型不純物によって生成された電子がホールを補償するため、ホール濃度が低くなり、高ドーズ量では電子が多数キャリアになって n 型化したと考えられる。また p 型から n 型に変わる P ドーズ量 ($\sim 1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ 付近) で、欠陥によるホールとほぼ同じ濃度の電子 ($\sim 3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) が生成されると予想される。

S も同様にドーズ量に応じてホール濃度を低減させる [図 1(a)]。S の方が n 型不純物よりも、同じドーズ量で比較した場合、ホール濃度が低くなることわかった。S は Ge 中のアクセプターライクな欠陥を減らすため、ホール濃度が低くなったと考えられる。尚、S が Ge 中においてダブルドナーとして働き、P などの n 型不純物と同様に電子がホールを補償した可能性も考えられるが、S のイオン化エネルギー ($E(0/+) = E_C - 0.28$, $E(+/++) = E_C - 0.59 \text{ eV}$ [4]) が P のそれ ($E(0/+) = E_C - 0.012 \text{ eV}$ [5]) よりも高く、電気的活性化率が低いいため、この可能性は低い。

n 型不純物で最もホール濃度を低減する効果のあった P と共に S をイオン注入すると、それぞれが高ドーズ量の場合 (S: $5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$, P: $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$, 計 $1.5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$) に、 $\sim 2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ の電子が生成され、 n 型化することがわかった [図 1(b)]。この濃度は P のみでドーズ量 $2.5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ の場合の電子濃度 $\sim 8 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ よりも高い [図 1(a)]。S によってアクセプターライクな欠陥が減少し、P のみで本来生成するはずの濃度 ($\sim 3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) に近い電子 ($\sim 2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) が支配的になったと考えられる。

このように、欠陥が多くホール濃度の高い poly-Ge では、 n 型不純物の中で最もホール濃度を低減できる P、あるいは S のいずれかをイオン注入するよりも、P と S を共に注入すると電子濃度を高くできることが明らかになった。

本研究を進めるにあたり、多大なご協力をいただきました産総研テクニカルスタッフの方々に感謝します。本研究は政府の最先端研究開発支援プログラムにより助成されたものである。

- [1] O. Weinreich, G. Dermit, and C. Tufts, J. Appl. Phys. **32**, 1170 (1961).
- [2] H. Haesslein, R. Sielemann, and C. Zistl, Phys. Rev. Lett. **80**, 2626 (1998).
- [3] M. Koike, Y. Kamimuta, and T. Tezuka, Appl. Phys. Lett. **102**, 032108 (2013).
- [4] H. G. Grimmeiss, L. Montelius, and K. Larsson, Phys. Rev. B **37**, 6916 (1988).
- [5] S. M. Sze, Physics of Semiconductor Devices, 2nd ed. (Wiley-Interscience, New York, 1981).

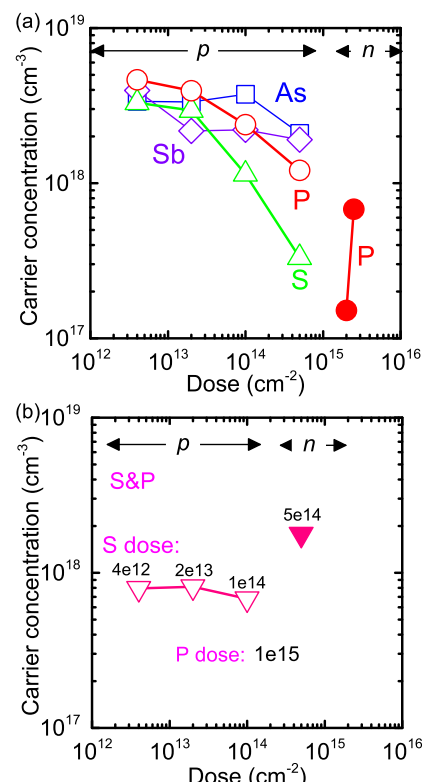


FIG. 1: 不純物ドーズ量とキャリア濃度の関係。(a) P, As, Sb, S のいずれかを注入した場合と、(b) P ドーズ量を固定して S ドーズ量を変えて注入した場合。