

Ge_{1-x}Sn_x エピタキシャル層の結晶性および電気的特性に*in-situ* Sb ドーピングが及ぼす影響Effects of *in-situ* Sb-Doping on Crystalline and Electrical Characteristics of Ge_{1-x}Sn_x Epitaxial Layer全 智禧¹、浅野 孝典^{1,2}、竹内 和歌奈¹、黒澤 昌志^{1,3}、坂下 満男¹、中塚 理¹、財満 鎮明^{1,3}
(¹名古屋大院工,²学振特別研究員,³名大エコトピア)J. Jeon¹, T. Asano^{1,2}, W. Takeuchi¹, M. Kurosawa^{1,3}, M. Sakashita¹, O. Nakatsuka¹, and S. Zaima^{1,3}
(¹Grad. Sc. of Eng., Nagoya Univ., ²JSPS Research Fellow, ³EcoTopia Sci. Inst., Nagoya Univ.)

E-mail: jjeon@alice.xtal.nagoya-u.ac.jp

【はじめに】 Ge_{1-x}Sn_x 中の電子および正孔は、Ge 中より高い移動度が期待されるため、次世代の金属-酸化膜-半導体電界効果トランジスタ (MOSFET) のチャネル材料として注目されている [1]。一方、*n* 型 Ge MOSFET のソース/ドレイン形成において、Ge 中の *n* 型ドーパントの固溶限の低さが問題となっている。我々は、Ge_{1-x}Sn_x 層の非平衡的成長中における *in-situ* ドーピングによって、Sn と同様に、固溶限を超える高濃度ドーピングが期待できる可能性に着目した。さらに、*in-situ* ドーピング法では、イオン注入法で懸念される欠陥形成の抑制も期待できる。本研究では、Sb *in-situ* ドーピングによる *n* 型 Ge_{1-x}Sn_x エピタキシャル層を試み、Ge_{1-x}Sn_x 層の結晶性および電気的特性への Sb ドーピングの影響を詳細に調べた。

【実験方法】 *p* 型 Ge(001)基板表面を化学洗浄および超高真空中における熱処理によって清浄化した。Ge_{1-x}Sn_x:Sb 層の成長には Knudsen セル (K-cell) を蒸着源とする分子線エピタキシー (MBE) 法を用いた。Sb の K-cell 温度を 220、250、および 280 °C として、Sb 蒸着量を制御した。基板温度および GeSn 層膜厚は、それぞれ 150 °C および 100 nm とした。目標 Sn 組成は 6% とした。

【実験結果】 二次イオン質量分析を用いて Ge_{1-x}Sn_x:Sb(280 °C)/Ge 試料の Sb 濃度の深さ分布を調べた結果、 $2 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ の均一な Sb の分布が測定された。低温成長が Sb の表面偏析を抑制する結果、固溶限 (10^{19} cm^{-3}) を超える高濃度ドーピングを実現できると考えられる。

非ドーパの Ge_{1-x}Sn_x/Ge および Ge_{1-x}Sn_x:Sb(280 °C)/Ge 試料の Ge224 逆格子点付近の X 線回折二次元逆格子空間マップ (XRD-2DRSM) をそれぞれ Fig. 1(a) および (b) に示す。また、Ge_{1-x}Sn_x224 回折の [110] 方向における対数ピークプロファイルの裾の部分を拡大して Fig. 1(c) に示す。Ge_{1-x}Sn_x の弾性変形とベガード則を仮定することで、Ge_{1-x}Sn_x 層の Sn 組成は 5.5% と見積もられた (Fig. 1(a))。一方、同じ Ge と Sn の照射条件に関わらず、Sb ドープされた Ge_{1-x}Sn_x 層に由来する逆格子 Q_y は、Sb のない場合より小さい (Fig. 1(b))。これは、原子半径が大きい Sb が Ge_{1-x}Sn_x 層に高濃度に導入される結果、Ge_{1-x}Sn_x 層に生じる歪を増大させるためと考えられる。また、Fig. 1(c) において、Sb K-cell の温度が高いほど、Ge_{1-x}Sn_x 回折ピークのすその広がりがより小さいことがわかる。これは Sb の導入によって、Ge_{1-x}Sn_x 層の結晶性がより均一に改善されることを意味する。

Ge_{1-x}Sn_x 層のシート抵抗をマイクロ四探針法により測定した。また、ホール効果測定を行い、Ge_{1-x}Sn_x 層の伝導型とキャリア濃度を調べた。Sb K-cell 温度の増加に伴って Ge:Sb 層および Ge_{1-x}Sn_x:Sb 層のシート抵抗は減少する (Fig. 2)。これは Sb ドーピングによって電子濃度が増加する結果と考えられる。K-cell 温度 280 °C の Ge_{1-x}Sn_x:Sb 層においては、Ge:Sb 層とほぼ同等のシート抵抗が得られる。また、Ge:Sb(280 °C) および Ge_{1-x}Sn_x:Sb(280 °C) 層はともに *n* 型伝導を示すことがわかり、電子濃度は、それぞれ $4.0 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ (測定温度: 197 K) および $7.9 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ (同: 84 K) と評価された。

【結論】 Sb の *in-situ* ドーピングによって、高い電子濃度を有する *n* 型 Ge_{1-x}Sn_x 層の形成、および Sb のサーファクタント効果による Ge_{1-x}Sn_x 層の結晶性向上を実証できた。

【参考文献】 [1] J. D. Sau *et al.*, Phys. Rev. B **75**, 045208 (2007).

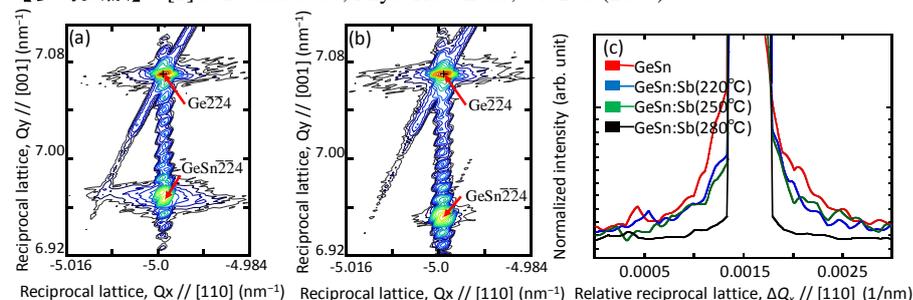


Fig. 1. XRD-2DRSM results around the Ge224 reciprocal lattice point of (a) without and (b) with Sb *in-situ* doping Ge_{1-x}Sn_x layers. (c) The magnified logarithm peak profiles of Ge_{1-x}Sn_x224 along the [110] direction.

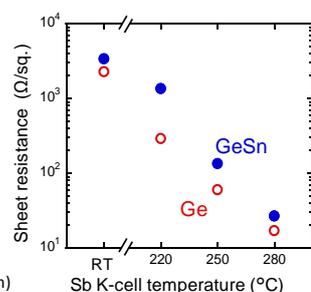


Fig. 2. The Sb K-cell temperature dependence of the sheet resistance for Ge: Sb and Ge_{1-x}Sn_x:Sb samples.