

## Sb ドープ Ge エピタキシャル薄膜中の飽和活性化 Sb 濃度

### Saturated concentration of activated Sb in Sb-doped Ge epitaxial thin films

全 智禧<sup>1</sup>、柴山 茂久<sup>1</sup>、中塚 理<sup>1, 2</sup>、財満 鎮明<sup>3</sup>

<sup>1</sup>名大院工, <sup>2</sup>名古屋大学 未来研, <sup>3</sup>名古屋大学 未来社会創造機構

°Jihee Jeon<sup>1</sup>, Shigehisa Shibayama<sup>1</sup>, Osamu Nakatsuka<sup>1, 2</sup>, and Shigeaki Zaima<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Nagoya Univ., <sup>2</sup>IMaSS, Nagoya Univ., <sup>3</sup>IIFS, Nagoya Univ.

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

【はじめに】 Ge MOSFET の実用化において、ソース/ドレイン領域の抵抗率低減が重要な課題であり、特に *n* 型ドーパントの低い固溶限に由来するドーピング濃度の低減が問題となっている<sup>[1]</sup>。我々は、この問題を解決すべく、非平衡プロセスである低温 *in situ* エピタキシャルドーピングに着目し、Ge や Ge<sub>1-x</sub>Sn<sub>x</sub> 層に Sb の固溶限 ( $1.2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ) を超える高濃度ドーピング ( $1.5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ ) を報告してきた<sup>[2]</sup>。また本手法と Ni ジャーマナイドの低温形成を駆使し、 $10^{-9} \Omega \cdot \text{cm}$  という低抵抗率の実現について報告した<sup>[3]</sup>。今後、抵抗率を更に低減するためには、エピタキシャル成長中の *in situ* ドーピングにおける Sb 原子の活性化の原理を理解することが重要と考えた。本研究では、Ge のエピタキシャル成長中の Sb 原子の導入量に対して、活性化 Sb 濃度にはある飽和値が存在することが分かったので報告する。

【試料作製】 化学洗浄および超高真空中の熱処理で清浄化した *p*-Ge(001)基板表面に分子線エピタキシー法を用いて Sb ドープ Ge 層を成長した。導入 Sb 濃度は Knudsen セル (K セル) の温度によって  $10^{18}$ – $10^{20} \text{ cm}^{-3}$  のオーダーで制御した。成長温度は 150 °C であり、膜厚は 100 nm とした。成膜後、表面ラフネスを原子間力顕微鏡 (AFM) 法により評価し、マイクロ四探針 (M4PP) 法と硬 X 線光電子分光 (HAXPES) 法により、キャリア濃度と活性化 Sb 濃度の評価を行った。

【実験結果および考察】 Fig. 1にHAXPESにより見積もったSbドープGe薄膜の活性化および非活性化Sb濃度のSbのKセル温度依存性を示す。SbのKセル温度を250 °Cから280 °Cに増大すると活性化Sb濃度は $1.5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ から $2.7 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ に増大した。一方、SbのKセル温度を更に増大し、Sb導入量を増大しても、活性化Sb濃度は約 $2.7 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ で飽和しており、非活性化Sb濃度およびSb酸化物濃度のみが増大した。また、Fig. 2にM4PPおよびGeのIrvin curveから求めたキャリア濃度とSbのKセル温度の関係を示す。Kセル温度の増大にともないキャリア濃度は増大するが、SbのKセル温度が290 °C以上になると、固溶限以下に減少する傾向が見られた。キャリア濃度が減少する前後で、表面のRMSラフネスは0.3 nm から1.0 nmに増大しており、成長中のSbの過剰供給だけでは、活性化Sb濃度およびキャリア濃度の増大を実現できない可能性が高い。一方で、多結晶Ge<sub>1-x</sub>Sn<sub>x</sub>薄膜の*n*型ドーピングにおいても、水中パルスレーザーアニールなどの非平衡プロセスを用いた場合にも、活性化Sb濃度は $10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 台で飽和する傾向があることを考慮すると<sup>[4]</sup>、本結果は、非平衡プロセスにおけるドーパントの固溶限の存在を示唆していると考えられる。

本研究におけるHAXPES測定は、SPring-8のBL47XUにおいて行われた (課題番号: 2018B1723)。

[1] J. D. Sau *et al.*, Phys. Rev. B **75**, 045208 (2007). [2] J. Jeon *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **55**, 04EB13 (2016).

[3] J. Jeon *et al.*, Semicond. Sci. Technol. **33**, 124001 (2018). [4] K. Takahashi *et al.*, Appl. Phys. Lett. **112**, 062104 (2018).

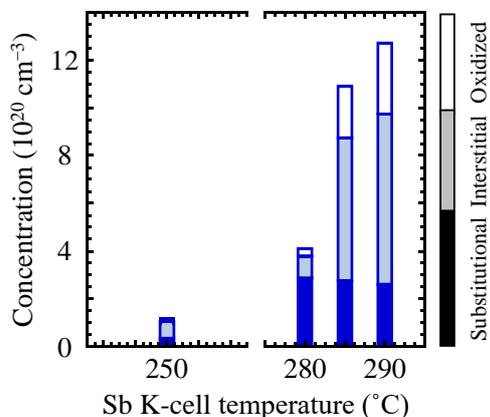


Fig. 1. Concentrations of Sb for Sb-doped Ge layers as a parameter of amount of supplied Sb, which is controlled by Sb K-cell temperature.

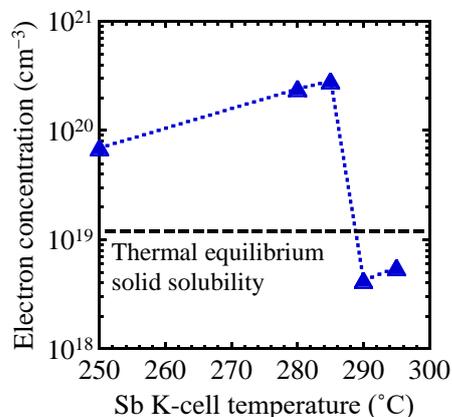


Fig. 2. Estimated electron concentration of Sb-doped Ge layers obtained from M4PP resistivity and Ge Irvin curve.