

学位論文 博士（工学）

ゲルマニウム基板上の極薄・高濃度
リンドナー活性層の作製と評価

2015 年度

慶應義塾大学大学院理工学研究科

山田 道洋

主 論 文 要 旨

報告番号	㊦ 乙 第	号	氏 名	山田 道洋
主論文題目： ゲルマニウム基板上の極薄・高濃度リンドナー活性層の作製と評価				
(内容の要旨) ゲルマニウム (Ge) は電子，ホール共にシリコン (Si) よりも速い移動度を有し，次世代金属-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を集めている．しかし，高性能 n 型 Ge-MOSFET の実現に向け，低抵抗・極浅オーミック接合の作製が課題となっている．Ge 上に金属薄膜を蒸着した場合，金属の種類に関係なく電子に対して高いショットキー障壁 (0.5~0.6 eV) が形成される．そのため，低抵抗・極浅オーミック接合を得るために基板に高濃度かつ極薄の活性化した不純物分布が必要である．これまで，イオン注入法を用いて不純物の導入が行なわれてきた．しかし，Ge 中に n 型不純物を導入した場合に，活性化熱処理中に，増速拡散が観測される．そのため，浅い接合を実現することは困難である．そこで，本研究では位置制御が正確に可能で，成長後熱処理の必要ない δ -ドーピング法を用いた．さらに， δ -ドーピング法において不純物分布拡がりの要因である成長中の表面偏析を防ぐ新規手法の開発に取り組んだ．カーボン (C) やシリコン (Si) をリン (P) の δ -ドーブ層に挿入することで，高い活性化に必要な高温での成長でも表面偏析を防ぐことを示した．その結果，高濃度・極薄の活性化した不純物濃度分布を実現した． 本論文は6章で構成される．第1章は，導入で，これまでの先行研究における取り組みや，本研究の意義について概観する．第2章では，本研究で用いた δ -ドーピング法について説明し， δ -ドーピング法における成長中の表面偏析について述べる．第3章では，本研究で用いた試料作製装置，測定手法について説明を行う．第4章では， δ -ドーブされた P に C を供給した場合と P のみが δ -ドーブされた試料を比較し，C により P の偏析が著しく抑制されることを示す．C による P の偏析の抑制により，C 導入のないものと比べてピーク濃度は 10 倍程度大きくなり，不純物の拡がりを表す偏析長は数十分の一になった．次に，C の導入と δ -ドーピングを行い急峻な濃度分布の得られた試料に対する電気特性の評価を示す．P のドーピング濃度が $1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ 以上の試料においてオーミック特性が観測された．閉じ込め層の膜厚を薄くした場合には，5 nm の試料においてもオーミック接合が得られた．その結果，高濃度な活性化 P を数 nm に閉じ込められることを示す．第5章においては，Si を用いた P の偏析抑制効果について議論する．Si は Ge と格子定数が近く，P の固溶度も大きい．Si の膜厚を変化させた時に，3.3 Å (~2 原子層) で最も急峻なプロファイルが得られる．次に，膜厚に対する偏析長の変化から，Si 含有量だけでなく，Si 層に導入された歪みの影響が P の偏析の抑制に寄与していることを明らかにする．さらに，Si と Ge の格子定数に違いにより導入される転位の透過型電子顕微鏡による観測結果を示す．Si 膜厚 3.3 Å (~2 原子層) では，それよりも厚い Si 層の試料と比べて欠陥の導入がなく高品質な膜の成長が可能であることを示す．3.3 Å の Si 層を挿入した試料では，C より強い偏析抑制効果が得られる．急峻な濃度分布が実現した Si 挿入試料に対して電流-電圧特性や，その温度特性の評価を行い，Si 挿入試料ではトンネル伝導が支配的であることを示す．第6章は，本論文のまとめで，本研究において示された P の δ -ドーピング法と Si, C の偏析抑制効果が，Ge 基板上への極薄・高濃度 P ドナー活性の作製に有効な手法であることを述べる．				

SUMMARY OF Ph.D. DISSERTATION

School Fundamental Science and Technology	Student Identification Number	SURNAME, First name Yamada Michihiro
Title Fabrication and characterization of ultra-thin, high concentration phosphorous donor layers on Ge substrates		
Abstract <p>Germanium (Ge) has gained much attention as one of the next generation metal oxide semiconductor field transistor (MOSFET) materials thanks to its high electron and hole mobilities. However, for realization of high-performance n-channel Ge MOSFETs, formation of ultra-shallow junction Ohmic contacts with low enough resistivity turns out to be the major challenge. Without ultra-shallow, highly activated, high concentration donor doping to Ge wafers, high Schottky barriers (0.5-0.6 eV) to electrons are formed irrespective of metal species deposited on Ge. Activation of ion-implanted donors in Ge requires annealing at high temperature leading to significant broadening of the donor distribution. In this study, δ-doping requiring no annealing for activation is employed to realize the ultra-shallow, highly activated, high concentration donor doping to Ge. In particular, co-doping with carbon or silicon (Si) is shown to be very effective in suppression of the segregation of phosphorous donors towards surface during the molecular beam epitaxy (MBE) of Ge. Using this method, ultra-shallow, low resistivity Ohmic contacts to Ge has been formed.</p> <p>Chapter 1 describes a brief history of MOSFET advancement via scaling and the current challenges for further improvements. Chapter 2 describes the essence of the δ-doping technique and the mechanism of the doping segregation associated with MBE. Chapter 3 introduces a variety of experimental methods employed in this study for the growth and characterization. Chapter 4 shows the effect of carbon co-doping on the segregation of the phosphorus donors during MBE. Carbon is shown to suppress the segregation of the δ-doped phosphorous compared with samples without carbon. As a result, activated phosphorus donors are confined within a few nm to realize ultra-shallow junctions. The electrical characteristics for such δ-doped samples exhibit excellent Ohmic behaviors especially when the sheet density of phosphorous donors exceeds $1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ and the capping layer is as thin as 5 nm. In chapter 5, insertion of ultra-thin Si layers for suppression of segregation of phosphorus is discussed. For the thickness of the Si layer ranging from 1.6 to 50 Å, the sample with the 3.3 Å thick Si layer gives the most abrupt phosphorus profile. The crystalline quality of the capping layers is confirmed by transmission electron microscopy. The current-voltage characteristics of the contacts and the temperature dependence of reverse bias current are investigated. Chapter 6 provides conclusions of this thesis.</p>		