

## 審査の結果の要旨

氏名 宋宇振

Si CMOS デバイスの高性能化は主にサイズの微細化によって進められてきたが、今後も永遠にそれが可能であることは物理的にありえない。そこで次の世代に向けて有望な半導体電子材料に対する研究が世界中で始まっており、特に SiGe は現実的なチャネル材料として精力的に検討がなされている。しかしながら課題も多く、本質的な解決策が求められている。

上記背景のもと、SiGe 上のゲートスタック特性の本質的向上に向けて、絶縁膜界面で起きている反応を理解し、高性能な SiGe デバイスの本質的課題を解決する方向性を与えることを本研究の目的としている。本研究の中心は実験的観点からのものであるが、SiGe の酸化過程における熱力学的計算結果と比較検討をしながら、Thermal oxidation kinetics of SiGe layer epitaxially grown on Si substrate (Si 基板上にエピタキシャル成長された SiGe 層における熱酸化機構の研究)という題目でまとめられた論文になっている。

第1章は序論であり、トランジスタの微細化、高移動度チャネル材料の必要性、さらに従来報告、議論されてきた SiGe の酸化機構の報告例を整理・検討することによって何が不足しているかを明確化し研究の目的を述べている。

第2章は、本研究で用いられている実験手法の紹介をすることによって実験の物理的意味と定量的精度などについて整理している。

第3章は、実際に SiGe の酸化実験を温度と酸素圧力を変化させながら調べ、Si と Ge の酸化過程の違いに注目して Si の選択酸化が起きる条件を見いだした。界面の劣化を理解するためには Si の選択酸化が起きた際の Ge の動きを解明することが酸化後の SiGe 界面制御の重要な点になることが予測される。しかし、この現象論的結果から選択酸化メカニズムを明らかにすることは困難であり、それを明らかにするために次の章での実験へと進んでいる。

第4章は、先に記したように選択酸化機構を明らかにするために、Si 基板上に GeO<sub>2</sub> を堆積することによって界面で起きる反応のモデル化を試みている。つまり、本章で GeO<sub>2</sub> が Si によって還元されることによって生じた金属 Ge の形成機構を検証するためのモデル実験になっている。厚さを変えた GeO<sub>2</sub> 膜を Si 上に準備し、両者の反応を熱的に促進することで、SiGe 上における場合よりも形成された金属 Ge を圧倒的に高精度に検出することに成功した。その結果に基づいて、GeO<sub>2</sub> が還元されて生じた金属 Ge が基板上に析出するか、基板中に拡散するか区別をしている。これは既報の酸化濃縮技術とはやや異なり Si が

表面へ拡散してくるような高温ではないので、界面近くのみで酸化濃縮が起きていると解釈できる。この理解によって SiGe 上に良好なゲートスタックを形成するためには、Ge の析出は表面偏析ではなく基板中に拡散していくことが重要であることを指摘している。

第 5 章は、前節のモデルを実証するために、酸素の拡散速度が遅い YSiO<sub>x</sub> 膜を SiGe 上に堆積してから熱処理をすることでゲートスタックを形成することを試みた結果、完璧なゲートスタック形成には至らなかったものの、従来よりも良好なゲートスタック形成に向けた方向性が得られることを示している。

第 6 章では、Si あるいは Ge 基板上とは異なる SiGe の特殊性を明確化するために、Si 上の SiGe 基板に関して、基板全体のインピーダンスを評価している。SiGe/Si 基板のインピーダンス解析から、通常の単一基板上のように抵抗ではなく、抵抗と容量の並列回路に近い形でモデル化でき、さらにより正確には単純な RC 回路ではなく、いわゆる CPE (constant phase element) を用いることによって実験結果をよく再現できることがわかった。つまり Si 基板上の SiGe は Ge 濃度が高くなると SiGe 濃度は gradual に変化しており、単純な RC 回路ではなく多重の RC 時定数の重ね合わせになっており CPE が適していることがわかった。この事実は SiGe だけではなく、基板にヘテロ構造が組み込まれている場合にはシリーズ・インピーダンスとして CPE が適していることを予測させる。

第 7 章は、全体を総括して、SiGe 技術に関するさらなる将来展望を述べている。

以上を要するに、本研究は SiGe が潜在的に持つ高い能力をどのように引き出すかに着目し、さらに電子デバイスにおいてもっとも重要な SiGe の酸化機構の理解・制御に対する新しいコンセプトを提案し、それを明瞭に実証している点に高い意義がある。これらはいずれも本研究において実証された成果であり、半導体デバイス分野のみならず材料工学の観点からも意義はきわめて大きい。

よって、本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。