

## 審査の結果の要旨

氏名 王 旭

シリコン(Si) CMOS デバイスの高性能化は、従来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電子デバイスに対する研究が世界中で始まっており、ゲルマニウム (Ge) は Si よりも移動度が高いという観点から有力な半導体材料として検討されつつある。しかしながら、問題は移動度だけではなくゲート絶縁膜の薄膜化、さらにゲートスタックの信頼性が確保されなくてはならない。そこで良質の極薄ゲート絶縁膜を Ge 上に形成することは Ge デバイスの可能性を確認する上できわめて重要である。

上記背景のもと本研究は半導体デバイスを作製する際のもっとも基本的な過程である Ge の酸化機構に焦点をあて、それがいかに Si とは異なるかを実験的に明確化することによって Ge デバイスを作製する際の基本的な考え方を明確にしようという大きな目的をもって行われている。従来から Ge の酸化機構が Si とは異なるのではないかという現象論的な結果は報告されているが、どの部分が Si と異なるのか酸化過程の基本に基づいた理解がなされてこなかった。本研究では Ge の酸化は Si とは異なり、酸素空孔および原子状酸素の酸化膜中の拡散が主要な役割をなしていることを実験的に明らかにしたものであり、それらを「Study of Thermal Oxidation Mechanism of Germanium」という題目のもとにまとめた博士論文になっており、Ge デバイス構築技術を大きく前進させるとともに材料による酸化機構の個性という観点からも大変貴重な学位論文となっている。

本論文は 6 章から構成されている。

第 1 章は序論であり、トランジスタの微細化、高移動度チャンネル材料の必要性、従来の Ge 上熱酸化膜の形成法と酸化機構を整理し、本研究の目的と位置づけを明確化している。

第 2 章は Ge の酸化方法、さらに形成した Ge 酸化膜の厚さ、酸化膜質の評価手法に関して詳述している。特に本研究では高压酸素下での酸化過程の研究も重要な部分を構成しており、高压酸化を行う際の酸化炉について紹介している。また本研究では Ge 酸化膜の膜厚測定と膜中の酸素原子プロファイル決定が重要な役割を果たしており、これらの測定法である、分光エリプソメトリと斜入射 X 線反射測定、および二次イオン質量分析 (SIMS) の評価原理について説明している。

第 3 章では大気圧酸素下での Ge の酸化に関して、酸素同位体である  $^{18}\text{O}_2$  を用いた酸化を行い、酸化にともなう酸化膜中における酸素原子の動きを調べた結果を報告している。特に本研究は初期酸化ではなく比較的厚膜領域の酸化を議論しており、その場合には  $^{18}\text{O}_2$  酸化後に  $^{18}\text{O}$  が酸化膜中にほぼ均一に分布している結果を得たことから、Ge の酸化では Si で理解されている  $\text{O}_2$  の拡散に基づく Deal-Grove 則が成り立っていないことを実験的に初めて明確に示したものである。この結果は本論文の核を構成している。

第 4 章では高圧酸素を用いた酸化では酸素原子がどのように移動しているかをやはり  $^{18}\text{O}_2$  を用いた酸化を行い大気圧の場合と比較して酸化機構が圧力によって大きく異なることを明らかにしている。以前より高圧酸素下で酸化を行うと酸化が進まないという異常な結果が実験的に観測されていた。しかしながら実際に何が起きているか不明であった。これに関してもやはり  $^{18}\text{O}_2$  を用いて  $^{18}\text{O}$  の膜中プロファイルを調べることで高圧酸化に適した酸化モデルの構築をおこなった。つまり高圧酸素下では酸素空孔の生成が熱力学的に抑制され、原子状酸素の拡散が主要な拡散機構に変わっていくことが示された。前章および本章で得られた結果はすべて世界で初めて得られた結果である。

第 5 章では大気圧酸素、高圧酸素の両方を一般的に取り扱う酸化モデルの構築に挑戦し、実験結果を定性的に再現している。本論では大気圧と高圧という 2 種類の場合について取り扱っているだけなので定量的なモデル構築までは至っていないが、今回得られた結果はその一般モデルを構築する上で基礎となる実験結果であることは間違いない。

第 6 章は以上の総括および将来展望を述べている。

以上を要するに、本研究は Ge が潜在的に持つ高い能力を引き出すために Ge の表面の酸化機構の解明に取り組み、Si との違いを実験的に明確にした初めての研究成果であり、Ge の表面を制御する上で基本となる研究成果と言える。これらはいずれも本研究において世界で初め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。