

審査の結果の要旨

氏名 魯 辞 莽

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) も Si よりも移動度が高いという観点から有力な候補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、極薄ゲート絶縁膜を Ge 上に形成し、良好なゲートスタックを形成することと、その絶縁膜信頼性に関して見通しを得ることは Ge デバイスの可能性を示す上できわめて重要である。

上記背景のもと、本研究は薄膜および界面に対する材料科学的な理解および制御に基づき、高性能な Ge ゲートスタックを実現しようという内容である。結果として、実効絶縁膜厚 (SiO₂ 膜の容量換算による絶縁膜厚) が 0.5 nm という極薄膜を実現し、さらにその材料の信頼性が従来からもっとも良いと言われてきた Ge 上の GeO₂ 膜に比べて圧倒的に良好であることが示されている。さらに、この結果に対する材料的な基本概念も構築し、「Study of Network Rigidity Coordination of Dielectric Thin Films for Scalable and Reliable Ge MOS Device」という題目の下、Ge 技術を大きく前進させた論文になっていると言える。本論文は 5 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/絶縁膜の界面終端方法の問題点を整理し、本研究の目的と位置づけを明確化している。

第 2 章は良好な初期特性を持つ Ge/GeO₂ スタックを基本にして、初期特性と信頼性の意味を再考察し、アモルファス薄膜における信頼性の基本として新しく **effective rigidity** という概念を提案している。これは従来からガラスの研究領域で議論されてきた **topological** に決まる **rigidity** の概念を、個々の結合の強さなどを考慮したものに展開した概念である。わずかに Y₂O₃ あるいは Sc₂O₃ を導入した GeO₂ は、純粋な GeO₂ に比べて **effective rigidity** が増加し、物理的に圧倒的な安定性を示すことが実験的に確認されている。

第 3 章は Ge 基板上のゲートスタックの電気特性を議論している。Y₂O₃ あるいは Sc₂O₃ を導入した GeO₂ は良好なゲートスタックを構成することができることを実験的に示している。しかしながら、この膜の比誘電率は SiO₂ の 2 倍程度であり、次世代デバイスのゲー

ト絶縁膜としては不十分である。そこで、界面特性を維持しながらバルク特性も優れた高誘電率膜 (high-k 膜) を用意する必要がある。その課題を克服するために、それぞれ比誘電率が 10 程度ある Y_2O_3 、 Sc_2O_3 を複合化して形成された三元系化合物 YScO_3 がアモルファス膜で約 18 の比誘電率を持つことを実験的に示し、Ge 上の high-k 膜として用いることを提案し、さらに実際にこれによって、きわめて良好な特性をもちながら実効絶縁膜厚が 0.5 nm という極薄膜を持つ Ge ゲートスタックを世界で初めて実現している。この事実はきわめて重要である。つまり、極薄膜領域では上層の high-k 膜がその後の熱処理によって拡散し界面を劣化させることは HfO_2 を用いた実験から示されており、界面に対してきわめて安定である材料から構成された high-k 膜は理想的と言える。

第 4 章は上記で構成されたゲートスタックの信頼性を実験的に調べた結果を詳細に議論している。理論的には高い信頼性を確保できることは予測されたが、電気的な信頼性においてはわずかな材料の変更によって膜中に欠陥が形成されることはよく知られている。しかしながら、 Y_2O_3 をドーブした GeO_2 は、高電界下における膜中トラップの生成効率、界面の劣化率ともに GeO_2 膜に比べて圧倒的に改善している。この結果も *effective rigidity* という観点から説明されている。このような試み自体が初めてであり、新材料を電子デバイスに用いるときの典型的な考え方になると思われる。

第 5 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どのように引き出し、さらに電子デバイスにおいてもっとも大事な項目である信頼性に対しても言及し、そのために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世界で初めて実証された成果であり、半導体集積回路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。