

審査の結果の要旨

氏名 李 忠賢

シリコン(Si) CMOS デバイスの高性能化は、基本的には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。そこで次の世代において有望な電子デバイスに対する研究が世界中で始まりつつある。近年ゲルマニウム(Ge)はSiよりも移動度が高いという観点から有力な候補材料として検討されている。特にp-MOSFETにおいてはSiを超える良好な特性が多く報告されている。一方、n-MOSFETにおいては極めて劣悪な特性しか報告されてこなかった。そこで、高性能n-MOSFETの実現は非常に大きな挑戦であるといえる。

上記背景のもと本研究は薄膜および界面に対する材料学的な理解および制御に基づき、高性能なGe n-MOSFETを実現しようという内容である。結果として、Siを用いた場合に比べて格段に良好な特性を実証することができた。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/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Ge/GeO₂スタックを形成する方法を詳述している。Geの酸化に関する熱力学的な考察から、Geにおいては高压酸素による酸化が有効なはずであるという指針のもと、実際にGe基板の高压酸化を行い、その結果としてGe/GeO₂スタックの電気特性を大幅に改善できることを示した。さらにバルクGeO₂膜質に影響を与えずにGe/GeO₂界面特性を向上させるために低温酸素アニールという新手法を提案し、GeO₂のバルク特性とGe/GeO₂界面特性を独立に制御できることを詳述している。

第3章は上記手法によって形成されたGe/GeO₂スタックを有するMOSFETを作製し、正孔及び電子移動度特性が大幅に改善することを示している。実際、Ge MOSFETにおいて、電子で $1920 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{sec}^{-1}$ 、正孔で $725 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{sec}^{-1}$ というピーク移動度を達成している。これらはSi MOSFETの場合と比較して、それぞれ2.5倍、3.5倍の向上である。特に電子移動度に関しては、高移動度n-MOSFET実現に否定的な意見が大勢を占める中、その高い可能性を実験的に示した点は大いに評価される。またGe基板面方位にも着目し、有効質量という観点からだけでなく良好な界面形成を実現するという観点からも(111)面の優位性を実証的に議論している。

第4章はFETチャンネル内における電子の散乱機構に関して議論している。ごく最近、n-MOSFETにおいてチャンネル内に存在する電子面密度の増加とともに電子移動度が劣化するということが報告されており、その起源を調べるために意図的にGe表面のラフネスをウ

ウェット処理によって制御し、高電界の電子移動度に与える影響を調べた結果、ウェット処理で形成した Ge 表面ラフネスは電子移動度に大きな影響を与えないことを示した。これは Si/SiO₂ を有する Si MOSFET とは異なる結果である。さらに他の散乱機構を含めて Ge の反転層における電子散乱機構を包括的に議論している。

第 5 章は Ge CMOS の微細化に対する大きな課題として、ゲート絶縁膜の薄膜化、短チャネル効果の抑制、良好な p/n 接合形成、の三つを取り上げ、それぞれに対して原理的課題を議論し、さらにそれぞれを克服するための実行可能な対策を詳述している。特にゲート絶縁膜の薄膜化に対しては、酸素圧力の増加に伴い酸化レートが低下する温度領域が存在することを初めて発見し、この温度領域で高压酸化法を用いることによって SiO₂ 容量換算で 1 nm 以下のゲート絶縁膜を実現する事に成功した。短チャネル抑制手法に関しては、薄膜 Ge 層を用いた FET を作製し、厚さ 9 nm 厚の Ge において良好な FET 特性を初めて動作実証した。これらの新しい実験事実に基づきながら Ge CMOS 実現の課題を整理していた。

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、本研究では Ge が潜在的に持つ高い能力を異種材料の界面形成に対する理解に基づく制御によって実証し、また将来の課題に対する対策も個々のプロセスの材料学的理解および発見に基づいて明瞭に示している点に高い意義がある。これらはいずれも本論文において初めて実証された研究成果であり、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。