

博士論文審査報告書

論文題目：高精度X線顕微折法による歪み Si ウェーハの結晶性に関する研究

申請者：仙田 剛士

1. 論文内容の要旨

デバイスプロセスにおけるスケーリング則の限界により、高速デバイスを実現する次世代ウェーハが望まれている。歪み Si ウェーハはその有力な候補である。しかしながら、歪み Si ウェーハを用いたデバイスプロセスにおいて、歪み Si 層膜厚の増加に伴いデバイス特性が劣化することが知られている。これは、歪み Si ウェーハの作製方法が複雑であること、さらに薄膜および多層膜構造ゆへの結晶性の劣化が原因として考えられる。よって、その結晶性を微細かつ高精度に解析することで、高品質なウェーハの作製が期待される。

本論文では、まず歪み Si 層膜厚と、この歪み Si 層中に発生する転位密度との定量的な関係を評価した。歪み Si 層の膜厚を増加させるに従い、貫通転位密度およびミスフィット転位密度が増加することを見出した。特に前者は、歪み Si 層厚約 17 nm において、 $1 \times 10^5 \text{ cm}^{-2}$ 程度まで増加する。また歪み Si 層の臨界膜厚は、同一の格子不整合を有する SiGe 層の単結晶 Si 基板上臨界膜厚に比べて大幅に小さいことが分かった。この原因として、歪み Si 層が成膜される緩和 SiGe 層の結晶性の劣化が考えられる。そこで、SiGe 層の成膜条件を変化させ、緩和 SiGe 層の結晶性および歪み Si 層の転位密度を評価した。組成傾斜 SiGe 層に発生するミスフィット転位の伸長を促進させる成膜条件(成膜温度増加、成膜時間増加等)を適応することにより、SiGe 層の貫通転位密度と緩和 SiGe 層の格子面傾斜分布幅は減少し、その結果として歪み Si 層の転位密度が減少することが分かった。

さらに、同ウェーハを SPring-8 放射光マイクロビームで評価した結果、これまで報告されているような、SiGe 層の格子面傾斜分布および表面形状に類似した格子面傾斜ドメインが存在することが分かった。このことは、緩和 SiGe 層の結晶性が、組成傾斜 SiGe 層で転位が発生した際の 3 次元変形により悪化することを意味する。

本論文ではさらに、歪み Si ウェーハの断面より高平行度の放射光マイクロビームを入射させ、組成傾斜 SiGe 層の成長方向の結晶性変化を評価した。組成傾斜 SiGe 層の Ge 組成をステップ状に増加させた(001)表面を有する歪み Si ウェーハを作製し、 $\langle 110 \rangle$ 方向の結晶性を詳細に調べた。その結果、組成傾斜 SiGe 層が Si ウェーハ表面に垂直な軸の周りでわずかに回転していることを初めて明らかにした。また、 $\langle 110 \rangle$ 方向の SiGe 層格子面回転分布幅は、成膜されるごとに悪化するが、深さ 4 μm 程度から表面に向かうに従い減少する。さらに、 $\langle 110 \rangle$ 方向の格子緩和率も同様の傾向で減少する。これらの結果より、以下の結晶性変化のメカニズムを推定した。ウェーハ表面の SiGe 層は、自由表面であるため歪みが開放され、SiGe 層の格子緩和率は低下する。この格子緩和率低下が成長方向の応力変化を生じ、格子面回転および格子面傾斜分布幅が減少する。この自由表面の影響はある深さまでおよびため、深さ 4 μm 程度から表面にかけて、徐々に格子緩和率、格子面回転および格子面傾斜分布幅が減少すると考えられる。つまり、SiGe 層は、成膜された際に緩和するのではなく、その層上に SiGe 層が成膜され、表面が拘束された際に転位発生を伴い緩和することが示唆される。

本論文において、これまで報告されていないウェーハ表面に対して垂直な格子面の評価もおこなうことにより、組成傾斜 SiGe 層成長方向の 3 次元的な結晶性変化を明確にした。

2. 論文審査結果

本論文は、次世代高速半導体ウェーハとして注目されている歪み Si ウェーハについて、その結晶性を詳細に評価したものであり、さらにその劣化メカニズムについても述べている。

歪み Si 層の臨界膜厚が、同一の格子不整合を有する SiGe 層の単結晶 Si 基板上臨界膜厚に比べて大幅に小さいことを示し、歪み Si 層中に発生する転位密度が、緩和 SiGe 層の格子面傾斜分布幅の大きさに依存することを明らかにした。また、SiGe 層の成膜温度増加や成膜時間増加により、SiGe 層に発生するミスフィット転位の伸長を促進させ、その格子面傾斜分布幅を減少させることで、歪み Si 層中の転位密度を大幅に軽減することができることを明らかにした。

さらに、放射光利用の高平行度 X 線マイクロビームを用いて、SiGe 層の成長方向の結晶性の変化を詳細にとらえた。(001)表面を持つ Si 基板に SiGe 層を成長させると、SiGe 層が Si 基板表面に垂直な軸の周りにわずかに回転しながら成長することを初めて明らかにした。また、SiGe 層の格子面回転分布幅と<110>方向の格子緩和率は、SiGe 層の成長とともに大きくなるが、表面から深さ 4 μm 付近で最大値に達した後、表面に向かって徐々に小さくなることを明らかにした。自由表面による歪み解放がこの原因であることを示唆している。これらの結果は、我が国の基幹産業である半導体製造技術の高度化にも重要な貢献をなすものである。

よって、本論文は博士（理学）の学位論文として価値のあるものと認める。

また、平成 20 年 7 月 30 日、論文内容およびこれに関連する事項について試問を行った結果、合格と判定した。

主査：籠島 靖 印

副査：松井純爾 印

：小林寿夫 印

：小椋厚志 印

(明治大学理工学部、准教授)

：津坂佳幸 印