

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 澤野 憲太郎

本研究の目的は、Si (001) 基板上に高品質な歪み緩和 SiGe バッファ層を作製し、電気伝導特性の高性能化を図ることである。また、高品質化された SiGe バッファ層において、結晶構造、成長機構を解明し、新たな知見を得るとともに、さらなる高品質化へ向けた指針を得ることを目的とする。論文は7つの章から成り立っている。

第一章では背景として、Si-LSI 技術の微細化限界が近づいていることから、移動度向上に向けたチャネルエンジニアリングが必須となっており、そのためには SiGe を導入することが最も有効な手段であることを述べた。特に、格子不整合を有するヘテロ構造を形成して結晶中に歪みを導入することで、大幅な移動度上昇が期待できることを述べ、そのためには高品質な歪み緩和 SiGe バッファ層の作製が必須であることを示した。

第二章では、歪みを有する Si / Ge ヘテロ構造におけるバンド構造について、その縮退の分裂やヘテロ界面でのバンドオフセットについて説明し、歪みチャネル構造における移動度向上メカニズムについて述べた。また、歪み Si および歪み Ge チャネル構造において、今までに行われてきた研究について移動度の変遷を中心に述べた。続いて研究の焦点となる、歪み緩和 SiGe バッファ層について、その転位構造について簡略に述べた後に、良質な構造を作製するためにこれまで提案されている方法について紹介し、それらの問題点についても言及した。

第三章では実験手法を述べた。まず試料作製に用いた分子線エピタキシー (MBE) 法と、イオン注入法について、装置の概要を述べた。また、結晶の歪みの評価方法について理論的説明を行った後、空間分解顕微ラマン分光装置、X 線回折装置について説明した。また電気伝導特性評価に用いたホール測定系、原子間力顕微鏡 (AFM)、透過型電子顕微鏡 (TEM) についても簡略に述べた。

第四章では、まず化学的機械研磨 (Chemical Mechanical Polishing ; CMP) により原子層オーダーの平坦性を有する歪み緩和 SiGe バッファ層が作製でき、さらにその上に良質な結晶性の膜が再成長可能であることを示した。この平坦化された SiGe バッファ層を歪み Si 変調ドープ構造に適用し、平坦化による最大 4 倍以上の電子移動度増大を得、低温で世界記録に並ぶ $520000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ という値を得た。また、チャネル層中のキャリア濃度を変化させることで、平坦化された試料における主散乱要因が残留イオン化不純物散乱であることを示した。同様に歪み Ge 変調ドープ構造にも CMP を適用し、平坦化により、低温で 8 倍、

室温で 1.8 倍の移動度増大を得た。移動度のチャンネル膜厚依存性を調べることで、ヘテロ界面の短周期なラフネスが散乱に大きく寄与していることを示すとともに、薄膜なチャンネルにおいても CMP により高移動度が実現できることを示した。さらに、移動度の歪み依存性を調べ、歪み 2%程度まで移動度が増加していき、有効質量の低下、バンド間散乱の抑制が効果的に移動度向上をもたらすことを示した。

第五章では、歪み Si / 傾斜組成 SiGe バッファ層構造の歪み場分布について議論した。空間分解ラマン分光法により、SiGe 層内部の転位が表面付近まで不均一な歪み場分布を及ぼし、その上の歪み Si 層の歪み場ゆらぎをもたらすことを示した。この歪み場不均一のため、歪み Si 層が局所的に歪み緩和を起し、歪みゆらぎ量も増大することが分かった。また、歪み場分布周期はバッファ層膜厚に大きく依存し、ミスフィット転位の分布が不均一であることを示唆した。また平坦化した SiGe バッファ層上にホモエピタキシャル成長を行い、表面モフォロジー変化を調べることで、歪み場ゆらぎが局所的に成長速度を変調し、歪み分布に対応したラフネスを生じさせることを示した。

第六章では、薄膜で高品質の SiGe バッファ層を作製する目的で、イオン注入法を開発し、従来法に比べて非常に薄い膜厚で、歪み緩和を大きく促進させることが可能であることを示した。イオン注入条件依存性を詳細に調べることで、Si 基板表面近傍に導入された欠陥が歪み緩和に大きく寄与することが分かった。さらに、SiGe 層成長温度を比較的低温とし、成長後の熱処理によって転位を増殖させることで、CMP に匹敵する平坦性を有する SiGe 緩和層を得た。また、TEM 観察より、イオン注入欠陥が転位源として働き、ヘテロ界面付近で転位ループが高密度かつ均一に形成されていることを示し、その効果で歪み場分布が大幅に均一化されることを示した。

第七章では総括として、本論文の内容をまとめ、さらに、SiGe 系ヘテロ構造のデバイス応用化において、本研究で開発された技術、得られた知見の意義と今後の課題について述べた。

以上を要約すると、本論文では、歪み Si/Ge 系ヘテロ構造の実用化に向け、大幅な高性能化を達成し、また結晶構造、成長機構の解明と制御に関して、極めて有意義な知見を得ており、物性工学の進展に寄与するところが多い。

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。