

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 入沢 寿史

本研究の目的は、歪みSi/Ge系ヘテロ構造の中で最も高い正孔移動度を有すると期待される歪みGeチャネル構造をSi基板上に作製し、その電気伝導特性を詳細に調べるとともに、本構造の超高移動度トランジスタとしての有用性を実証することである。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、現在、微細化限界に直面しつつある Si 大規模集積回路を今後もこれまでと同様に発展させていくには、他の材料系およびヘテロ構造などの新構造を素子に導入することが不可欠であることを述べる。また、その際に Si と同じIV族元素である Ge、およびこれらの混晶 SiGe とのヘテロ構造が、Si との整合性も良く、移動度の著しい増大をもたらす得るので大変有望視されていることを述べる。

第二章ではまず、歪み Si/Ge 系ヘテロ構造の物性、特徴を説明する。特に、本ヘテロ構造を用いることで、既存の Si 素子と比べて大幅な移動度の増大が期待される理由について詳しく述べる。その後、実際に作製された様々な高移動度歪み Si/Ge 系ヘテロ構造に関するこれまでの研究報告を概観する。その中で、本研究で注目した歪み Ge チャネル構造は、作製が困難であるためにこれまで詳しく調べられてこなかったが、歪み Si/Ge 系ヘテロ構造中で最も高い正孔移動度を有し、大変魅力的な構造であることも述べる。

第三章では実験手法を述べる。まず、試料の作製に用いた分子線エピタキシー法に関して、Si 基板の準備法や装置の概要について述べる。次に、電気伝導特性の評価に用いたホール測定、移動度スペクトル解析、磁気輸送特性評価、実効移動度測定について、その理論的側面を含めて説明する。最後に、その他の評価法として、X 線回折測定、2 次イオン質量分析、透過型電子顕微鏡観察、原子間力顕微鏡観察について簡略に述べる。

第四章では、超高移動度を目指して作製した歪み Ge チャネル p 型変調ドープ構造の作製について述べた後、その電気伝導特性を、構造最適化を図った結果とともに示す。まず、高移動度歪み Ge チャネル構造を得るために必須となる高品質 SiGe 歪み緩和バッファの作製法を説明する。ここでは、本研究で採用した低温バッファ法と呼ばれる方法を、これまでに開発されている他の方法と比較しながら述べる。そして、実際作製された試料が高品質であることを、構造評価および電気伝導特性評価の結果から示す。構造最適化の結果からは、本構造における最適なチャネル層厚およびチャネル層の成長温度は、界面ラフネス散乱と、フォノン散乱のチャネル層厚依存性、波動関数のバリア層への染み出し、および

チャンネル層の歪み緩和による影響で決定されることが分かった。また、移動度のキャリア濃度依存性や、チャンネル以外を流れるパラレル伝導の存在により、室温付近における試料全体の移動度が著しく低下させられていることが明らかにされた。

第五章では、歪み Ge チャンネル構造の電気伝導特性をより詳細に調べるために行なった、移動度スペクトル解析と磁気輸送特性評価の結果を示す。移動度スペクトル解析から、パラレル伝導の影響を取り除いた歪み Ge 中のみの移動度は、室温で $2940 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ という超高移動度に達することが分かった。バルク Ge (ノンドープ) の移動度 $1900 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ を大幅に越える試料の作製に成功したのは本研究が初めてであり、この結果は歪みによる移動度増大の効果を明瞭に示している。磁気輸送特性評価からは、歪み Ge の正孔有効質量がバルク Ge の値 ($0.28 m_0$) から大幅に減少すること、また、価電子帯の非放物線性のため、キャリア濃度の増大とともに大幅に増大することが分かった。本研究で得られた値は、キャリア濃度 $5.7 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ で $(0.087 \pm 0.005) m_0$ 、 $2.1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ で $(0.19 \pm 0.01) m_0$ であった。これらの値は、上述の超高移動度を説明するのに十分小さな値である。

第六章では、歪み Ge チャンネル構造の超高移動度トランジスタへの応用を図った結果を述べる。まず、デバイス作製プロセスへの指針を得るため、構造の熱的安定性を調べた結果、30分の熱処理では、500度以上でチャンネル層界面での Si と Ge の相互拡散が顕著となり、移動度が急激に減少するが、30秒の熱処理では、700度まで移動度の減少は起こらないことが分かった。また、チャンネル層厚が熱平衡状態での臨界膜厚を大きく超えている場合、500度以下の熱処理によっても歪み緩和が容易に生じ、移動度が低下してしまうことが分かった。次に、バッファ中に n 型不純物である Sb のドーピングを行なうことにより、デバイス応用で大きな問題となるパラレル伝導の大幅な抑制に成功した。最後に、本研究の集大成として、歪み Ge チャンネルトランジスタを作製し、良好なデバイス動作と室温実効移動度 $2700 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ を達成した。この値は、現在使用されている Si p 型トランジスタの値の約 30 倍にも相当する画期的な値であり、本構造が集積回路に利用されれば飛躍的な性能向上が期待できる。

第七章では総括として、本研究で得られた結果、知見をまとめるとともに、歪み Ge チャンネル構造を実用化しようと考えた場合に生じる今後の課題について述べる。

以上を要するに、本論文では、Si を母体とする高移動度ヘテロ構造の中で歪み Ge チャンネル構造に注目し、超高移動度を有する試料の作製に成功するとともに、その電気伝導特性の解明と、実用化へ向けた課題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。