

審査の結果の要旨

氏名 株柳 翔一

シリコン(Si) CMOS デバイスの高性能化は現在まで主にサイズの微細化によって進められてきたが、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の一つとして検討されつつある。しかしながら Ge という材料の研究は最近になってようやく研究が始まったものの Si に比べて圧倒的にその知見が少ない。一方、Ge の物性を基本から見直すことは Ge 技術を構築するという観点からだけでなく半導体物性をより詳細に理解するという観点からもきわめて重要である。

上記背景のもと本研究は半導体物性においてもっとも基本的である不純物のドーピングの効果に焦点をあて、それらが Ge の電子構造および格子構造にどのように影響するかを詳細に調べた研究内容である。さらに得られた結果を理解するために多くの半導体材料において重要な sp^3 混成軌道の結合状態と反結合状態に対するフリーキャリアの効果として議論を展開しその妥当性を述べている。それらを「ゲルマニウム薄膜に誘起されたフリーキャリアによるフォノンのソフト化およびバンドギャップ変調に関する研究」という題目のもとにまとめた大変ユニークな論文になっている。本論文は6章から構成されている。

第1章は序論であり、本研究をすすめる動機になっている部分である。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などを述べた後に上記問題点を克服する一つとして提案されている接合レストランジスタを紹介している。このトランジスタの性能などに関しては第3章で述べるが、この構造を用いることが本研究のユニークさを引き出しているという点で重要である。

第2章は本研究を進めるにあたって必要であった実験方法として、特にトランジスタ作成技術および物性評価技術を詳細に説明している。評価方法として主に使われる手法は、トランジスタの電気測定を別にすればフォトルミネッセンス (PL) 測定およびラマン測定である。これらの評価技術は既によく研究され確立された評価技術と言えるが、今回の研究のようにわずかな変化を追いかけてやると装置の評価原理に戻って考え直す事が必要であった。

第3章は Ge を用いて作成された接合レストランジスタの性能評価結果を示している。性能の善し悪しを本研究では目的とはしていないが、Ge 上で初めて n-チャンネル接合レストラ

ンジスタを動作させ、Si に対するその優位性を示したことは価値が高い。また実際に高濃度に隣を導入した Ge において極めて高い電子移動度を実証しており、次章で議論されるラマンおよび PL の評価に供された Ge トランジスタが高品質のものであることを示している。

第4章は本論文における主要な部分であり、上記接合レストランジスタを用いた PL 測定、ラマン測定の結果を示している。実際、トランジスタを用いて PL およびラマン評価を行ったところに今回の論文のもっとも大きなポイントがある。つまり従来は PL、ラマン測定は材料の評価装置であったが、本研究では材料の状態は同じであるが、バイアスを加えてフリーキャリア濃度だけを変えて上記の物性評価を行っているところにそのユニークさがある。そのおかげで半導体中の不純物とフリーキャリアの効果を区別して PL およびラマンへの影響を議論することができた。

第5章は4章で得られた結果に対して半導体物性の基本に戻って結果の理解を試みている。まずは原子間の結合モデルによって電子構造、フォノン構造を考察し、フリーキャリア濃度に依存して変化する PL、ラマンの結果をフリーキャリアによる原子間結合強度の変調として定性的に説明している。また高濃度不純物を持つ半導体のラマン評価においてよく議論されてきた Fano 効果との区別を明らかにし今回のモデルの妥当性を議論している。さらに第一原理計算の力を借りて、多数の不純物が半導体中に存在する場合に電子間の交換相関相互作用がバンドギャップ変調に影響していることを示している。

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は、半導体中において不純物が果たしている役割を不純物原子と自由キャリア導入という二つの観点からとらえ、それらを実験的に区分けすることを試み、結果としてフリーキャリアの存在が電子構造、格子構造そのものに影響していることを明らかにした極めてユニークな研究内容となっている。これらはいずれも世界で初めて実証された成果であり、半導体物理、半導体デバイス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。
