

# 論文審査の結果の要旨

氏名 ジョセフ リンジー フォルソン

本論文は6章からなり、第1章は高移動度二次元電子系の発展と物理的な特徴についてまとめたのち、本研究の目的を述べている。第2章は高移動度二次元電子系が低温・強磁場下で示す量子現象の物理的概念および理論的側面を説明している。第3章は本研究で用いた  $\text{MgZnO}/\text{ZnO}$  ヘテロ構造の作製方法と高品質化および評価法を述べている。第4章は  $\text{MgZnO}/\text{ZnO}$  二次元電子系の基本的な物理パラメータの評価について、第5章は本研究で初めて観測された新規な量子伝導特性について、第6章は将来的な展望について、それぞれ述べられている。

本論文は、 $\text{MgZnO}/\text{ZnO}$  ヘテロ界面に生成される二次元電子系に注目し、 $\text{GaAs}$  における二次元電子系と比べて有効質量が大きく電子相関が強いという特徴を用いて、低温・強磁場中において見出した新たな量子輸送現象を主題としている。

第3章は、 $\text{ZnO}$  薄膜の品質を向上させるため、分子線エピタキシー用真空チャンバーの改善に焦点が当てられている。真空チャンバー内の残留ガスをモニターすることで、基板ホルダー材料の検討、加熱機構の改良による不純物発生の低減が行われた。この改良のもと、低温での移動度が最大となる  $\text{Mg}$  濃度を調べている。その結果、 $\text{Mg}$  濃度が約1%のとき  $700,000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$  を超える最大移動度を達成した。この値は、従来の最大値の約4倍である。また、 $\text{ZnO}$  基板上的  $\text{MgZnO}$  中の  $\text{Mg}$  量を定量する方法として、フォトルミネッセンス法を提案し、 $\text{Mg}$  濃度と局在エキシトンエネルギー値の校正曲線を得ている。

第4章では、新規な量子ホール状態を理解するために必要な物理パラメータを、様々な低温測定により抽出した実験について述べられている。フォトルミネッセンスを用いて、フェルミ準位とサブバンド間の関係を様々なキャリア濃度の試料について測定した結果、測定に用いた試料すべてにおいて伝導電子は最低サブバンドに存在し、完全な二次元系となっていることを確認している。さらに、試料を磁場中で回転させたときの量子振動の結果から、スピン感受率のキャリア濃度依存性を調べている。電子濃度を減少させると電子相関の効果が強くなり、有効質量、 $g$  因子共に増大することを明らかにしている。また、 $\text{GaAs}$  二次元電子系に比べ、移動度から求まる輸送散乱時間は1桁ほど小さいにもかかわらず、量子振動の減衰に関わる量子散乱時間はほぼ同等の最大値を持つことを見出し、 $\text{ZnO}$  の二次元電子系は  $\text{GaAs}$  二次元電子系と同程度清浄であることを示している。

第5章では  $15\text{mK}$  までの低温において量子ホール効果を測定した結果について述べている。整数量子ホール効果、および、奇数分母の分数を指標に持つ分数量子ホール効果

を多数観測し、試料が非常に良質であることを確認している。さらに、GaAs 二次元電子系で非常にまれに観測される  $7/2$  を指標に持つ分数量子ホール効果、これまでどの半導体でも観測されたことのない  $3/2$  を指標に持つ分数量子ホール効果の観測に成功した。一方、GaAs 二次元電子系で観測される  $5/2$  を指標に持つ分数量子ホール効果は観測されていない。これらの偶数分母分数量子ホール効果の特徴について、第4章で求めた物理パラメータを元に、基底状態と第一励起状態の量子化軌道準位が入れ替わることが原因であることを提案している。さらに、量子振動の角度依存性より、そのような量子化軌道準位の入れ替えが実際に起こっている強い証拠を捉えている。

第6章は発見された量子現象をより詳細に調べるため、Air-gap を用いた電界効果型トランジスタの開発と、サブマイクロメートルのポテンシャル変調の実験を行い、これらを用いた今後の展望について述べられている。

本論文は酸化亜鉛という、二次元電子系の分野では新しい物質を用いて、初めにヘテロ構造の高品質化を行い、極低温測定において酸化亜鉛の特徴を生かした電子相関に基づく新現象を観測している。特に、偶数分母を持つ分数量子ホール効果は、トポロジカルに守られた量子計算等への新規な応用可能性が開かれる可能性がある。

なお、本論文第3章～第6章は川崎雅司、塚崎敦、小塚裕介、Denis maryenko 各氏に加え、第3章は瀬川勇三郎、牧野哲生各氏との、第4章 Victor V. Solovyev、Aleksandr B. Van'kov、Igor V. Kukushkin、Ding Zhang、Jurgen H. Smet、笠原裕一、大島勇吾、岩佐義宏各氏、第5章は Benedikt Friess、Ding Zhang、Jurgen H. Smet 各氏との、第6章は田中一成、反保智貴各氏との共同研究であるが、論文提出者が主体となって分析及び検証を行ったもので、論文提出者の寄与が十分であると判断する。

したがって、博士（科学）の学位を授与できると認める。

以上1994字