

## 審査の結果の要旨

論文提出者氏名 マルクス マリアン ニコラ ヨアヒム

本論文は「Spin-orbit interaction of holes in Si-pMOS double quantum dots (シリコン p MOS二重量子ドットにおける正孔のスピン軌道相互作用)」と題して、Si量子ドットにおける正孔のスピン軌道相互作用 (SOI) に関して論文提出者が行った研究の成果をまとめたもので、英語で執筆されている。

Si量子ドットは、半導体集積化のプロセスと互換性がある、核スピンによるデコヒーレンスの影響が小さい、1 K以上の高温動作が可能であるという特徴があることから、スピン量子コンピュータの量子ビットを構成する材料として注目されている。なかでもSi中の正孔は電子に比べてSOIが強く、スピンの電圧制御に有利であることが報告されている。しかし、正孔のSOIに関する研究は実験、理論ともに日が浅く、十分な知見が得られていない。本学位研究では、このような背景のもと、p型Si-MOS量子ドットを用いて正孔のランダウg因子、SOI磁場の角度異方性を検出し、SOI異方性の測定結果を、Rashba型とDresselhaus型を統合したSOIモデルの導入により矛盾なく理解することに成功している。その中で、g因子の新しい測定法の開発、励起状態によるスピnfanネル (二重量子ドットのスピン閉塞を破る正負の磁場がドット間の離調に対して漏斗のような関数形で変化する現象) の観測、量子ドットの内部電場方向の決定、といった先駆的な成果が挙げられている。

論文は8章からなり、第1章では研究の背景と動機、そして量子ドットのスピンを用いた量子計算への応用の研究状況を紹介した後、Si量子ドットの正孔スピンには量子ビット核スピンによるデコヒーレンスの影響が小さい、SOIが強い、バレー縮退の影響がないといった特徴があることを要領よく説明している。続いて、パウリスピン閉塞現象の破れを利用したg因子とSOIの測定、スピnfanネルの観測、新しいSOIモデルによる実験結果の理解という本研究のシナリオが説明されている。

第2章では、まず試料の特徴として、量子ドットの閉じ込めポテンシャルがメサ側壁とゲート電極で作られていることを述べた後、ゲート電圧による二重量子ドットの電荷状態の制御と検出法、パウリスピン閉塞とスピnfanネルの起源、g-因子とSOI磁場の検出など、本研究に関係する実験手法と原理を説明している。最後に、先行研究例として、細線型の量子ドットについてスピン共鳴の手法で正孔g因子の異方性を調べた実験を紹介している。

第3章では、本研究の主題であるSOIについて、Rashba型とDresselhaus型それぞれの起源を群論に基づいて説明した後、g因子とSOI磁場の関係に言及している。

第4章では、二重量子ドットのクーロンピークの間隔と電圧に対する傾きをゲート容量モデルで解析することにより、量子ドットの大きさと位置、メサ側壁とゲート電極 (上面と側面) で作られる内部電場を評価している。ここでは、側壁と側面ゲート電極による主な

る内部電場がいずれも面内にあることを指摘しており、このことは、第6章のSOI磁場の異方性の実験結果を説明する上で重要な知見を提供している。

第5、6章では、本学位研究の中心的な成果が書かれている。第5章では、まず、従来のパルス電圧印加に比べて簡便なDC電圧印加の手法でスピントランスポールが観測できること、観測したスピントランスポールが、従来の基底状態ではなく、励起状態に起因していることを結論している。さらに、スピントランスポールの磁場角度依存性の測定からg因子がSOIの予想に従って周期的に振動することを確認している。これらの結果は、正孔g因子について、明瞭なSOI効果の確認と有用な測定法の提供を意味している。

第6章では、SOI磁場の異方性の検出とその結果を説明するための統合Rashba-Dresselhaus SOIモデルの提案を述べている。パウリスピン閉塞の磁場破れによるトンネル電流の増大がSOIのスピン混合を反映することを利用してSOI磁場を求め、そのSOI磁場が面直方向に偏っていることを指摘している。さらに、この磁場異方性がRashba型とDresselhaus型を統一的に含むSOIモデルにより説明できることを確認している。これらは、Si量子ドット中の正孔SOIの異方性の問題が実験、理論ともに矛盾なく理解できることを初めて示したものであり、正孔SOIの重要な物理と同SOI磁場の有用な測定法を提供している。

第7章では正孔のg因子とSOI磁場の異方性の実験的導出と統合SOIモデルの提案という、一連の研究で得られた成果、第8章では今後の研究展開をまとめている。

以上述べたように、本研究は、Si量子ドット中の正孔に対するSOIの評価と物理の解明を目指して行われたもので、g因子とSOI磁場の異方性の検出、統合Rashba-Dresselhaus SOIモデルとの対応、励起状態に起因する新奇なスピントランスポールの観測、量子ドット構造に固有の内部電場方向の決定など、いずれも正孔スピンの基礎物理に関して重要な成果をあげており、また、スピン量子情報への応用にも有用な知見を提供している。これらの結果は注意深い実験と理論解析に基づいて得られたものであり、内容的にも、意義、独自性ともに高い。半導体ナノ構造のスピン物性、スピン量子計算の物理と技術の進展に大きな寄与があったと評価でき、物理工学としての貢献が大きい。

よって、本論文は博士（工学）の学位申請論文として合格と認められる。