

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	スピン系量子情報デバイスを目指した電荷センサ集積シリコン 2 重量子ドットデバイスに関する研究
Title(English)	Silicon double quantum dots with charge sensors for spin-based quantum information devices
著者(和文)	蒲原知宏
Author(English)	Tomohiro Kambara
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第9456号, 授与年月日:2014年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:小田 俊理,波多野 睦子,浅田 雅洋,宮本 恭幸,河野 行雄, 水田 博
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第9456号, Conferred date:2014/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	審査の要旨
Type(English)	Exam Summary

論文審査の要旨及び審査員

報告番号	甲第 号			学位申請者氏名		蒲原 知宏	
論文審査 審査員		氏 名	職 名		氏 名	職 名	
	主査	小田 俊理	教授	審査員	河野 行雄	准教授	
	審査員	波多野 睦子	教授		水田 博	JAIST 教授	
		浅田 雅洋	教授				
		宮本 恭幸	教授				

論文審査の要旨 (2000 字程度)

本論文は、“Silicon double quantum dots with charge sensors for spin-based quantum information devices” (スピン系量子情報デバイスを目指した電荷センサ集積シリコン 2 重量子ドットデバイスに関する研究)と題し英文 8 章からなっている。

第 1 章 “Introduction” 「序論」では、本研究の背景と目的を述べている。量子コンピュータは、従来の並列コンピュータでは何年もかかる複雑な計算を僅か数秒で解いてしまう能力があると言われているが、実用的な計算を実行するためには、大規模集積化と十分に長いコヒーレンス時間が必要であると述べている。そして、Si 量子ドットを用いた電子スピン操作は大変有望な方法であることを述べ、本研究の目的は、Si 中の電子スピンを用いた量子情報素子の実現に向けたスケーラブルなデバイス構造の開発にあると述べている。

第 2 章 “Theory of Electron Transport in Quantum Dot Devices” (量子ドットデバイス中の電子輸送理論) では、本論文で取り扱う量子ドット中の電子輸送及び電子スピン共鳴の理論を述べている。具体的には、多体系における各導体を持つ静電エネルギーの導出と、電子がポテンシャル障壁を通り抜ける単電子トンネリング、さらに単一量子ドット及び 2 重結合量子ドット構造における静電エネルギー、電子スピン共鳴の原理を説明している。

第 3 章 “Experimental Techniques”(実験技術)では、本論文の量子ドット構造の作製に使用した装置、設備について述べている。半導体、特にシリコンを用いた量子ドットなどのナノ構造では、その作製に使用する設備のクリーン度やサンプルの取り扱い方が、極低温における電子輸送の特性に多大な影響を与える。そのため、本論文で行うサンプル作製の詳しい作製手順についても述べている。

第 4 章 “Analysis of Charge Modulation in Si DQD” (シリコン 2 重結合量子ドット中の電荷状態解析) では、電子線リソグラフィとドライエッチングにより作製される 2 重結合量子ドット中の電荷状態について、3 次元デバイスシミュレータを用いて解析を行ない、各ゲート電圧により量子ドット中に電子が閉じ込められることを確認している。極低温における電子密度を、100K における計算結果と、MOSFET の電子密度測定結果を用いて見積もっている。各ゲート電圧の調整により本デバイス構造で単一電子の閉じ込めが可能になることが示唆されたが、一方でトンネルレートの低下によるソース・ドレイン電流値の減少も考えられることから、2 重結合量子ドット中の電荷状態を読み出すための電荷センサを集積した構造についても述べている。

第 5 章 “Detection of Single Electron Transport in various Si DQD Structures” (種々のシリコン 2 重結合量子ドット構造における単電子輸送の検出) では、シリコン 2 重結合量子ドット近傍に電荷センサとして単一量子ドットを集積し、この構造において初めて左右量子ドット間の単電子輸送を検出している。また 2 重結合量子ドットデバイスの構造について、電子スピン量子ビットに向け、バックゲート電圧による電荷誘起、及び電子トンネリングレート向上に向けた量子ドット間くびれ位置の検討も行なったと述べている。

第 6 章 “Dual Function of Charge Sensor: Charge Sensing and Gating” (電荷センサの 2 重機能性：電荷検出とゲーティング機能)では、本研究で用いているシリコン量子ドットの 2 重機能性について述べている。2 重結合量子ドット近傍に集積した電荷センサは、そのソース・ドレイン端子両方に電圧を印加することで、電荷センサのセンシング機能に加え、2 重結合量子ドットに対するゲート端子としても機能することが初めて示されている。特に本研究の量子ドットデバイスでは各量子ドット・ゲート端子がドライエッチングにより分離されているため、量子ドット間の電流リークが起きにくいという長所があり、本デバイス構造の大きな利点であると述べている。

第 7 章 “Analysis of Electron Spin Resonance with Ferromagnets and Si DQD” (シリコン 2 重結合量子ドットと強磁性体を用いた電子スピン共鳴の解析) では、2 重結合量子ドット中の電子スピンを制御するためにその近傍に集積した強磁性体微細構造による局所磁場を解析している。これまでに報告されている磁性体を用いた電子スピン共鳴に比べ、本デバイス構造では 10 倍程度の速度で電子スピンを回転できることが示されている。実際に強磁性体を集積したデバイスでブロッケード現象が観測され、その磁場依存性や高周波応答により、電子スピンのみでなく、4 族半導体に特有なバレーによるブロッケードとの混在であることが示されている。更に特定の磁場印加によりブロッケードを解除し、その磁場領域のみで電子スピン共鳴とみられる電流ピークが観測されている。また、強磁性体の形状を最適化することで、外部磁場を印加することなく、残留磁化と高周波印加によって電子スピンを制御することが可能な構造を提案したと述べている。

第 8 章 “Conclusion”(結論)では、本論文の結論について述べている。

以上を要するに、本論文では、量子ビットの応用を目指した Si 量子ドットの電子輸送に関する研究を行い、Si 単電子トランジスタに電荷検出機能とゲーティングの 2 重機能を賦与させることに成功したこと、デバイスに強磁性体電極を集積し磁場および高周波を印加することにより電子スピン共鳴と見られる現象を観測し、Si 量子ドットによる量子情報素子応用への道を拓いたもので工学上、工業上貢献するところが大きい。よって、我々は本論文が博士 (工学) の学位論文として十分な価値があると認める。