

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

題目(和文)	物理的パターン形成による少数電子シリコン量子ドットの電気特性と電子スピン量子ビットへの応用に関する研究
Title(English)	Physically-defined few-electron silicon quantum dots for electron spin qubits
著者(和文)	堀部浩介
Author(English)	kosuke Horibe
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9784号, 授与年月日:2015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,宮本 恭幸,河野 行雄,小寺 哲夫, 藤原 聡
Citation(English)	Degree:., Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第9784号, Conferred date:2015/3/26, 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	堀部 浩介	
		氏名	職名	氏名	職名
論文審査 審査員	主査	小田 俊理	教授	小寺 哲夫	准教授
	審査員	波多野 睦子	教授	藤原 聡	NTT 部長 主幹研究員
		宮本 恭幸	教授		
		河野 行雄	准教授		

## 論文審査の要旨 (2000 字程度)

本論文は Physically-defined few-electron silicon quantum dots for electron spin qubits (物理的パターン形成による少数電子シリコン量子ドットの電気特性と電子スピン量子ビットへの応用に関する研究) と題し英文 9 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。従来のコンピュータでは不可能な高い計算能力が期待される量子コンピュータについて説明し、これまでの量子ビットに関する研究の状況について述べている。特にシリコン量子ドット内の電子スピンを利用した系が量子コンピュータ実現に向け有望であることを説明し、先行研究における主要な課題について記述している。また、本研究の目的は多重量子ビットの集積化に有望である物理的パターン形成によるシリコン量子ドット構造の開発および電子スピン量子ビット実現に向けた諸問題を解決することであると述べている。

第 2 章 "Theory for quantum dots and charge sensors" (量子ドットと電荷センサに関する理論) では、本論文で取り扱う量子ドット中の電子輸送および電荷センサの理論について述べている。具体的には複数の静電結合した導体の静電エネルギー、単電子輸送とクーロンブロックード、単一量子ドットおよび二重結合量子ドットにおける電子輸送理論、電荷センサの感度、RF-単電子トランジスタ (SET) の原理について記述している。

第 3 章 "Experimental Techniques" (実験技術) では、本研究で作製したデバイス構造およびデバイス作製プロセスについて述べている。具体的には物理的パターン形成によって作製された量子ドットデバイスの構造と、その作製プロセスについて実験条件を含め詳細に記述している。

第 4 章 "Realization of charge sensing measurements and observation of few-electron silicon single and double quantum dots" (電荷センシング測定の実現と、単一および二重量子ドットにおける少数電子占有状態の観測) では SET 電荷センサ構造の作製と電荷センシング測定の実現、電荷センシング測定を用いた単一および二重結合量子ドットにおける少数電子占有状態の観測について述べている。これらは電子スピン量子ビット実現に向け必須の課題であり、5 章以後の実験においても前提の技術となっている。

第 5 章 "Key capacitive parameters for designing single-electron transistor charge sensors" (SET 電荷センサを設計するための主要な容量パラメータ) では、実験及び理論計算によって SET 電荷センサの容量パラメータを評価したことについて述べ、量子ビット測定における SN 比を向上させるための SET 電荷センサの設計指針を明らかにしている。SET 電荷センサの直径を小さくすると、量子ビットとの容量結合が減少してしまうが、同時にセンサ自身の感度が向上し、結果的に量子ビット測定時の SN 比が向上することを示している。

第 6 章 "Control of the tunnel coupling between coupled quantum dots" (結合量子ドット間トンネル結合の制御) では、交換相互作用を用いた電子スピン量子ビットの実現に必須である結合量子ドット間トンネル結合制御の実現について述べている。物理的パターン形成によるシリコン量子ドット構造ではトンネル結合が量子ドットパターンの形状に大きく依存するが、トップゲート電圧を変調することによりこのトンネル結合を変調可能であることを実験的に示している。

第 7 章 "Back-action-induced excitation of electrons in a silicon quantum dot with a single-electron transistor charge sensor" (SET 電荷センサのバックアクションによるシリコン量子ドット内の電子励起) では、SET 電荷センサのバックアクションによる量子ドット内電子の励起現象の観測と、実験結果の理論フィッティングによる解析について記述している。また電流が小さい領域で量子ビット測定を行うことによりバックアクションの影響を抑えることができることを述べている。

第 8 章 "Pulse measurements of Pauli spin blockade in few-electron silicon double quantum dots" (少数電子シリコン量子ドットにおけるパウリスピンブロックードのパルス測定) では、少数電子シリコン二重結合量子ドットにおけるパルス電圧測定によるスピブロックード現象の観測について述べている。シングレットとトリプレット状態間のエネルギー幅を見積もり、またパルスの周波数からシングレット・トリプレット量子ビットの縦緩和時間を見積もっており、本測定がパルス操作を用いた電子スピン量子ビットのシングルショット測定に向けた重要な進展であると述べている。

第 9 章 "Conclusions" (結論) では本論文のまとめと結論について述べている。以上を要するに、本研究では、電子スピン量子ビットの集積化を見据えたシリコン量子ドットデバイス構造の開発を行い、電荷センサの実装と少数電子量子ドットの形成、また結合量子ドット間トンネル結合の制御やパウリスピンブロックードのパルス測定といった重要な課題の達成に成功している。また電子スピン量子ビットの諸問題である電荷センサの SN 比やバックアクションの抑制策の提示を行っている。これらは、シリコンデバイスにおける電子スピン量子ビットの実現と集積化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。