T2R2 東京科学大学 リサーチリポジトリ
Science Tokyo Research Repository

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	
Title(English)	A study of charge sensing techniques in physically defined silicon quantum dots
著者(和文)	溝口来成
Author(English)	Raisei Mizokuchi
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12144号, 授与年月日:2021年12月31日, 学位の種別:課程博士, 審査員:小寺 哲夫,波多野 睦子,宮本 恭幸,若林 整,鈴木 左文,河野 行雄,小田 俊理,小林 正治
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第12144号, Conferred date:2021/12/31, 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

Powered by T2R2 (Science Tokyo Research Repository)

別　　紙　１（論文博士）

論文審査の要旨及び審査員　　（2000字程度）

報告番号	乙 第　　号	学位申請者	溝口 来成	
論文審査員	氏　　名	職　　名	氏　　名	職　　名
	主査　小寺 哲夫	准教授	鈴木 左文	准教授
	波多野 睦子	教授	小林 正治	准教授(東京大)
	宮本 恭幸	教授	小田 俊理	名誉教授
	若林 整	教授	河野 行雄	特定教授

本論文は、“A study of charge sensing techniques in physically defined silicon quantum dots”（物理形成シリコン量子ドットにおける電荷読み出し技術に関する研究）と題し、英文 7 章から構成されている。

第 1 章“Introduction”（序論）では、シリコン量子ドットを用いたスピン量子ビットの集積化と読み出し技術についての研究背景と目的を述べている。実用的な量子計算を行うには、数千万規模の量子ビットの 2 次元集積と個々の量子ビットが高性能であることが必要であり、シリコンスピン量子ビットは有望な物理系の 1 つであると説明している。本論文の目的は、スピン量子ビットに適した構造として期待される物理形成シリコン量子ドットの集積化とそれを用いた MHz の基底帯域での高速読み出しに向けた技術開発であると述べている。本論文では、シリコン量子ドットの 2 次元的な集積化とスピン状態の読み出しに必要な電荷検出技術について、デジタル信号解析による検出感度の向上と、RF 波を利用した読み出し技術の開発を具体的な研究対象としていることを説明している。

第 2 章“Theoretical background”（理論的背景）では、量子ドットの基礎的な特性と量子ドット中のスピン読み出し手法について概説している。半古典的な側面から量子ドット中のエネルギー準位の離散化を説明し、その準位を介した電子の輸送理論と多量子ドット系における電子の安定状態について説明している。また、スピンの読み出しには単発的な電荷検出を利用できることを説明し、RF 波を用いた低ノイズの読み出し手法について述べている。

第 3 章“Device fabrication”（デバイス作製）では、物理形成シリコン量子ドットの作製工程それぞれについて、その役割と条件を説明している。

第 4 章“Physically defined triple quantum dot systems in silicon on insulator”（silicon on insulator 基板を用いた物理形成 3 重量子ドット系）では、直列配置と 3 角形状配置の 2 種類の物理形成シリコン 3 重量子ドットを用いて 4.2 K において実験的に得られた輸送特性について述べている。測定では、それぞれの構造で、3 重量子ドット近傍に集積された電荷センサを用い、3 つすべての量子ドットの電子数変化の観測に成功したと述べている。また、3 角形状配置 3 重量子ドットではその電流値測定から、2 量子ビット操作に必要な量子ドット間のトンネル結合の存在を確認したと説明している。これらの測定から物理形成シリコン量子ドット系の 2 次元的な拡張性を実証したと述べている。

第 5 章“Tunneling event detection using single-shot measurements improved by numerical treatments”（数値処理によって改善された単発測定によるトンネリング検出）では、第 4 章と同様の構造を用いて、デジタル信号処理による、ノイズの大きい系からの単発的な電子状態の変化の検出を行ったと説明している。測定では、物理形成量子ドットにおける単一電子の単発トンネリング現象の読み出しのため、300 mK において、電荷センサ電流の応答を調べたと述べている。量子ドット内の電子数変化が断続的に起こるようゲート電極にパルス電圧を繰り返し印加することで、量子ドットからの単一の電子のトンネリングに対応したステップ状の電流値の変化の観測に成功したと述べている。電子スピン読み出しのためには、数 kHz の測定帯域幅で繰り返し行った測定それぞれでステップの有無を確認する必要があるが、今回の電流変化(~20 pA)は測定帯域幅 10 kHz における電流ノイズの大きさと同程度であり、そのままではスピン読み出しへの応用は難しいことが明らかになったと述べている。しかしながら、ここで、最尤推定に基づいたデジタル信号処理による高精度なステップ検出を実現することで、ノイズの大きい系からのスピン読み出しの可能性を示したと述べている。

第 6 章“Radio-frequency single electron transistors with a sensitive phase response”（大きな位相応答を持った RF 波単電子トランジスタ）では、物理形成量子ドットにおいて RF 反射測定という高速な電荷状態検出手法の開発とその評価について述べている。この技術では、低周波ノイズの影響を抑えるため数百 MHz 程度の RF 波を量子ドットと結合した LC 共振回路に印加し、その反射率の変化から MHz の IF 帯域での量子ドットのインピーダンスの変化が実証されてきたと述べている。測定では、4.2 K において、量子ドットのインピーダンスの変化に対応した反射率の変化が観測され、RF 反射測定の実現に成功したと述べている。また、この結果において、反射率の位相の変化は先行研究(~1°)に比べ大きな値(~45°)が得られたが、素子の寄生成分を考慮した等価回路を用いたシミュレーションから、その機構を解明したと述べている。この解析手法は、様々なデバイス構造に最適な回路定数を選ぶ際に有用であると述べている。

第 7 章“Conclusions”（結論）では、本論文の結論と今後の展望をまとめている。

以上を要するに、本論文では、シリコンスピン量子ビット集積化に向けたデバイス技術と測定技術の研究を行い、その中で、2 次元的な集積化の最小構成単位となりうる 3 角形状に配置した物理形成シリコン 3 重量子ドットの実現と、最尤推定を利用したデジタル信号解析による単発の電子トンネル検出精度の向上、RF 波反射測定回路の等価回路解析が行われた。以上の内容は、将来的に大規模量子コンピュータを実現するための重要な要素技術となるものであり、工学上、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。

注意：「論文審査の要旨及び審査員」は、東工大リサーチリポジトリ（T2R2）にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。