

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	物理形成シリコン量子ドットにおける電荷センサの機能向上についての研究
Title(English)	A study on the functional advancement of charge sensors in physically defined silicon quantum dots
著者(和文)	西山伸平
Author(English)	Shimpei Nishiyama
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京科学大学, 報告番号:甲第270号, 授与年月日:2025年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:小寺 哲夫,若林 整,鈴木 左文,渡辺 正裕,荒井 慧悟,森山 悟士
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Institute of Science Tokyo, Report number:甲第270号, Conferred date:2025/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	要約
Type(English)	Outline

(博士課程)
Doctoral Program

論文要約

THESIS OUTLINE

系・コース： Department of, Graduate major in	電気電子 電気電子	系 コース	申請学位 (専攻分野)： Academic Degree Requested	博士 Doctor of	(工学)
学生氏名： Student's Name	西山 伸平		審査員主査： Chief Examiner	小寺 哲夫	

要旨 (和文 2000 字程度)

Thesis Summary (approx.2000 Japanese Characters)

本論文は、“A study on the functional advancement of charge sensors 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センサの機能向上についての研究) と題し、英文 6 章から構成されている。

第 1 章 “Introduction” (序論) では、汎用的な量子コンピュータの実現には、量子ビットの集積規模に応じて、各段階での拡張に必要な技術的知見を引き出しながら進めていく必要があると述べている。数ある物理量子ビットと比較し、シリコンスピン量子ビットは既存の集積回路作製プロセスとの整合性が高い点で有望視されていると述べている。このような背景のもとで、量子ビットデバイス作製プロセスや量子ビット状態の読み出し技術における集積化に向けた課題点を指摘し、本論文で行った一連の研究の目的と本論文の構成について説明している。

第 2 章 “Theoretical background” (理論的背景) では、シリコンスピン量子ビットを実現するデバイスとしての量子ドットの基礎特性と、電荷スピン状態の読み出し方法を概説している。量子ドットの離散化したエネルギー準位と、それを介した電荷輸送特性を半古典的な視点から説明している。次に、電荷スピン状態の高速読み出し手法として、ラジオ波帯で動作する単電子トランジスタ (Radio frequency-single electron transistor: RF-SET) を用いた読み出し技術を取り上げ、RF-SET に必要となる共振回路の概要に加えて、そこに含まれる寄生成分とその除去方法を説明している。また、デバイス動作の理解を目的として、Technology computer aided design (TCAD) シミュレーションの役割についても概説している。

第 3 章 “Device fabrication employing negative-tone e-beam resist” (電子線ネガレジストを使用したデバイス作製) では、量子ビットデバイス作製プロセスの概要と作製したデバイスを用いた実験結果について説明している。本論文で実施した独自の改良として、物理形成量子ドットの形成に電子線ネガレジストを用いたことと、トップゲートの縮小化による RF 応答性の向上を挙げている。作製した物理形成量子ドットの直流特性を極低温で調べた結果、意図せず形成される付加量子ドットの影響と安定性に課題が残ったものの、単一電荷輸送を反映するクーロンダイヤモンドを観測することができたと述べている。また、RF 反射測定では、トップゲートの縮小化を反映して RF-SET 電荷センサの応答性が改善されたと説明している。さらに、GHz 帯域でのスピン状態操作についても物理形成量子ドットで初めて可能となったと述べている。本論文で示した作製技術は、量子ドットアレイのスケールアップや CMOS 技術との統合に向けた重要な基盤技術であると述べている。

第 4 章 “Demonstration of inductor-shunted matching circuits toward frequency multiplexed qubit readout in silicon” (シリコンでの周波数多重の量子ビット読み出しに向けた並列インダクタ整合回路の実証) では、LC 回路にインダクタを並列に追加した L-L 回路の設計・実装と、その読み出し性能評価について説明している。整合回路の構成素子における寄生成分を含めた等価回路モデルを構築し、極低温下での S パラメータ測定を行うことで寄生成分を抽出したと述べている。抽出した寄生成分を基に L-L 回路の設計・実装を行った結果、1 GHz までの周波数領域において共振周波数可変性を確認したと述べている。さらに、RF-SET 電荷センサの評価により 1 MHz 以上の読み出し帯域が得られ、量子誤り訂正の要件を満たすことが示されたと述べている。この手法は、周波数多重化により量子ビットの同時並列読み出しを可能にする簡便かつ有効なアプローチであると結論付けている。

第 5 章 “The functions of a reservoir offset voltage applied to physically defined p-channel Si quantum dots” (物理形成 p チャネルシリコン量子ドットに印加されるリザーバーオフセット電圧の機能) では、ソース・ドレイン両方のリザーバーに共通のオフセット電圧であるリザーバーオフセット電圧を印加させた際の量子ドットのポテンシャル変化について、TCAD によるシミュレーションと極低温下の実測結果の比較を行って説明している。TCAD シミュレーションを行った結果、リザーバーオフセット電圧によって閾値変化が起きており、これはチャネルのフェルミ準位と価電子帯端のエネルギー差の変化によってチャネルに誘起されるキャリア密度が変化することに起因すると示している。量子ドットと電荷センサを集積した構造では、リザーバーオフセット電圧による電荷センサのキャリア密度の変化が近傍の量子ドットに対する制御ゲートとして機能していると述べている。この成果は、ゲート数が少ない場合でも、量子ドットのポテンシャルを変調可能にする方法を新たに提案するものであると述べている。

第6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、集積化や高忠実度化に有利な物理形成量子ドットの形成技術、同時並列読み出しが可能なL-L整合回路による周波数多重化技術、電荷センサによる量子ドットのポテンシャル調節技術を開発し、将来的に汎用的な量子コンピュータ実現に向けて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。

備考：論文要旨は、和文 2000 字と英文 300 語を 1 部ずつ提出するか、もしくは英文 800 語を 1 部提出してください。

Note : Thesis Summary should be submitted in either a copy of 2000 Japanese Characters and 300 Words (English) or 1copy of 800 Words (English).

注意：論文要旨は、東京科学大学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。

Attention: Thesis Summary will be published on Science Tokyo Research Repository Website (T2R2).

(博士課程)
Doctoral Program

論文要約

THESIS OUTLINE

系・コース： Department of, Graduate major in	電気電子 電気電子	系 コース	申請学位（専攻分野）： Academic Degree Requested	博士 Doctor of	(工学)
学生氏名： Student's Name	西山 伸平		審査員主査： Chief Examiner	小寺 哲夫	

要旨（英文 300 語程度）

Thesis Summary (approx.300 English Words)

This paper, titled "A study on the functional advancement of charge sensors in physically defined silicon quantum dots," consists of six chapters. Chapter 1, "Introduction", discusses the necessity of extracting the required technical insights for expansion at each stage in order to realize a universal quantum computer, depending on the scale of qubit integration. It highlights that, among various physical qubit implementations, silicon spin qubits are considered promising due to their high compatibility with existing integrated circuit fabrication processes. It follows as Chapter 2, "Theoretical background," which includes the basics of quantum dots (QDs), a discussion of charge sensing, a rapid readout technique called RF reflectometry, and device simulations. In Chapter 3, "Device fabrication employing negative-tone e-beam resist," in addition to fabrication process of silicon physically defined QDs, which is our focus among the many silicon qubit systems, we discuss the differences from industrial qubit fabrication methods and the characterization as a quantum device. In Chapter 4, "Demonstration of inductor-shunted matching circuits toward frequency multiplexed qubit readout in silicon," we implement a new and two-inductor resonance circuit designed for frequency multiplexing and discuss the readout performance evaluation of its readout using RF reflectometry. In Chapter 5, "The functions of a reservoir offset voltage applied to physically defined p-channel Si quantum dots," we explore an underlying operation method, the reservoir offset voltage, which reduces the number of wires required per qubit by incorporating gate functionality into the charge sensor. Finally, we conclude this thesis and research perspectives towards qubit integration and fast qubit readout in Chapter 6, "Conclusions". Device fabrication has translated from university cleanroom methods to industry-compatible approaches. Additionally, by enhancing charge sensor functionality for qubit readout, we demonstrate a method for independent access to all qubit arrays while minimizing wiring connections across temperature stages. These achievements mark key steps toward scalable quantum computing.

備考：論文要旨は、和文 2000 字と英文 300 語を 1 部ずつ提出するか、もしくは英文 800 語を 1 部提出してください。

Note: Thesis Summary should be submitted in either a copy of 2000 Japanese Characters and 300 Words (English) or 1copy of 800 Words (English).

注意：論文要旨は、東京科学大学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。

Attention: Thesis Summary will be published on Science Tokyo Research Repository Website (T2R2).