



令和6年3月27日 公開シンポジウム

ムーンショット目標6

研究開発テーマ:(1)誤り耐性獲得に有望な量子 ハードウェア(固体系)の研究開発

<u>拡張性のあるシリコン量子コンピュータ技術の開発</u>

PM 樽茶 清悟

理化学研究所創発科学物性研究センター、量子コンピュータ研究センター

課題推進者 中島 峻(理研) 藤田 高史(阪大産研) 宮本 聡(名大) 山本倫久(理研/東大) 高田真太郎(阪大)

MS目標達成に至るまでのシナリオ

目標:2050年までに100万以上の量子ビットからなる誤り耐性量子コンピュータを開発。 2040年までに10万~100万の量子ビットに誤り訂正を導入。 2030年までに産業界と提携可能な量子ビット配列作製技術を開発。

マイルストーン

- (1) 拡張性のある単位構造の開発
- (2)多層配線、三次元配線技術の導入、信号配線実装技術の開発(R6年度から)
- (3)論理ビット形成に適した誤り訂正方式の導入
- (4) 中距離量子結合による量子ネットワーク技術の有用性の実証
- (5)大面積の同位体制御28Si/SiGe結晶の開発

(FS)新原理の量子技術として、半導体量子回路を伝搬する電子波束の状態で定義される量子ビットを制御する技術を開発。同技術が開発されると制御システム構築への要求を大きく低減できる。

研究開発プロジェクトの研究項目



Si量子ビットの開発状況

Si、超伝導ともにムーア則に従って量子ビット数が増大 ただしSiは超伝導量子ビットに8年遅れ(8~10年遅れて開発開始) **20**年後には**100**万ビットになる計算 > 10⁶



開発の方向性

2次元配列

量子ビットネットワーク

電子波束の伝搬型量 子回路(新原理)







Design for 40x40 qubit array

Quantum links connecting smallscale quantum registers Quantum gates for propagating wave packets

(理研/中島)

目的:5量子ビット以上の直列配列構造の試作、量子ビット制御の実証・検証

Si/SiGe 直列5量子ビット試料





Microwave burst time (us)



成果:

- 1. 5量子ビットの独立制御・各隣接2ビット 間の制御位相操作を実証
- 2. さらなる忠実度向上のため検証、構造 最適化を推進



成果

K. Takeda et al., npj Quantum Info. 10, 22 (2024)

- コヒーレンス時間よりも高速(1µs < T₂^{*}~10µs)、高忠実度(> 99%)な 量子ビット読み出しを実現
- 2. 誤り訂正に適するオンライン信号処理を実装

目的:誤り訂正要素技術の実装・検証

成果1:量子ビットアクティブリセットの実装

成果2:2ビットゲートのエラー解析・補償



T. Kobayashi et al., npj Quantum Info. 9 52 (2023)

W. Yi-Hsien et al., npj Quantum Info. 10 8 (2024)

成果3: 複数量子ビット間のノイズ相関を検出・解析し、誤り訂正への知見を取得 (水野PMプロジェクトと連携)

J. Yoneda et al., Nature Physics 10.1038/s41567-023-02238-6 (2023)

J. S. Rojas-Arias et al., Phys. Rev. Applied **20** 054024 (2023)

項目1 2024年度計画

目的:

- 1.5量子ビット制御の高忠実度化に向けた試料構造・歩留の改善
- 2. 10ビット以上の量子制御実験技術開発および実験着手



希釈冷凍機、高密度同軸配線、多チャンネル制御エレクトロニクス、 試料マウント基板の納品完了、実験着手へ

項目1 2024年度計画:新規課題の追加

課題2の目的:

10ビット以上の量子ビット単位構造に向けた信号配線実装技術を開発

- ・多ビット制御に対応する信号生成回路
- ・高品質信号伝送を実現する配線実装

2024年度の計画:

- 1. 多チャネル制御信号生成回路 の試作と評価
- 2. DC-10GHz帯域の信号配線実 装に向けたプロセス評価に着手



(阪大産研/藤田)

目的: 単ースピンコヒーレンスを保持する 伝送専用チャネルの開発



(理研:野入)

研究開発中の項目
1. 独立ゲート電極数を削減可能な
シャトリング方式(コンベイヤーモード)
の開発
2. 伝送時の電圧操作を量子ビット付近

に限った新規伝送方式(スピン鎖法) の原理検証 3. 伝送用量子ドットアレイの試作・評価



開発中の直上周期ゲート構造試料







99%精度に対する最小転写時間の 線形拡張性を確認 応用物理学会等 成果2: (山本俊PMプロジェクト大岩課題と連携) スピン量子ビットの、雑音耐性のある断熱操作 にショートカット法適用



期待する効果 断熱操作を利用可能なスピン反転、電荷 伝送、スピン転写などの安定高速化

> X-F. Liu *et al.*, Phys. Rev. Lett. 132, 027002 (2024).

項目2 2024年度計画

目的: 5~10量子ドット相当に延長した量子状態伝送測定



量子ドットアレイ延長のための拡張、 量子ビット制御機能の追加 量子ドットアレイ測定



スピン伝送・結合手法の確立

(名古屋大学/宮本)



水素などの軽元素の相反的特性を利用 (欠陥終端と結合切断)





目的:同位体結晶の大面積プロセス·評価の基盤技術の構築

大面積対応可能な同位体基板評価技術

クロスゲート構造



スプリット構造





最適な材料デバイス構造の設計と 1次元配列構造への適用

外部連携(SNUとの共同研究): ²⁸Si/SiGeへの量子ビット実装による 同位体基板の性能評価



項目3 2024年度計画



準備

1. 量産対応の同位体成膜装置の導入 ⇒中移動度化が目標(>1x10⁵ cm²/Vs)



準備

 1. 界面ステップ間隔の指標となる 界面傾斜角の精密評価技術の構築
 2. 基板評価用の1次元配列構造の 実装プロセスの歩留まり向上

16

項目4:新原理電子波束量子ビットの開発



特許出願(2023年7月)

- ・量子ビットをtime-binの形で伝送
 位相緩和抑制のため
- ・量子演算は2経路干渉計を用いて実行

Yamamoto, Takada, Bauerle PCT/JP2023/025244

time-bin量子ビット生成



- 目的:単一伝導モードの干渉計を用いた 電子波束の量子干渉実験
 - 理研に実験系を構築
 - ・試料開発:2量子ビット演算まで可能
 - ・高周波線(40GHz)の実装と評価









東大にも冷凍機を導入(2024年2月)



- 目的: GaAs/AlGaAsヘテロ構造で光パルスを 電気パルスに変換
- 3 0 1 0 1 -1 -5 0 5 10 Time (ns)

新しいレーザーシステムを導入

15

- 目的:電子波束の新しい速度制御法の開発
- 成果:電子波束の長さに対して適切な距離で 2つのQPCを配置し、その閉じ込めを 制御することで電子波束の速度が制 御可能であることを実証。



- 2023/6までに実験データの収集が完了 - データ解析が完了し、現在論文執筆中 目的: 単一電子波束の読み出し技術の開発

・ 2023/10 大阪大学へ異動



- 実験装置の搬入・整備などを実施



- 40 GHzまでの高周波の低温への印 加に向けてシミュレーションなどを行い ながらPCBを設計



• 電子波束が通過する際、クーロン相互作用によってスピン状態の振動周波数が変化

「通過無 → スピン一重項 S)	
【通過有 → スピン三重項 T)	

電子波束の通過(<1ns)をスピン状態に転写

スピンのコヒーレンス時間(~100 μs)内に観測





x (nm) de -600 -400 -200 0 200 400 600 800 0

ポアソンソルバーによるシミュレーションを用いて試料を設計 🗸

項目4 2024年度計画

研究項目

- ・幅ピコ秒オーダーの電子波束生成
- ・高い忠実度の量子操作
- time-bin⇔which-path量子ビット変換
- ・単一波束読み出し技術の開発





高い忠実度の量子操作:
 1量子ビット演算+2量子ビット演算



- time-bin量子ビットの長コヒーレンスの実証
- シフトカレントの評価
 - 単一波束読み出し
 電子数10個以下の電子波束の単発測定



まとめ

