

超伝導回路を使った量子情報処理



概要

将来の情報システムを変革する量子情報処理の実現に向け、窒化物超伝導回路を用いた新型量子ビット、最適量子回路探索法、量子ビットと複数電磁場モードとの深強結合系等の研究開発を行っています。

π接合を持つ窒化物超伝導量子ビットの開発

π接合 + 磁束量子ビット = π-量子ビット

半磁束量子パイアスと同じ効果
S: 超伝導体
F: 強磁性体
I: 絶縁体

Josephson接合 π接合
ゼロ磁場動作による配線の大幅な簡略化

- 作製した量子ビット構造

(a) 磁束量子ビット (b) π-量子ビット

PDNのπ接合 (名古屋大学との共同研究)

- 量子ビットのエネルギー分光測定

(a) 磁束量子ビット (b) π-量子ビット

Φ0/2の磁場で最適動作点
ゼロ磁場でQubit動作確認

(NTTとの共同研究で測定)

→ π接合によりゼロ磁場で動作する窒化物磁束量子ビット作製に成功

量子ゲートシーケンスの探索

量子計算: 1ビットゲート・2ビットゲートから成る量子ゲートシーケンスにより実装される。

多ビット量子操作 (例: 量子フーリエ変換など) コンパイラ

1量子ビットゲート 2量子ビットゲート

- 背景: 考えられる量子ゲートシーケンス数は、量子ビット数に対して指数関数的に増加する。すべてのシーケンスを考慮する場合、わずかに6量子ビットにおいて宇宙年齢以上の時間がかかってしまう。

→ 最適量子ゲートシーケンスを効率的に見つける方法を開発 → 計算時間を大幅に短縮

- 複数量子ビットのゲート合成と任意の量子状態生成について、最適ゲートシーケンスを探索し開発した手法の有効性を確認。

4量子ビットToffoliゲートの合成
任意の8量子ビット状態の生成 (富岳スーパーコンピュータ使用)

量子ビットと複数電磁場モードとの深強結合研究

- 量子ビット (人工原子) と共振器中の複数モード (光子) との非常に強く結合した系を作製し、周波数スペクトルを測定

量子ビット周波数 (結合なし) : Δ₁/2π = 730 MHz
全共振器モードにより縮小した量子ビット周波数 : ω_{q1}/2π = 26 MHz

→ 量子ビット周波数の大きなシフト (Lambシフト) を発見: 96.5 %
(Lambシフト: 原子と電磁場の零点振動との結合により生じる周波数シフト)

- 理論的計算により、量子ビットと共振器高次モード間の結合強度には、下記のような特徴があることを明らかにした。

$$\omega_n \ll \omega_{cf}: g_n \propto \sqrt{n}g_0, g_n \propto L_c$$

$$\omega_n \gg \omega_{cf}: g_n \propto \frac{1}{\sqrt{n}}g_0, g_n \text{ は } L_c \text{ と独立}$$

→ 実験での検証、高次のモード応用の検討へ

特徴

- 窒化物等を用いた新しい量子ビット
- 量子アルゴリズムの実装を最適化する新しい方法
- 量子ビットと複数電磁場モードとの深強結合

ユースケース

- 集積化に適した量子ビット
- 量子操作を実現する最小ステップ数量子ゲートシーケンスの効率的な探索 (量子コンピュータのコンパイラ)
- 量子ビットと電磁場との非常に強い結合 (Lambシフト: 96.5 %) を応用した、マイクロ波光子の非破壊個数検出や高次量子過程の効率的な制御

今後の展開

- 大規模超伝導量子コンピュータ
- 最適量子計算への機械学習の応用
- 光子周波数や電磁場モード間の高効率変換