

プログラム名：量子人工脳を量子ネットワークでつなぐ高度知識社会基盤の実現

PM名：山本 喜久

プロジェクト名：量子シミュレーション

委 託 研 究 開 発

実 施 状 況 報 告 書 (成 果)

平成 27 年度

研究開発課題名：

量子ドット量子シミュレータ

研究開発機関名：

国立研究開発法人理化学研究所

研究開発責任者：

樽茶 清悟

I 当該年度における計画と成果

1. 当該年度の担当研究開発課題の目標と計画

半導体を用いた量子シミュレーションの手法により、基底、励起状態のダイナミクスを実験的に解明することにより、強相関物質科学に有効な研究手法を提供する。その方法として、電氣的に制御された半導体量子ドットを1, 2次元的に配置することにより、ハイゼンベルグフェルミ、ハバードフェルミ型の強相関量子シミュレータを開発する。また、光学的に制御された2次元量子ドット列におけるポラリトン凝縮を利用して、ハバードボーズ型の励起子ポラリトン量子シミュレータを開発する。さらに、非可換エキシオンを用いた量子シミュレータの開発に向けて、トポロジカル超伝導系 (HgTe、ナノ細線との超伝導接合) におけるマヨラナ粒子の検出法、制御法を開発する。

強相関量子シミュレータ

1次元3重量子ドットの励起電子スピン状態の検出、2次元三角量子ドット格子の基底電子状態の制御性の評価を基に、量子シミュレータの構成単位としての適性を判定する。また外部電極との結合による単一ドットへの影響を評価する。量子ドットを埋め込んだ超伝導共振器の性能を評価し、量子シミュレータとしての有用性を判断する。

励起子ポラリトン量子シミュレータ

単一ポラリトントラップを1次元、2次元格子上に並べて量子シミュレータを作製する。また、コヒーレンス関数 $g(1)$ 、 $g(2)$ の測定系を立ち上げる。

非可換エキシオン量子シミュレータ

HgTe トポロジカル絶縁体、ナノ細線それぞれについて、マヨラナ粒子生成のための実験条件を明らかにする。前者では、ジョセフソン接合における位相関係、後者ではヘリカル状態の形成の有無と条件を明らかにするとともに、制御性を評価する。

2. 当該年度の担当研究開発課題の進捗状況と成果

2-1 進捗状況

強相関量子シミュレータ

1次元3重量子ドット列においては、3スピン励起状態を生成しそのコヒーレントな時間発展を電氣的に検出する技術を確立した。また、この手法を用いて3スピン励起スペクトルを実験的に評価した。一方、三角格子量子ドットにおいては、量子シミュレータの基本単位となる試料を試作し、そこに形成された電子状態を評価するために、異なる端子間での輸送電流を測定した。外部電極との結合では、電極に結合した時間に依存して量子ドット中の電子スピンの状態が変化する様子を測定する手法を開発し、電子スピン緩和に対する環境結合の影響を評価した。超伝導共振器に埋め込んだ量子ドット系においては、その性能評価のためのデバイスを試作し、極低温での共振器特性および量子ドットデバイスの安定性を評価した。

励起子ポラリトン量子シミュレータ

励起子ポラリトン凝縮による量子シミュレータの実現には、格子配置可能な強い閉じ込めポテンシャルを作ることを必要とする。しかし、従来の技術はポラリトンの光子成分の閉じ込めには有用であるが、幾何学格子、すなわちエニオンを含む量子シミュレーションに適した、大きい励起子成分をもつポラリトン凝縮の閉じ込めには不十分である。当該年度は、プロトン注入誘起の相互拡散を利用する新しい技術を開発し、任意の励起子成分をもつポラリトン凝縮を強く閉じ込められる構造を作ることを試みた。

非可換エニオン量子シミュレータ

HgTe ジョセフソン接合では、エネルギー位相関係の 4π 周期性を反映するシャピロステップ構造を観測した。これはマヨラナ粒子の存在を示唆する結果である。ナノ細線については、試料の作製技術を確認し、常伝導体金属を用いてナノ細線の電気伝導特性を評価した。パリスティック伝導を反映する特性が得られ、品質の高い細線ができていることを確認した。

2-2 成果

強相関量子シミュレータ

1 次元 3 重量子ドットにおいては、目標としていた 3 スピン励起状態の生成と測定に成功した。ハバードフェルミ模型に基づく計算との非常に良い一致を確認し、この系が量子シミュレータの構成要素としての応用に有用であることを示した。三角格子量子ドットにおいては、通常の一次元的な結合とは異なる、三角格子状に強くトンネル結合した量子ドットの形成に成功した。外部電極との結合では、結合強度を系統的に変化させながら電子スピンの測定を行い、電極結合によるスピン状態の変化を直接的に観測することに成功した。超伝導共振器に埋め込んだ量子ドット系では、極低温において超伝導共振器の Q 値約 30 万を達成し、量子ドットとの結合を実現する上で十分な性能が得られることを確認した。

励起子ポラリトン量子シミュレータ

今回、プロトン注入誘起の相互拡散が、励起子成分あるいは光子成分の変調を同時に行ってポラリトン凝縮エネルギーを大きく変えられる、新技術となることを示した。これは、重い質量のポラリトンを任意のポテンシャルと格子に強く閉じ込められる初めての手法であり、これを用いて、試料を劣化させることなく光子的励起子的ポラリトンのエネルギーを強くシフトさせることができた。この技術を使って重いポラリトンに対する格子とポテンシャルの束縛を作ることを予定している。

非可換エニオン量子シミュレータ

HgTe ジョセフソン接合で初めて位相 4π 周期性を確認し、これがマヨラナ粒子の存在を示唆することを指摘した。架橋型 InAs ナノ細線において、量子化伝導度およびヘリカル状態を特徴づけるヘリカルギャップの兆候を観測することに成功した。

2-3 新たな課題など

強相関量子シミュレータ

1次元3重量子ドット列を量子シミュレータとして応用する上では、外部電極や核スピン浴等の外界との相互作用の効果を取り入れることが重要であるが、特に核スピン浴の影響を電氣的に抑制することは困難であることがわかった。そこで核スピン浴の影響を高速で検出し適応制御することによりこの問題を解決するべく、フィードバック系の構築に取り組んでいる。外部電極との結合では、測定における電子温度の影響が無視できなくなってきたため、現在電子温度を低減する対策を実施している。超伝導共振器に埋め込んだ量子ドット系では、量子ドットデバイスの安定性が不十分であることがわかり、改善に取り組んでいる。これは超伝導共振器と結合させたことによるデバイス作成プロセスの複雑化に起因していると考えられ、現在作成プロセスの改善および特性の再評価を進めている。

励起子ポラリトン量子シミュレータ

プロトン注入によるエネルギー変化と離長変化の形成の実証を格子などの構造の空間パターンの形成に適用するには、マスク形成プロセスの最適化が必要である。このとき試料の不要部分からのプロトンを十分防ぐ必要があり、そのために高い縦横のSiO₂柱を作る。体積とプラズマエッチングプロセスの最適化を通して同試料を作成し、現在テストしている。

非可換エニオン量子シミュレータ

現在の試料構造ではナノ細線表面の不純物によって試料が不安定となり、ヘリカルギャップの再現性を得るのが難しい。その対応策として、h-BN薄膜をゲート絶縁層として用いることにより、さらに安定で高品質なナノ細線試料の作製手法を確立する。

3. アウトリーチ活動報告

無し。