

平成 27年 3月 31日

プログラム名：量子人工脳を量子ネットワークでつなく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 26 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：

理化学研究所

研究開発責任者

樽茶 清悟

## 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

従来の平衡量子多体系の枠組みを超える、非平衡量子系ダイナミクスの開発を目的として、電極や共振器を環境、環境と相互作用を介して結合する量子ドットからなる量子多体系からなる、非平衡量子系の設計、試作を開始した。具体的には、環境結合量子ドット列の開発方針の設定、ダイナミクス検出に必要な実験手法の基本設計、1次元、2次元量子ドット列の試作と特性評価を行った。

- (1) 外部電極を環境とする量子ドット結合系の量子シミュレータ
- (2) 孤立1次元量子ドット列の開発
- (3) 孤立2次元量子ドット列の開発
- (4) 共振器を環境とする量子ドット結合系の量子シミュレータ

また、ハバードボーズ型の非平衡開放系量子シミュレータの開発に適した励起子ポラリトンの閉じ込め効果を調べた。

- (5) 励起子ポラリトン量子シミュレータ

### 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

##### (1) 外部電極を環境とする量子ドット結合系の量子シミュレータ

量子ドット中の局在スピンによる近藤効果はアンダーソン不純物モデルで記述される。この局在スピンの外部電極の多数スピンとの相互作用による時間応答を実験的に解明することによって非平衡量子系のダイナミクスのモデル化が可能と考えられる。今年度は、量子ドットと電極の結合を時間的に変調することによって得られるスピン状態の時間発展に的を絞って、時間応答の測定方法と測定条件、試料構造について検討した。

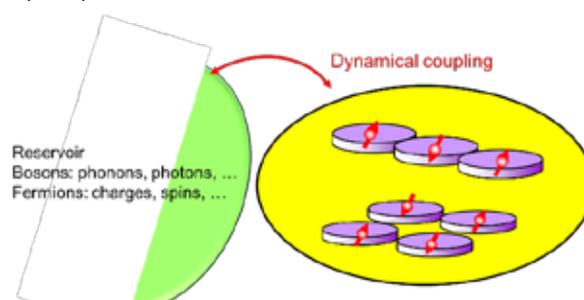


図 環境と結合した量子ドット列

##### (2) 孤立1次元量子ドット列の開発

(1)の電極結合した量子系をより複雑な多体系に拡張するため、3重量子ドットを初めとして、4重、5重の量子ドット1次列を作り、そのスピン相関を静的・動的に調べることによって、多重量子ドット・ハバードモデルにおけるスピン相関の解明を目指す。今年度は、3重、4重、5重の量子ドット列を作製し、電子状態、スピン操作、スピン相関などの特徴と電気制御性を調べた。これらは、目的とする1次元量子ダイナミクスの研究（物理と実験技術）の基盤となる。

##### (3) 孤立2次元量子ドット列の開発

高温超伝導体の基本構造とされる、銅酸化物の理論的解明には、最終的には(2)の1次元列ではなく、銅酸化物  $\text{CuO}_2$  を構成する2次元四角構造を取り扱う必要がある。そのためのアプローチとして、本計画では、まず1次元量子ドット列を3、4量子ドットで作られる三、四角構造へ拡張し、2次元系スピン相関の解明と電氣的制御技術の確立を目指す。しかし、2次元量子ドット列の作製技術は世界的に未だ開発段階に

あることから、今年度は、まず三角形量子ドットを試作し、電気的特性を評価した。これらは、目的とする2次元量子ダイナミクスの研究の基盤となる。

#### (4) 共振器を環境とする量子ドット結合系の量子シミュレータ

高温超伝導体をはじめとした電子相関に基づく多様な固体物性を理解するためには、そのミクロな構成要素であるフェルミオン励起とボソンバスとの相互作用を正しく記述することが不可欠である。このような系をシミュレートするために、今年度は量子ドットを用いた共振器量子電気力学(hybrid cQED)シミュレータの構築を開始した。この hybrid cQED 系の特徴はフェルミオン励起とボソンモードの双方を厳密に定義することができ、それらの相互作用を自在に制御し測定できる点にある。これにより、理論計算とシミュレーション結果を直接比較・検討することができる。

我々は、フェルミオン二準位系として Si/SiGe の量子ドット構造、ボソンバスとして共鳴周波数 6GHz の超伝導マイクロ波フォトン共振器を採用した。これにより、従来の GaAs 量子ドットの系では達成が困難であった高い Q 値と長いコヒーレンス時間を得ることができ、強結合領域のシミュレーションが実現できると考えられる。これまでに我々は Si/SiGe 量子ドットと超伝導共振器を結合した試料の微細加工技術確立に注力し、試作した試料の特性評価を行った。

#### (5) 励起子ポラリトン量子シミュレータ

半導体マイクロキャピティ中の励起子ポラリトンは相互作用するボーズ粒子系であり、その粒子を構成する励起子と光子の成分を調節することにより、有効質量を大きく変えられるという特長をもっている。この有効質量は、BEC の形成を保ったままでも、二桁以上変化させることが実験的に可能である。このような特長は、ポラリトンを用いて、たとえば超流動-モット絶縁体転移や Bose 粒子の量子ホール効果といった凝縮物理における様々な相を実現する際、必要パラメータを設定する上で極めて有用である。しかしながら、量子シミュレータのような応用を開発する上では、ポラリトンを横方向に強く閉じ込めて操作する技術を開拓することが極めて重要になってくる。これまで、ポラリトンを横方向に閉じ込める方法は全て、とても弱いか、または光子成分を変調することだけに頼っていたため、励起子成分が担っている有効質量を実験的なパラメータとして用いることができなかった。また、ポラリトン系は、本質的に開放-散逸を伴う系という意味で他のボーズ粒子系とは異なり、このことは量子シミュレータを開発する上でも利用可能な性質であると言える。このような強い非平衡的性質は、複素固有値や非エルミートのダイナミクスの存在を示唆しており、閉じ込めポテンシャルや利得・損失の空間的なプロファイルを空間的に変調することにより、これらを効率的に制御できることが分かりつつある。このような空間構造をもつ試料を用いて凝縮相のバンド構造やその間の光学遷移を制御することは前例がなく、将来的に有望な技術になると期待される。

## 2-2 成果

### (1) 外部電極を環境とする量子ドット結合系の量子シミュレータ

量子ドットの非平衡ダイナミクスの実験に関して、量子ドットと電極の結合の時間変調によって得られるスピン状態の時間発展の測定手法、測定条件、試料構造を検討した。本測定に必要な時間スケールは、おおよそ系の近藤温度によって特徴付けられる。実験的に典型的な近藤温度 500mK に対して、この時間スケールは 100ps 程度となり、この時間スケールにおいて十分な精度の測定を行うためには、10GHz から 100GHz 程度の高周波測定系の構築が必要となると結論した。

## (2) 孤立1次元量子ドット列の開発

今年度は、孤立した一次元結合量子ドット系の電子状態、スピン操作、スピン相関の制御の研究を行った。1次元配列の例として、3重、4重、5重の量子ドット列を作製した。今年度は、微小磁石を有する3重量子ドットには微小磁石を取り付け、これを利用して各ドット中の1個の電子について、スピン共鳴、さらには、Rabi 振動を達成した。また、2電子間の SWAP 操作を行うことで、3電子のエネルギー状態を検出することができた。これらの成果は世界初である。4重量子ドットでは、各々の電子のスピン共鳴を確認し、また、5重量子ドットでは、2つの電荷計を用いた電荷状態の検出に向けて、測定系の構築を行った。これらの成果は世界初である。

## (3) 孤立2次元量子ドット列の開発

銅酸化物系超伝導の超伝導を担う基本単位として三角形の3重量子ドットを試作し、電気的性質を評価した。従来、同様な3重量子ドットでは、隣接ドット間のトンネル結合を有限に保つことができなかった。これは作製上の問題で隣接ドット間の距離を小さく(0.2ミクロン以下)できないことに因る。今回、この問題を解消するため、新しい設計方針に沿って3重量子ドットを作製し、隣接ドット間距離0.2ミクロンを実現した。また、全てのドット間にトンネル電流が流れることを確認し、これにより、同三角形3重ドット構造において隣接ドット間のトンネル結合を保てることを示した。今後、同3重ドットの電子状態、トンネル結合強度、電子数、クーロン相互作用などの制御性を求め、量子シミュレータの構成要素としての性能を評価する。

## (4) 共振器を環境とする量子ドット結合系の量子シミュレータ

作製した超伝導共振器の特性を評価して、Q値2000程度を得た。この値は既に従来のGaAs素子の値と同等であるが、微細加工の改良により向上の余地がある。特に現在試料をマウントしている基板の高周波特性を改善することによってQ値の向上が見込まれたため、要件を満たした基板を新規に設計し、適切な高周波測定準備を行った。また、Si/SiGe量子ドットを超伝導共振器と結合したhybrid cQED試料を作製し、クーロン閉塞を観測することで量子ドットの動作を確認した。一方で、試料のゲート絶縁膜特性にヒステリシス等の問題点が見出されたため、これらの影響を抑制するため試料構造を再検討した。

以上の結果を踏まえて改良した試料を現在作製中であり、量子ドット中の電荷状態のフォトンモードを介した相互作用を捉えるべく、準備を進めている。

## (5) 励起子ポラリトン量子シミュレータ

我々は、高エネルギーのプロトンを試料に注入することで深い任意のポテンシャル形状を作り出し、励起子と光子の両成分を同時に、かつ、効率的に閉じ込める方法を開発した(論文準備中)。これにより、ポラリトンを横方向に強く閉じ込め、かつ、パラメータ空間を十分に利用することができる。さらにこの技術は結晶成長後のプロセスであるため、成長とトラッピング形状を分離できることを意味しており、試料作製を大幅に容易にすることができる。

ポラリトン凝縮において利得・損失の空間的制御を確立するという目標は、ポラリトンの離調を独立に制御することで実現され、ポラリトンのエネルギー(有効ポテンシャルの実部)だけでなく、ポラリトンの寿命(有効ポテンシャルの虚部)も決定する。この意味において、次のステップは、ディラック・コーンやフラットバンド、トポロジカルに非自明な性質といった特徴をもつ任意の格子バンドを凝縮相が占有できるように、所望の形状をもつ複素ポテンシャルを作製することである。これらのバンドに凝縮相を閉

じ込めることでモデルハミルトニアン<sup>1</sup>の創出が可能になり、凝縮物理系の量子シミュレータの開発が促進される。

### 2-3 新たな課題など

なし。

### 3 . アウトリーチ活動報告

なし。