

「電子・光子等の機能制御」
平成10年度採択研究代表者

青柳 克信

(理化学研究所 主任研究員)

「量子相関機能のダイナミクス制御」

1. 研究実施の概要

電子の量子状態は、時間、空間及びスピンからなり、本研究では特に、時間部分の制御に注目し、それに伴う新しい機能（量子相関機能）の発現を理論的、実験的に研究している。具体的には、シュレディンガー方程式に基づくコヒーレントな量子状態の時間的な発展に注目し、それを量子ドットなどの量子ナノ構造の量子準位やスピンの実現することを目指す。このようなコヒーレントな量子状態の制御技術は、量子情報処理技術への応用へつながる。本研究では、以下の3つの観点から研究を行っている。

- 量子相関機能の量子情報処理技術への応用の理論的研究

量子状態の時間的及び空間的相関を利用した新しい量子情報処理システムの設計を行う。

- 量子相関機能のためのナノ構造作製技術の開発

電子ビーム、走査プローブ法、結晶成長法による10nm以下のスケールの量子ナノ構造を作製する技術を開発する。

- 量子相関機能の実験的検証および新材料の探索

量子ナノ構造と電磁波との相互作用、スピンドイナミクスなどを利用して極低温での量子相関機能を探索するとともに、量子情報処理のための基本デバイスへの応用を検討する。

2. 研究実施内容

2-1. 量子相関機能の量子情報処理技術への応用の理論的研究

(1) 量子チューリング機械のための量子回路の開拓

電子波回路で量子論理回路を構成する、という概念を提案した。基本ゲートの一つであるユニタリ変換を電子波回路で構成する方法（位相シフタと方向性結合器を組み合わせる方法）を考案した。もう一つの基本ゲートである制御NOTについては、そのキーポイントとなる相関ゲートを量子効果（アハラノフボーム効果や静電ポテンシャル効果）で構成することの可能性を提案した。その実現性について理論検討

を行っている。

(2) 量子計算システムのための入出力インターフェイス

量子計算システムに信号を入出力するための機構を検討した。これまでに、量子ドット系の計算システムを例として、フィールドエミッタと電子線干渉計による信号読み出し機構の概念を提案した。すなわち、量子ドット計算システムをSiフィールドエミッタ (FE) の先端部に置き、パイプリズムを利用した電子線干渉計による干渉縞の観察結果から計算結果を知る (つまり各ドットごとに電子のエネルギー状態を検出する)。具体的な実験システムの構築に向けた検討を進めている。

(3) 非チューリング系の量子計算システムの提案

量子チューリング機械とは異なる量子計算システムがあり得ることを提案した。一例として量子ホップフィールドネットワークという概念を提案した。量子ホップフィールドネットワークでは (通常のホップフィールドネットワークでは重大な問題である) ローカルミニマム障害がない。そのため難しい組み合わせ問題を解くためのデバイスとなり得る。単電子回路の協同トンネル効果を利用して構成する方法を提案した。量子セルオートマトンや量子ニューラルネットワークについても、それらの概念を創出すべく検討中である。

2-2. 量子相関機能のためのナノ構造作製技術の開発

(1) 結晶成長法によるナノ構造作製技術

量子コンピュータの基本エレメントとして、自己組織化を用いた量子ディスク適用可能性の検討を開始した。量子力学的な entanglement を固体中で実現するには、まず何らかの構造、方法で2準位 qubit と波動関数の結合状態を実現する必要がある。有機金属気相成長法 (MOVPE) を用いて GaAs(311)B 面上に歪 InGaAs を成長させると、非平衡下で非線形な自己組織化がおこりナノディスク閉じ込め構造 (ナノクリスタル) が周期的に形成される。In 濃度を増加させると基本的にはディスクサイズを小さくすることができる。これまでの局所的な PL 測定 (@ 4 K) によれば、低次元性を反映した非常に多数の輝線が観測されており、ナノクリスタルの中に幾つか微細変調構造の存在が考えられていた。即ち、結合量子ディスクの可能性である。

今回、SNOM (近接場光顕微法) により、ファイバースコープ微小先端をナノクリスタル表面に直接押し付け圧縮応力で PL 輝線の波長変化を調べそのような結合状態の有無を探った。基本的な傾向は圧力増加に従い輝線波長はブルーシフトし、PL 輝線強度はクエンチすることがわかった。またエネルギーの近接した輝線が圧力増大に従い合体する現象も観測され、圧縮応力でディスク PL 波長の制御が可能なこと、ナノクリスタル内でのなんらかの結合状態の可能性が示唆され、現在波長分解能をあげ検討を続けている。

また、零次元の微小ディスクはエキシトンの閉じ込めエネルギーを増大させ、比較的容易にバイエキシトン（エキシトン分子）を形成できる。今回このエキシトンバイエキシトン形成過程で非線形の量子干渉効果があることをみだし、qubit ゲートへの適用性を検討している。

量子ディスクの位置、サイズ、構造の制御性については、従来の内部同期型の形成法のみならず、選択成長とのコンビネーションで外部同期的に位置のアライメントが可能であることがわかった。また PL 波長のブルーシフトも確認され、ディスク構造変調の検討を続けている。

(2) 走査プローブ法によるナノ構造作製技術

AFM 微細加工を用いて、10nm 以下の微細加工を実現し、室温において、量子相関機能の実現を目指す。従来、AFM 微細加工を用い場合、形成される酸化細線は、20nm 前後が再現性よく作製できる加工サイズであった。この場合、この酸化細線を用いて得られるトンネル電流は 10-13A 以下になり、信号電流の測定が非常に困難になる。この問題を解決する手段として、AFM 微細加工を行う際、1) パルス酸化法を適用する、2) カンチレバーの曲立半径を極小にするために、カーボンナノチューブカンチレバーを用いる、の2点の手法の研究を行った。

1) パルス酸化法による微細加工

AFM 微細加工を行う際、カンチレバー・基板間に従来は直流バイアスを印加して陽極酸化を行っていたが、この方法では酸化の際に水素イオンによる正の空間電荷層が形成されて、深い酸化の進行を妨げるという問題があった。このためより高い電圧を印加して酸化を深くする必要があり、これにより酸化細線の幅が太くなるという問題があった。これを解決する方法として、直流バイアスの代わりに正負のパルスバイアスを印加する。負のバイアスにより通常の酸化が生じ、正のパルスにより正の空間電荷層が中和される。これにより、低電圧で深い酸化の進行が可能となった。その為に従来は 20nm 以下の酸化細線幅を得ることは困難であったが、本パルスバイアス法では 10~15nm の酸化細線の作製が可能となった。この手法を用いて単一電子トランジスタ、単一電子メモリを作製し、その室温におけるクーロン振動特性、ヒステリシス特性を得ることに成功した。

2) カーボンナノチューブによる微細加工の試行

アーク放電により形成した多層カーボンナノチューブを顕微鏡下でシリコンカンチレバー先端に直接張り付ける技術によりカーボンナノチューブカンチレバーの作製を行った。この手法により形成したカーボンナノチューブカンチレバーを用いて原子オーダー平坦アルミナ基板上に形成したチタン薄膜の酸化実験を行った。大気中の AFM 微細加工において、コンタクトモードにより、容易に 10nm の酸化チタン細線の形成が可能になった。しかしながらコンタクトモードで AFM を用いると

シリコンカンチレバー先端に張り付けたカーボンナノチューブが容易に剥離してしまい、この手法では再現性よく酸化細線を得ることは困難であると判明した。この解決法として、単層カーボンナノチューブを、化学気相成長法により直接シリコンカンチレバー先端に成長させる手法の予備実験に入った。

2-3. 量子相関機能の実験的検証および新材料の探索

(1) 2重結合量子ドット系の電磁波照射下でのダイナミクスのモデリング

時間的な量子相関機能の最も基本的な実験的検証は、2重結合量子ドットを人工的な2準位系と見なした場合のダイナミクスの測定である。具体的には、2準位系のエネルギーに共鳴した電磁波のパルスを照射して、ラビ振動がどのような形で電流として測定できるかを調べることである。そのために、密度行列法を基本とした手法で現象論的にパルス電磁波照射下の2重結合量子ドットを流れる電流をシミュレーションした。その結果パルスの長さの関数として電流が振動するという形で、ラビ振動が観測できることを示し、さらに現象論的に導入した非弾性散乱の効果が振動を弱めることが明らかになった。

(2) 2重結合量子ドットを用いた量子ビット・量子ゲートの提案

2重結合量子ドットの2準位系を量子ビットとして用い、それらを容量的に2個結合することにより量子ゲートを構成できることを提案した。この提案が、どの程度現実性があるか検討するために、現在得られている量子ドットのパラメータを検討し、数値的には十分可能であることがわかった。ただし、コヒーレンス時間に関して、孤立したドットでの値が明らかではない。

(3) 単一カーボンナノチューブ

高温で動作するドット系のための新材料としてカーボンナノチューブに注目している。量子ドットとしての特性を調べるために、1本の単一壁ナノチューブバンドルの電極をつけ、単一電子トランジスタとしての特性を測定することに成功した。その結果、液体ヘリウム温度でもクーロンブロック効果、ゼロ次元量子準位の影響を観測することができた。また、電磁波を照射しその応答を調べたが、光アシストトンネリングを観測することができず、古典的な2乗検波的になっている様子である。

3. 主な研究成果の発表（論文発表）

無し