

## 研究課題別評価

1 研究課題名: 単一量子ドットにおける多光子量子操作

2 研究者氏名: 黒田 隆

3 研究のねらい:

近年の結晶成長技術の進展により、10ナノメートル程度の微小な半導体結晶を作製することが可能となってきた。微結晶の大きさは、原子数にして  $10^3$  個程度に相当する。このような微結晶を、異種の半導体中に、エピタキシャルに(結晶格子の切れ目なしに)埋め込むことにより、結晶の表面やその内部に格子欠陥が存在しない、高品質のナノ結晶(量子ドット)が実現できる。

量子ドット内部の伝導電子は、ナノメートル・スケールの微小空間に閉じ込められる結果、顕著な量子性を示す。例えば、バルク結晶で見られていたバンド的な電子構造は、量子ドットにおいては、原子の量子準位と似た離散的な線スペクトルになる。また、固体中の電子は、一般に、価電子や原子核など他自由度からのランダムな擾乱を受け、純粋な量子状態は極めて短時間に消失するが、量子ドットにおいては、システムのサイズダウンの結果、電子状態と相互作用する自由度が劇的に少なくなり、結果として量子状態が乱れることなく長時間に渡って保たれる。半導体量子ドットは、固体でありながら、真空中に孤立して置かれた原子に類した系であり、人工原子とも呼称する。顕著な量子性が長く保たれる特性は、固体の量子計算を実現するために理想的な対象といえる。

量子ドットを用いて量子ビットを構成する方法には、量子ドット内の伝導電子の有無を量子ビット準位に用いるもの、伝導電子のスピンの準位を用いるもの、および、光学遷移である励起子を用いるものなどが知られている。それぞれ長所と短所があるが、本研究で着目する励起子を用いる方法は、光学手法を用いるため非接触的に量子ビットにアクセスでき、実験の構成が比較的簡単になること、超短パルスレーザーを用いるために高速のゲート処理が実現できること、量子通信など光ネットワークとの相性がいいこと、などの優位点がある。他方、欠点としては、量子ビットの寿命が、励起子の自然放出寿命で制限されることがある。広く用いられている III-V 族の半導体では、励起子寿命は100ピコ秒～1ナノ秒であり、全ての量子演算はこの時間内に終わらねばならない。この欠点は、しかしながら、先述のように毎ステップ1ピコ秒程度の高速処理が可能であることを考慮すれば、幾分緩和できる。これらの特徴から、励起子量子ビットは、大規模かつ長大な演算処理には不向きであるが、量子中継器など高速かつ小規模な量子情報処理ユニットに活用できると考えられる。

量子ドットの励起子を量子ビットに適用する試みは、プロジェクトの開始時点において既に、ラビ振動の観測(2001年)、制御付量子ゲートの実験(2002年)など報告があった。これらの先行実験では、励起子の量子ビット的な性質を、非線形光学手法や変調分光など、量子情報処理としては、やや冗長な手段を駆使して、ようやく検証に至っている。実験の困難さのために、残念ながら後続する研究例は多くはない。

本研究では、優れた性質を持つ励起子量子ビットを、実用に使える程度のレベルまでに展開することを目的とした。鍵となるのは、将来的にはシングル・ショット検知も可能な、高効率の読み出し手法を開発することである。そのため、自然放出をベースとした新しい読み出し手法を提

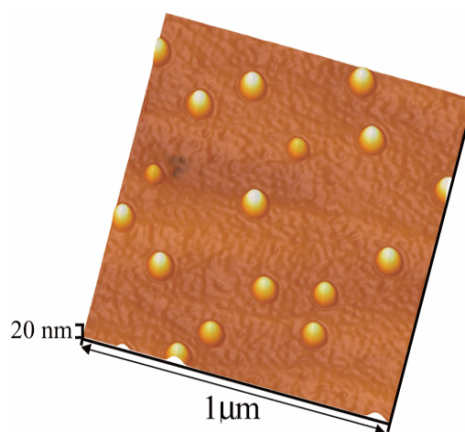


図 1 GaAs 量子ドットの原子間力顕微鏡写真

案した。また、条件付き量子ゲートを構成する空間的に近接した量子ドット複合体を作製し、その結合した電子準位を確認することに成功した。

#### 4 研究成果:

##### 【励起子量子ビットの読み出し手法の開発】

量子計算では、アルゴリズムに則って量子ゲートを施し、その後、個々の量子ビットの状態を演算結果として読み出す。励起子量子ビットの場合、量子ビットを担う2準位は、量子ドット内に励起子が「ある」状態と「ない」状態である。個々の量子ドットに対して、適切な波長、強度、位相に定めた光パルスの列で、多段的に量子遷移を引き起こし、最終的に励起子が存在するか、消えているかを、個々の量子ドットにおいて観測する。一般に、一個の量子ビットからの応答は極微なものであり、終状態の読み出しには、ごく高感度な計測が要求される。

励起子の有無を決める、最も直接的な方法は、自然放出光を検知することである。励起子が存在する場合に限り、再結合に伴って光子が放出される。従って、その光子を検知できれば、状態操作後の励起子の存在を確定できることになる(図3)。現在、光子用の検出器には、100%に近い効率のものが手に入る。そのため、この手法は、原理的にはシングル・ショットの状態検知も可能な、理想的な読み出し手法とみなすことが出来る。

しかし、実際に量子ドットからの自然放出を検出しようとすると、微弱な発光信号は、ゲート操作に用いた入射光に埋もれてしまい、判別できない場合が多い。1個の量子ドットの吸収断面積はごく小さく、量子遷移の操作には莫大な数の光子の照射が必要となる。対する発光信号は、1対の電子・正孔の再結合で生み出される1個の光子に過ぎず、波長が等しいこともあって、両者を分別することは不可能だと信じられていた。

我々は、このような一般認識を逆にとり、入射ゲート光のもれ成分を丁寧に取り除くことで、単一の量子ドットからの自然放出光を観測することを試みた。基本的なアイデアは、広

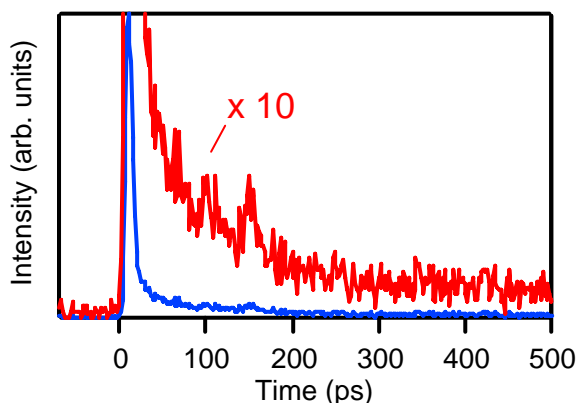


図2 単一量子ドットにおける共鳴パルス励起後の発光の時間発展。

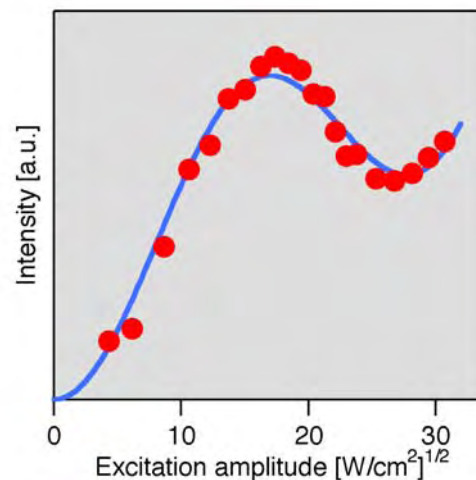


図3 共鳴励起後の発光信号の励起強度依存性。振動的な依存性は励起子のラビ振動を反映している。

く用いられている共焦点的な顕微鏡配置を崩し、平面波的なゲート光を照射後、励起光とは異なるモード(伝搬方向)の自然放出を観測することである。そのため、量子ドット試料には、斜め方向から平面波に近い励起パルス照射した。単一の量子ドットを共鳴的に励起し、その後の発光を対物レンズで捕集する。さらに、試料表面からの弾性散乱と共鳴的な信号を分別するため、時間分解計測を行った。

図2は、単一の量子ドットを共鳴的にパルス励起し、その後の光放出信号を時間分解計測したものである。時刻0に現れるスパイク的な信号は、励起光の弾性散乱信号である。これに引き続き、単一量子ドットの自然放出に由来する減衰信号を、初めて観測することに成功した。

この実験では 10<sup>9</sup>回もの試行を繰り返し、その結果を足し合わせて、自然放出の減衰曲線を

見出した。実際の量子計算では、放出寿命内に光子が検知できるかのみを確認すればよい。高効率の光子検出器と、光子の取り出し効率を高めた試料デザインを採用すれば、シングルショットに近い状況での状態読み出しが、今後可能になると考えている。

この読み出し手法を用いて、1量子ビットの回転ゲート操作であるラビ振動を見た結果が、図3である。光パルスを用いてラビ振動見出す場合、コヒーレントな相互作用の大きさ(パルス面積)を変えるために、励起パルスの入射強度を変化する。図3は、自然放出の信号強度を、励起強度の関数として図示したものである。振動的な依存性は、パルス励起後の量子状態が、基底状態と励起状態の間を往来していることを示しており、確かに回転ゲートが実現したことを確認づけた。

#### 【励起子デコヒーレンス時間の評価】

固体凝縮系の電子状態のデコヒーレンスは、原子分光で知られたスペクトル衝突広がりとの類推で、他自由度や擬粒子との衝突過程として考えることが多い。しかしながら量子ドット内部に閉じ込められた電子は、空間的に局在した状態であり、衝突によるコヒーレンス破壊といった素朴な描像が立ちにくく、デコヒーレンス機構については未解明な部分が多い。この背景には、デコヒーレンス時間を決定する有力な方法がなく、実験研究が捗っていないことがある。

量子準位のデコヒーレンス時間は遷移スペクトルの線幅の逆数で与えられる。従って、1個の量子ドット発光線のスペクトル線幅が決定できれば、本来十分であるが、多くの場合、発光線幅は通常の分光装置の分解能以下であり、その決定には困難を極めていた。

そこで我々は、量子ドット発光の自己相関を観測することにより、分光器を用いることなく高分解に線幅を決めることを試みた。実験では、単一の

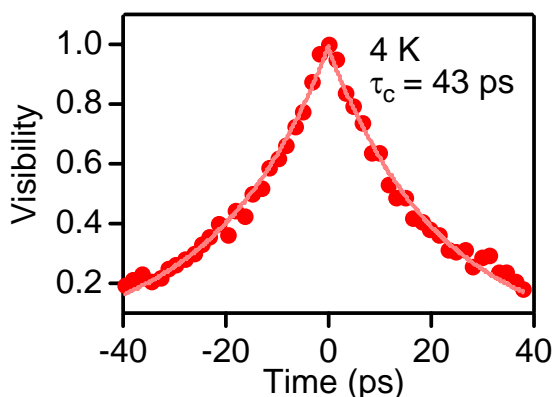


図4. 単一量子ドット発光信号の自己相関関数。

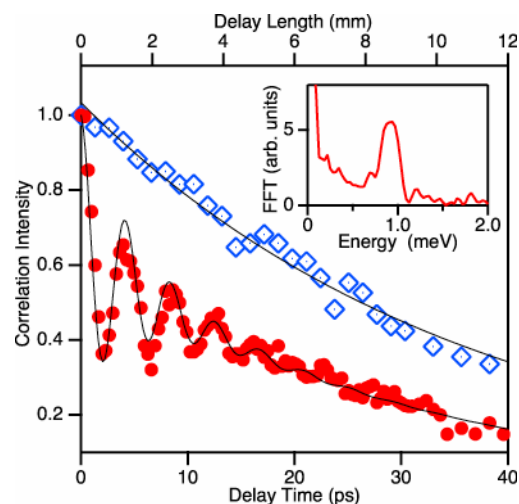


図5. 励起強度が  $4 \text{ W/cm}^2$  (青)と  $40 \text{ W/cm}^2$  (赤)での自己相関関数。

量子ドットからの発光信号を、マイケルソン型の干渉計に導入し、可干渉度を測定する。一般のフーリエ分光とは異なり、毎秒数光子程度の微弱な信号を長時間積算するため、干渉計の内部には位相関係を保持するフィードバック機構を組み込んだ。

光学遅延を関数とした可干渉度が自己相関関数であり、そのフーリエ変換がスペクトル(線幅)を与える。結果を図4に示す。代表的な量子ドットにおいて、デコヒーレンス時間は  $40 \text{ ps}$ 、線幅にして  $30 \text{ meV}$  と決定できた。相関関数は温度によらず、単一指数減衰を示す。またデコヒーレンス時間は検出する量子ドットによって著しく異なっており、統計的には6割程度の分散を持つことがわかった。この結果は、量子ドットのデコヒーレンスが、局所的な環境に強く依存することを示している。

図5は、異なる励起強度における自己相関関数の変化の様子を示す。弱励起時(青)には指数関数的な単調減少だったものが、強励起時(赤)には振動成分が重畳していることがわかる。この時、量子ドットには2個の励起子の複合体である励起子分子が形成される。励起子分子と

1励起子は、電子間相関の分、遷移エネルギーが異なる。両者の発光波長の違いを反映して、自己相関関数にうなりが生じる。うなりのフーリエ解析から、励起子分子の結合エネルギーやデコヒーレンス時間を評価することができる。

【量子ドット複合体の創生と光学評価】

1つの量子ビットは、1つの量子ドットで実現できる。多量子ビットを構成するには、複数の量子ドットを準備し、量子ビット間に相互作用を持つようにすればよい。例えば、量子ドットのペアを、波動関数の浸みだし程度の、ごく近傍に置くことが出来れば、制御ゲート(条件付ゲート)が実現できる。図6には、近接した量子ドット対における制御ゲートの概念図を示した。2つの量子ドットは、励起光の波長や偏光の違いを用いて、個別のアクセスが可能である。各々の量子ドットの遷移エネルギーは、電子相関の結果、相手方の量子ドットの状態(励起子の有無)に応じて僅かに異なる。そのため、励起光の波長を適切に設定することで、相手方の状態に応じて、もう片方の状態のみを制御すること(条件付きゲート)が可能となる。

自己形成的に作製する半導体量子ドットは、結晶学的には極めて高品質であるが、形状制

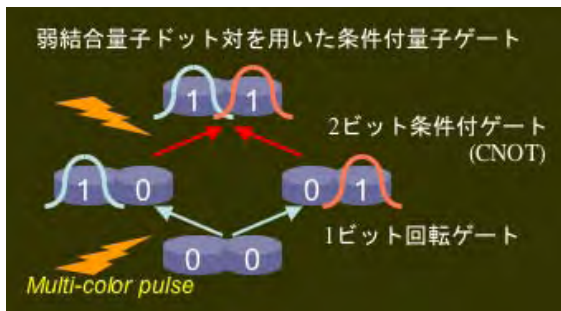


図6. 近接しておかれた量子ドット対を用いる2量子ビット条件付きゲート。

御や配置制御は困難である。特に量子ドットの配列化は、ナノテク分野のフロンティア領域の一つであるが、現状では、分光探査に要求される高品質の試料は実現していない。

我々は、液滴エピタキシー手法に特有な、自己形成的に作製できる複合的な量子ドット構造に着目し、これらの成長過程の観測および光学評価を進めた。

図7には、試料面内方向に分割して形成した量子ドットの例を示す。面内の [011] 方向と [0-11] 方向では、結晶成長時における吸着原子の拡散速度がわずかに異なる。この異方性が大きくなるような条件に設定することにより、面内に分割した量子ドット対を作製することができた。下段には、分割量子ドットからの発光スペクトルを示している。比較的再現性よく、発光線(図の A1, A2)の対が見出され、これは、分子軌道的な結合状態、反結合状態からの発光と考えられる。スペクトル分裂の大きさは数値シミュレーションの結果ともよく合致していた。

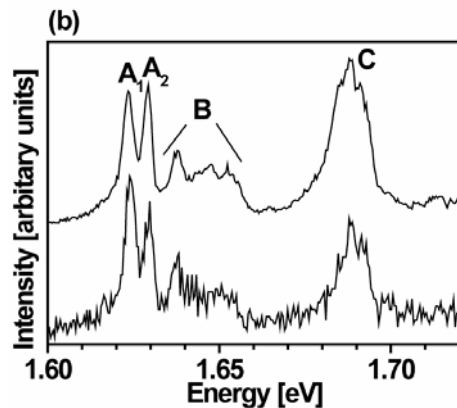
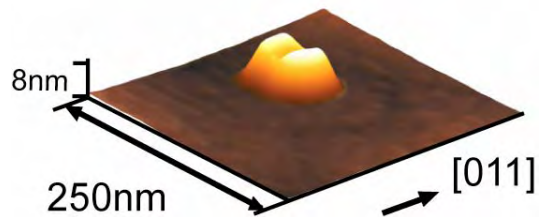


図7. 自己形成的に作製した量子ドット分子の原子間力顕微鏡写真(上)と光学遷移スペクトル(下)。

5 自己評価:

プロジェクト申請段階で、1)高効率の励起子量子ビットの読み出し手法を確立し、2)2~3量子ビット程度の量子ゲート操作を実現することを目標に掲げていた。1)は完遂できたものの、2)は手つかずの状況である。この理由は、申請時のプランニングにおける読みの甘さもあるが、

期間中に、量子ドット複合構造が新たに見出されたことなど、当初予定になかった発展があったからである。現在、2量子ビット系の準備も整った状況なので、今後、多波長・多パルスの励起レーザー光を用いた、条件付き量子ゲートの実証実験に着手する。また同時測定計測により、量子もつれの大きさを定量評価したいと考えている。

さきがけ研究では、励起子量子計算のための要素技術を、単純明快に探求してきた。固体量子情報のトレンドを見てみると、それぞれの分野・それぞれの量子ビットで、量子性をフルに取り扱う洗練した方策が探求されてきたと思う。極限技術の開発は、それ自身で面白い研究対象であるが、他方、ブレークスルーのためには、近未来、複雑にもつれ合う量子情報ネットワークの中で、個々の技術に望まれる要求仕様を、確かに見定めることが不可欠であると思う。今後他分野の動向を踏まえつつ、自身の研究を展開していきたい。

## 6 研究総括の見解:

物理的に単純明快なやりかたで、

(1) 単一量子ドットの自然放射の減衰信号を初めて観測

(2) そのラビ振動

(3) 励起子コヒーレンス時間の評価

を実験的に実証した点を高く評価します。

単一量子ドットによる量子計算素子の研究に関して大きな成果をあげたと思います。量子ドット複合構造があらたに見いだされたこともあり、今後の2ビットの量子ゲートの実証実験に期待します。

## 7 主な論文等:

【論文】 11 件

[1] T. Kuroda, T. Mano, T. Ochiai, S. Sanguinetti, K. Sakoda, G. Kido, N. Koguchi: Optical transitions in quantum ring complexes; Phys. Rev. B 72, 205301 (2005); cond-mat/0509625.

[2] K. Kuroda, T. Kuroda, K. Sakoda, K. Watanabe, N. Koguchi, G. Kido: Excitonic and biexcitonic decoherence in self-assembled GaAs quantum dots as observed by phase-locked interferography; Appl. Phys. Lett. 88, 124101 (2006).

[3] M. Yamagiwa, T. Mano, T. Kuroda, T. Tateno, K. Sakoda, G. Kido, N. Koguchi, F. Minami: Self-assembly of laterally aligned GaAs quantum dot pairs; Appl. Phys. Lett. 89, 113115 (2006); cond-mat/0607549.

[4] T. Kuroda, T. Mano, T. Ochiai, S. Sanguinetti, T. Noda, K. Kuroda, K. Sakoda, G. Kido, N. Koguchi: Excitonic transitions in semiconductor concentric quantum double rings; Physica E, 32, pp. 46-48 (2006).

[5] K. Kuroda, T. Kuroda, K. Watanabe, T. Mano, K. Sakoda, G. Kido, N. Koguchi: Final-state read-out of exciton qubits by observing resonantly excited photoluminescence in quantum dots; Appl. Phys. Lett. in press; cond-mat/0612629.

【特許】 1 件

・特願 2004-127226(平成16年4月22日)

黒田隆、黒田圭司、迫田和彰、木戸義勇「レーリ一散乱光除去方法及びその装置」

【受賞】 なし

【招待講演】 なし

【解説】 1 件

黒田圭司、黒田隆、迫田和彰、小口信行、木戸義勇

GaAs 量子ドット励起子の単一光子フーリエ分光  
固体物理, Vol.41, No.12, 919(2006).

【プレス発表】 1 件

・物質・材料研究機構・JST 共同プレス発表(2006 年 3 月 17 日)

「量子コンピュータ素子の性能評価に世界で初めて成功」(日刊工業新聞、日経産業新聞)