

半導体量子ドットを用いた量子情報素子への応用

Application for Quantum Information devices using Semiconductor Quantum Dots



五島 敬史郎 (Keishiro GOSHIMA, Ph.D.)
愛知工業大学 工学部 電気学科 准教授
(Associate Professor, Department of Electrical Engineering,
Aichi Institute of Technology)
応用物理学会 電子情報通信学会
研究専門分野：半導体物性 量子光学 半導体デバイス

あらまし 本研究は、半導体量子ドットの励起子を用いて、量子情報技術の基礎となる量子情報素子の実現方法への基礎実験を行なった。量子情報技術とは、量子力学特有の性質である重ね合わせ状態や量子もつれ合い、不確定性原理などを直接利用して従来技術では実現不可能な情報処理や通信などを可能にする技術である。特に量子コンピュータへの応用を考えてその基本ゲート構成である。量子ドットを1個使った1量子ビットの回転ゲート、及び量子ドット2個使った2量子ビットの量子ゲート（コントロール NOT ゲート）の実現を目指した。その結果、1量子ビットにおいては回転ゲート操作であるラビ振動現象を確認した。また2量子ビットについては、半導体量子ドットの2個垂直方向に並べた結合量子ドットをした。この結合量子ドットを用いた2量子ビットで量子力学的な相関効果と4つの量子状態の形成に成功した。これらの実験結果をもとに、量子コンピュータ実現で重要になる拡張性についても個人的な所見を述べる。

1. 研究背景と研究目的

デジタル信号を基礎とした情報科学技術は、私たちの生活を一変させたのは言うまでもない。そして、インターネットを始めとする世界規模での情報ネットワークなど自由に快適利用できるなど更なる進化を続けている。

一方、コヒーレントな量子状態を利用する量子情報科学技術は、量子計算、量子通信など画期的な性能を有する次世代の科学技術として期待されている。量子情報技術とは、量子力学特有の性質である重ね合わせ状態や量子もつれ合い、不確定性原理などを直接利用して従来技術では実現不可能な情報処理[1][2]や通信[3][4]などを可能にする技術である。量子コンピュータ[5]や上記に述べた量子通信が有名であるが、高感度センシングや高精度周波数標準技術などにも応用され始めている。

例えば、量子コンピュータは、従来のコンピュータに比べてある種の計算分野では桁違いの高速な計算を可能にする。このようなことが可能になるのは、従来コンピュータが逐次実行型に対して、桁違いの情報量を一度に扱えるからである[2]。

量子情報処理と従来情報処理と比較する。従来情報処理の大きな特徴は、0と1の2進法デジタルの演算である。複雑な計算を単純な基本ゲート（NOT, AND, OR など）を用いることで実現できる点が大きな特徴である。量子情報素子も $|0\rangle$ と $|1\rangle$ の2つの量子状態を使う点では同じである。しかし、重ね合わせ状態の作成、位相の操作、量子干渉操作などのアナログ的要素を含む点が大きく違う。また複雑な演算を単純ゲート操作に分解できる。1量子ビットの操作と2量子ビットの論理ゲート操作の2種類のゲートが量子情報処理の基本ゲートも共通である。量子ビット操作は、量子波という波を使った操作である点が従来情報処理と根本的に異なり、かつ最も実現を難しくしている。その要因の一つは、量子波の振動が減衰して消滅してしまう前にビット操作を終わらせなければならないということがある。

その様な量子状態を使って量子コンピュータを実現させるための物理系に必要な4つの条件を提示する[6]。

半導体量子ドットを用いた量子情報素子への応用

Application for Quantum Information devices using Semiconductor Quantum Dots

- ① 性質の良く分かった量子ビット（2準位系）を必要な数だけ用意できる事。
- ② 初期化が可能である事。
- ③ コヒーレンス時間がゲート操作時間に対して十分長い時間保たれる系である事。
- ④ 基本量子論理ゲート（1量子ビットの回転ゲートと2量子ビットの C-NOT ゲート）が実行可能である事。

①の条件は、量子ビットにとって必要な条件は、「0または1」の重ね合わせ状態を保持できることである。この重ね合わせ状態は量子力学に特有の現象である。この状態を取る事ができればどんなものでも量子ビットの候補になりえる。

②の条件は、量子ビットをある決まった状態（0または1）にできる事を意味する。これは現在のコンピュータと同じである。

③の条件は、重ね合わせ状態の破壊に関するものである、量子コンピュータは重ね合わせ状態を使った並列計算機であるので、計算は重ね合わせ状態が壊れてしまわないうちに終了しなければならない。

④の条件は、この2つの論理ゲートができれば任意の量子回路を構成する事ができる。

現在、上記の条件を満たす幾つかの物理系が量子コンピュータの候補として研究が進められている。

候補として研究が進められているのは、分子中の原子の核スピンを量子ビットとして用いる核磁気共鳴（NMR）を量子計算に利用した NMR 量子コンピュータ[7][8][9]、また、1個の光子を放出し、ハーフミラーを通したときにその光子がミラーで反射した場合と透過した場合を、量子ビットとして扱い、光の粒で量子計算を行う線形光学素子量子コンピュータ[10][11]、超伝導素子を用いた量子コンピュータとして、極低温領域のみで起こる微小な超伝導内部の電荷は必ず2つが対になって行動するという（クーパー対）の現象を利用した方法[12][13][14]などがある。

1. 1 半導体量子ドットを用いた量子コンピュータ

半導体量子ドットを用いた方法は、今までの半導体微細化技術と材料系が利用できる。そのため今までのノウハウの蓄積もあり集積化が容易である。この理由

から、半導体固体デバイスは実用的な量子コンピュータ素子の候補になっている。半導体量子ドットを用いた量子コンピュータの候補は、量子ドット中の電子準位を量子ビットとして用いる方法、また励起子を量子ビットとして用いる方法、そして量子ドットスピンを用いる方法の3つが考えられているが今回筆者らは、励起子を用いた方法を採用している。

1. 2 量子ドット中の電子準位、励起子を用いた量子コンピュータ

量子ドットの電子軌道準位を量子ビットとして用いる方法は、1995年 Barenco らによる提案から始まる[15]。この提案では、電子軌道準位の方式は、量子演算にレーザーパルスを用いる事ができ、1個の量子ドットにアクセスできるなどの演算操作が比較的容易である利点を持つがサブバンド間電子軌道準位を用いるために、位相緩和時間が fs から数 ps と非常に短い為、実用としては不適切と考えられた。しかし、この考え方を量子ドットの励起子に発展させた方式が提案され実験が進められた[16][17]。励起子とは、半導体中の伝導帯の中の電子と荷電子帯の中の正孔との間に強いクーロン相互作用が働いて束縛状態を作るものである。励起子がゼロまたはひとつ存在する状態を1量子ビットとし、状態の任意の重ね合わせを制御する事で量子コンピュータの基本回路を構築する事ができる。特に量子ドットの場合は双極子能率の増大効果、状態の完全な離散化によるフォノン散乱の抑制による長い位相緩和時間を持つなどの特徴が上げられる。ここで、半導体量子ドットの励起子を量子コンピュータに用いた場合の利点をまとめる。

- ・量子ドット中の励起子1個のみを制御する技術が比較的容易である。また、量子ビットの集積化も原理的に可能である。
- ・励起子のコヒーレンス時間は、量子ドットスピンよりも短い為、フェムト秒超高速光技術等を用いる事で、演算時間を十分確保できる。
- ・初期化が簡単である。

いずれにしても、どの方法も量子コンピュータ実現に向けて模索している段階である。どの方式でも一長一短があり量子コンピュータの実現に向けて模索して

半導体量子ドットを用いた量子情報素子への応用

Application for Quantum Information devices using Semiconductor Quantum Dots

いる段階である。今回筆者らは、半導体量子ドットを用いた量子コンピュータの実現の可能性を模索した。

2. 量子ゲートの実現方法

2. 1 1量子ビットの回転ゲート

量子ビットと呼び、状態0を $|0\rangle$ 、状態1を $|1\rangle$ と表す。

物理的には2準位系の2つの量子状態を表している。1量子ビットの演算で最も基本なのは NOT 演算（回転ゲート）である。これは、

$$|0\rangle \Rightarrow |1\rangle \quad (1)$$

$$|1\rangle \Rightarrow |0\rangle \quad (2)$$

のように変換するものである。

実際に1量子ビットの回転ゲートは、量子ドット中に現れる励起子のラビ振動現象を利用する。ラビ振動は、理想的な二準位系を考えてこの二準位間のエネルギーに等しいコヒーレントな光を照射すると二準位間の存在確率が周期的に変化する現象である（図1-a）。

$T = \pi/R$ を満たすような時間周期 T を与えると、ちょうど下の準位から上の準位（又は上の準位から下の準位）に電子が移動する。この光電場を π パルスと呼び、量子コンピュータの1量子ビットの回転ゲートの基礎動作として利用される（図1-b）。

2. 2 2量子ビット 量子演算ゲート実現方法

量子コンピュータのもう一つの基本素子である2量子演算ゲートの実現方法について述べる。

まず、量子ドット励起子を量子ビットとして利用するには、図2に示すように標的ドット（t-dot）と制御ドット（c-dot）の2つ必要になる。この2つの量子ドット間に量子力学的な相関が無くてはならないので、2つの量子ドット間は、量子力学的な結合が現れるような十分近接して配置する必要がある。今、十分近接したサイズの異なった2つの量子ドットでは、励起子間に相関があるため、各ドット励起子の遷移エネルギーは、片側ドットの励起子の有無によって異なった値をとる。図2に2つの量子ドットのエネルギーバンド図を示す。ここで、 X_c は、c-dot 励起子のエネルギーを示す。 X_t は、t-dot 励起子のエネルギーを示す。

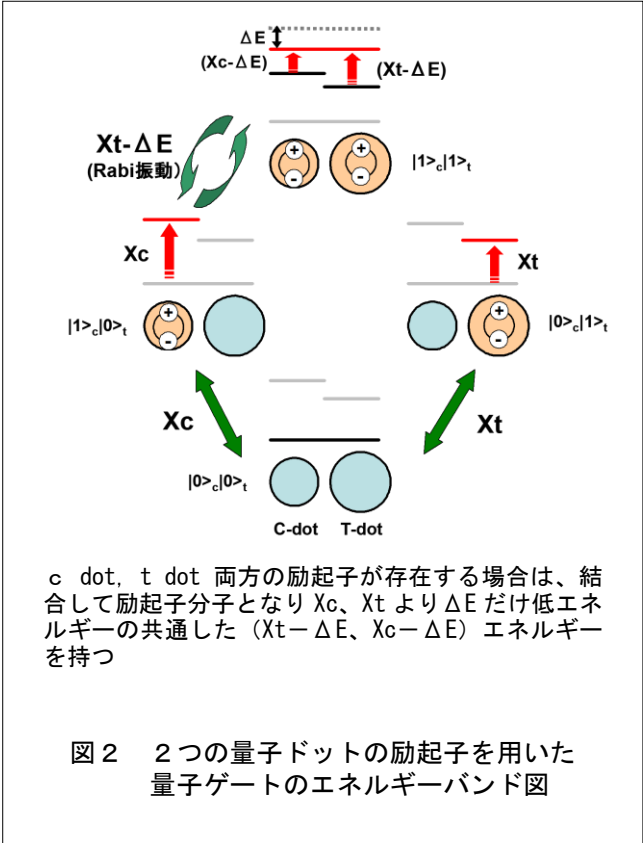
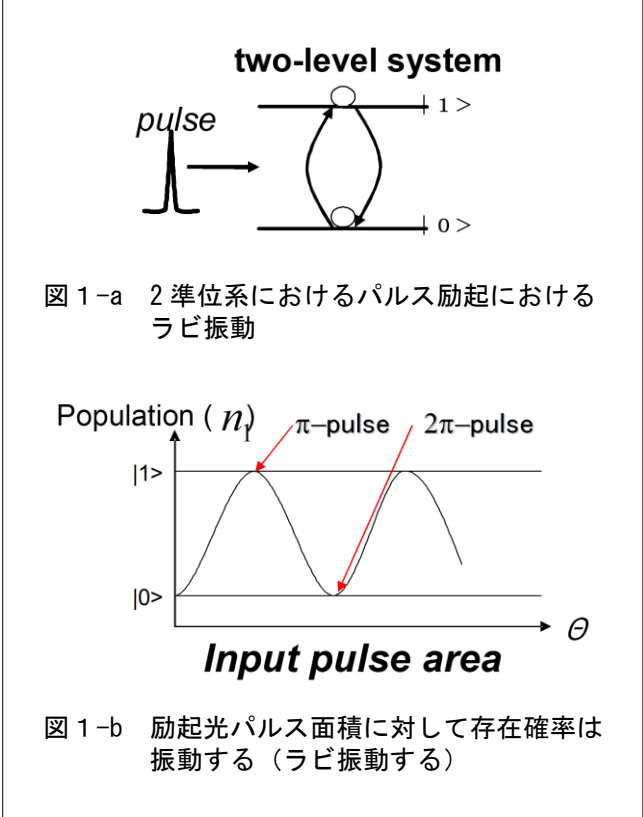


Figure 2: Energy band diagram for two coupled quantum dots (c-dot and t-dot). The energy levels are X_c and X_t . The combined states are $X_c - \Delta E$ and $X_t - \Delta E$. The diagram shows the Rabi oscillation between the states $|1\rangle_c |1\rangle_t$ and $|0\rangle_c |1\rangle_t$.

半導体量子ドットを用いた量子情報素子への応用

Application for Quantum Information devices using Semiconductor Quantum Dots

近接した2つの量子ドット中の励起子間相互作用により、各々の励起子間遷移は他方の励起子が在る無しで異なった遷移エネルギーを取る。

今、制御ドット (c-dot) に励起子が無い場合の標的ドット(t-dot)の遷移エネルギーを X_t とする。また逆の場合で (t-dot) ドットの励起子が無い場合の (c-dot) ドットの遷移エネルギーは X_c と書く事ができる。そして、c-dot と t-dot の両方に励起子が存在する場合は、2つのドットの励起子は相関によって結合し、より安定な状態(低エネルギー)の励起子分子が形成される。このときの t-dot ドットの遷移エネルギーは、この相関分だけ小さいエネルギー ($X_t - \Delta E$) に変化する。この変化したエネルギー ($X_t - \Delta E$) に相当するエネルギーで t-dot ドットの励起子がフリップすると2量子演算ゲートが完成する。

すなわち、c-dot, t-dot ドット共に励起子が無い場合が

$$|0\rangle_c |0\rangle_t \Rightarrow |0\rangle_c |0\rangle_t$$

に相当する。

また、c-dot ドットに励起子が無く、t-dot ドットに励起子がある場合、

$$|0\rangle_c |1\rangle_t \Rightarrow |0\rangle_c |1\rangle_t$$

である。

次に c-dot ドットに励起子が有り、t-dot ドットが空の場合、図2に示すように変化分のエネルギー ($X_t - \Delta E$) を与えれば t-dot ドットに励起子を生成させた事と同じになる。つまり、c-dot ドットに励起子がある状態で $|1\rangle_c |0\rangle_t$ と $|1\rangle_c |1\rangle_t$ の間に相当するエネルギー ($X_t - \Delta E$) を与えれば、 X_t のエネルギーを与えなくても t-dot に励起子を作る事が出来る。そして励起子分子状態を作り出す事が出来る。

$$|1\rangle_c |0\rangle_t \Rightarrow |1\rangle_c |1\rangle_t \quad (3)$$

最後に c-dot 及び t-dot に励起子が有る励起子分子状態の場合は、 $X_t - \Delta E$ のエネルギーを失う事により c-dot のみ励起子がある状態に移行する。

$$|1\rangle_c |1\rangle_t \Rightarrow |1\rangle_c |0\rangle_t \quad (4)$$

になる。よって、2量子ゲートを実現する為には、(3) と(4)をコヒーレントな状態で行えば良い事になる。2つの量子ドットの励起子を用いた2量子演算ゲート動作全てを行うことができる。

3. 研究の方法、研究の結果：

3. 1 単一量子ドットのラビ振動観測

図3は、励起子からのラビ振動を示す。励起子に与える励起エネルギーを2準位間のエネルギーに共鳴させて励起強度を増加させていくと、ドットの発光は正弦波的に振動していく様子が観測された。発光強度の正弦波の頂点の部分が、励起状態の状態密度が最大になった事を意味しており。これは、基底状態の存在確率が0%で励起状態の存在確率が100%になった事を意味している。この状態を π パルスと呼ぶ。また、正弦波の谷の部分は、系の存在確率が一回りしてまた基底状態に戻ってきた事を意味している。この場合を 2π パルスと呼ぶ。また、 2π パルス時の励起強度が π パルスの励起強度のほぼ2倍である事からも、ラビ振動である強い証拠になっている[18][19]。

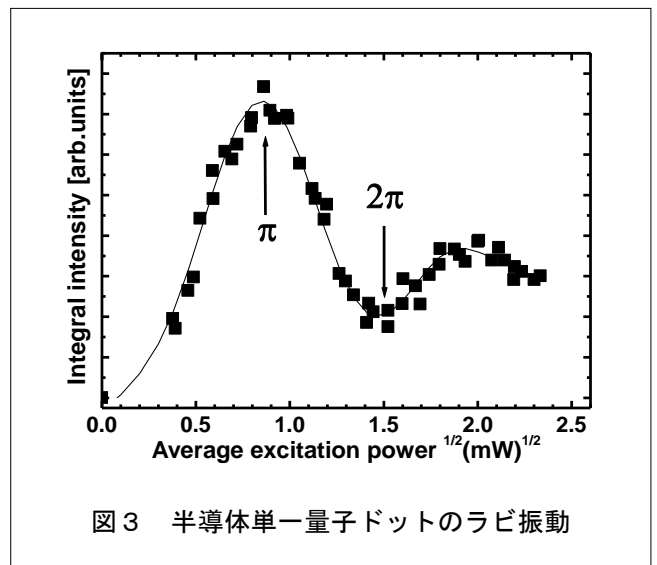


図3 半導体単一量子ドットのラビ振動

3. 2 量子ドットの励起子結合の理論計算

2量子ビットを半導体量子ドットで実現するためには、2つの量子ドット間に量子力学的結合が生じる必要がある。そこでまず初めに上下に積層された量子ドット間距離と量子力学的結合との相互作用を検証する理論計算を行った。理論計算は、量子力学の有効質量近似を用いたシュレーディンガー方程式を用いた。実際の形状に近づけるため3次元に拡張し、コンピュータシミュレーションを用いて解析した。

半導体量子ドットを用いた量子情報素子への応用

Application for Quantum Information devices using Semiconductor Quantum Dots

理論計算の結果、上下の量子ドット間隔が15nm を超えるような広い場合には、上下の量子ドット間に量子力学的な効果は働かなくなることが分かった。

図4に示す図は、結合状態と反結合状態の分裂エネルギーの差を示したものである。結合状態と反結合状態の間は、バリア層厚が10nm を切る間隔より形成され始め、バリア層が薄くなるにつれてエネルギー幅も指数関数的に広がっていくことが理論計算より明らかになった。このことから、実際に2つの量子ドットの間隔が10nm 以下である必要性が分かった。

3. 3 積層量子ドットの作成

理論計算に基づいて結合量子ドット試料の断面走査型透過電子顕微鏡 (STEM) 像を図5に示す。1層目 InAs 層厚=1.65ML, 2層目 InAs 層厚=1.45ML, cap 層厚=3.5nm, バリア層厚=7nm である。STEM 像で分かるように、2層目のドットが1層目の直上に成長していることが分かる。

3. 4 結合量子ドットにおける励起子分子の観測

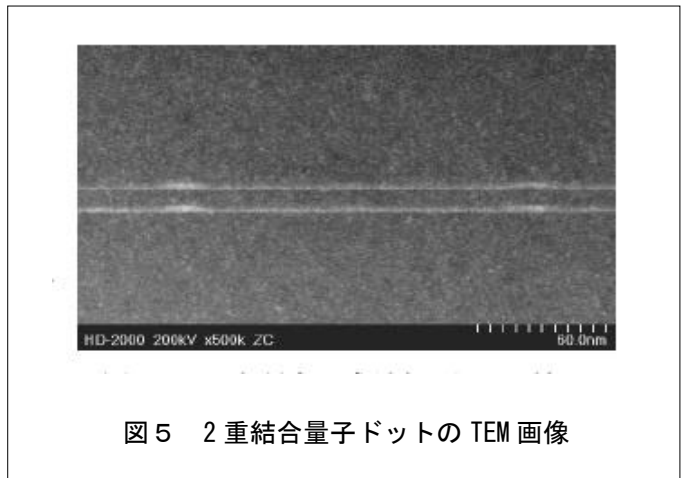
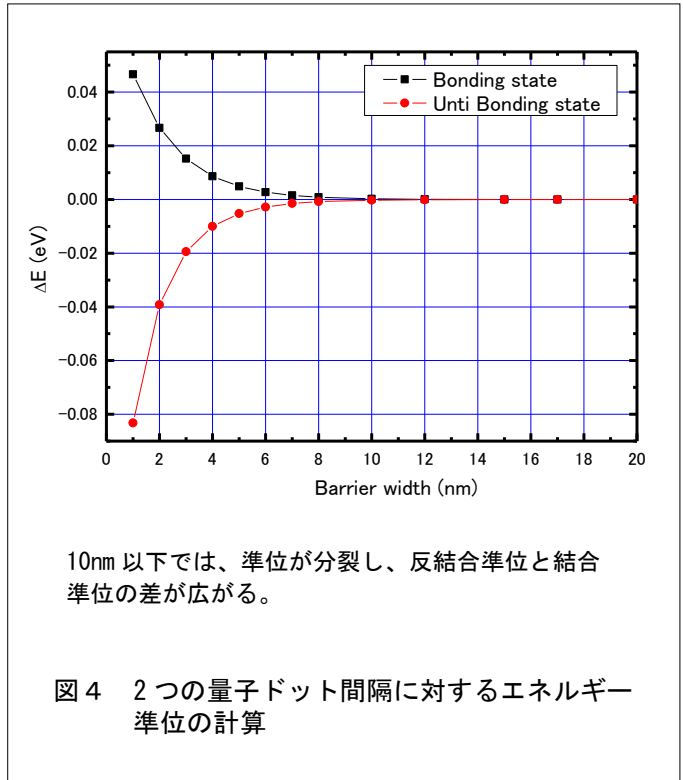
前節までの討論では、結合ドットの相互作用について光学物性から明らかにしてきた。

そこで結合ドット1組のみの観測を行い、この量子力学的な相互作用を利用して2量子ビット素子に必要不可欠な4つの状態 ($|00\rangle$, $|01\rangle$, $|10\rangle$, $|11\rangle$) を調べた。

結合ドットを用いた量子ゲートの実現方法で重要な事は、まず4つの状態 ($|00\rangle$, $|10\rangle$, $|01\rangle$, $|11\rangle$) が形成できる系である事と、その4つの状態のうち $|10\rangle \leftrightarrow |11\rangle$ がラビ振動によって状態を任意に変化させる事の2つである。

結合ドット構造を用いた4つの状態を形成するために、図2のような状態構造をしている。結合準位と反結合準位に分裂したそれぞれの準位の状態を、4つの状態として利用するものである。

- 結合ドットに励起子が無い場合を $|00\rangle$
 - 片方だけに励起子が存在する状態を $|01\rangle$
 - 片方だけに励起子が存在する場合を $|10\rangle$
 - 両方の準位に励起子が存在する場合を $|11\rangle$
- の4つの状態である。

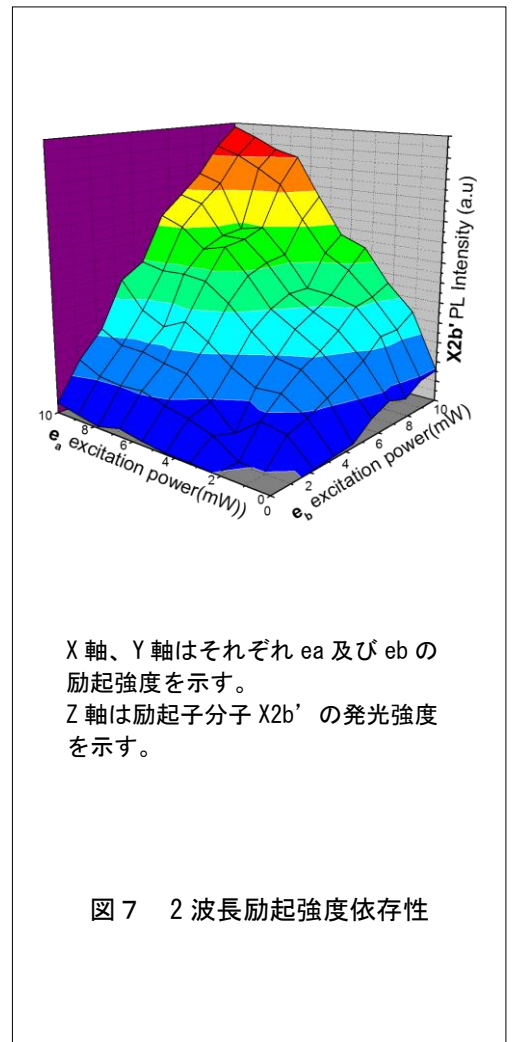
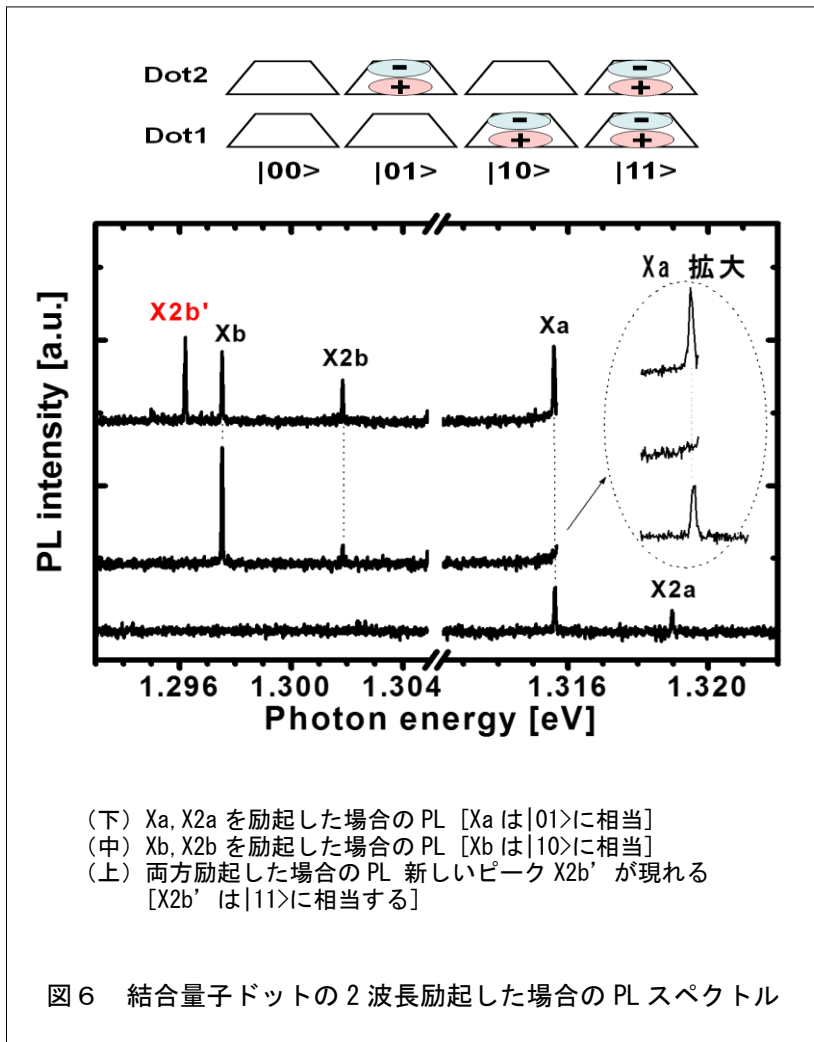


両方の準位に励起子が存在すると、2つの励起子が励起子分子へと変化して、 ΔE だけ低エネルギーになることが予想される。

そこで、筆者らは結合ドットの励起子の片側の量子ドットのみを作った場合 (図6下段) 片側の量子ドットからの発光である Xa のピークが観測される。次に、もう片方の量子ドットのみを励起した場合 (図6中段) では、結合準位である Xb の発光が観測されている。最後に、両方を励起子を同時に作った場合 (図6上段)

半導体量子ドットを用いた量子情報素子への応用

Application for Quantum Information devices using Semiconductor Quantum Dots



に示す。この場合は、Xb ピークの1.3meV 低エネルギー側に新しいピーク (X2b') が現れた。これは、結合準位と反結合準位の2つの励起子が結合した事による励起子分子である可能性であると考えられる[20][21]。

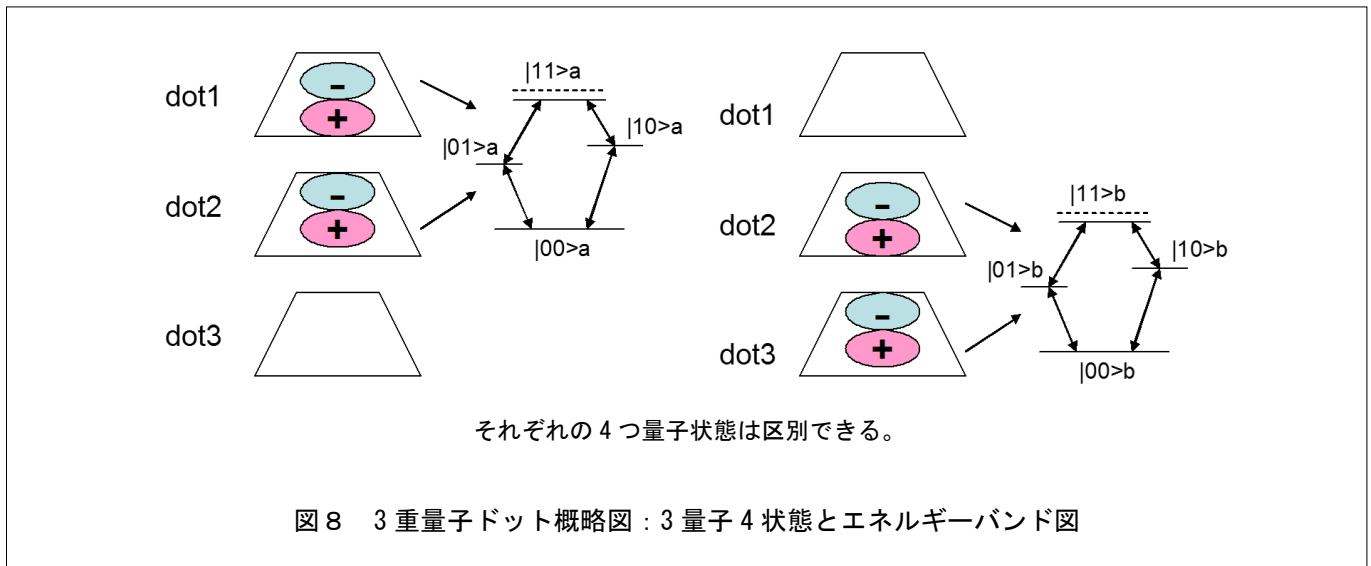
この新しい発光ピーク (X2b') を明らかにするために、2波長励起を測定した。その実験結果を図7に示す。ここで X 軸は片側のみ励起した場合の励起強度、Y 軸はもう片側のみ励起強度、そして Z 軸は X2b' の発光強度を3次元図で示したものである。X2b' の発光強度は、両方の励起強度同じ時に最も強いので、X2b' の発光ピークは、Xa と Xb の励起子が結合する事によって生成した励起子分子である事が分かった。従って、X2b' 励起子分子のピークであり、結合ドットにおける4状態 ($|00\rangle$, $|01\rangle$, $|10\rangle$, $|11\rangle$) を実験的に示す事ができた。

4. 結び

量子演算素子で状態の異なった4つの状態 ($|00\rangle$, $|01\rangle$, $|10\rangle$, $|11\rangle$) を作る事が重要である。図6に示す2つの量子ドットを上下に近接させた積層ドットを用い、この4つの状態を作り出すことに成功した。さらに、これまでの結果を踏まえて2量子ビット以降の拡張性の可能性について述べる。まず3量子ビットの拡張では、3つの量子ドットを上下に積層した多重積層ドットを作成する。多重積層ドットは他の研究機関でも多数報告されており技術的には可能である。図8に示すように、隣り合うドット (Dot1と Dot2及び、Dot2と Dot3のように) の励起子-励起子分子の4状態を形成させる。そして、隣り合うドット間で量子ゲート演算を行い、さらにはドット間で順次計算させていけば拡張性は可能であると考えられる。

半導体量子ドットを用いた量子情報素子への応用

Application for Quantum Information devices using Semiconductor Quantum Dots



今回の量子ドットに限らず、他の方法でも多ビット化可能な技術のブレイクスルーがあれば量子コンピュータ実現に向けて大きなインパクトがあると考えられる。今回筆者らは、個々の量子ドットを量子情報素子として使う方法を用いているが、たくさんの量子ドット集合体を観測することでも量子情報素子として応用できる提案もされている[22][23]。これらの技術を基礎にブレイクスルーが起きることを期待したい。

参考文献

[1] R.P. Feynman, et al : Opt. News, 11, (1985)
 [2] D. Deutsch : Phys. Rev. D, 44, 3197 (1991)
 [3] H.J.Briegel, W.Dur, J.I.Cirac, and P. Zoller: Phys.Rev. Lett 81, 5932 (1998)
 [4] R.Raussendorf, and J.Harrington :Phys. Rev. A . 59, 169 (1999)
 [5] P.W. Shor: Phys. Rev. A, 52, R2493 (1995)
 [6] D. P. Divincenzo, G. Burkard, D. Loss and E. V. Sukhorukov : in Quantum Mezoscopic Phenomena and Mezoscopic Devices in Microelectronics, (Kiuwer Academic, 2000) pp.399
 [7] D. G. Cory, A. F. Fahmy, T. F. Havel : Proc Natl. Acad. Sci. USA, 94, 1634, (1997)
 [8] L. V. K. Vandersypen, M. Steffen, G. Breyta, C.S. Yannori, M. H. Sherwood and I. L. Chuang : Nature 414, 883.(2001)
 [9] C. Negrevergne, T.S. Mahesh, C.A. Ryan, M.Ditty, F.C. Racine, W. Power and R. Laflamme : Phys. Rev. Lett. 96 170501, (2006)
 [10] S. Takeuchi : Proceedings of FOURTH WORKSHOP ON PHYSICS AND COMPUTATION, PhysComp 96 (1996)
 [11] S. Takeuchi : Phys. Rev. A, 62, 032301 (2000)
 [12] Y. Nakamura, Yu. A. Pashikin and J. S. Tsaki : Nature 398. 786.(1999)
 [13] D. Vion, A. Aassime, A. Cottet, P. Joyez, H. Pothie, C. Urbina, and H. Ando : Phys. Rev. Lett. 87, 246401, (2001)
 [14] J. Majer, J. M. Chow, J. M. Gambetta, J. Koch, B. R. Johnson, J. A. Schreier, L. Frunzio, D.I. Schuster, A.A. Houck, et.el : Nature 449, 443 (2007)
 [15] A. Barenco, D. Deutsch and A.Ekert : Phys. Rev. Lett. 74, 4083 (1995)
 [16] 松枝秀明 : 電気情報通信学会誌 A J81-A, 1678 (1998)
 [17] H. Kamada and H. Gotoh : Phys. Rev. B. 58 , 16243 (1998)

半導体量子ドットを用いた量子情報素子への応用

Application for Quantum Information devices using Semiconductor Quantum Dots

- [18] K. Goshima, K. Komori, S. Yamauchi, I. Morohashi, A. Shikanai, T. Sugaya : Jpn.J. Appl. Phys. 45, 3625 (2006)
- [19] K. Goshima, K. Komori, S. Yamauchi, I. Morohashi, A. Shikanai, T. Sugaya : Jpn.J. Appl. Phys. 46, 2626 (2007)
- [20] K. Goshima, K. Komori, S. Yamauchi, I. Morohashi, A. Shikanai, T. Sugaya : Appl. Phys.Lett. 87, 253110 (2005)
- [21] S. yamauchi, K. Komori, I. Morohashi, K. Goshima, T. Sugaya : Appl. Phys. Lett. 87, 182103 (2005)
- [22] K. Suzuki, K. Akahane, and J. I. Hayase: *The 10th conference on laser and electro-optics* (CREO-PR 2013) WG-2
- [23] K.Suzuki, K. Konishi, K. Akahane, and J. I. Hayase: IEICE Technical Report 113,45 (2013)

この研究は、平成21年度SCAT研究助成の対象として採用され、平成22～24年度に実施されたものです。