

半導体二重量子ドットを用いた電荷量子ビット

半導体量子ドットは多くの制御パラメータを持ち、単一電子の運動を制御することができるので、量子ビットへの応用が期待されています。量子計算機実現に向けてのNTT物性科学基礎研究所の研究の中から、高速電圧パルスによって駆動される半導体二重量子ドット電荷量子ビットの研究について紹介します。

はしり としあき
林 稔晶

NTT物性科学基礎研究所

量子計算機への期待

シリコン・トランジスタに代表されるように、20世紀は半導体デバイスの急速な進歩がエレクトロニクスの発展を牽引してきました。より高速動作でより高集積な集積回路作製のため、トランジスタの大きさは3年で4分の1というスピードでどんどん小さくなっています。これをムーアの法則と呼びます。ナノ作製技術の急速な発展により、デバイス寸法は数十nmにまで減少しています。これはすでに材料の物質定数によって決まる物理的限界に達しつつあります。この限界を打ち破るには、デバイスとしてよりポテンシャルの高い新たな材料を探す、あるいは全く新しい原理に基づく情報処理技術を考案することが必要です。ここで紹介する量子計算機は後者に属します。

量子計算機は量子力学の原理に基づいた計算機のことを指します。素因数分解など古典計算機が苦手とするある種の問題に対し、量子計算機は古典計算機よりもはるかに高い計算能力を持つことが示されています。このような量子計算機の実現のため、現在までに多くのデバイスが提案されてきた

した。NTT物性科学基礎研究所では、単一電子の運動を制御することができ半導体量子ドットを用い、量子計算機に向けた研究を行っています⁽¹⁾。

半導体量子ドット

量子計算機の説明に入る前に、半導体量子ドットおよび二重量子ドットの基本的性質について簡単に解説します。半導体量子ドットは静電ポテンシャルによって電子を3次的に閉じ込めます。この閉じ込め効果により量子ドット内に原子と同様な離散的なエネルギー単位が形成されます。このため量子ドットはしばしば人工原子と呼ばれています。量子ドットはトンネル障壁を介して電極とつながっています。1つの電子が量子ドット内にトンネルすると、電子間のクーロン斥力²のため、初めの電子が他方の電極に抜け出るまで次の電子のトンネルは禁止されます。これをクーロン閉塞と呼びます。このように量子ドットでは電子1つの運動を制御することができます。トンネル障壁を介して2つの量子ドットを連結した二重量子ドットは人工分子と呼ぶことができます。

図1(a)は半導体二重量子ドットの

デバイス構造を示しています。ゲート G_L , G_C , G_R に負の電圧を印加することによってそのゲート下の二次元電子ガスを空乏化させ、トンネル障壁をつくることができます。障壁の大きさはそれぞれのゲート電圧を制御することによって変化させることができます。ゲート P_L , P_R はそれぞれのドット内の静電ポテンシャルを変調するために用いられます。図1(b)は、左右ドット内の量子単位が共鳴している状態を示しています。

半導体電荷量子ビット

古典計算機は、ビットと呼ばれる0(OFF)と1(ON)という2つの状態を基本単位とし、論理回路を構成するデジタル計算機です。一方、量子計算機の基本単位は量子ビットと呼ばれます(古典的なビットと区別するために $0 >$ と $1 >$ という記号を用いることにします)。量子ビットは二準位系で構成されます。二準位系とは2つの量子状態のみで近似できる物理系

* クーロン斥力: 距離 r を隔てて静止する2つの点電荷 q_1, q_2 の間に働く力 $F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2}$ 。ここで ϵ_0 は真空の誘電率。

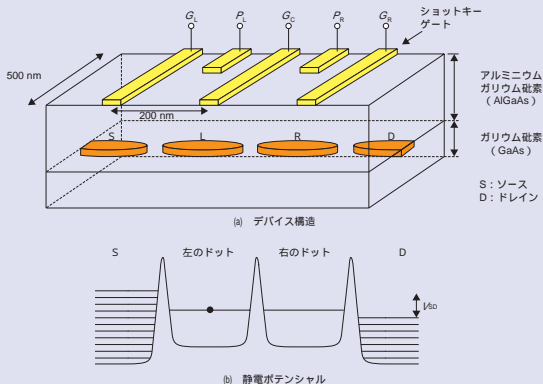


図1 半導体二重量子ドット

のことで、半導体電荷量子ビットは余剰電子を1つ持つ二重量子ドットで構成されます。電子が左の量子ドットに存在する状態を $|0\rangle$ 、右の量子ドットに存在する状態を $|1\rangle$ と考えることができます。クーロン閉塞にある二重量子ドットは、電極との電子の出入りが無視できるため、二準位系と考えることができます。

量子状態は量子力学的ベクトルで表現されます。二準位系の量子状態を視覚的に表現するために、 $|0\rangle$ を北極に $|1\rangle$ を南極に持つ単位球（ブロッホ球）が用いられます（図2）。ブロッホ球上の任意の点が二準位系の量子状態に対応します。このように量子ビットでは $|0\rangle$ と $|1\rangle$ に対応した2つの量子状態から無数の重ね合わせ状態を実現することができます。半導体電荷量子ビットにおける重ね合わせ状

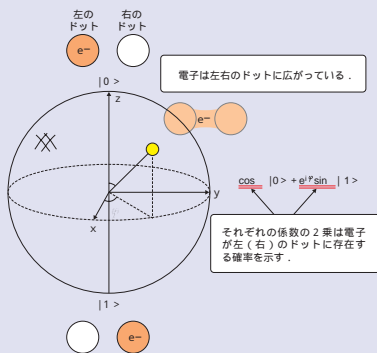


図2 半導体電荷量子ビットのブロッホ球表現

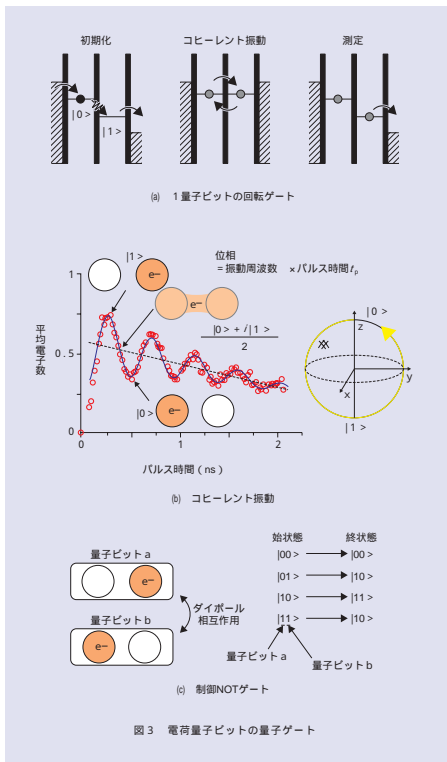
態とは、電子が左のドットと右のドットの両方に広がった状態を指します。

1つの量子ビットの電子位置を測定すると、電子が左のドットに存在する ($|0\rangle$) か、右のドットに存在する ($|1\rangle$) か、いずれかの結果が得られます。これだけでは測定前にその量子ビットがどのような状態であったかを判断することはできません。もし同じ状態にある多くの量子ビットを測定したとすると、 $|0\rangle$ または $|1\rangle$ という答えを得る確率はそれぞれの係数の2乗と一致します。

量子計算機は、無数の異なる重ね合わせ状態を用いて計算を行う超並列計算機といえます。最終的な計算の出力は、それぞれの量子ビットの出力が $|0\rangle$ であるか $|1\rangle$ であるかを測定することによって得られます。量子ビットは可干渉性 (coherency) を持つので、観測者にとって望ましい答えが建設的な干渉効果によって得られ、望ましくない解は相殺的干渉によって打ち消されます。量子ビットが可干渉性を失う時間をデコヒーレンス時間と呼びます。すなわち、量子計算はデコヒーレンス時間内に終了しなければなりません。どれだけ長いデコヒーレンス時間を持つ量子ビットをつくれるかということが、量子計算機実現のための課題となります。

1 量子ビットの回転ゲート

1量子ビットのコヒーレント制御について説明します。初めに左の量子ドットに電子が存在するとします。量子ドットはトンネル障壁を介してつながっているため、電子は量子ドット間をコヒーレントに振動します。すなわち、位相は時間とともに変化します。NTT物性科学基礎研究所では高速電圧パルスを用い、ソース・ドレイン電



圧を調製することによって、この電子の振動 (コヒーレント振動) の時間発展を観測しました (図3(a))。高速パルスによるコヒーレント制御を時間軸に沿って詳しく説明します。

初めにソース・ドレイン間に大きな

電圧を印加し、左右のドットを非共鳴な状態にします。左のドットから右のドットへの非弾性トンネルの速度を十分に小さくすると、電子の流れはこの非共鳴トンネルによって律速されます。このようにして余剰電子が実効的に左

の量子ドットに局在した状態 ($0 >$) をつくり出すことができます。これが量子ビットの「初期化」です。

初期化が完了後、ある時刻にパルス電圧によってソース・ドレイン電圧を0にします。このとき $0 > 1 >$ は共鳴し、電子は左右の量子ドット間を振動します。これが量子ビットの「コヒーレント制御」です。振動周波数は2つのドットの結合エネルギーに比例します。この振動をパルス時間 t_p 保ちます。

パルス時間 t_p 後でソース・ドレイン電圧を再び元の値に戻します。このとき電子が右側のドットに存在すればトンネル障壁を通して右側の電極に抜け、電流として観測されます。一方、余剰電子が左の量子ドットにいる場合、系は初期状態と全く同じであり、電流は流れません。これが量子ビットの「測定」です。観測される電流は、測定時に電子が右側のドットに存在する確率に比例します。NTT物性科学基礎研究所では、パルス時間を変化させながらコヒーレント電流を観測しました。図3(b)にあるように電流は時間とともに振動していることが観測されました。このことは右側の量子ドットの平均電子数が時間とともに振動していることを意味します。この一連のパルス操作は、一量子ビットの回転ゲートに対応します。古典的な論理ゲートでは、ビットの状態を0から1に、あるいは1から0に反転させるNOTゲートに対応します。

振動の減衰

観測されたコヒーレント振動は時間とともに振動は減衰しています。これは外乱によって量子ビットが可干渉性を失っていくこと(デコヒーレンス)を意味します。NTT物性科学基礎研究

所では、この振動の減衰を詳細に解析することによって、半導体電荷量子ビットにおける外乱の原因として結晶中の音波や背景電荷の揺らぎなどが重要であることを示しました。

ここでは古典力学からの類推を用いて振動の減衰について考察してみましよう。バネに吊るされた重りの振動を考えます。このとき重りには変位に比例した大きさの力が振動中心に向かって働いています。何の外乱もなければこの振動は永遠に続くことでしょう。しかし実際には摩擦や空気抵抗(総称して摩擦と呼ぶことにします)によって振動は減衰します。多くの場合、摩擦は重りの速さに比例します。このとき振動の振幅は指数関数的に減少していきます。この例にあるような古典的な振動の減衰はエネルギー散逸を伴います。しかし量子ビットではエネルギー散逸を伴わないデコヒーレンスも存在します。

実験で観測されたコヒーレント振動の時間依存性も指数関数的に減衰する三角関数で近似することができます。この近似から求められた電荷量子ビットのデコヒーレンス時間は約1 nsです。このデコヒーレンス時間が十分であるというわけではありません。半導体電荷量子ビットは多くの制御パラメータを持っているので、よりデコヒーレンスに強い量子ビットの研究を行っていく予定です。

今後の展望

1 量子ビットの回転ゲートと2 量子ビットの制御NOT (CONTROL-NOT) ゲートの組み合わせは、量子計算における万能ゲートです。図3(c)にあるように、電荷量子ビットを2つ並列に配置すると、電子のクーロン斥力のため量子ビット間に相互作用が生じます。

この相互作用を用いることによって制御NOTゲートを実現できるものと考えられています。NTT物性科学基礎研究所では並列された二重量子ドットを用い、制御NOTゲート動作の実験的検証を行っていく予定です。

参考文献

- (1) 藤澤: “単一電子ダイナミクスによる量子計算の可能性”, NTT技術ジャーナル, Vol.15, No.4, pp.58-61, 2003.



林 稔晶

量子計算機が古典計算機よりも高い計算能力を示すためには、少なくとも1000個以上の量子ビットを並列に制御する必要がありますといわれています。ここで述べたような研究を通じて半導体量子ドットを用いた高集積な量子計算機の実現を目指します。

問い合わせ先
NTT物性科学基礎研究所
TEL 046-240-3447
FAX 046-240-4727
E-mail toshiaki@nttbl.jp