

学位論文題名

A study on quantum computation using electron spins of semiconductor quantum dots

(半導体量子ドットの電子スピンを用いた量子演算に関する研究)

学位論文内容の要旨

Feynmanによって提案された重ね合わせの原理と波動関数の非局在性をコンピュータに適用した量子コンピュータは、Peter Shorによる素因数分解の多項式時間アルゴリズムの発見から、実験、理論共に研究が盛んに行われている。例えば素因数分解の難しさに基づいた(現在の古典アーキテクチャでは多項式時間アルゴリズムが発見されていない)RSA暗号は量子演算を用いると理論的にはわずかに数秒で解くことができる。古典的なコンピュータでビットと呼ばれる(0,1)のデジタル信号の代わりに、量子演算では2つの状態の量子力学的重ね合わせ状態(量子ビットと呼ばれる)を用いて演算を行う。N個の量子ビットで 2^N 個の状態全てを同時に表現できる。量子演算は重ね合わせ状態と干渉効果により、超並列処理が可能になるため、現在の古典演算では計算時間が指数関数的に増大してしまう問題に対して多項式時間で解を与えることができ、計算が桁違いに高速になる。また演算自体の可逆性から原理的にはエネルギー損失が無い。これら量子情報に関する研究は、ここ数年諸外国、特に米国で盛んに研究されている。このような中で、3重結合量子ドットにおける2電子のスピン状態を用いた新しい量子演算スキームを提案した。サイズの異なる量子ドットでは、電子のゼーマンエネルギーと量子化エネルギーが異なることによるこの提案は電子準位間の遷移のエネルギー選択性を利用するもので、スピン間交換相互作用を利用する従来の提案とは異なっている。論文の目的は本提案の安定性を理論的に検証し、また、その拡張性と実用性を明らかにすることにある。

Deutch等が示しているように量子ビットに対して1-bit回転と2-bit制御NOTと呼ばれる2種類のユニタリーゲートを作用させることができれば全ての量子演算が可能である。物理的に実現できる量子ゲートを提案することは、量子演算を実現する上でキーとなる。量子演算を実現する物理系に要求される条件(DiVincenzo's 5 criteria)として、

- 量子ビットの実現とビット数の拡張性
- 初期化の可能性
- デコヒーレンス時間を1回の演算時間(ゲート時間)で割った演算回数の多さ
- 量子ゲート動作の可能性
- 最終結果の観測の可能性

が挙げられる。特に新しいモデルを考案するにあたって量子演算の特徴である並列処理能

力に念頭をおくことは応用的観点から重要である。

半導体量子ドット中に閉じ込められた電子のスピンアップとスピンドアウンの重ね合わせ状態(電子の基底状態)を量子ビット(スピン-1/2系)として用いる。量子コンピュータの実現には1-bit回転と2-bit制御NOTの実現がキーとなる。1-bit回転は任意の量子ビットを任意の方向に回転する量子ゲートである。任意の量子ビットへのアクセスはゼーマンエネルギーの量子ドットのサイズ依存性により実現し、電子スピン共鳴により回転する。2-bit制御NOTは一方の量子ビット(制御ビット)の状態が $|1\rangle$ のときのみ、他方の量子ビット(標的ビット)を反転させる($|0\rangle \leftrightarrow |1\rangle$)量子ゲートである。これについては、サイズの異なる3つの量子ドットからなる系を基本単位として考える。静磁場を印加すると電子の量子準位とg因子のサイズ依存性を利用してどの準位間のエネルギー差も異なる6準位系が形成できる。テラヘルツ波による準位間の共鳴 π パルス励起(光支援トンネル)により、スピンドアウンの状態($|1\rangle$)が左の量子ドットから中央の量子ドットへトンネルする。このトンネルリング量子ビットによるクーロンブロックードによって右から中央の量子ドットへのトンネルを制御する。次に1-bit回転と同様に左の量子ドットの電子スピン状態を反転する。最後に中央にトンネしている状態を元に戻す。

この提案の特徴は、磁場の振動数と共鳴光の周波数という2つのエネルギー選択的なプロセスを用いていることである。これらの周波数は外部からチューニングが可能であるため、量子ゲートの作製を極めて容易にする。また多数の量子ビットへの拡張が容易である。エネルギー選択性を用いて量子ビットを制御できるか否かは、各遷移の所要時間に依存する。各遷移時間を等しくしたとき、いくつの量子ドットが量子演算に使えるかを試算した結果、100 psの遷移時間で量子ドット数は100を超える。

次に上記、演算スキームの基本単位である非対称3重結合量子ドットにおける2電子間のクーロン相互作用を数値計算により求めた。その結果、非対称3重結合量子ドットでは量子ゲート動作中にクーロン相互作用によって意図しない状態に遷移してしまうエラーの存在を確認した。このエラーは電子の存在しない空の量子ドットがあり、サイズの異なる量子ドット列からなる系で顕著に現れる。しかし、量子ドット間隔を適切にとることによりエラーは1%以下に抑えられることがわかった。またこの結果をもとに上記の量子ゲートの動作を密度行列の時間発展により確認した。

新しい提案は拡張性と実現性に優れていると位置付けられることから、固体量子コンピュータ実現の新しい方向性を示すものとして意義がある。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 武 藤 俊 一
副 査 教 授 田 村 信 一 朗
副 査 教 授 末 宗 幾 夫
副 査 助 教 授 足 立 智

学 位 論 文 題 名

A study on quantum computation using electron spins of semiconductor quantum dots

(半導体量子ドットの電子スピンを用いた量子演算に関する研究)

次世代の情報技術として量子情報処理の進展が急である。量子暗号通信についてはプラグ・アンド・プレイのシステムがネット上で売りに出されており、また 1.55 ミクロン帯で 87km の無中継通信が可能になった。量子中継器が実現すれば量子暗号通信の通信距離を飛躍的に増大させることができる。より高度の情報処理として量子コンピューティングへの期待も高い。ショアのアルゴリズムによる因数分解と暗号解読、グローバーの検索アルゴリズムによるデータベース検索などが可能になる。現在はまだ、他の目立った応用は報告されていないがハードウェアが実現すれば新しい応用も拓けて来るものと期待される。ハードウェアの提案は多数あり、既に NMR を用いた量子コンピューティングでは 7 量子ビットを用いた因数分解がデモンストレーションされている。またジョセフソン素子を用いて固体版でも Qubit 間の相互作用が報告されている。

量子ドットの電子スピンは将来の大規模量子コンピューティング実現へ向けての有力候補の一つである。半導体の電子スピンは核スピンの影響を受け易く、デコヒーレンスが桁違いに短いことが指摘されている。しかしながら量子ドットでは電子のスピン緩和機構の殆どが抑制されることが理論的には予測でき、デコヒーレンスの抑制が期待できる。特に光半導体では、光学遷移の選択則により光 Qubit からスピン Qubit への変換が可能になるという利点もある。

量子ドットの電子スピンを用いた量子演算としては Loss と DiVincenzo による提案がパイオニア的である。電子スピン間の交換相互作用を用いたもので、電子スピンを用いたその後の数多い提案の殆どがこの考えに基づいている。電子スピン間の交換相互作用は電子が区別できない同種粒子（フェルミ粒子）であることから生じる根本的な相互作用でありこれを用いることは極めて自然な提案である。しかしながら、量子演算においてはこの相互作用をオン/オフする必要がある、そのための具体的な手法も提案されているが、容易で

はない。

本論文の著者は、これとは全く異なる量子演算を独自に提案した。量子ドットの電子スピンの光支援トンネル（ラビ振動）とそのクーロンブロッケイドを用いたもので、テラヘルツ光による共鳴トンネル過程と共鳴磁場による磁化反転というエネルギー選択的なプロセスを用いているために外部からの tuning が可能で、Loss-DiVincenzo よりも遥かに実現し易い提案と考えている。量子演算手法についての日本からの基本的な提案は殆どなく、その点でもこの提案は特筆に価する。

本論文は全7章から構成されている。

第1章では、序論として量子コンピューティングの簡単な歴史を紹介している。

第2章では、新しい情報技術としての量子コンピューティングの位置付けについて言及する。

第3章では量子コンピューティングのハードウェアに必要とされる要件、いわゆる DiVincenzo の5つの条件を中心に述べる。

第4章では提案に関連した量子ドットの物性について述べる。

第5章では量子ドットで量子コンピューティングを行うための光制御について述べる。

第6章は本論文の中心となる電子スピンをもちいた量子コンピューティングの提案である。提案内容と共に、現実的なハミルトニアンを用いた場合の計算機シミュレーションによる提案の確認が行われる。本提案をスピン間の交換相互作用が無視できない場合に拡張することを想定して、交換相互作用を用いた演算についてもクーロン相互作用の影響を評価している。第3章でのべた条件との対応についても解析する。

第7章は結論である。

これを要するに、著者は量子ドットの電子スピンを用いた量子コンピューティングの新しい手法を提案し、計算機実験により、提案を実証し、また量子演算が機能する条件を明らかにしたものである。この知見は半導体工学、応用物理学の発展に寄与するところ大なるものがある。よって著者は、北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。