

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第5910968号
(P5910968)

(45) 発行日 平成28年4月27日 (2016. 4. 27)

(24) 登録日 平成28年4月8日 (2016. 4. 8)

(51) Int. Cl. F I
 HO 1 L 39/00 (2006. 01) HO 1 L 39/00 Z A A G
 B 8 2 B 1/00 (2006. 01) B 8 2 B 1/00 Z N M

請求項の数 5 (全 13 頁)

<p>(21) 出願番号 特願2012-521447 (P2012-521447) (86) (22) 出願日 平成23年6月17日 (2011. 6. 17) (86) 国際出願番号 PCT/JP2011/063881 (87) 国際公開番号 W02011/162172 (87) 国際公開日 平成23年12月29日 (2011. 12. 29) 審査請求日 平成26年6月16日 (2014. 6. 16) (31) 優先権主張番号 特願2010-142978 (P2010-142978) (32) 優先日 平成22年6月23日 (2010. 6. 23) (33) 優先権主張国 日本国 (JP)</p>	<p>(73) 特許権者 504171134 国立大学法人 筑波大学 茨城県つくば市天王台一丁目1番1 (74) 代理人 100098589 弁理士 西山 善章 (72) 発明者 小泉 裕康 茨城県つくば市天王台一丁目1番1 国立 大学法人筑波大学内 審査官 須原 宏光</p>
--	--

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 量子コンピュータ

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

量子ビットを使用して量子演算を行う量子コンピュータにおいて、
 製造時に1つ以上のホール、又は1つ以上の電子がドーピングされたモット絶縁体薄膜を有する量子ビット基板と、

前記量子ビット基板に磁場を印加して、前記モット絶縁体薄膜に形成された前記各ホール又は前記各電子を中心にしたスピン渦を生成すると共に、スピン渦に対応した右回り又は左回りのループ電流を生成し、その2状態にエネルギー差を与え量子ビットとする磁場発生ユニットと、

量子演算データを含み、前記各ホール又は前記各電子を前記2状態の量子ビットにする電磁波を生成して、前記量子ビット基板に照射する量子演算データ供給ユニットと、

ビーム径を絞った強力コヒーレント光パルスを用いて前記量子ビット基板に照射し、前記量子ビット基板での反射光又は透過光の偏光を解析して、前記量子ビット基板の量子演算結果を取り出す量子演算結果読み出しユニットと、
 を備えたことを特徴とする量子コンピュータ。

【請求項2】

請求項1に記載の量子コンピュータにおいて、
 前記モット絶縁体薄膜として、ホールドーピング型銅酸化物超伝導体薄膜を使用する、ことを特徴とする量子コンピュータ。

【請求項3】

請求項 1 に記載の量子コンピュータにおいて、
前記量子ビット基板に量子演算を行う前に、走査型プローブ顕微鏡の探針を動作して、前記モット絶縁体薄膜にドーブされた前記各ホール又は前記各電子の位置を調整する、ことを特徴とする量子コンピュータ。

【請求項 4】

請求項 1 に記載の量子コンピュータにおいて、
前記磁場発生ユニットによって、前記量子ビット基板に不均一な磁場を印加し、
前記量子ビット基板に量子演算を行う前に、各量子ビットのエネルギー状態の差を調整する、ことを特徴とする量子コンピュータ。

【請求項 5】

請求項 1 に記載の量子コンピュータにおいて、
初期化指示が入力されたとき、前記磁場発生ユニットによって、前記量子ビット基板に強い磁場を印加して、前記モット絶縁体薄膜に形成された前記各ホール、又は前記各電子に対応するループ電流をすべて右回り又はすべて左回りに統一し、前記量子ビット基板を初期化する、

ことを特徴とする量子コンピュータ。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、例えばモット絶縁体薄膜に磁場を印加する際に、モット絶縁体薄膜にドーブしたホール、又は電子の周囲に発生するループ電流を利用して、量子ビットを定義し、量子演算を行う量子コンピュータに関する。

【背景技術】

【0002】

量子コンピュータは、1ビットについて“0”か“1”の値しか持ち得ない従来型コンピュータに対して、1ビットにつき“0”と“1”の値を任意の割合で重ね合わせて保持することができ、n量子ビットであれば2のn乗の状態を並列的に計算することが可能である。このため、量子コンピュータは、例えば原子核スピンや光子の偏極等の量子ビットを用いる。

【0003】

現在までに、下記に示す量子ビットを利用した量子コンピュータが提案されている（例えば、特許文献1乃至3を参照）。

(1) 核磁気共鳴を利用する（原子核のスピン状態を利用）。

(2) イオントラップを利用する（イオンの電子状態を利用）。

(3) 量子光学を利用する（光子の偏極を利用）。

(4) 量子ドットを利用する（電荷数の違う状態を利用）。

(5) 超伝導量子ビットを利用する（磁束又はクーパー対の数を利用）。

【0004】

そして、量子コンピュータにおいて用いられる量子ビットは、当然のことながら、以下に示す3つの属性が必要である。

(1) 量子状態が計算中安定であること。

(2) 量子状態の変化を制御出来ること。

(3) 大規模集積化が可能であること。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0005】

【特許文献1】特開2006-135054号公報

【特許文献2】特開2003-227805号公報

【特許文献3】特開2003-260700号公報

【発明の概要】

10

20

30

40

50

【発明が解決しようとする課題】

【0006】

ところで、従来の量子コンピュータの内、例えば核磁気共鳴型の量子コンピュータは、次式に示すハミルトニアン（運動方程式）に基づき、量子ビットの定義及び制御を行っている。

【数1】

$$H = \sum_{i=1}^N \frac{\epsilon_i}{2} I_i + \sum_{i>j} J_{ij} I_i I_j$$

但し、ここで、 H ：ハミルトニアン、 N ：量子ビットの総数、 I_i ： i 番目の核スピンの量子状態（スピンの向きが上向きなら1、下向きなら-1）、 ϵ_i ： i 番目の量子状態間のエネルギー差、 J_{ij} ： i 番目と j 番目の核スピン間に働く相互作用のエネルギー、を意味する。

10

【0007】

また、上記原子核のスピンの状態を量子ビットにした核磁気共鳴型量子コンピュータで用いることができる制御可能な量子ビットとして、12量子ビット（2006年に達成された数値）が最高値でありこれがすべての量子コンピュータの最高記録である。現在までに提案されている量子ビットでは、その数を飛躍的に増大することは困難であると考えられている。

【0008】

20

しかし、量子コンピュータの実用化のためには、100量子ビット以上が必要であり、従来から、100量子ビット以上を得ることができる量子ビットの開発が強く望まれていた。しかし、従来の量子コンピュータで用いられる量子ビットの属性は、上記した3つの主要な属性を必ずしも満足するものではなくその達成の見込みはなかった。

【0009】

本発明は、上記の事情に鑑みてなされたものであって、安定な量子ビットを生成して、1素子当たりの量子ビット数を100量子ビット以上とすると共に、量子ビットに必要な属性、すなわち計算中における量子状態の安定性、量子状態の制御性を確保することができ、さらには量子ビットの大規模集積化を可能とする量子コンピュータを提供することを目的としている。

30

【0010】

また、本発明は、結晶の育成方法が確立し、比較的安価に作成可能な銅酸化物超伝導体を用いて、モット絶縁体薄膜を製作することができ、これによって量子ビット基板の製造コストを低く抑えながら、1素子当たりの量子ビット数を100量子ビット以上にすることができると共に、量子ビットに必要な属性、すなわち計算中において量子状態を安定に保つことができ、また量子状態の変化を制御することができ、さらに量子ビットを大規模集積化することができる量子コンピュータを提供することを目的とする。

【0011】

また、本発明は、量子ビット基板にドーピングされた各ホールの位置、各電子の位置と各量子ビットの関係を最適化させることができ、さらに1素子当たりの量子ビット数を100量子ビット以上にすることができると共に、量子ビットに必要な属性、すなわち計算中において量子状態を安定に保つことができ、また量子状態の変化を制御することができ、さらに量子ビットを大規模集積化することができる量子コンピュータを提供することを目的としている。

40

【0012】

さらに、本発明は、量子ビット基板にドーピングされた各ホールの位置、各電子の位置と共に、各量子ビットの量子状態間のエネルギー差を調整することにより、1素子当たりの量子ビット数を100量子ビット以上とし、さらに量子ビットを大規模集積化することができる量子コンピュータを提供することを目的としている。

【課題を解決するための手段】

50

【0013】

本発明は、上記の目的を達成するために、量子ビットを使用して量子演算を行う量子コンピュータにおいて、製造時に1つ以上のホール又は1つ以上の電子がドーブされたモット絶縁体薄膜を有する量子ビット基板と、前記量子ビット基板に磁場を印加して、前記モット絶縁体薄膜に形成された前記各ホール又は前記各電子を中心にしたスピン渦を生成すると共に、スピン渦に対応した右回り又は左回りのループ電流を生成し、その2状態にエネルギー差を与え量子ビットとする磁場発生ユニットと、量子演算データを含み、前記ループ電流が生成された量子状態系を量子ビットとして制御する電磁波を生成して、前記量子ビット基板に照射する量子演算データ供給ユニットと、反射光または透過光の偏光依存性によるループ電流の回転方向を特定し、前記量子ビット基板の量子演算結果を取り出す量子演算結果読み出しユニットとを備えたことを特徴としている。

10

【0014】

また、本発明は、請求項1に記載の量子コンピュータにおいて、前記モット絶縁体薄膜として、ホールドーブ型銅酸化物超伝導体薄膜を使用することを特徴としている。

【0015】

また、本発明は、前記量子ビット基板に量子演算を行う前、走査型プローブ顕微鏡の探針を動作して、前記モット絶縁体薄膜にドーブされた前記各ホール、又は前記各電子の位置を調整することを特徴としている。

【0016】

また、本発明は、前記磁場発生ユニットによって、前記量子ビット基板に不均一な磁場を印加し、前記量子ビット基板に量子演算を行う前、各量子ビットの状態間のエネルギー差を調整することを特徴としている。

20

【0017】

さらに、本発明は、前記量子コンピュータにおいて、初期化指示が入力されたとき、前記磁場発生ユニットによって、前記量子ビット基板に強い磁場を印加して、前記モット絶縁体薄膜に形成された前記各ホール、又は前記各電子に対応するループ電流をすべて右回り、又はすべて左回りに統一し、前記量子ビット基板を初期化することを特徴としている。

【発明の効果】

【0018】

本発明の請求項1に記載の量子コンピュータでは、安定な量子ビットを生成して、1素子当たりの量子ビット数を100量子ビット以上にすることが可能であると共に、量子ビットに必要な属性、すなわち計算中における量子状態の安定性、量子状態の制御性を確保することができ、さらに量子ビットの大規模集積化を可能にすることができる。

30

【0019】

また、請求項2の量子コンピュータでは、比較的安価に作成できるホールドーブ型銅酸化物超伝導体を用いてモット絶縁体薄膜を製作することができ、これによって量子ビット基板の製造コストを低く抑えながら、1素子当たりの量子ビット数を100量子ビット以上にすることが可能であると共に、量子ビットに必要な属性、すなわち計算中において量子状態を安定することができ、また量子状態の変化を制御することができ、さらに量子ビットを大規模集積化することができる。

40

【0020】

また、請求項3の量子コンピュータでは、量子ビット基板にドーブされた各ホールの位置、各電子の位置などを最適化して、各量子ビットの関係を最適化することができ、さらに1素子当たりの量子ビット数を100量子ビット以上にすることが可能であると共に、量子ビットに必要な属性、すなわち計算中において量子状態を安定することができ、また量子状態の変化を制御することができ、さらに量子ビットを大規模集積化することができる。

【0021】

また、請求項4の量子コンピュータでは、量子ビット基板にドーブされた各ホールの位

50

置、各電子の位置と共に、量子ビット基板に形成される各量子ビットの量子状態間のエネルギー差を調節して、各量子ビットの関係を最適化することができ、さらに1素子当たりの量子ビット数を100量子ビット以上にすることが可能であると共に、量子ビットに必要な属性、すなわち計算中において量子状態を安定することができ、また量子状態の変化を制御することができ、さらに量子ビットを大規模集積化することができる。

【0022】

また、請求項5の量子コンピュータでは、量子ビット基板に量子演算を行う前に、簡単な操作で、量子ビット基板を初期化することができ、さらに1素子当たりの量子ビット数を100量子ビット以上にすることが可能であると共に、量子ビットに必要な属性、すなわち計算中において量子状態を安定することができ、また量子状態の変化を制御することができ、さらに量子ビットを大規模集積化することができる。

10

【図面の簡単な説明】

【0023】

【図1】本発明による量子コンピュータの一形態を示すブロック図である。

【図2】図1に示す量子コンピュータの動作例を示すフローチャートである。

【図3】図1に示す量子ビット基板にドーパされたホール4の位置、ループ電流の回り方向を調整するときの動作例を示す模式図である。

【図4】図1に示す量子ビット基板に対し、量子演算データを供給するときの動作例を示す模式図である。

【図5】図1に示す量子ビット基板から量子演算結果を読み出すときの動作例を示す模式図である。

20

【図6】図1に示す量子ビット基板から量子演算結果を読み出すときの動作例を示す模式図である。

【図7】本発明による量子コンピュータで使用する量子ビット基板の概要を示す斜視図である。

【図8】図7に示す量子ビット基板内にドーパされたホールとホールに対応して生成されるスピン渦との関係を示す模式図である。

【図9】図7に示す量子ビット基板内に生成される右回りのループ電流と、左回りのループ電流との組み合わせ例を示す模式図である。

【発明を実施するための形態】

30

【0024】

最初に、本発明による量子コンピュータの詳細に説明に先立ち、本発明で使用する量子ビットについて説明する。

【0025】

図7は、本発明による量子コンピュータで使用する量子ビット基板の概要を示す斜視図である。図7に示す量子ビット基板1は、 SrTiO_3 のベース基板2上にランタン系又はビスマス系又はイットリウム系のホールドーパ型銅酸化物超伝導体薄膜3を成長させたものである。この薄膜3内の CuO_2 平面を2次元モット絶縁体薄膜として使用する。この薄膜内では強い電子格子相互作用によりドーパされたホール4が低温で局在化する。銅酸化物超伝導体の組成により、薄膜作成行程で、複数のホール4がドーパされた2次元モット絶縁体薄膜が銅酸化物超伝導体薄膜3の内部に構成されている。

40

【0026】

そして、図8の模式図に示す如く液体ヘリウムなどによって、量子ビット基板1を冷却した状態で、不均一の強い磁場を印加する。これにより、銅酸化物超伝導体薄膜3の CuO_2 平面内にドーパされた各ホール4の中心(点A、M)を軸にしたスピン渦6が発生し、各スピン渦6が結合/分岐して右回りのループ電流5、又は左回りのループ電流5が生成される。このように、本願の発明者は、ホール4の周りにスピン渦6が生じると、その周りに安定的なループ電流5が生成することを理論的に証明し、さらには、銅酸化物にスピン渦とそれに伴うループ電流が生成することを実験結果の理論シミュレーションによって確認したのである。

50

【 0 0 2 7 】

この状態で、銅酸化物超伝導体薄膜 3 内に形成された各ホール 4 の中から 1 つのホール 4 を選択した後、走査型プローブ顕微鏡の探針を、選択したホール 4 部分に近接する。次いで、探針の位置をずらし、選択したホール 4 の位置を調整する。以下、他の各ホール 4 についても、同じ処理を施して異なる量子ビット間の相互作用が適度な大きさになるように並べる。さらに、不均一磁場を利用し、各量子ビットの量子状態間のエネルギー差がすべて異なり、それぞれの量子ビットの単一ビット操作が独立して行えるようにする。

【 0 0 2 8 】

これにより、ホール 4 の数が “ n ” であれば、“ 2ⁿ ” 個の状態のいずれか、例えばホール 4 の数が “ 4 ” であれば、図 9 (a) 乃至 (h) に示す 8 つの状態、又はこれら 8 つの状態を各々、反転させた 8 つの状態 (右回りのループ電流 5 を左回りのループ電流 5 に反転させ、左回りのループ電流 5 を右回りのループ電流 5 に反転させた 8 つの状態) のうちのいずれか 1 つの状態になる。

10

【 0 0 2 9 】

本発明では、この量子ビット基板 1 を用い、各ホール 4 毎のスピントラップ 6 が結合 / 分岐して生成される各右回りのループ電流 5 と、各左回りのループ電流 5 とによって、次式に示すハミルトニアンに基づき、量子ビットを制御する。

【 数 2 】

$$H = \sum_{i=1}^N \frac{\epsilon_i}{2} w_i + \sum_{i>j} J_{ij} w_i w_j$$

20

但し、ここで、H : ハミルトニアン、N : 量子ビットの総数、 w_i : i 番目のループ電流 5 の量子状態 (ループ電流 5 が右回りなら “ 1 ”、左回りなら “ - 1 ”)、 ϵ_i : i 番目の量子状態間のエネルギー差、 J_{ij} : i 番目と j 番目のループ電流間に働く相互作用のエネルギー、を意味する。

【 0 0 3 0 】

この際、不均一な磁場と、走査型プローブ顕微鏡とを用いて、各ホール 4 の位置、各量子ビットの量子状態間のエネルギー差を調整しているため、量子ビットの制御が容易である。

30

【 0 0 3 1 】

また、量子演算を行う場合には、演算対象データに対応する量子演算データを生成すると共に、この量子演算データに対応した波長の強力な電磁波を決められた時間、決められた順番で量子ビット基板 1 に照射する。これにより、量子演算データに対応した新たな量子状態を生成することができる。

【 0 0 3 2 】

また、量子演算の演算結果を取り出す場合には、ビーム径を絞った強力コヒーレント光を生成し、これを量子ビット基板 1 の各量子ビットに照射する。この反射光または透過光の偏光依存性を測定し、演算終了後の各量子ビットの状態を得、演算結果を知ることができる。

40

【 0 0 3 3 】

図 1 は、本発明による量子コンピュータの一形態を示すブロック図である。図 1 に示す量子コンピュータ 1 1 は、操作員によって操作される入力装置 1 2 と、量子ビット基板 1 の各ホールの位置などを調整するとき使用される走査型プローブ顕微鏡 1 3 と、量子ビット基板 1 を用いて量子演算を行う演算装置 1 4 と、量子ビット基板 1 の量子演算結果を読み出して表示する出力装置 1 5 とを備えており、走査型プローブ顕微鏡 1 3、演算装置 1 4 を動作して、演算装置 1 4 内の量子ビット基板 1 にドーピングされた各ホール 4 の位置を調整した状態で、入力装置 1 2 から演算対象となる量子演算データに対応する電磁波 1 9 を出射して、量子ビット基板 1 に量子演算を行わせた後、出力装置 1 5 からビーム径を絞った強力コヒーレント光パルス 2 0 を出射して量子ビット基板 1 に照射し、反射光または

50

透過光の偏光依存性から、量子演算結果を測定し、画面表示する。

【0034】

入力装置12は、通常のコンピュータと同様に、キーボード、マウスなどの入力デバイスによって構成される入力ユニット16と、入力ユニット16から出力される演算対象データを量子演算データに変換するデータ変換ユニット17と、データ変換ユニット17から出力される量子演算データに対応した波長、光強度を持つ電磁波19を出射する電磁波出射ユニット18とを備えており、入力ユニット16が操作されて、量子演算準備指示、量子演算結果読取指示などの操作指示が入力されたとき、操作指示に応じた制御指示を生成して、演算装置14及び出力装置15を制御し、量子演算準備動作、量子演算結果読取動作等を行う。また、入力ユニット16を操作して、演算対象データと共に、量子演算指示が入力されたとき、入力された演算対象データを量子演算データに変換すると共に、量子演算データに対応した波長、光強度を持つ電磁波19を生成し、演算装置14の量子ビット基板1に、演算データに対応した照射時間、照射する。

10

【0035】

また、ビーム径を絞ったコヒーレントなx線ビームにより、ナノサイズの磁性やループ電流の検出が可能であることから、本量子コンピュータの出力装置15は、入力装置12からの制御指示に応じて、ビーム径を絞った強力コヒーレント光パルス20を生成して、演算装置14の量子ビット基板1に照射した後、量子ビット基板1からの反射光または透過光21を取り込んで、受信信号を生成する強力コヒーレント光パルス入出力ユニット22と、強力コヒーレント光パルス入出力ユニット22から出力される偏光の変化を解析して、量子演算結果を生成する反射光・透過光解析ユニット23と、この反射光・透過光解析ユニット23から出力される量子演算結果を取り込み画面表示する表示ユニット24と、を備える。

20

【0036】

ここで、入力装置12から読み取り開始を指示する読取指示信号(制御指示)が出力されたとき、ビーム径を絞った強力コヒーレント光パルス20を生成し、これを演算装置14の量子ビット基板1の各量子ビットに照射して、その反射光21を取り込んで、偏光を解析し、各量子ビットの状態を特定する。これをすべての量子ビットに対して行い量子演算の結果を得、演算結果を画面表示する。

【0037】

また、走査型プローブ顕微鏡13は、演算装置14内に配置され、量子ビット基板1を固定する固定台25と、操作員の手動操作によって、演算装置14内に入りさせ、また入力された位置データに基づき、下部側に配置された探針取付部をX-Y-Z方向に動かす3軸ステージ26と、3軸ステージ26の探針取付部に取り付けられ、量子ビット基板1の表面に近接した状態にされているとき、量子ビット基板1の表面状態を探る探針27と、演算装置14の近傍に配置される走査型プローブ顕微鏡本体28と、を備えている。

30

【0038】

ここで、走査型プローブ顕微鏡本体28は、操作員の操作内容に応じて、3軸ステージ26を制御して、探針27を移動し、量子ビット基板1の銅酸化物超伝導体薄膜3の表面状態を測定すると共に、銅酸化物超伝導体薄膜3内にドーパされた各ホール4の位置を調整する。そして、操作員の手動操作によって、3軸ステージ26が演算装置14内に入れられた後、操作員によって、走査型プローブ顕微鏡本体28が操作される。

40

【0039】

ここで、新たな位置データ、走査指示などが入力される毎に、3軸ステージ26を制御して、探針27の位置を移動し、量子ビット基板1の銅酸化物超伝導体薄膜3内にドーパされた各ホール4の位置を調整する。そして、量子ビット基板1に形成された各ホール4の位置調整が完了した後、操作員の手動操作によって、3軸ステージ26が演算装置14外に出され、これら3軸ステージ26、探針27によって、入力装置12から出射される強力コヒーレント光19、出力装置15から出射されるビーム径を絞った強力コヒーレント光パルス20、量子ビット基板1上からの反射光21が遮られないようにする。

50

【 0 0 4 0 】

また、量子ビット基板 1 は、 SrTiO_3 のベース基板 2 上にランタン系又はビスマス系又はイットリウム系のホールドーブ型銅酸化物超伝導体薄膜 3 を成長させたものである（図 7 参照）。銅酸化物中の CuO_2 平面を 2 次元モット絶縁体薄膜として使用し、銅酸化物の作成過程での組成により、複数のホールがドーブされた状態となっている。図 1 に示すように、演算装置 1 4 は、この量子ビット基板 1 の下方に配置され、不均一な磁力線 3 1 を発生して、量子ビット基板 1 に不均一な磁場を与える電磁石 2 9 と、液体ヘリウムを用いて、固定板 2 5、量子ビット基板 1、走査型プローブ顕微鏡 1 3 の探針 2 7、電磁石 2 9 などを冷却し、量子ビット基板 1 にドーブされた各ホール 4（図 3 参照）の位置、ループ電流 5（図 3 参照）などを安定化する冷却ユニット 3 0（図 1 参照）と、を備える。尚、軟 X 線コヒーレント光の透過光を読み出しに使用する場合は、量子ビット基板 1 を十分に薄くし、サンプルステージ 7（図 1 及び図 3 参照）に固定し、ホール 4（図 3 参照）の位置にビームがあたるように位置を調整できるようにする。

10

【 0 0 4 1 】

ここで、量子ビット基板 1 を冷却しながら、不均一な強い磁場を与えて、量子ビット基板 1 の銅酸化物超伝導体薄膜 3 内に右回りのループ電流 5、左回りのループ電流 5 を生成する。この状態で、走査型プローブ顕微鏡 1 3 の探針 2 7 によって、量子ビット基板 1 の表面が走査されたとき、走査内容に応じて、銅酸化物超伝導体薄膜 3 内に形成された各ホール 4 の位置を調整する。また、不均一磁場により各量子ビットの量子状態間のエネルギー差を異なるものにする。不均一磁場を演算開始前に一時的に強力にし、ループ電流の向きをそろえ、初期化を行う。初期化ののち、不均一磁場はもとにもどす。入力装置 1 2 から量子演算データを含む電磁波 1 9 が出射されて、量子ビット基板 1 に照射されたとき、各ホール 4 の状態、各ループ電流 5 の回り方向などを変更して、量子演算データに応じた量子演算を行う。すべての演算の終了後、出力装置 1 5 からビーム径を絞った強力コヒーレント光パルス 2 0 を量子ビット基板 1 に出射する。この強力コヒーレント光の反射光または透過光の偏光依存性を測定することにより、量子ビット基板 1 の量子状態を特定し、出力装置 1 5 に供給する。

20

【 0 0 4 2 】

次に、図 1 に示す構成図、図 2 に示すフローチャート、図 3 乃至図 6 に示す各模式図を参照しながら、量子コンピュータ 1 1 の動作を説明する。

30

【 0 0 4 3 】

まず、量子演算を開始する前に、操作員の手動操作によって、3 軸ステージ 2 6、金属探針 2 7 が演算装置 1 4 内に入れられる。

【 0 0 4 4 】

この後、入力装置 1 2 の入力ユニット 1 2 が操作されて、冷却開始指示が入力されると、冷却ユニット 3 0 が起動されて、量子ビット基板 1 乃至走査型プローブ顕微鏡 1 3 の探針 2 7 などが冷却される（ステップ S 1）。

【 0 0 4 5 】

次いで、操作員によって入力装置 1 2 の入力ユニット 1 2 が操作されて、磁場生成指示が入力されると、電磁石 2 9 が起動されて、量子ビット基板 1 に磁場が印加され、銅酸化物超伝導体薄膜 3 内にドーブされた各ホール 4 毎にスピン渦 6 が生成されると共に、これらの各スピン渦 6 に対応するように右回りのループ電流 5、左回りのループ電流 5 が生成される（ステップ S 2）。

40

【 0 0 4 6 】

この後、走査型プローブ顕微鏡本体 2 8 が操作されて、走査型プローブ顕微鏡 1 3 の探針 2 7 が動かされ、量子ビット基板 1 の銅酸化物超伝導体薄膜 3 内にドーブされた各ホール 4 の位置が調整する（ステップ S 3）。

【 0 0 4 7 】

この際、図 3 の模式図に示す如く電磁石 2 9 によって、量子ビット基板 1 に印加される磁場の強さが不均一にされていることから、各量子ビットの量子状態間のエネルギー差が

50

異なるものとなる。なお、符号 31 は電磁石 29 によって生成される磁力線を表している。

【0048】

さらに、量子ビット基板 1 にドープされた各ホール 4 の位置調整が完了した後、操作員の手動操作によって、3 軸ステージ 26 が演算装置 14 外に出され、量子ビット基板 1 の上部側に遮蔽物が無い状態にされる。そして、不均一磁場を一時的に強力にし、すべてのループ電流を右回り又は左回りとし、初期化したのち、もとの不均一磁場に戻す。

【0049】

この状態で、入力装置 12 の入力ユニット 16 などが操作されて、演算対象データが入力されると、入力装置 12 のデータ変換ユニット 17 によって、演算対象データが量子演算データに変換されると共に、電磁波出射ユニット 18 によって、量子演算データに対応した複数の波長光を含む電磁波 19 が生成されて、図 4 の模式図に示すように、演算装置 14 の量子ビット基板 1 に照射される。

10

【0050】

これにより、電磁波 19 に含まれている波長と照射時間に対応して、初期量子状態は量子状態が重なり合った状態に変化する。

【0051】

以下、入力装置 12 の入力ユニット 16 などが操作されて、演算対象データが入力される毎に、上述した量子演算動作が繰り返され量子状態が複雑に絡み合った状態が作り出される（ステップ S4 乃至 S6）。

20

【0052】

次いで、入力装置 12 の入力ユニット 16 などが操作されて、読取指示が入力されると、出力装置 15 の強力コヒーレント光パルス入出力ユニット 22 によってビーム径を絞った強力コヒーレント光パルス 20 が生成されて、図 5 の模式図に示すように量子ビット基板 1 の各量子ビットに照射される（ステップ S7）。量子ビット基板 1 からの反射光を強力コヒーレント光パルス入出力ユニット 22 で受信し、反射光解析ユニット 23 で偏光を解析することより、量子ビットの状態がわかる（図 6 参照）。すべての量子ビットの状態を測定し、量子演算結果を得る（ステップ S8）。量子演算結果は表示ユニット 24 で画面表示される。

【0053】

30

このように、この形態では、複数のホール 4 がドープされた銅酸化物超伝導体薄膜 3 を持つ量子ビット基板 1 に磁場を印加して、銅酸化物超伝導体薄膜 3 に形成された各ホール 4 を中心にしたスピン渦 6 を生成すると共に、各ホール 4 の位置、各スピン渦 6 に対応した右回りのループ電流 5、又は左回りのループ電流 5 を生成した状態で、量子演算データを含む電磁波 19 を量子ビット基板 1 に照射し、量子演算を行うようにしているので、各ループ電流 5 の安定性を利用して、量子ビットの値を安定することができ、これによって 1 素子当たりの量子ビット数を 100 量子ビット以上にすることができる。

【0054】

さらに、量子ビットに必要な属性、すなわち計算中における量子状態の安定性、量子状態の制御性を確保することができ、さらに量子ビットの大規模集積化を可能にすることができる。

40

【0055】

また、この形態では、量子ビット基板 1 を構成するモット絶縁体薄膜として、安価に製造が可能であるホールドープ型銅酸化物超伝導体薄膜を使用するようにしているので、量子ビット基板 1 の製造コストを低く抑えることができる。

【0056】

また、この形態では、量子ビット基板 1 に量子演算を行う前、走査型プローブ顕微鏡 13 の探針 27 を動作して、銅酸化物超伝導体薄膜 3 にドープされた各ホール 4 の位置を調整しているので、前記数式 2 で示される各量子ビットの関係を最適化することができる。

【0057】

50

また、この形態では、電磁石 29 によって、量子ビット基板 1 に不均一な磁場を印加し、量子ビット基板 1 に量子演算を行う前、走査型プローブ顕微鏡 13 の探針 27 を動作して、銅酸化物超伝導体薄膜 3 にドーピングされた各ホール 4 の位置を調整する際、不均一な磁場を利用し、各量子ビットの量子状態間のエネルギー差を異なるように調整しているため、各量子ビットの関係調整を容易にすることができる。

【0058】

また、入力装置 12 の入力ユニット 16 が操作されて、初期化指示が入力されたとき、電磁石 29 によって、強い磁力線 31 を生成して、量子ビット基板 1 に強い磁場を印加し、銅酸化物超伝導体薄膜 3 内にドーピングされた各ホール 4 に対応するループ電流 5 をすべて右回り、又はすべて左回りに統一し、量子ビット基板 1 を初期化する。このようにすることにより、量子ビット基板 1 に量子演算を行う前に、量子ビット基板 1 を初期化して、量子ビットを特定値にすることができる（請求項 5 の効果）。

10

【0059】

また、上述した形態では、複数のホール 4 がドーピングされた銅酸化物超伝導体薄膜を使用するようにしているが、複数の電子がドーピングされた銅酸化物超伝導体薄膜を使用するようにしても良い。また、2次元モット絶縁体薄膜に属する他の材料によって構成される薄膜に複数のホール 4、複数の電子をドーピングして、使用するようにしても良い。これにより、各ホール 4、各電子の回りにスピン渦 6 を発生して、右回りのループ電流 5、又は左回りのループ電流 5 を発生し、前記数式 2 で定義された量子ビットを生成することができる。

20

【0060】

また、上述した形態では、銅酸化物超伝導体薄膜 3 の表面で、原子配列が乱れ易いことから、銅酸化物超伝導体薄膜 3 の表面から少し、内部に入った層に複数のホール 4 をドーピングして、各ホール 4 の状態を安定するようにしているが、銅酸化物超伝導体薄膜 3 の表面にコーティングなどを施して、銅酸化物超伝導体薄膜 3 の表面で、原子配列が乱れ難くした場合には、銅酸化物超伝導体薄膜 3 の表面層に複数のホール 4 をドーピングするようにしても良い。

【産業上の利用可能性】

【0061】

本発明は、例えばモット絶縁体薄膜に磁場を印加している際に、モット絶縁体薄膜にドーピングしたホール、又は電子の周囲に発生するループ電流を利用して、量子ビットを定義し、量子演算を行う量子コンピュータに関するものであって、産業上の利用可能性を有する。

30

【符号の説明】

【0062】

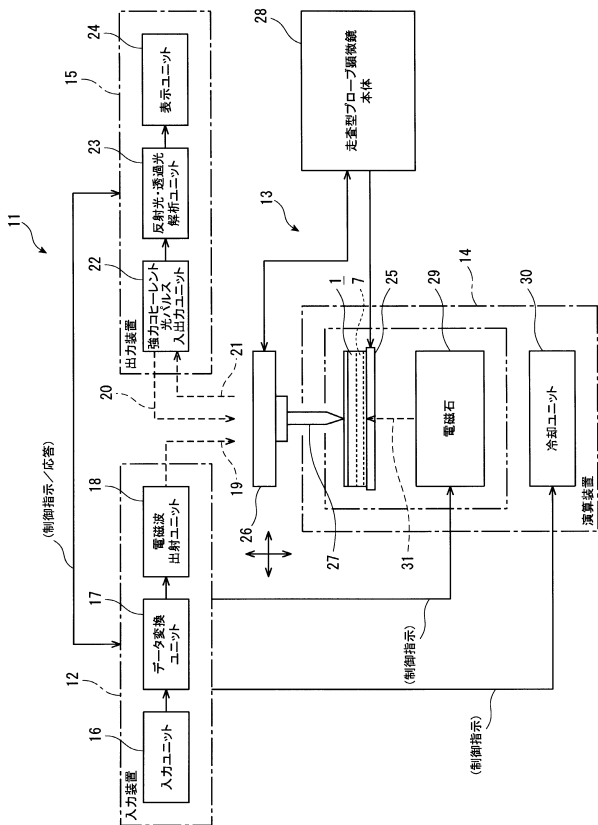
- 1：量子ビット基板
- 2：ベース基板
- 3：銅酸化物超伝導体薄膜（モット絶縁体薄膜）
- 4：ホール
- 5：ループ電流
- 6：スピン渦
- 7：サンプルステージ
- 11：量子コンピュータ
- 12：入力装置
- 13：走査型プローブ顕微鏡
- 14：演算装置
- 15：出力装置
- 16：入力ユニット
- 17：データ変換ユニット
- 18：電磁波出射ユニット（量子演算データ供給ユニット）
- 19：電磁波

40

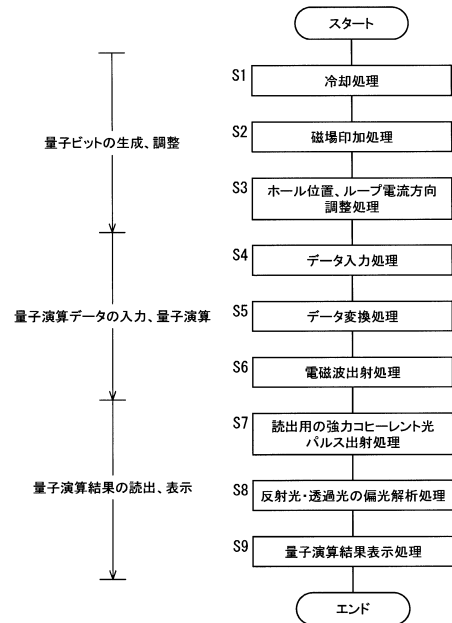
50

- 20 : ビーム径を絞った強力コヒーレント光パルス
- 21 : 反射光または透過光
- 22 : 強力コヒーレント光パルス入出力ユニット (量子演算結果読み出しユニット)
- 23 : 反射光解析ユニット (量子演算結果読み出しユニット)
- 24 : 表示ユニット
- 25 : 固定台
- 26 : 3軸ステージ
- 27 : 探針
- 28 : 走査型プローブ顕微鏡本体
- 29 : 電磁石 (磁場発生ユニット)
- 30 : 冷却ユニット
- 31 : 磁力線

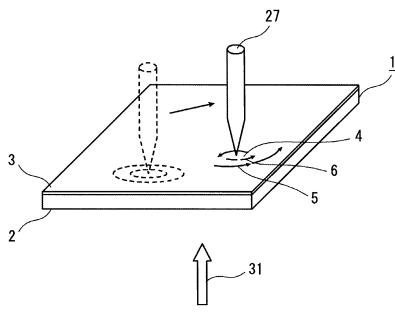
【図1】



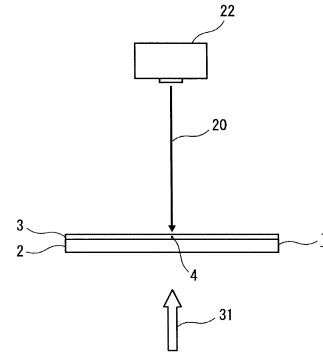
【図2】



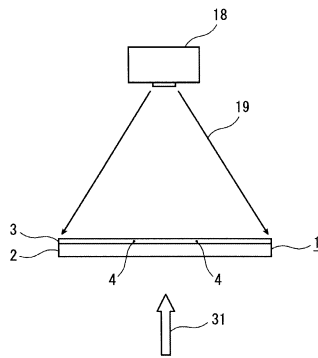
【図3】



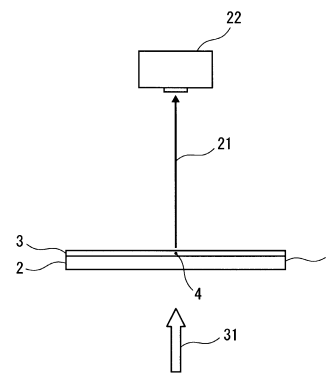
【図5】



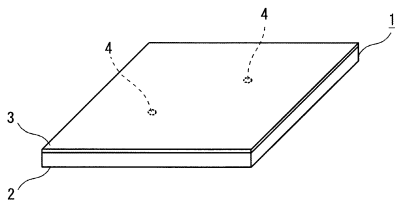
【図4】



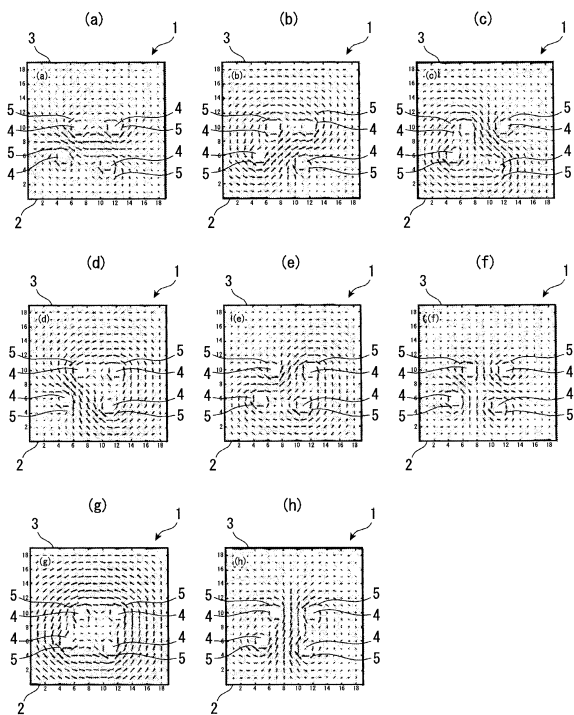
【図6】



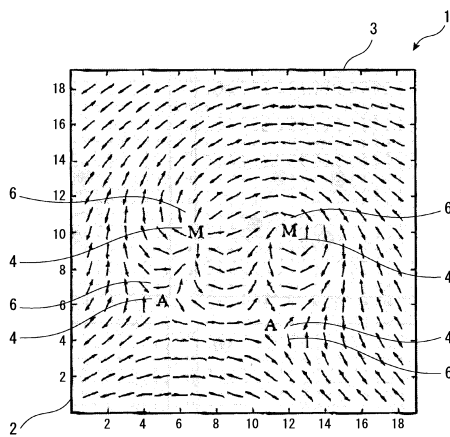
【図7】



【図9】



【図8】



フロントページの続き

(56)参考文献 特表2008-539480(JP,A)
特表2008-527684(JP,A)
特表2007-516610(JP,A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

H01L 39/00

H01L 29/66

H03K 19/18

JSTPlus/JST7580(JDreamIII)