



## 【特許請求の範囲】

## 【請求項 1】

それぞれのエネルギー状態  $E_0$  および  $E_1$  (ただし、常に  $E_0 < E_1$ ) に関連する 2 つの状態  $|0\rangle$  および  $|1\rangle$  を有する量子ビット再初期化装置であって、前記量子ビット装置に隣接して配置され、一定量のエネルギーを前記一定量がある値  $E_{env}$  に等しいときにのみ吸収することが可能である第 1 の散逸手段と、前記エネルギー差  $E_{01} = E_1 - E_0$  を、前記第 1 の手段が吸収できない初期値  $E_{01}$  から前記第 1 の散逸手段により吸収されることが可能な値  $E_{01} = E_{env}$  に一時的に変調することが可能な第 2 の手段を備えることを特徴とする量子ビット再初期化装置。

## 【請求項 2】

前記第 1 の散逸手段は、前記量子ビット装置の即時エネルギー環境にあり、かつ少なくとも 1 つの吸収ピークを有し、その吸収ピーク値の値  $E_{env}$  は、

- ・前記量子ビット装置の遷移エネルギー  $E_{01} = E_1 - E_0$  から十分に遠く離れていて前記量子ビット装置と前記第 1 の散逸手段との間のすべての相互作用をなくすか、または無視可能にするが、

- ・前記遷移エネルギーに十分に近く、前記量子ビット装置前記遷移エネルギー  $E_{01}$  が前記吸収ピーク  $E_{env}$  に等しいか、もしくは近くなり、前記量子ビット装置と前記第 1 の散逸手段との間に強いエネルギー結合が一時的に存在し得るような条件下で動作することが可能であり、

前記第 2 の手段は、前記量子ビット装置の前記遷移エネルギー  $E_{01} = E_1 - E_0$  を再初期化の際に前記吸収ピークの値  $E_{env}$  に等しいかまたは近い前記値  $E_{01}$  に変調するように適合されていることを特徴とする請求項 1 に記載の量子ビット再初期化装置。

## 【請求項 3】

前記第 1 の散逸手段は、 $E_{env}$  の値の少なくとも 1 つの吸収ピークを有し、前記量子ビット装置の遷移エネルギー  $E_{01} = E_1 - E_0$  を、 $E_{01} = E_1 - E_0$  が前記吸収ピークの値  $E_{env}$  に等しいかまたは近い値  $E_{01}$  に変えられると、吸収することができる特定の自由度を持つことを特徴とする請求項 2 に記載の量子ビット装置再初期化装置。

## 【請求項 4】

値  $E_{env}$  の吸収ピークを有する前記第 1 の散逸手段は、前記量子ビット装置の遷移周波数  $\omega_{01} = E_{01} / h$  (ここに  $h$  はプランクの定数である) における量子スペクトル密度が高く、複数の自由度を持つことを特徴とする請求項 2 に記載の量子ビット装置再初期化装置。

## 【請求項 5】

前記第 2 の手段は、特定の再初期化セットポイント生成手段を備え、前記再初期化セットポイントは前記量子ビット装置を調整して前記遷移エネルギー  $E_{01}$  を、前記吸収ピークの値  $E_{env}$  に等しいかまたは近い  $E_{01}$  に一時的に変える通常の調整手段に適用されることを特徴とする請求項 2 ~ 4 のいずれか一項に記載の量子ビット装置再初期化装置。

## 【請求項 6】

前記特定の再初期化セットポイントは、前記量子ビット装置がコヒーレントに展開可能であるときに使用される範囲外の値を有することを特徴とする請求項 5 に記載の量子ビット装置再初期化装置。

## 【請求項 7】

前記第 2 の手段は、前記量子ビット装置の動作パラメータであって前記量子ビット装置の遷移エネルギーに直接作用して前記遷移エネルギー  $E_{01}$  を、コヒーレントに展開するように選ばれた前記量子ビット装置の動作パラメータの設定とは独立に、前記吸収ピークの値  $E_{env}$  に等しいかまたは近い値  $E_{01}$  に一時的に調整する特定の手段を備えることを特徴とする請求項 2 ~ 4 のいずれか一項に記載の量子ビット装置再初期化装置。

## 【請求項 8】

量子的挙動を示し、かつ、ゲート電極を含む書込回路、ジョセフソン接合 (101、1

10

20

30

40

50

02)を有する超電導体集積電子装置、クーパー・ペア・ボックス(110)および電流パルスにより活性化される読取ジョセフソン接合(105)からなる物理的媒体を備えたことを特徴とする請求項1~7のいずれか一項に記載の量子ビット装置再初期化装置。

【請求項9】

前記第2の手段は前記読取ジョセフソン接合(105)に印加される電流パルスの形の特定の再初期化セットポイントを生成する手段を備え、前記電流パルスの振幅は前記量子ビット装置の緩和を最大化するように選ばれることを特徴とする請求項5および8のいずれか一項に記載の量子ビット装置再初期化装置。

【請求項10】

前記電流パルスの振幅が読取動作中に用いられる範囲外であることを特徴とする請求項9に記載の量子ビット装置再初期化装置。 10

【請求項11】

前記量子ビット装置再初期化装置は、前記量子ビット装置の位相に作用する磁気調整手段であって、磁気コイルと電流パルス発生器とを含む磁気調整手段を備え、前記第2の手段は特定の値の電流パルスの形の特定の再初期化セットポイントであって、前記量子ビット装置の前記位相に動作する前記磁気コイルに印加される再初期化セットポイントを生成する手段を備えることを特徴とする請求項5および8のいずれか一項に記載の量子ビット装置再初期化装置。

【請求項12】

前記第2の手段は、前記量子ビット装置の近傍に配置され、その位相に作用する磁気コイル(140)と、前記遷移エネルギー  $E_{01}$  を前記吸収ピークの  $E_{e,nv}$  に等しいかまたは近い値  $\omega_1$  に一時的に変えるのに適した振幅を持つ電流パルスの発生器(145)とを備えたことを特徴とする請求項11に記載の量子ビット装置再初期化装置。 20

【請求項13】

前記第2の手段は前記クーパー・ペア・ボックスおよび適切な振幅の電圧パルスの発生器とを備え、前記遷移エネルギー  $E_{01}$  を前記吸収ピークの  $E_{e,nv}$  に等しいかまたは近い値  $\omega_1$  に一時的に変えることを特徴とする請求項11に記載の量子ビット装置再初期化装置。

【請求項14】

前記第2の手段は、前記読取ジョセフソン接合(105)を通過し、前記読取ジョセフソン接合(105)に適切な振幅の電流パルスを送って前記遷移エネルギー  $E_{01}$  を前記吸収ピークの  $E_{e,nv}$  に等しいかまたは近い値  $\omega_1$  に一時的に変えるように適合された第2の回路ループ(31)を備えたことを特徴とする請求項11に記載の量子ビット装置再初期化装置。 30

【請求項15】

前記第1の散逸手段は前記読取ジョセフソン接合(206)の端子における散逸装置を備え、かつ散逸抵抗器(157)、インダクタ(158)およびコンデンサ(159)を含むことを特徴とする請求項8~14のいずれか一項に記載の量子ビット装置再初期化装置。

【請求項16】

前記量子ビット装置は量子挙動を示し、かつ原子またはイオンのエネルギー状態からなる物理媒体(1)を備えたことを特徴とする請求項1~7のいずれか一項に記載の量子ビット装置再初期化装置。 40

【請求項17】

前記第2の手段は、前記原子またはイオン放出エネルギーの確率を変える手段を備えたことを特徴とする請求項16に記載の量子ビット装置再初期化装置。

【請求項18】

前記原子またはイオン放出エネルギーの確率を変える手段は前記原子またはイオンが拘束されている前記スペースの寸法を変更することを特徴とする請求項16に記載の量子ビット装置再初期化装置。 50

## 【請求項 19】

前記第2の手段は前記原子またはイオンを、前記原子またはイオンが拘束されているキャビティ(2)からより大きなキャビティ(4)内に移動する手段を備えたことを特徴とする請求項16に記載の量子ビット装置再初期化装置。

## 【請求項 20】

前記量子ビット装置は量子挙動を示し、かつ二次元電子ガスの表面上または下のゲート電極(12、13)により制御される前記二次元電子ガス中に生成される量子点からなる物理媒体(11)を備えたことを特徴とする請求項1~7のいずれか一項に記載の量子ビット装置再初期化装置。

## 【請求項 21】

前記第1の散逸手段は抵抗部品(161)を少なくとも1つのゲート電極(13)の前記回路含む共鳴電気回路(16)を備え、前記第2の手段は前記ゲート電極(12、13)に前記ゲート電圧の特定値を印加する磁界源(17)またはゲート電圧源(14、15)を備え、前記量子点の寸法を変えて、前記遷移エネルギー  $E_{01}$  を、前記量子点の形状を規定する前記電極(12、13)の少なくとも一方を制御する電気回路の前記吸収ピークの  $E_{env}$  に等しいかまたは近い値  $E_{01}$  に一時的に変えるようにしたことを特徴とする請求項2~20のいずれか一項に記載の量子ビット装置再初期化装置。

10

## 【発明の詳細な説明】

## 【技術分野】

## 【0001】

本発明は、エネルギー状態  $E_0$  および  $E_1$  (ただし、 $E_0 < E_1$ ) に関連する2つの状態  $|0\rangle$  および  $|1\rangle$  を有する量子ビット装置を再初期化する装置に関するものである。

20

## 【0002】

量子ビット装置[以下、Qubit(単数の場合)またはQubits(複数の場合)という]は非常に多くの物理的媒体:光学的または電磁氣的に制御された原子またはイオン、分極されたフォトン、電磁氣的に制御された核スピン、集積電子装置、特にジョセフソン接合超電導体、または二次元電子ガス半導体等を有することが可能である。

## 【0003】

これらの物理的媒体とは独立に、Qubitは常に2つの別個の状態  $|0\rangle$  および  $|1\rangle$  を持つシステムを構成している。たいてい、これら2つの基礎状態は2つのエネルギーレベルに対応するが、まれに(例えば、分極されたフォトンの場合)、異なるエネルギーレベルに基づかない2つの状態に対応している。

30

## 【0004】

本発明は基礎状態が2つのエネルギーレベルに対応する全てのQubitsに適用される。一般性を失うことなく、状態  $|0\rangle$  は、以下、低エネルギーレベル  $E_0$  に関連し、状態  $|1\rangle$  は、以下、高エネルギーレベル  $E_1$  に関連するものとする。 $|0\rangle$  状態はまた本明細書において基礎状態ともいわれる。

## 【0005】

本発明は、従って、量子計算(書き込み、コヒーレントおよび可能な射影測定)の工程の間を含む、常に異なる2つのエネルギーレベル  $E_0$  および  $E_1$  に対応する2つの状態  $|0\rangle$  および  $|1\rangle$  を有する任意の型のQubitに関する。

40

## 【背景技術】

## 【0006】

Qubitにおいて、他のQubitsと結合することにより、制御された仕方で情報を書き込み、記憶し、または変更し、ついでその情報を読むことができなければならない。書き込みは2つの基底状態の任意のコヒーレントな重ね合わせ  $a|0\rangle$  および  $b|1\rangle$  (ただし、「a」および「b」は確率振幅と呼ばれる複素数である)におけるQubitを作成することにある。Qubitの量子状態のコヒーレントな制御は確率振幅 a、b の時間展開の制御を必要とする。

## 【0007】

50

確率振幅の制御は以下の2つの態様で失われる。

【0008】

第1の態様は脱分極 (depolarization)、すなわち、確率振幅の一方の絶対値 (modulus) が制御されずに増加して他方の増加にも資する態様である。基底レベルの振幅「a」が一方の絶対値が増加するか否かによって、脱分極はQubitのエネルギーの励起 (excitation) または緩和 (relaxation) となる。エネルギーの緩和は状態  $|1\rangle$  に当所作成されたQubitが状態  $|0\rangle$  に戻る平均時間として定義された特性緩和時間  $T_1$  により特徴付けられた本質的にランダムな工程である。

【0009】

確率振幅の制御が失われる第2の態様は状態  $|0\rangle$  および  $|1\rangle$  の間にランダムな位相差が現れることに対応する。換言すると、他のQubitsと相互作用していないQubitにとって、数学的には、 $a(t)|0\rangle + b(t)|1\rangle$  と表現される、理想的な展開は  $a(t)|0\rangle + b(t)\exp(i\phi(t))|1\rangle$  (ここに、 $\phi(t)$  はランダム位相である) のタイプの部分的にランダムな展開により置き替えられる。

【0010】

Qubitは上述の2つの現象にもかかわらずできるだけ長くコヒーレントに展開し続ける必要がある。

【0011】

Qubitに書き込みする前に、Qubitは一般にその基底状態  $|0\rangle$  である基準状態に置く必要がある。従来技術では、この再初期化は緩和時間  $T_1$  の数倍に等しい期間、Qubitが状態  $|0\rangle$  に向かって緩和する非常に高い確率に対して単に待機することにより行われる。

【0012】

この種の再初期化は非常に遅いことが証明できるので、Qubitの動作はできるだけ長い間その量子コヒーレンスが維持されることを必要とし、そのためできるだけ長い緩和時間  $T_1$  を必要とする。換言すると、Qubitの効率 (performance) が良いほど緩和時間  $T_1$  がながくなり、再初期化が長時間かかる。

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0013】

本発明は、特に、この再初期化が遅いという問題を解決すること、および良好な効率を提供するQubitの迅速な再初期化を可能にし、しかもコヒーレントに展開するというその能力を顕著に低下させることのないようにすることを目的とする。

【課題を解決するための手段】

【0014】

本発明によれば、上述の目的は、それぞれのエネルギー状態  $E_0$  および  $E_1$  (ただし、常に  $E_0 < E_1$ ) に関連する2つの状態  $|0\rangle$  および  $|1\rangle$  を有する量子ビット装置であって、前記量子ビット装置に隣接して配置され、一定量のエネルギーを前記一定量がある値  $E_{env}$  に等しいときにのみ吸収することが可能である第1の散逸手段と、前記エネルギー差  $E_{01} = E_1 - E_0$  を、前記第1の手段が吸収できない初期値  $E_{01}$  から前記第1の散逸手段により吸収されることが可能な値  $E_{01} = E_{env}$  に一時的に変調することが可能な第2の手段を備える装置により達成される。

【0015】

本発明は、また、2つのエネルギーレベルを有するQubitが、その緩和確率を一時的に増加させることにより再初期化することができ、この増加は、その遷移エネルギーを吸収することが可能な散逸装置に一時的に接続することに全体的にまたは部分的に達成される。

【0016】

最後に、本発明は、さらに、少なくとも1つの自由度と前記Qubitの遷移周波数に

10

20

30

40

50

おける高量子スペクトル密度とを有するシステムに結合するようにその遷移周波数を変え  
ることにより、2つのエネルギーレベルを有する Q u b i t を再初期化することができる  
ものである。

【0017】

2つの状態  $| > 0$  および  $| > 1$  がそれぞれのエネルギー状態  $E_0$  および  $E_1$  (ただし、 $E_0 < E_1$ ) に対応する Q u b i t では、これは下記の本発明の再初期化装置、すなわち、

- 前記第1の散逸手段は、前記量子ビット装置の即時エネルギー環境にあり、かつ少なくとも1つの吸収ピークを有し、その吸収ピーク値の値  $E_{env}$  は、

・前記量子ビット装置の遷移エネルギー  $E_{01} = E_1 - E_0$  から十分に遠く離れていて前記量子ビット装置と前記第1の散逸手段との間のすべての相互作用をなくすか、または無視可能にするが、

・前記遷移エネルギーに十分に近く、前記量子ビット装置の前記遷移エネルギー  $E_{01}$  が前記吸収ピーク  $E_{env}$  に等しいか、もしくは近くなり、前記量子ビット装置と前記第1の散逸手段との間に強いエネルギー結合が一時的に存在し得るような条件下で動作することが可能であり、

- 前記第2の手段は前記量子ビット装置の前記遷移エネルギー  $E_{01} = E_1 - E_0$  を再初期化の際に前記吸収ピークの値  $E_{env}$  に等しいかまたは近い前記値  $E_{01}$  に変調するように適合されている再初期化装置を用いて達成することができる。

【0018】

前記  $E_{env}$  の値の少なくとも1つの吸収ピークを有する第1の散逸手段は、前記量子ビット装置の遷移エネルギー  $E_{01} = E_1 - E_0$  を、 $E_{01} = E_1 - E_0$  が前記吸収ピークの値

$E_{env}$  に等しいかまたは近い値に変えられると、吸収することができる特定の自由度を持つことができる。

【0019】

値  $E_{env}$  の吸収ピークを有する前記第1の散逸手段は、前記量子ビット装置の遷移周波数  $\omega_{01} = E_{01} / h$  (ここに  $h$  はプランクの定数である) における量子スペクトル密度が高く、複数の自由度を持つことも可能である。この場合、多数の非常に近い値  $E_{env}$  が存在する。

【0020】

本発明の第2の手段は、Q u b i t の環境との結合を非常に低い値に低下させて、その環境のインコヒーレンス効果を最低限にし、それにより緩和時間  $T_1$  を非常に高い値に増加させ、かつ Q u b i t をコヒーレントに展開させるか、あるいは Q u b i t をその環境に結合させて緩和によりインコヒーレンスを最大化し、すなわち緩和時間  $T_1$  を非常に低い値に低下させ、かつ Q u b i t を急速に状態  $| > 0$  に再初期化する。

【0021】

一特定実施形態では、前記第2の手段は特定の再初期化セットポイント生成手段を備え、該再初期化セットポイントは前記量子ビット装置を調整して前記遷移エネルギー  $E_{01}$  を、前記吸収ピークの値  $E_{env}$  に等しいかまたは近い  $E_{01}$  に一時的に変える調整手段に適用される。

【0022】

さらに詳しくは、前記特定の再初期化セットポイントは、前記量子ビット装置がコヒーレントに展開可能であるときに使用されている範囲外の値を有する。もっともこれは必須ではない。

【0023】

他の特定実施形態では、前記第2の手段は、前記量子ビット装置の動作パラメータであって前記量子ビット装置の遷移エネルギーに直接作用して前記遷移エネルギー  $E_{01}$  を、コヒーレントに展開するように選ばれた前記量子ビット装置の動作パラメータの設定とは独立に、前記吸収ピークの値  $E_{env}$  に等しいかまたは近い値  $E_{01}$  に一時的に調整する特定の手段を備える。

【0024】

10

20

30

40

50

前記量子ビット装置は2つのエネルギーレベルを有する Q u b i t の基本特性のみを用いるので、本発明はその実装技術にかかわらず、そのタイプの任意の Q u b i t に適用可能である。

【0025】

第1の好適な実装技術では、前記 Q u b i t は電氣的であり、ジョセフソン超電導体接合を有するものである。そのコヒーレントな展開は、自由度の数を最小限にして、それによりこれらの Q u b i t s に本願の下記の一定の対称性質を付与し、かつそれらの遷移周波数を制御する外部パラメータを調節する構成により保証することが可能である。

【0026】

本発明は、特に好適な状況に適用される。この好適な状況では、電氣的 Q u b i t は、  
 ディー・ヴィオン、エイ・アシム、エイ・コテット、ピー・ジョイズ、エイチ・ポティア  
 ー、シー・ウルピナ、ディー・エステーヴ、エム・エイチ・デヴォレット著「電気回路  
 の量子状態の操作」サイエンス1069372号2002年5月4日(D. Vion, A  
 . Aassime, A. Cottet, P. Joyez, H. Pothier, C. Ur  
 bina, D. Esteve, M. H. Devoret, " Manipulating  
 the Quantum State of an Electrical Circu  
 it, " Science 1069372, 04 May 2002)に発表された報  
 文に開示されているように、量子的挙動を示し、かつ、ゲート電極を含む書込回路、読取  
 ジョセフソン接合を含みクーパー・ペア・ボックスのジョセフソン接合よりもずっと高い  
 ジョセフソン・エネルギーを有する読取回路、および前記 Q u b i t の位相を調節するよ  
 うに適合された磁気手段を設けた、2つのジョセフソン接合を有するクーパー・ペア・ボ  
 ックスを用いて構築された超電導体集積電子装置からなる物理的媒体を備える。

【0027】

上述の種類の回路[以下、カントロニウム(Q u a n t r o n i u m)という]は読取  
 ジョセフソン接合の電圧をトグルするように適合された電流パルスを印加することにより  
 読み取られる。

【0028】

この種の Q u b i t の超電導体ループは、Q u b i t において情報を書き込む、または  
 情報をコヒーレントに展開するために必要とされる条件である、その遷移周波数  $\omega_1$  が外  
 部擾乱およびパラメータに対して固定されている値に調整可能であるように、構築される  
 。実際には、この調整は近傍の磁気ループを用いて Q u b i t の位相 に作用する調整可  
 能な磁束を発生させることにより行われる。

【0029】

読取回路は、前記書込回路とは独立であり、Q u b i t の超電導体ループに電氣的に接  
 続されている。前記読取ジョセフソン接合に加えて、前記読取回路は、読取ステージの間  
 パラメータ化可能な期間および振幅の電流パルス  $I_0$  を印加する手段と、前記2つの状態  
 の一方のみについて、読取パルス後、前記読取ジョセフソン接合の端子において出現する  
 2 の位相ジャンプを検知する手段とを備える。

【0030】

前記 Q u b i t の緩和確率がこの読取パルスの印加時にどのように変化するかを検討す  
 るために、前記パルスの立ち上がりエッジに時間プラトーを発生することにより測定を行  
 った。なお、プラトーがある電流値に達すると、それぞれ Q u b i t のある遷移エネルギ  
 ーを設定し、Q u b i t 緩和の確率が高くなる(緩和時間  $T_1$  が短くなる)。これらの値  
 は Q u b i t の即時環境における共鳴に対応するが、この即時環境はこの場合単に電氣的  
 読取回路である。

【0031】

カントロニウムには、本発明を種々の方法で実装することが可能である。

【0032】

本発明の再初期化装置の第1の散逸手段は散逸装置を備え、この散逸装置は典型的には  
 抵抗部材を含む共鳴回路である。より正確には、前記手段は意図的に共鳴を Q u b i t の

電氣的読取回路に共鳴を導入することにより製造され、Qubitの周波数は、Qubitの遷移周波数が制御パラメータに関して固定されているときにQubitの遷移周波数が採る値であるが、再初期化時にQubitの遷移周波数が一時的に採ることが可能である値から遠く離れている。

【0033】

第2の手段または結合手段はQubitに特異的な調整手段に適用される制御信号、例えば、

- Qubitの位相に作用する磁気コイル(磁気調整手段の好適な実装形態)に適用される特定値の電流パルス、

- 前記読取回路が構成する通常の制御手段に適用される特定値の電流パルスの発生器を備えることができる。

10

【0034】

公称動作では決して採られない値が超電導体ループの磁束および/または前記読取接合における電流の値に選ばれることが好ましい。前記読取接合の電流は、再初期化段階の間、例えばQubitの状態を読み取るのに用いられる電流パルスの符号と反対の符号の値を採ることが可能である。

【0035】

より一般的には、この回路で動作するパラメータを調整する手段は、特定の入力値がそれらに提供されるならば、すべて再初期化手段を構成することが可能である。

【0036】

従って、操作は読取回路に電流を発生させる命令の場合は、次の通りである。すなわち、

20

- Qubit内の情報を読み取り、またはコヒーレントに展開させるために、Qubitの超電導体ループを横断する磁束および読取接合における電流を、Qubitの遷移周波数がその固定値を採るように、調整し、

- Qubitを再初期化するために、Qubitsの遷移周波数を意図的に導入された共鳴周波数の値に等しいかまたは非常に近い値に一時的に変える。

【0037】

この操作は自明な方法でQubitsの位相に作用するコイルの電流パルスの状態に置き替えることが可能であることは明らかである。

30

【0038】

前記結合手段は再初期化装置、例えばQubitの位相に作用する第2の磁気手段(例えば磁気コイル)、クーパー・ペア・ボックスの第2の結合ゲート、読取ジョセフソン接合を通過しQubitsの高確率のインコヒーレンスに対応する振幅を有する第2の電流パルスに適合された第2のループ等に特異的であるようにすることも可能である。再び、前述の例について、結合手段の動作をどのように演繹するかは自明である。

【0039】

前記超電導体ループの磁束および/または読取接合の電流の値は公称動作では決して採られない値であることが好ましい。前記読取接合の電流は、例えば再初期化段階の間の値であり、その符号がQubitの状態を読み取るのに用いられる電流パルスの符号と反対である。

40

【0040】

第2の技術では、前記Qubitsはエネルギー状態がQubitの遷移エネルギーに相当する周波数 $\omega_1$ の光子の吸収または放出により変化される原子またはイオンをそれらの物理的媒体として有することが可能である。コヒーレンスの維持は、前記原子またはイオンを原子またはイオンが例えば周波数 $\omega_1$ の光子を吸収することができないように十分に小さい電磁気キャビティ内に置くことにより行うことができる。本発明の再初期化装置は適切な電磁場を用いて原子またはイオンを移動してこのキャビティから出し、原子またはイオンが例えば自然に脱励起されることを可能にする。原子またはイオンを例えばQubitの周波数において吸収モードを有する第2のキャビティ内に移動させるとより有効

50

である。

【0041】

従って、この状況では、本発明の装置の第2の手段はエネルギーを吸収する原子またはイオンの確率を変化させる手段、さらに詳しくは、前記手段は前記原子またはイオンが拘束される寸法を変更する手段を含む。本発明の装置の第1の散逸手段は、従って、前記原子またはイオンが移動する新しい散逸スペースからなる。

【0042】

第3の技術では、Qubitの物理的媒体は二次元電子ガス中に生成され、前記ガスの表面上または下のゲート電極により制御される量子点であることができる。

【0043】

前記Qubitの2つの状態に対応する2つのエネルギー状態は一般に遷移エネルギー  $E_{01}$  により隔てられた量子点の2つの電子状態である。

【0044】

本発明の急速再初期化装置のこの実施形態では、前記第1の散逸手段は、少なくとも1つのゲート電極の回路中に抵抗部材を含む共鳴電気回路を備え、前記第2の手段は前記ゲート電極にゲート電圧の特定値を与える磁界源またはゲート電圧源を備え、前記量子点の寸法を変えて遷移エネルギー  $E_{01}$  を前記量子点の形状を規定する電極の少なくとも1つの電気回路の吸収ピークの  $E_{env}$  に等しいかまたは近い値  $E_{01}$  に変えるようにしている。

【発明を実施するための最良の形態】

【0045】

本発明の他の特徴および利点は、例示として提供された以下の特定の実施形態から明らかになるが、添付図面を参照してこれらについて説明する。

【0046】

まず、電気的Qubitの好適な実施形態を説明する。さらに詳しくは、Qubitが、ディー・ヴィオン、エイ・アシム、エイ・コテット、ピー・ジョイズ、エイチ・ポティアー、シー・ウルピナ、ディー・エステーヴ、エム・エイチ・デヴォレット著「電気回路の量子状態の操作」サイエンス1069372号2002年5月4日(D. Vion, A. Aassime, A. Cottet, P. Joyez, H. Pothier, C. Urbina, D. Esteve, M. H. Devoret, "Manipulating the Quantum State of an Electrical Circuit," Science 1069372, 04 May 2002)に発表された報文に開示されているように、量子的挙動を示し、かつ、ゲート電極を含む書込回路、読取ジョセフソン接合を含みクーパー・ペア・ボックスのジョセフソン接合よりもずっと高いジョセフソン・エネルギーを有する読取回路、および前記Qubitの位相を調節するように適合された磁気手段を設けた、2つのジョセフソン接合を有するクーパー・ペア・ボックスを用いて構築された超電導電子回路である状況を説明する。

【0047】

上述の種類回路は、以下カントロニウムと呼ぶが、通常読取ジョセフソン接合をトグルするように適合された電流パルスを印加することにより読み取られる。

【0048】

図1を参照すると、上述の種類のカントロニウムは、下記を備えることにより定義することができる。

a) 匹敵するジョセフソン・エネルギー  $E_{J1}$  および  $E_{J2}$  の2つのジョセフソン接合101、102の間の超電導アイレット。前記接合は、Qubitの遷移周波数が外部擾乱およびパラメータに対する固定値に電氣的に調整可能であるように構築されたS型超電導体ループ含まれる。

b) 前記超電導アイレットに容量的に結合され、回路の形状のゆえに遷移周波数をQubitの2つの状態の間に調整可能である電極131。電極131はまた読取ステージの間、Qubitをその2つの状態のコヒーレントな重ね合わせに置くことが可能である

10

20

30

40

50

。

c) 前記超電導体ループに、回路の形状のために遷移周波数  $\omega_{01}$  を Q u b i t の 2 つの状態の間に調整可能な磁束  $B$  を印加する手段 1 3 3、1 3 5。

d) 読取接合と呼ばれる第 3 のジョセフソン接合 1 0 5。そのジョセフソン・エネルギー  $E_{JL}$  は上記定義のジョセフソン接合 1 0 1、1 0 2 のジョセフソン・エネルギー  $E_{J1}$  および  $E_{J2}$  よりも 5 0 ~ 1 0 0 倍程度、好ましくは約 8 0 倍大きい値を持ち、読取ジョセフソン接合 1 0 5 は書込または保持ステージの間に超電導体短絡回路として、および読取ステージの間に閾値検知器として動作する。

e) 前記書込回路とは独立であって、Q u b i t の超電導体ループに電氣的に接続され、かつ読取ジョセフソン接合 1 0 5 に加えて、前記読取工程の間に調整可能な持続時間および振幅の電流パルス  $I_b$  を印加する手段 1 2 5 Q u b i t の状態と読取パルスの複合効果の結果である、読取ジョセフソン接合 1 0 5 の端子における位相ジャンプを検知する手段 1 2 6 を含む読取回路。

10

## 【0049】

本発明のカントロニウムの好適な実施形態は上述の特徴 a) ~ e) に加えて下記の特徴 ( 図 5 参照 ) を備えている。

f) カントロニウムの公称遷移周波数 ( 典型的には数ギガヘルツ ( G H z ) ) の倍数または約数から遠く離れた、唯一またはいくつかの特定の周波数において散逸的である散逸装置 2 1。散逸装置 2 1 は一般に例えば抵抗部材を含む共鳴回路を用いて実装される。この回路 2 1 は、読取ジョセフソン接合 1 0 5 の端子に接続されているが、図 5 および図 6 においては、その抵抗が構築欠陥の結果でなく、意図的にカントロニウム、のエネルギーを散逸させることが可能な値を採るように選択された抵抗器 1 5 7 と、インダクタと、コンデンサ 1 5 9 とを備えた R L C 回路により図示されている。

20

g) 通常の制御手段 ( 読取回路 ) に Q u b i t の遷移エネルギーを  $E_{01} = E_1 - E_0$  から  $E_{01} = E_{env}$  の値に変更する特定の値を有する電流パルス  $I_b$  を印加する手段 3 1。後者の値は抵抗部材を含む共鳴回路 2 1 の共鳴周波数に対応する。

## 【0050】

カントロニウムの電気回路の全体は構造と動作がなるべく対称であるように設計される。また、Q u b i t はそのコヒーレンスの維持を促進する条件下で操作することが可能である。

30

## 【0051】

本発明の Q u b i t のコヒーレンスの維持を促進する操作条件は下記の通りである。

1) 使用に先立って、そして量子状態の操作中に、2 つの量子状態の遷移周波数を電荷アイレットの一部ではない電極 1 3 1 におけるキャパシタンス  $C_g$  のコンデンサ 1 0 3 に印加される D C 電圧  $V_g$  に関しておよび Q u b i t を通る磁束に関して固定された値に電氣的に調整する。

2) 書込ステージ ( 量子状態操作 ) の間、Q u b i t 自体のループに流入するすべての電流を、読取接合 1 0 5 における磁束と電流の特定の組合せにより相殺する。

3) 読取回路は、読取パルス  $I_b$  により決定される特定の場例外は常に活性化されない。電荷アイレットは、これに接続された、キャパシタンス  $C_g$  のコンデンサ 1 0 3 を介して電荷でバイアスすることが可能である。

40

## 【0052】

これは下記の重ね合わせをアイレットの一部ではないコンデンサ 1 0 3 の電極 1 3 1 に印加することにより達成される。

- Q u b i t が構成するループの共鳴周波数を実際に決定する D C バイアス電圧  $V_g$ 、および

- 電圧  $u(t)$  の共鳴周波数における一連の振動。これらの振動の振幅および数により Q u b i t がその 2 つの量子状態のコヒーレントな重ね合わせ  $a|0\rangle + b|1\rangle$  に置かれることが可能になる。

## 【0053】

50

電荷アイレットを定義するジョセフソン接合 101、102 は、それらのジョセフソン・エネルギー  $E_j$  がそれらのクーロン・エネルギー  $E_c$  に近くなるように選ばれる。それぞれの接合は超電導体アイレットの一部である電極とその一部ではない電極を有する。各接合のアイレットに属さない電極間の位相差により、読取電流パルスにより課せられると、*Qubit* のループ中をその状態に応じて電流が流れる。

【0054】

2つのジョセフソン接合 101、102 はそれらのエネルギー  $E_j$  が、非常に小さい寸法の接合で一般に達成されるエネルギー  $E_c$  に非常に近くなるように選択される。さらに、接合 101、102 のジョセフソン・エネルギー  $E_j$  はできるだけ近い値を有する。アイレットの一部ではないジョセフソン接合電極は相互に接続されて超電導体ループを形成し、全体としてそのような *Qubit* を形成している。現実には、このループも第3のジョセフソン接合 105 を含むが、これはずっと大きな寸法を持ち、その結果そのジョセフソン・エネルギー  $E_j$  はクーロン・エネルギー  $E_c$  に比べて非常に高い。

10

【0055】

読取接合が読取期間外に超電導体短絡回路として動作することが可能であるのはこの特徴による。

【0056】

公称動作では、最大コヒーレンスの維持に対応して、カントロニウムは以下のように調整される。

【0057】

すなわち、本発明の装置の一実施形態の操作は図1の理論図を用いて説明される。

20

【0058】

電荷アイレットはジョセフソン接合 101 および 102 の絶縁によって定義される。接合 101 および 102 はよく似た特性を有する。接合 101 および 102 は非常に小さい寸法（ほぼ  $0.1 \mu\text{m} \times 0.1 \mu\text{m}$ ）を有し、かつそれらのそれぞれの比  $E_j / E_c$  が  $1 \sim 3$  であるように設計される。クーパー・ペア・ボックス 110 の実際の接合に対するこの比  $E_j / E_c$  は、4倍大きく、従って  $4 \sim 12$  である。

【0059】

超電導体ループは非常に大きな寸法（ほぼ  $3 \mu\text{m} \times 0.3 \mu\text{m}$ ）を持つ読取接合 105 により閉じられ、実際に測定工程外の *Qubit* に対する短絡回路として挙動する。これはジョセフソン・エネルギー  $E_{jL}$  は接合 101 および 102 のジョセフソン・エネルギーのよりもほぼ  $100$  倍大きいからである。さらに、読取接合 105 の比  $E_j / E_c$  は接合 101 および 102 の比  $E_j / E_c$  のほぼ  $5000$  倍  $\sim 10,000$  倍である。

30

【0060】

このループは、多分 *Qubit* と同じ基板状の永久磁石、コイル 133 または近傍に配置された電源 135 から電流を運ぶ電線により誘導される種々の磁束にさらされる。磁束は *Qubit* の操作の間、動作点の座標を調整する。特に、磁束は、位相を好適な値に維持することにより、読取接合 105 における負の静止電流を補償する。

【0061】

ループを通る磁束と測定接合 105 における負の静止電流のこの組合せにより読取の間の 0 および 1 状態を区別する能力が以下に説明するように増加する。

40

【0062】

前記回路は任意の型 S の超電導材料、例えばアルミニウムまたはニオブを用いて製造することが可能である。好適な実施形態は、 $\text{Si} / \text{SiO}_2$  基板上へのアルミニウム導電性フィルムの真空堆積を用いる。

【0063】

ジョセフソン接合 101 および 102 は 2つのアルミニウム・ストリップを同じ軸に沿って数百ナノメートル離して堆積することにより製造される。これらのストリップは酸化されて  $\text{Al}_2\text{O}_3$  を生じる。次いで、短い第3のストリップを最初の2つのストリップの間のギャップに、最初の2つのストリップを、それぞれ約  $0.1 \mu\text{m} \times 0.1 \mu\text{m}$  の2つの

50

領域にわたって被覆するように堆積し、それにより2つのジョセフソン接合101および102を構成する。第3のストリップはクーパー・ペア・ボックスのアイレット、従ってキャパシタンス $C_g$ のコンデンサ103の第1のプレート131をも構成する。新しいストリップに平行なもう一つのストリップがコンデンサ103の第2のプレートを構成する。

【0064】

このようにして形成された電荷アイレットは小さい寸法を有する。

【0065】

Qubit自体のループの残部は同様にして、ただし、ほぼ $1\mu\text{m}$ で製造され、読取接合105の寸法はずっと大きい。

【0066】

前記回路の動作温度はQubitの遷移エネルギーをボルツマン係数 $k_B$ で割ったものよりも非常に低くなければならない。実際には、この動作温度は50ミリケルビン(mK)程度であり、 $\text{He}_3/\text{He}_4$ 希釈冷却システムを用いて得られる。

【0067】

Qubitの遷移周波数はアイレットに結合した電荷およびループを通る磁束の形の外貌パラメータによって決まる。電荷または磁束ノイズは従ってQubitの操作の間、遷移周波数を変えやすく、それゆえ量子状態のインコヒーレンスの原因となるランダム位相シフトを誘起する。従って、このノイズに対する感度は遷移周波数 $\omega_{01}$ が外部パラメータに関して固定されている動作点 $F_1$ 、 $F_2$ 、 $F_3$ において最小である。従って、これらの動作点は好ましい動作点である。本発明のQubitについては、これらの点は図2の鞍点 $F_1$ (これについては $N_g = 0.5$ および $\phi = 0$ )であり、三次元グラフのピーク点 $F_2$ または $F_3$ ( $2\pi$ を法として)(これについては $N_g = 0$ および $\phi = 0$ )である。

【0068】

公称動作では、最大コヒーレンスの維持に対応して、一つの状態または状態のコヒーレントな重ね合わせがカントロニウムに以下のように書き込まれる。

【0069】

カントロニウム書込ステージは最大コヒーレンスの維持に対応する一般的動作条件の枠内にある。すなわち、

1) 使用に先立って、そして量子状態の操作中に、2つの量子状態の遷移周波数を電荷アイレットの一部ではない電極131におけるキャパシタンス $C_g$ のコンデンサ103に印加されるDC電圧 $V_g$ に関しておよびQubitを通る磁束に関して固定された値に電氣的に調整する。

2) 書込ステージ(量子状態操作)の間、Qubit自体のループに流入するすべての電流を、読取接合105における磁束と電流の特定の組合せにより相殺する。

【0070】

書込は、ボックス110の(キャパシタンス $C_g$ のコンデンサ103により結合された)ゲート電極131に、第1に電圧源121からのDC電圧 $V_g$ を印加して電荷の自由度に作用する最適の動作点 $N_g = 1/2$ 、ここに、 $N_g$ はアイレットの低下バイアス電荷 $C_g V_g / 2e$ を達成し、第2に電流源122からボックス110のQubitとの共鳴周波数で無線周波数パルス $u(t)$ を印加することにより達成される。AC電圧 $u(t)$ の振幅 $2e$ の $0.01$ 倍程度の結合電荷に相当する。

【0071】

読取ステージの間、カントロニウムは以下の通りに動作する。

【0072】

Qubitの状態を読み取るために、読取ジョセフソン接合105と並列の定電流源125は種々の強度と持続期間(典型的には $100\text{ns}$ )のパルス $I_b$ (図3)を発生する。パルスの間、定電流源125は読取ジョセフソン接合105の端子に、クーパー・ペア・ボックス100の端子における超電導位相差 $\phi$ とループを通る磁束 $\Phi$ とともに以下の等式を満足する超電導位相差を誘導する。ここに、 $\phi_0$ は磁束量子であり、符号は無視する

10

20

30

40

50

$$= + / 0.2$$

【0073】

読取パルスの間、動作点  $F_1$  ( $N_g = 0$ 、 $= 0$ ) における位相  $\phi$  が変位され、それにより位相  $\phi$  に変位を起こす。読取接合 105 は約  $\phi = \pi/2$  でトグルする。

【0074】

読取の間、電流は読取接合 105 の臨界電流に近くして Qubit の 2 つの状態それぞれに対する遷移率が 0% および 100% に近くなるようにすることが必要である。読取外のバイアス電流  $I_b$  は回路を選択された点  $F$ 、例えば図 2 の点  $F_1$ 、 $F_2$ 、 $F_3$  に維持するよう 10  
に選ばれる。最後に、超電導体ループに結合した磁束  $\Phi$  の選択は、読取パルスにより分かるように、状態  $|0\rangle$  および  $|1\rangle$  と関連するループ電流  $i_0$  および  $i_1$  ができるだけ異なるように最適化することが可能である。

【0075】

本発明の Qubit の状態の読取は超電導体ループを通る磁束  $\Phi$  を、状態  $|0\rangle$  および  $|1\rangle$  と関連するループ電流  $i_0$  および  $i_1$  が、読取パルスにより分かるように、できるだけ異なるように最適化される。この磁束補償して動作点  $F_i$  に対応するゼロ位相  $\phi$  を維持 20  
するために、読取シーケンスの外で、読取定電流源はゼロ静止電流の代わりに、読取パルスの方向に関して負である、 $-0.25 I_{bc}$  程度の静止電流を供給する。これらの  $i_{bc}$  のピーク値  $I_{bc}$  は不変である。この好適な最適化で、世も取りパルスの中の位相シフト  $\phi$  は  $\pi/2 \sim \pi$  である。

【0076】

Qubit の公称動作では、最大コヒーレンスの維持に対応して、Qubit は読取接合から以下のように脱結合される。

【0077】

読取ループは自然モードを有し、その周波数はできるだけ Qubit 自体の自然周波数から遠く離れていて Qubit が基底状態  $|0\rangle$  に向かって緩和されることを防止するよう 30  
にしなければならない。

【0078】

Qubit と読取接合の自然周波数のこの分離は既に存在するが、その理由は、読取ジョセフソン接合 105 の寸法とアイレットを定義するジョセフソン接合 101、102 の寸法の間 30  
に大きな差があるためである。この差は読取ジョセフソン接合 105 の端子に 1 つ以上のコンデンサを追加することにより意図的に増加させられる。

【0079】

つまり、カントロニウムのコヒーレントに展開する能力は 3 つの条件を同時に満たすことにより得られる。すなわち、

a) 第 1 の条件はアイレットにより見られた電荷ノイズの影響を除去することを目的とする。充電されたときに測定されるクーパー・ペア・ボックスと異なり、本発明はジョセフソン・エネルギー・パラメータ  $E_j$  とクーロン・エネルギー・パラメータ  $E_c$  の間の比を  $E_j/E_c$  - エネルギーのスペクトルが非調和であり、Qubit を実際に形成するようにすること、 40

- 遷移周波数が実際に完全に電荷ノイズに非感受性にする、こと、および

- アイレットのゲート 131 に無線周波数電圧を印加することにより Qubit の状態を操作すること。

b) 第 2 の条件は Qubit の緩和を制限することを目的とする。これは、Qubit が、従来  $|1\rangle$  と示される、その励起状態に置かれるとインコヒーレンスに寄与する。Qubit はそのエネルギーをその即時環境に、ここでは電気回路の全体に移転して脱励起することが可能である。より正確には、この移転は Qubit (図 5 および図 6) から分かるように、等価電気インピーダンス 157、158 の実部 157 に向かって行われる。このインピーダンスは、最小化された場合でも、厳密にはゼロになり得ない。エネルギー 50

の移転がないので、Q u b i tの超電導体ループに電流の流れがないという条件を適用することが必要である。Q u b i tのループからQ u b i tの状態またはその状態のコヒーレントな重ね合わせから生じる全電流の除去するこの条件は、適切な永久磁石または制御電流が流れる誘導ループのいずれかにより印加された磁界BによりQ u b i tのループに印加される拮抗する磁束を用いて磁束を正確にゼロ値に調整することにより得られる。この条件は書込および保持ステージの間、Q u b i tの状態にかかわらず、従って除去されるべき磁束にかかわらず、満足されなければならない。

c) 第3の条件は環境パラメータのインコヒーレンスへの影響を制限することを目的とする。| ( t = 0 ) > が以下の重ね合わせ状態

$$| ( t = 0 ) > = | 0 > + | 1 >$$

この状態は、Q u b i tの遷移周波数  $\omega_{01}$ における成分 | 0 > + | 1 >の相対的位相シフト

$$| ( t = 0 ) > = | 0 > + \exp(i \omega_{01} t) | 1 >$$

により理想的には自由に展開する。

#### 【0080】

遷移周波数  $\omega_{01}$  汎用変数 x により表される外部パラメータによって決まり、汎用変数 x への任意のノイズが遷移周波数  $\omega_{01}$ の変動に、従って成分 | 0 > および | 1 >の相対的位相におけるランダム誤差に反映されるならば、これはインコヒーレンスとして知られる現象である。従って、インコヒーレンスが最小であるのは、遷移周波数  $\omega_{01}$ が x に関して固定されているとき、すなわち下記の条件が満足されるときである。

$$d \omega_{01} / d x = 0$$

#### 【0081】

本発明の目的のためには、遷移周波数  $\omega_{01}$ が決まり、汎用変数 x により記号化される本質的に2つの外部パラメータ、すなわちコンデンサ 103 に印加されるDC電圧  $V_g$  と Q u b i t 自体を構成する超電導体ループを通る磁束  $\Phi$  がある。従って、 $V_g$  と  $\Phi$  の値は以下の2つの条件が同時に満たされるように設定され、それによりインコヒーレンスが、特に Q u b i t の重ね合わせ状態の場合において低減される。

$$d \omega_{01} / d V_g = 0$$

$$d \omega_{01} / d \Phi = 0$$

#### 【0082】

本発明の再初期化装置をカントロニウムと関連して使用することについて以下に説明する。

#### 【0083】

本発明は上述の3つの条件の1つ以上の機能的条件の外側への一時的変位を生成して Q u b i t の自然周波数の近傍でエネルギー交換を誘起する対称的条件下に Q u b i t を置いて、緩和により急速にインコヒーレンスを得ることからなる。これらの条件は、電気的に、エネルギーを回路の二次的自由度共鳴にエネルギーを送り、次いでそのエネルギーを抵抗により散逸させることに相当する。

#### 【0084】

この読取ジョセフソン接合の端子に配置され、図5において意図的散逸抵抗器 157、インダクタ 158 およびコンデンサ 159 を備えた R L C 回路により図示される。共鳴散逸装置は、また、同様に、並列のインダクタ、コンデンサおよび抵抗器によっても表すことが可能である。その理由は、現実の問題の周波数において、コントラストが分布してい

10

20

30

40

50

るからである。印刷回路の任意の要素が、マイクロ波の当業者には周知のように、実際には物理的に配置することが不可能である誘導性および容量性特性を同時に有している。さらに、これらの特性も、その形状単独では正確に特定されたとしてもその分布された特性を決定するのに不十分である範囲において、その即時環境によって決まる。なし得るすべてのことはその共鳴周波数を定義することである。共鳴周波数は、前述のように、 $Qubit$ の遷移エネルギー  $E_{01} = E_1 - E_0$ をそれが値  $E_{01} = E_{env}$ に変えられたときに吸収することが可能な特定の自由度  $E_{env}$ に対応する。ここで考察した特定の状況では、その周波数は約  $8.06 GHz$ である。

【0085】

$Qubit$ に一時的に結合してこれを再初期化する手段には多くの変形例がある。

10

【0086】

好適な一変形例では、 $0.130$ ナノアンペア ( $nA$ )程度の特定期の電流パルスが読取回路からなる通常の制御手段に印加されて緩和時間  $T_1$ を  $59 ns$ に低減し、この時間の終わりに初期情報を読み取る確率が約  $32\%$ 、すなわち  $T_1$ の数倍の再初期化時間でゼロに非常に近い値である。

【0087】

第2の好適な変形例は、読取ジョセフソン接合の端子において図5に示す本発明の再初期化装置に特異的な第2の定電流源  $155$  (モジュール  $31$ )を使用する。

【0088】

上述の2つの変形例の均等性はエレクトロニクスの当業者には自明であり、再初期化パルスを受けるように専用化その他により適合された、第2の定電流源を追加することまたは同じ定電流源を制御入力とともに使用することは同じことになる。図を明瞭にするために、結合手段は再初期化工程の間、電流パルス  $I_b$ を印加する追加の手段  $155$ により図示される。

20

【0089】

本発明の動作は図4A~4Cを用いて説明する。

【0090】

図4Aは、時間の関数として、定電流源  $125$ により読取ジョセフソン接合  $105$ の端子におけるカントロニウムに印加された読取電流パルス  $I_0$ の振幅を示す。このパルスはコヒーレンスの維持を促進する  $-300 nA$ 程度の静止値から出発する。あらかじめ、カントロニウムは「 $\mu w$ パルス」と記された破線の下向きスパイクにより記された時間において状態  $|1\rangle$ に調整されている。任意に  $-130 nA$ として示される、電流プラトーと呼ばれる値における電流の安定化が示される。次いで、読取パルスは  $400 nA$ 程度の値に続く。プラトーは本発明を試験するためにパルスの立ち上がりエッジに配置される。このプラトーの振幅と持続期間について多くの値が試験された。

30

【0091】

図4Bは電流プラトー  $I_{plateau}$ の全ての値に対して、「 $\mu w$ パルス」の時間における量子ビットにおいて準備された状態  $|1\rangle$ の読取確率を示す。これらの測定はすべて電流プラトー  $I_{plateau}$ の持続時間  $100 ns$ で行われた。図中のこの確率の強い変動に注意せよ。横座標  $-320 nA$ における垂直上方を指す第1の矢印のように、確率が高いほど読み取られた情報は書き込まれた情報によりよく近似し、コヒーレンスは良好であり、緩和時間  $T_1$ は  $730 ns$ であり、コヒーレンスは良好であり緩和時間  $T_1$ は  $730 ns$ である。横座標  $-130 nA$ における垂直下向きの第2の矢印については、この確率が低いほど、読み取られた情報は状態  $|1\rangle$ に関連した書込情報からより乖離し、量子ビットが緩和により容易にそのコヒーレンスを失い、緩和時間  $T_1$ は  $59 ns$ まで低下する。

40

【0092】

電流プラトーの  $-320 nA \sim -130 nA$  2つの値について、図4Cはカントロニウムが状態  $|1\rangle$ でプラトーの持続時間の関数として測定される確率における変動を示す。読取パルスが読取ジョセフソン接合  $105$ の端子においてクーパー・ボックス  $110$ の端子における超伝導性位相差、およびループを通る磁束とともに以下の等式を満足する

50

超伝導性位相差を誘起することを見た。ここに、 $\phi_0$ は磁束量子であり符号は無視する。

$$= \frac{1}{2} + \frac{\phi_0}{2\pi} \frac{2\pi}{\phi_0} \frac{1}{2}$$

【0093】

例えば図2において、読取パルス間の動作点 $F_1$  ( $N_g = 0$ 、 $\phi_0 = 0$ )において、位相は位相 $\phi_0$ にシフトを生じる変位を受ける。プラトーの間、図2の曲線上の動作点は一定値 $N_g$ により定義される平面に変位される。例えば、点 $F_1$ は電流プラトー $I_{plateau}$ の間、点 $F_1$ になる。量子ビットの遷移周波数は動作点 $F_1$ において $E_{01} = E_1 - E_0$ であったが、動作点 $F_1$ においては $E_{01} = E_1 - E_0$ になる。次いで、共鳴回路の周波数を $E_{env} = E_{01}$ になるように選択するのに充分である。

10

【0094】

電流プラトー $I_{plateau}$ のこの値は実際には読取パルスのために設計された定電流源125に特定の設定点を適用することにより、あるいはこの目的のために並列に接続された第2の定電流源 $I_{bias} = 155$ を用いることにより得ることができる。例えば、 $-130$  nAの電流と $8.06$  GHz程度の散逸回路共鳴周波数で、 $60$  ns未満の緩和時間 $T_1$ が得られ、緩和確率が $200$  ns後に $96\%$ に達する。

【0095】

もちろん、量子装置がそのコヒーレンスを維持することができるのが長いほど、本発明の緩和装置を使用する利点は大きくなる。

【0096】

図6に示す実施形態では、結合手段または第1の手段は、Qubitの近傍に配置され、その位相 $\phi_0$ に作用する磁気コイル140を持つモジュール32と、遷移エネルギー $E_{01}$ を吸収ピークの $E_{env}$ に等しいかまたは近い値 $\omega_{01}$ に一時的に変えるのに十分な振幅を持つ電流パルスの発生器145とを備える。

20

【0097】

イオン性Qubitを用いる本発明の好適な実施形態を図7を参照して説明する。

【0098】

原子またはイオン1のエネルギー状態はQubitの遷移エネルギーに相当する周波数 $\omega_{01}$ の光子吸収または放出によって変化される。Qubitに情報を書き込む、または情報をコヒーレントに展開させる条件は、周波数 $\omega_{01}$ の光子を吸収することができないように十分に小さい電磁気キャビティ2内に光子を置くことを伴う。

30

【0099】

本発明によれば、散逸装置は光子が原子またはイオンにより放出され得る環境(キャビティ4)に相当する。制御装置は遷移周波数と原子またはイオン1が拘束されるスペースの寸法との間の比を変えることが可能な手段(例えば、一組のレーザー光または適切な磁界)からなるか、またはレーザーもしくは原子もしくはイオンが拘束されているキャビティ2からより大きいキャビティ4内に(あるいはまったくキャビティ内ではなく)原子またはイオンを移動させる電磁気装置からなり、電子またはイオンが自然に脱励起できるようにしている。

【0100】

従って、2つのエネルギーレベルを有するQubitを生じる原子またはイオン1の場合、Qubitは電磁界を用いてトラップされるか、または固有の速度のゆえに自由に移動する。

40

【0101】

電磁気キャビティ2は非常に低吸収であり、従って線質係数が高い。適宜、前記キャビティは、

- Qubitのコヒーレントな制御のために、または続いてキャビティに入る他のQubitとの相互作用を媒介するために使用される場合、Qubitの遷移周波数に等しいか近い自然周波数、

- キャビティとQubitの間のエネルギー交換を阻止するために、Qubitの遷移

50

周波数よりも顕著に高い自然基底周波数を持つことが可能である。

【0102】

迅速な再初期化のために、原子またはイオン1は、Qubitが、図示しない手段を用いて運動電磁界を印加することによりその基底状態に急速に緩和することが可能な領域に向かってシフトされる。

【0103】

初期速度のゆえに原子またはイオンが移動されるならば、結合装置を定義する本発明の装置の第1の手段は単に原子またはイオンを非常に低吸収のキャビティ内に保持する手段を一時的に抑制する手段を備える。原子またはイオンが電磁気的手段により移動されるならば、それらの手段は本発明の装置の第1の手段を構成する。

10

【0104】

Qubitの急速緩和領域は低線質（高吸収）の他の電磁気キャビティ4の内部であることが可能であり、前記内部は本発明の装置の第二の散逸手段を定義する。Qubitが急速に緩和するには、キャビティ4の自然周波数の1つがQubitの周波数と等しいか、または近いことが必要である。

【0105】

適切な電磁界を用いて、Qubitの遷移周波数を再初期化用に選択された低線質の共鳴モードに等しいか、または近くなるように変えることが可能である。図7は例示的に、電源6により付勢され、ゼーマン効果を用いてQubitの遷移周波数を一時的に変えるヘルムホルツ・コイル5を示す。

20

【0106】

二次元電子ガス中に生成される量子点を用いた好適な実施形態を図8を参照して以下に説明する。

【0107】

一つの特定の技術では、Qubitsはそれらの物理的媒体として二次元電子ガスの表面上または下のゲート電極12、13により制御されるにガス中に生成される量子点を有することが可能である。Qubitの2つの状態に対応する2つのエネルギー状態は一般に遷移エネルギー  $E_{01}$  により分離され、ゲート電極12、13における電圧により制御される量子点の2つの電子状態に対応し、振幅の大きい負電圧が量子点をより拘束し、エネルギーレベル間の、従って状態  $E_0$  と状態  $E_1$  の間の状態  $E_1$  の間のオフセットを増加させ、従って遷移エネルギー  $E_{01}$  を増加させる。ゲート電極12、13は一般に同じバイアス電圧である。

30

【0108】

本発明によれば、散逸装置は共鳴電気回路16に相当し、少なくとも1つのゲート電極の回路の抵抗部材161を含む。例えば、制御装置は磁界源または電極に印加されたゲート電圧の特定値からなり、遷移エネルギー  $E_{01}$  を量子点の形状を規定する電極12、13の少なくとも1つを制御する電気回路の吸収ピークの遷移エネルギー  $E_{01}$  に等しいかまたは近い値  $E_{01}$  に変えることが可能であり、これは遷移エネルギー  $E_{01}$  を増加して値  $E_{01} = E_{env}$  に増加させるというのと同じことになる。

40

【0109】

従って、図8を参照すると、量子点11は、調整可能なゲート電圧源14、15により付勢されたゲート電極12、13自体により印加された電圧により規定されることがわかる。ゲート電極12は量子点11を含むスペースの領域を規定するのに用いられる。ゲート電極13はゲート電極12と同じタイプであることが可能であるが、Qubitを再初期化するのに特化されていることも可能である。

【0110】

電圧パルスは電圧源15により電極13に一時的に印加されて量子点11の大きさを変え、Qubitの遷移周波数を外部環境の共鳴周波数に等しいか、または近い値に変えるようにすることが可能である。

50

## 【0111】

回路17は電流源171とコイル172を備え、量子点の領域内に磁界を生成するのに用いられる。この回路は磁界パルスを印加してQubitの遷移周波数を外部環境共鳴周波数に等しいか、または近い値に変えるのに使用することが可能である。

## 【0112】

共鳴回路16は電圧源15とゲート電極13の間にあり、並列に接続された抵抗器161と、インダクタ162と、コンデンサ163とを備える。ゲート13の制御回路の共鳴モードは、Qubitの遷移エネルギーが共鳴モードと一致するときに、Qubitのエネルギーを吸収することが可能であるが、この共鳴モードはゲート電極12の回路の一方に、または回路17にさえも等しく見出すことができる。

10

## 【図面の簡単な説明】

## 【0113】

【図1】ジョセフソン接合に基づくカントロニウム(Quantronium)型の電子Qubitの理論図である。

【図2】本発明の量子ビット装置の動作点の選択を説明する三次元図である。

【図3】本発明の量子ビット装置の量子状態の測定の操作に関する信号のタイミング図の例である。

【図4A】カントロニウムが状態 $|1\rangle$ に準備された後、カントロニウムに印加された読取電流パルスの一時的表示の図であり、プラトーが前記パルスの立ち上がりエッジに置かれ、試験が読取接合の異なる電流値において種々の持続時間で置換え可能であるようにしている。

20

【図4B】状態 $|1\rangle$ のカントロニウムを測定する確率の変化を、読取パルスの立ち上がりエッジの電流の関数として示す図であり、ここではプラトーの期間は100ナノ秒(ns)である。

【図4C】状態 $|1\rangle$ のカントロニウムを測定する確率の変化を、カントロニウムの遷移周波数の2つの異なる値を示す2つのプラトー電流値の持続時間の関数として示す図である。

【図5】再初期化手段が読取パルスに特異的な制御要素を備える回路を示す図である。

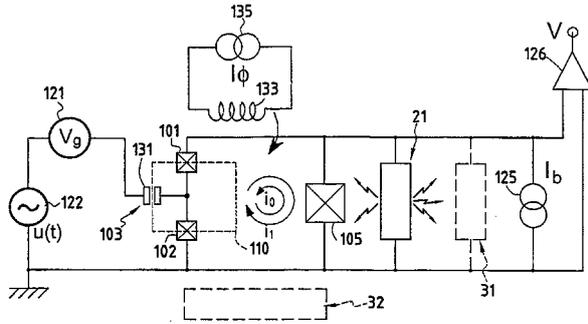
【図6】再初期化手段が近傍磁気ループを用いるQubitの位相に特異的な制御要素を備える回路を示す図である。

30

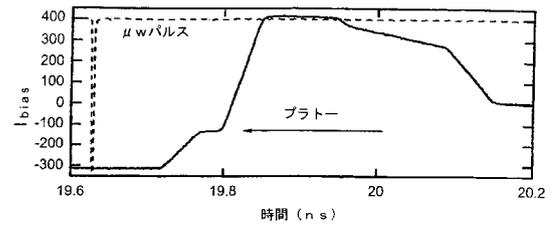
【図7】イオン性Qubitを示す図であり、電磁気キャビティと連絡する装置およびその中のイオンを変位する手段を示す。

【図8】二次元ガス中の「量子点」を有する「Qubit」を示す図であり、その寸法(および従ってQubitの遷移周波数の)変更と、所与の周波数モードにおけるそのエネルギーの吸収を同時に誘起する電気回路を示す。

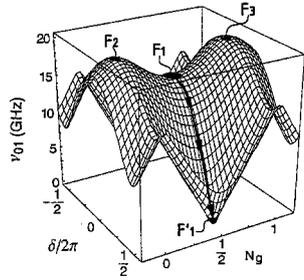
【図 1】



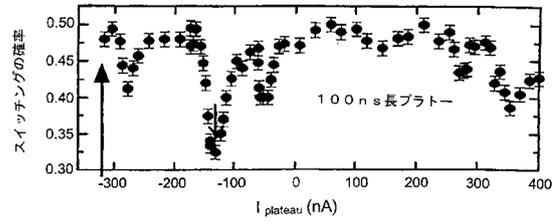
【図 4 A】



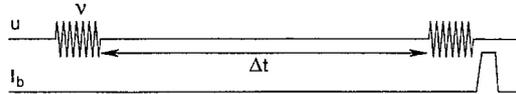
【図 2】



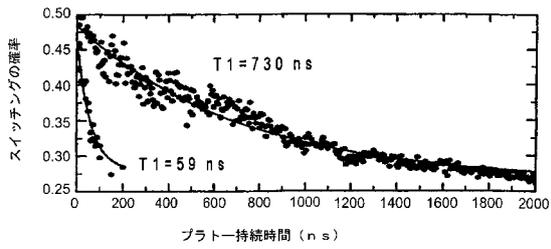
【図 4 B】



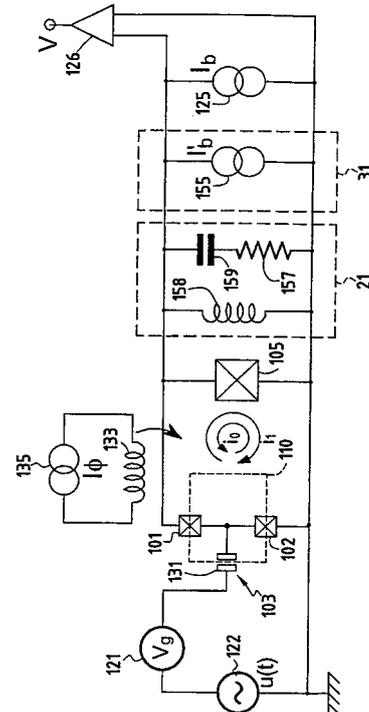
【図 3】



【図 4 C】



【図 5】





## 【 国際調査報告 】

## INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International Application No  
PCT/FR2004/002864

<b>A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER</b> G06N1/00		
According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC		
<b>B. FIELDS SEARCHED</b>		
Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols) G06N		
Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched		
Electronic data base consulted during the International search (name of data base and, where practical, search terms used) EPO-Internal, INSPEC, WPI Data, PAJ, IBM-TDB		
<b>C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT</b>		
Category *	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	WO 03/090162 A (WAVE SYSTEMS INC D) 30 October 2003 (2003-10-30) page 15, line 22 - page 16, line 3 page 38, line 26 - page 40, line 19; figure 1	1-21
A	WO 02/097725 A (WAVE SYSTEMS INC D) 5 December 2002 (2002-12-05) page 6, line 27 - page 8, line 11 page 22, line 30 - page 25, line 21 page 29, line 13 - page 31, line 8 page 32, line 23 - page 34, line 26; figures 6-8,12,13,16,17	1-21
-/--		
<input checked="" type="checkbox"/> Further documents are listed in the continuation of box C. <input checked="" type="checkbox"/> Patent family members are listed in annex.		
* Special categories of cited documents : *A* document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance *E* earlier document but published on or after the International filing date *L* document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified) *O* document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means *P* document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed *T* later document published after the International filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention *X* document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone *Y* document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art. *&* document member of the same patent family		
Date of the actual completion of the international search  13 March 2006		Date of mailing of the international search report  30/03/2006
Name and mailing address of the ISA European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl, Fax: (+31-70) 340-3016		Authorized officer  Schenkels, P

Form PCT/ISA/210 (second sheet) (January 2004)

## INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International Application No  
PCT/FR2004/002864

C.(Continuation) DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category *	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	<p>JEFFERSON J H ET AL: "Two-electron quantum dots as scalable qubits"            PHYSICAL REVIEW A (ATOMIC, MOLECULAR, AND OPTICAL PHYSICS) APS THROUGH AIP USA,            vol. 66, no. 4, October 2002 (2002-10),            pages 042328/1-11, XP002303412            ISSN: 1050-2947            page 1, left-hand column, line 1 - line 31            page 3, left-hand column, line 2 - line 3            page 6, left-hand column, line 20 - page            7, left-hand column, line 3            -----</p>	1-21

**INTERNATIONAL SEARCH REPORT**

Information on patent family members

International Application No

PCT/FR2004/002864

Patent document cited in search report		Publication date	Patent family member(s)	Publication date
WO 03090162	A	30-10-2003	AU 2003218935 A1	03-11-2003
			CA 2482792 A1	30-10-2003
			EP 1518208 A2	30-03-2005
			JP 2005527902 T	15-09-2005
-----				
WO 02097725	A	05-12-2002	CA 2448682 A1	05-12-2002
			EP 1395947 A2	10-03-2004
			JP 2004533061 T	28-10-2004
			US 2004167036 A1	26-08-2004
			US 2004170047 A1	02-09-2004
			US 2002188578 A1	12-12-2002
-----				

## RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Demande Internationale No  
PCT/FR2004/002864

<b>A. CLASSEMENT DE L'OBJET DE LA DEMANDE</b> G06N1/00		
Selon la classification internationale des brevets (CIB) ou à la fois selon la classification nationale et la CIB		
<b>B. DOMAINES SUR LESQUELS LA RECHERCHE A PORTE</b>		
Documentation minimale consultée (système de classification suivi des symboles de classement) G06N		
Documentation consultée autre que la documentation minimale dans la mesure où ces documents relèvent des domaines sur lesquels a porté la recherche		
Base de données électronique consultée au cours de la recherche internationale (nom de la base de données, et si réalisable, termes de recherche utilisés) EPO-Internal, INSPEC, WPI Data, PAJ, IBM-TDB		
<b>C. DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS</b>		
Catégorie *	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées
A	WO 03/090162 A (WAVE SYSTEMS INC D) 30 octobre 2003 (2003-10-30) page 15, ligne 22 - page 16, ligne 3 page 38, ligne 26 - page 40, ligne 19; figure 1	1-21
A	WO 02/097725 A (WAVE SYSTEMS INC D) 5 décembre 2002 (2002-12-05) page 6, ligne 27 - page 8, ligne 11 page 22, ligne 30 - page 25, ligne 21 page 29, ligne 13 - page 31, ligne 8 page 32, ligne 23 - page 34, ligne 26; figures 6-8,12,13,16,17	1-21
	----- -/--	
<input checked="" type="checkbox"/> Voir la suite du cadre C pour la fin de la liste des documents <input checked="" type="checkbox"/> Les documents de familles de brevets sont indiqués en annexe		
* Catégories spéciales de documents cités:		
*A* document définissant l'état général de la technique, non considéré comme particulièrement pertinent	*T* document ultérieur publié après la date de dépôt international ou la date de priorité et n'appartenant pas à l'état de la technique pertinent, mais cité pour comprendre le principe ou la théorie constituant la base de l'invention	
*E* document antérieur, mais publié à la date de dépôt international ou après cette date	*X* document particulièrement pertinent; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme nouvelle ou comme impliquant une activité inventive par rapport au document considéré isolément	
*L* document pouvant jeter un doute sur une revendication de priorité ou cité pour déterminer la date de publication d'une autre citation ou pour une raison spéciale (telle qu'indiquée)	*Y* document particulièrement pertinent; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme impliquant une activité inventive lorsque le document est associé à un ou plusieurs autres documents de même nature, cette combinaison étant évidente pour une personne du métier	
*O* document se référant à une divulgation orale, à un usage, à une exposition ou tous autres moyens	*G* document qui fait partie de la même famille de brevets	
*P* document publié avant la date de dépôt international, mais postérieurement à la date de priorité revendiquée		
Date à laquelle la recherche internationale a été effectivement achevée	Date d'expédition du présent rapport de recherche internationale	
13 mars 2006	30/03/2006	
Nom et adresse postale de l'administration chargée de la recherche internationale Office Européen des Brevets, P.B. 5818 Patentaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo.nl Fax: (+31-70) 340-3016	Fonctionnaire autorisé  Schenkeis, P	

## RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Requête Internationale No  
PCT/FR2004/002864

C.(suite) DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS		
Catégorie	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées
A	<p>JEFFERSON J H ET AL: "Two-electron quantum dots as scalable qubits"            PHYSICAL REVIEW A (ATOMIC, MOLECULAR, AND OPTICAL PHYSICS) APS THROUGH AIP USA,            vol. 66, no. 4, octobre 2002 (2002-10),            pages 042328/1-11, XP002303412            ISSN: 1050-2947            page 1, colonne de gauche, ligne 1 - ligne 31            page 3, colonne de gauche, ligne 2 - ligne 3            page 6, colonne de gauche, ligne 20 - page 7, colonne de gauche, ligne 3</p>	1-21

**RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE**

Renseignements re ux membres de familles de brevets

mande Internationale No

PCT/FR2004/002864

Document brevet cité au rapport de recherche	Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
WO 03090162      A	30-10-2003	AU 2003218935 A1	03-11-2003
		CA 2482792 A1	30-10-2003
		EP 1518208 A2	30-03-2005
		JP 2005527902 T	15-09-2005
WO 02097725      A	05-12-2002	CA 2448682 A1	05-12-2002
		EP 1395947 A2	10-03-2004
		JP 2004533061 T	28-10-2004
		US 2004167036 A1	26-08-2004
		US 2004170047 A1	02-09-2004
		US 2002188578 A1	12-12-2002

## フロントページの続き

(81) 指定国 AP(BW, GH, GM, KE, LS, MW, MZ, NA, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), EA(AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), EP(AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HU, IE, IS, IT, LU, MC, NL, PL, PT, RO, SE, SI, SK, TR), OA(BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG), AE, AG, AL, AM, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KP, KR, KZ, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LV, MA, MD, MG, MK, MN, MW, MX, MZ, NA, NI, NO, NZ, OM, PG, PH, PL, PT, RO, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SY, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, UZ, VC, VN, YU, ZA, ZM, ZW

(72) 発明者 エステヴェ , ダニエル  
フランス国, F - 7 8 2 2 0 ヴィロフレ, プールヴァール ドゥ ラ リベラシオン 3

(72) 発明者 ジョワイエ, フィリップ  
フランス国, F - 9 1 4 0 0 オルセイ, プールヴァール ドゥ モンデトゥール, 1 0 2

(72) 発明者 ポティエ, ユーグ  
フランス国, F - 7 5 0 1 4 パリ, リュ アルフォンス ドーデ 2

(72) 発明者 オルフィラ, ピエール - フランソワ  
フランス国, F - 9 1 1 2 0 パレソー, シュマン ドゥ ラ ユニエル 6 9

(72) 発明者 コラン, エディ  
フランス国, F - 7 8 3 7 0 プレジール, リュ セヴェストレ 2 7 3

(72) 発明者 イテエル, グレゴワール  
フランス国, F - 7 8 1 1 0 ル ヴェジネ, リュ ジャン ローラン 3 7

(72) 発明者 ウルピナ, クリスチャン  
フランス国, F - 9 1 1 9 0 ジフ シュル イヴェト, アレー オートゥリヴ 1 7

Fターム(参考) 4M113 AA08 AA18 AA25 AC03 AD36 CA12 CA13