

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公表特許公報(A)

(11) 特許出願公表番号

特表2005-521248  
(P2005-521248A)

(43) 公表日 平成17年7月14日(2005.7.14)

(51) Int. Cl.<sup>7</sup>  
H01L 39/22

F I  
H01L 39/22 ZAAA  
H01L 39/22 K

テーマコード(参考)  
4M113

審査請求 未請求 予備審査請求 未請求 (全 43 頁)

(21) 出願番号 特願2003-577344 (P2003-577344)  
 (86) (22) 出願日 平成15年3月14日(2003.3.14)  
 (85) 翻訳文提出日 平成16年11月16日(2004.11.16)  
 (86) 国際出願番号 PCT/CA2003/000357  
 (87) 国際公開番号 W02003/079450  
 (87) 国際公開日 平成15年9月25日(2003.9.25)  
 (31) 優先権主張番号 60/365,490  
 (32) 優先日 平成14年3月16日(2002.3.16)  
 (33) 優先権主張国 米国(US)  
 (31) 優先権主張番号 10/121,800  
 (32) 優先日 平成14年4月12日(2002.4.12)  
 (33) 優先権主張国 米国(US)  
 (31) 優先権主張番号 10/121,817  
 (32) 優先日 平成14年4月12日(2002.4.12)  
 (33) 優先権主張国 米国(US)

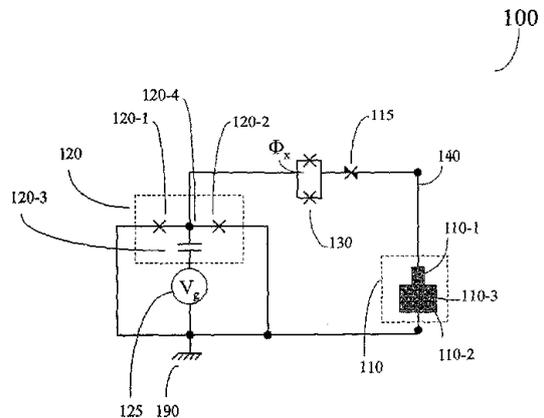
(71) 出願人 503226534  
 ディー・ウェイヴ システムズ インコー  
 ポレイテッド  
 カナダ プリティッシュ コロンビア ヴ  
 ィー6ジェイ 4ワイ3 バンクーバー  
 ブロードウェイ 1985 스위트 3  
 20  
 (74) 代理人 100082005  
 弁理士 熊倉 禎男  
 (74) 代理人 100067013  
 弁理士 大塚 文昭  
 (74) 代理人 100074228  
 弁理士 今城 俊夫  
 (74) 代理人 100086771  
 弁理士 西島 孝喜

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 量子位相電荷結合素子

(57) 【要約】

メゾスコピック位相素子及びメゾスコピック電荷素子を含む超伝導構造体。超伝導構造体は更に、メゾスコピック位相素子の量子状態とメゾスコピック電荷素子の量子状態とが相互作用するように、メゾスコピック位相素子とメゾスコピック電荷素子とを結合する機構を含む。別の態様では、超伝導構造体は、メゾスコピック電荷素子の量子状態を読み出す機構を含む。



100

## 【特許請求の範囲】

## 【請求項 1】

メソスコピック位相素子と、  
メソスコピック電荷素子と、  
前記メソスコピック位相素子の量子状態と、前記メソスコピック電荷素子の量子状態とが相互作用するように、メソスコピック位相素子とメソスコピック電荷素子とを結合する機構と、  
を有することを特徴とする超伝導構造体。

## 【請求項 2】

前記メソスコピック位相素子が、電荷エネルギー  $E_C$  とジョセフソン結合エネルギー  $E_J$  によって特徴付けられる超伝導メソスコピック島を含み、前記メソスコピック島の前記電荷エネルギー  $E_C$  が、前記ジョセフソン結合エネルギー  $E_J$  より少なくとも 10 倍大きいことを特徴とする請求項 1 に記載の超伝導構造体。

10

## 【請求項 3】

前記メソスコピック位相素子が、超伝導メソスコピック島を含み、前記メソスコピック島の電荷エネルギー  $E_C$  が、前記メソスコピック島のジョセフソン結合エネルギー  $E_J$  と同じオーダーであることを特徴とする請求項 1 に記載の超伝導構造体。

## 【請求項 4】

前記メソスコピック位相素子が、時間反転対称を乱す超伝導材料からなることを特徴とする請求項 1 に記載の超伝導構造体。

20

## 【請求項 5】

時間反転対称を乱す前記超伝導材料が d 波超伝導体であることを特徴とする請求項 4 に記載の超伝導構造体。

## 【請求項 6】

前記 d 波超伝導材料が、 $\text{Yb}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ 、 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_{n-1}\text{Cu}_n\text{O}_{2n+4}$ 、 $\text{Tl}_2\text{Ba}_2\text{CuO}_{6+x}$  及び  $\text{HgBa}_2\text{CuO}_4$  からなるグループから選択され、 $x$  は 0.6 よりも小さく、0 よりも大きいことを特徴とする請求項 5 に記載の超伝導構造体。

## 【請求項 7】

超伝導材料が、p 波超伝導体であることを特徴とする請求項 5 に記載の超伝導構造体。

## 【請求項 8】

超伝導材料が、 $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  であることを特徴とする請求項 7 に記載の超伝導構造体。

30

## 【請求項 9】

超伝導材料が、 $\text{CeIrIn}_5$  であることを特徴とする請求項 7 に記載の超伝導構造体。

## 【請求項 10】

メソスコピック位相素子が、  
メソスコピック島と、  
バルク領域と、  
前記メソスコピック島を前記バルク領域から分離するクリアなジョセフソン接合と、  
を有することを特徴とする、請求項 1 に記載の超伝導構造体。

## 【請求項 11】

メソスコピック位相素子が、  
1 又はそれ以上のジョセフソン接合を含む内側超伝導ループと、  
2 又はそれ以上のジョセフソン接合を含む外側超伝導ループと、  
を含み、  
前記内側超伝導ループが、前記外側超伝導ループに誘導的に結合されたことを特徴とする請求項 1 に記載の超伝導構造体。

40

## 【請求項 12】

前記メソスコピック位相素子の前記内側超伝導ループが、通常の超伝導材料からなることを特徴とする請求項 11 に記載の超伝導構造体。

## 【請求項 13】

50

前記通常の超伝導構造体が、アルミニウム (Al)、ニオブ (Nb) 及び鉛 (Pb) からなるグループから選択されることを特徴とする請求項 1 2 に記載の超伝導構造体。

【請求項 1 4】

前記内側超伝導ループが時間反転対称を乱す超伝導材料からなることを特徴とする請求項 1 1 に記載の超伝導構造体。

【請求項 1 5】

前記超伝導材料が、d 波超伝導体であることを特徴とする請求項 1 4 に記載の超伝導構造体。

【請求項 1 6】

前記 d 波超伝導材料が、 $\text{Yb}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ 、 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_{n-1}\text{Cu}_n\text{O}_{2n+4}$ 、 $\text{Tl}_2\text{Ba}_2\text{CuO}_{6+x}$  及び  $\text{HgBa}_2\text{CuO}_4$  からなるグループから選択され、 $x$  が 0.6 よりも小さく、0 よりも大きいことを特徴とする請求項 1 5 に記載の超伝導構造体。 10

【請求項 1 7】

前記外側超伝導ループが通常の超伝導材料からなることを特徴とする請求項 1 1 に記載の超伝導構造体。

【請求項 1 8】

前記通常の超伝導材料が、アルミニウム (Al)、ニオブ (Nb) 及び鉛 (Pb) からなるグループから選択されることを特徴とする請求項 1 7 に記載の超伝導構造体。

【請求項 1 9】

前記外側超伝導ループが移相素子を含むことを特徴とする請求項 1 1 に記載の超伝導構造体。 20

【請求項 2 0】

前記メソスコピック電荷素子が、電荷エネルギー  $E_C$  とジョセフソン結合エネルギー  $E_J$  によって特徴付けられる超伝導メソスコピック島を含み、前記メソスコピック超伝導領域の前記電荷エネルギー  $E_C$  が、前記ジョセフソン結合エネルギー  $E_J$  と比較して小さいことを特徴とする請求項 1 に記載の超伝導構造体。

【請求項 2 1】

前記メソスコピック電荷素子が、超伝導メソスコピック島を含み、前記メソスコピック島の電荷エネルギー  $E_C$  が、前記メソスコピック島のジョセフソン結合エネルギー  $E_J$  以下であることを特徴とする請求項 1 に記載の超伝導構造体。 30

【請求項 2 2】

前記メソスコピック電荷素子が、  
素子リードと、  
メソスコピック島と、  
前記素子リードに接続され、かつ、前記 2 つのジョセフソン接合が、前記メソスコピック島に結合されて、前記メソスコピック島を前記素子リードから絶縁する 2 つのジョセフソン接合と、  
前記メソスコピック島に容量的に結合された電極と、  
前記容量的に結合された電極の電荷を制御する機構とを含む、  
ことを特徴とする請求項 1 に記載の超伝導構造体。 40

【請求項 2 3】

前記メソスコピック電荷素子が、通常の超伝導材料を含むことを特徴とする請求項 1 に記載の超伝導構造体。

【請求項 2 4】

結合のための前記機構が移相を導入するための機構を含むことを特徴とする請求項 1 に記載の超伝導構造体。

【請求項 2 5】

結合のための前記機構が、前記メソスコピック位相素子と前記メソスコピック電荷素子との間の移相を制御するための機構を含むことを特徴とする請求項 2 4 に記載の超伝導構造体。

## 【請求項 26】

移相を制御するための前記機構が、 $\pi/2$ 移相素子であることを特徴とする請求項 25 に記載の超伝導構造体。

## 【請求項 27】

前記  $\pi/2$ 移相素子が移相ジョセフソン接合であることを特徴とする請求項 26 に記載の超伝導構造体。

## 【請求項 28】

前記移相ジョセフソン接合が、強磁性材料を含み、前記強磁性材料が前記移相ジョセフソン接合のリードの間に配置されたことを特徴とする請求項 27 に記載の超伝導構造体。

## 【請求項 29】

移相ジョセフソン接合は、通常でない超伝導材料を含み、前記移相ジョセフソン接合のリードが、ジョセフソン接合粒界を横切って接続され、その結果、移相が前記粒界を横切る遷移で蓄積されることを特徴とする請求項 27 に記載の超伝導構造体。

10

## 【請求項 30】

前記粒界を横切る結晶の異方性の角度が、前記粒界の角度に対して  $0^\circ$  乃至  $45^\circ$  である、ことを特徴とする請求項 29 に記載の超伝導構造体。

## 【請求項 31】

前記メソスコピック位相素子がキュビットであることを特徴とする請求項 1 に記載の超伝導構造体。

## 【請求項 32】

前記メソスコピック電荷素子がキュビットであることを特徴とする請求項 1 に記載の超伝導構造体。

20

## 【請求項 33】

前記メソスコピック位相素子と前記メソスコピック電荷素子とを結合する前記機構が、前記メソスコピック位相素子と前記メソスコピック電荷素子とをコヒーレントに結合する、ことを特徴とする請求項 1 に記載の超伝導構造体。

## 【請求項 34】

前記メソスコピック位相素子と前記メソスコピック電荷素子とを結合する前記機構が、前記メソスコピック位相素子と前記メソスコピック電荷素子とを絡み合わせることができものである、ことを特徴とする請求項 1 に記載の超伝導構造体。

30

## 【請求項 35】

移相を制御する前記機構が、 $\pi/2$ 移相を生じること特徴とする請求項 25 に記載の超伝導構造体。

## 【請求項 36】

移相を制御する前記機構が、 $\pi/2 \pm 0.20$  移相を生じること特徴とする請求項 25 に記載の超伝導構造体。

## 【請求項 37】

移相を制御する前記機構が、 $\pi/2 \pm 0.10$  移相を生じること特徴とする請求項 25 に記載の超伝導構造体。

## 【請求項 38】

移相を制御する前記機構が、 $\pi/2 \pm 0.05$  移相を生じること特徴とする請求項 25 に記載の超伝導構造体。

40

## 【請求項 39】

メソスコピック位相素子と、  
メソスコピック電荷素子と、  
前記メソスコピック位相素子の量子状態と前記メソスコピック電荷素子の量子状態とが相互作用するように、前記メソスコピック位相素子を前記メソスコピック電荷素子に結合するための機構と、  
前記メソスコピック電荷素子の量子状態を読み出すための機構と、  
を有することを特徴とする超伝導構造体。

50

## 【請求項 40】

前記メソスコピック電荷素子が素子リードを含み、前記メソスコピック電荷素子の量子状態を読み出す前記機構が、

シャント抵抗と、

電流源と、

前記メソスコピック電荷素子のリードにおける電圧降下を測定するための機構と、

前記メソスコピック電荷素子のリードを接地するための機構と、

を含み、

前記シャント抵抗、前記電流源、電圧降下を測定するための前記機構、及び、接地するための前記機構が、前記メソスコピック電荷素子の前記素子リードと並列であることを特徴とする請求項 39 に記載の超伝導構造体。

10

## 【請求項 41】

前記メソスコピック電荷素子が素子リードを含み、前記メソスコピック電荷素子の量子状態を読み出す前記機構が、

ジョセフソン接合と、

電流源と、

前記メソスコピック電荷素子のリードにおける電圧降下を測定するように構成された機構と、

前記メソスコピック電荷素子のリードを接地するための機構と、

を含み、

前記ジョセフソン接合、前記電流源、電圧降下を測定する要に構成された前記機構、及び、接地するための前記機構が、前記メソスコピック電荷素子の前記素子リードと並列に配置されていることを特徴とする請求項 39 に記載の超伝導構造体。

20

## 【請求項 42】

前記メソスコピック電荷素子の量子状態を読み出すための前記機構が、

接地された前記メソスコピック電荷素子の第 1 のリードと、

タンク回路に接続された前記メソスコピック電荷素子の第 2 のリードと、を有し、

前記タンク回路がインダクタ及びキャパシタを含み、

前記タンク回路の特性が、前記メソスコピック電荷素子の量子状態に依存する、ことを特徴とする請求項 39 に記載の超伝導構造体。

30

## 【請求項 43】

前記タンク回路の前記特性が、前記タンク回路のインピーダンスであることを特徴とする請求項 42 に記載の超伝導構造体。

## 【請求項 44】

前記メソスコピック電荷素子の量子状態を読み出すための前記機構が、

前記メソスコピック電荷素子の第 1 のリードを前記メソスコピック電荷素子の第 2 のリードに接続させて、前記メソスコピック電荷素子のリードがループを形成するようにすることと、を含み、

タンク回路と、前記タンク回路が、前記ループに誘導的に結合され、前記タンク回路の特性が、前記メソスコピック電荷素子の量子状態に依存する、ことを特徴とする請求項 42 に記載の超伝導構造体。

40

## 【請求項 45】

前記タンク回路の前記特性が、前記タンク回路のインピーダンスであることを特徴とする請求項 44 に記載の超伝導構造体。

## 【請求項 46】

各々が並列に配置された複数の追加のメソスコピック位相素子と、

前記第 1 の追加のメソスコピック位相素子の状態と前記メソスコピック電荷素子の状態とが相互作用するように、前記複数の追加のメソスコピック位相素子の第 1 の追加のメソスコピック位相素子を前記メソスコピック電荷素子に結合する機構とを更に含む、ことを特徴とする請求項 39 に記載の超伝導構造体。

50

## 【請求項 47】

前記メゾスコピック位相素子と前記複数の追加のメゾスコピック位相素子からなるグループの各メゾスコピック位相素子が位相キュビットであり、前記超伝導構造体が量子レジスタを形成する、ことを特徴とする請求項 46 に記載の超伝導構造体。

## 【請求項 48】

メゾスコピック位相素子の状態を読み出す機構を更に有することを特徴とする請求項 39 に記載の超伝導構造体。

## 【請求項 49】

複数のメゾスコピック位相素子とを有し、前記複数のメゾスコピック位相素子の各メゾスコピック位相素子が並列に配置され、

10

メゾスコピック電荷素子と、

前記第 1 のメゾスコピック位相素子の状態と前記メゾスコピック電荷素子の状態とが相互作用するように、前記複数のメゾスコピック位相素子の第 1 のメゾスコピック位相素子を前記メゾスコピック電荷素子と結合させる機構と、

前記メゾスコピック電荷素子の状態を読み出す機構と、  
を有することを特徴とする超伝導構造体。

## 【請求項 50】

前記メゾスコピック電荷素子がリードを含み、前記メゾスコピック電荷素子の状態を読み出す前記機構が、

シャント抵抗と、

20

電流源と、

前記メゾスコピック電荷素子のリードにおける電圧降下を測定するための機構と、

前記メゾスコピック電荷素子のリードを接地するための機構と、

を含み、

前記シャント抵抗、前記電流源、電圧降下を測定するための前記機構、及び、接地するための前記機構が、前記メゾスコピック電荷素子の前記素子リードと並列であることを特徴とする請求項 49 に記載の超伝導構造体。

## 【請求項 51】

前記メゾスコピック電荷素子が素子リードを含み、前記メゾスコピック電荷素子の状態を読み出す前記機構が、

30

ジョセフソン接合と、

電流源と、

前記メゾスコピック電荷素子のリードにわたって電圧降下を測定するための機構と、

前記メゾスコピック電荷素子のリードを接地するための機構と、

を含み、

前記ジョセフソン接合、前記電流源、電圧降下を測定するための前記機構、及び、接地するための前記機構が、前記メゾスコピック電荷素子のリードと並列に配置されたことを特徴とする請求項 49 に記載の超伝導構造体。

## 【請求項 52】

前記メゾスコピック電荷素子の状態を読み出す前記機構が、

40

前記メゾスコピック電荷素子の第 1 のリードを接地し、

前記メゾスコピック電荷素子の第 2 のリードをタンク回路に接続すること、を含み、

前記タンク回路がインダクタ及びキャパシタを含み、

前記タンク回路の特性が、前記メゾスコピック電荷素子の状態に依存する、

ことを特徴とする請求項 49 に記載の超伝導構造体。

## 【請求項 53】

前記タンク回路の前記特性が、前記タンク回路のインピーダンスであることを特徴とする請求項 52 に記載の超伝導構造体。

## 【請求項 54】

前記複数のメゾスコピック位相素子の各メゾスコピック位相素子が位相キュビットであ

50

り、前記超伝導構造体が量子レジスタを形成する、ことを特徴とする請求項 49 に記載の超伝導構造体。

【請求項 55】

各々が並列に配置された複数のメソスコピック位相素子と、  
複数のメソスコピック電荷素子と、

前記複数のメソスコピック位相素子の第 1 の位相素子の状態と第 1 のメソスコピック電荷素子の状態とが相互作用するように、該第 1 のメソスコピック位相素子と、前記複数のメソスコピック電荷素子の第 1 のメソスコピック電荷素子とを結合する機構と、

第 1 のメソスコピック電荷素子又は前記メソスコピック位相素子の状態を読み出す機構と、

を有することを特徴とする超伝導構造体。

10

【請求項 56】

前記メソスコピック電荷素子の状態を読み出す前記機構が、  
シャント抵抗と、

電流源と、

前記メソスコピック電荷素子のリードにおける電圧降下を測定するための機構と、

前記メソスコピック電荷素子のリードを接地するための機構と、

を含み、

前記シャント抵抗、前記電流源、電圧降下を測定するための前記機構、及び、接地するための前記機構が、前記メソスコピック電荷素子の前記素子リードと並列であることを特徴とする請求項 55 に記載の超伝導構造体。

20

【請求項 57】

前記メソスコピック電荷素子の各々がリードを含み、前記第 1 のメソスコピック電荷素子の状態を読み出す前記機構が、

ジョセフソン接合と、

電流源と、

前記第 1 のメソスコピック電荷素子のリードにおける電圧降下を測定するための機構と、

前記第 1 のメソスコピック電荷素子のリードを接地するための機構と、

を含み、

前記ジョセフソン接合、前記電流源、電圧降下を測定するための前記機構、及び、接地するための前記機構が、前記第 1 のメソスコピック電荷素子のリードと並列に配置されたことを特徴とする請求項 55 に記載の超伝導構造体。

30

【請求項 58】

前記第 1 のメソスコピック電荷素子の状態を読み出す前記機構が、

前記第 1 のメソスコピック電荷素子の第 1 のリードを接地し、

前記メソスコピック電荷素子の第 2 のリードをタンク回路に接続することを含み、

前記タンク回路がインダクタ及びキャパシタを含み、

前記タンク回路の特性が、前記第 1 のメソスコピック電荷素子の状態に依存する、ことを特徴とする請求項 55 に記載の超伝導構造体。

40

【請求項 59】

前記タンク回路の特性が、前記タンク回路のインピーダンスであることを特徴とする請求項 55 に記載の超伝導構造体。

【請求項 60】

前記複数のメソスコピック位相素子の各メソスコピック位相素子と、前記複数のメソスコピック電荷素子の各メソスコピック電荷素子がキュビットであり、前記超伝導構造体が不均一な量子レジスタを構成する、ことを特徴とする請求項 55 に記載の超伝導構造体。

【請求項 61】

メソスコピック位相素子の量子状態を読み出す方法であって、

該方法が、

50

移相素子を使用してメゾスコピック電荷素子に前記メゾスコピック位相素子をコヒーレントに結合させ、

前記メゾスコピック電荷素子の量子状態を測定する、ステップを有することを特徴とする方法。

【請求項 6 2】

前記メゾスコピック移相素子を前記メゾスコピック電荷素子にコヒーレントに結合するステップが更に、

前記メゾスコピック位相素子と前記メゾスコピック電荷素子との間にコヒーレントな接続を設けるステップを有し、前記コヒーレントな接続が、前記移相素子を含み、前記コヒーレントな接続が、前記メゾスコピック位相素子の量子状態と、前記メゾスコピック電荷素子の量子状態とを維持し、

前記メゾスコピック位相素子と前記電荷素子との間の前記コヒーレントな接続を制御する位相干渉スイッチを設け、

持続時間  $t$  の間、前記位相干渉スイッチの量子状態を調整する、ステップを有することを特徴とする請求項 6 1 に記載の方法。

【請求項 6 3】

前記メゾスコピック位相素子及び前記メゾスコピック電荷素子が前記持続時間  $t$  の間、接続又は切断されることを特徴とする請求項 6 1 に記載の方法。

【請求項 6 4】

前記移相素子が  $1/2$  移相素子であることを特徴とする請求項 6 1 に記載の方法。

【請求項 6 5】

前記位相干渉スイッチが、第 1 の分岐に第 1 のジョセフソン接合及び前記第 2 の分岐に第 2 のジョセフソン接合を含む超伝導ループであることを特徴とする請求項 6 2 に記載の方法。

【請求項 6 6】

前記位相干渉スイッチを調整するステップが、印加された外部フラックス  $x$  を制御するステップを含むことを特徴とする請求項 6 2 に記載の方法。

【請求項 6 7】

前記メゾスコピック位相素子に導く前記コヒーレントな接続に前記 SSET の第 1 のリードを接続し、前記第 2 のメゾスコピック電荷素子に導く前記コヒーレントな接続に前記 SSET の第 2 のリードを接続するように、前記位相干渉スイッチが前記コヒーレントな接続に接続されたことを特徴とする請求項 6 2 に記載の方法。

【請求項 6 8】

前記位相干渉スイッチの量子状態を調整するステップが、ゲート電圧を制御するステップを含むことを特徴とする請求項 6 2 に記載の方法。

【請求項 6 9】

前記持続時間  $t$  が、前記メゾスコピック位相素子のトンネリング振幅のオーダーであることを特徴とする請求項 6 2 に記載の方法。

【請求項 7 0】

前記持続時間が、約 2 マイクロ秒以下であることを特徴とする請求項 6 2 に記載の方法

【請求項 7 1】

前記メゾスコピック電荷素子の量子状態を促成するステップが、ある持続時間  $t_0$  の快打、前記メゾスコピック電荷素子のリードにわたってバイアス電流を駆動し、

前記メゾスコピック電荷素子にわたって電圧降下を測定する、ステップを含むことを特徴とする請求項 6 2 に記載の方法。

【請求項 7 2】

前記メゾスコピック電荷素子が、シャント抵抗と並列に配置され、前記メゾスコピック電荷素子にわたる電圧降下の測定が、前記シャント抵抗にわたる電圧降下を含む、ことを

10

20

30

40

50

特徴とする請求項 7 1 に記載の方法。

【請求項 7 3】

シャント抵抗がジョセフソン接合であることを特徴とする請求項 7 2 に記載の方法。

【請求項 7 4】

前記持続時間  $t_0$  が約 1 マイクロ秒以下であることを特徴とする請求項 7 1 に記載の方法。

【請求項 7 5】

前記持続時間  $t_0$  が約 1 ナノ秒以下であることを特徴とする請求項 7 1 に記載の方法。

【請求項 7 6】

前記測定された電圧降下が、前記メゾスコピック位相素子の量子状態と関連することを特徴とする請求項 7 1 に記載の方法。 10

【請求項 7 7】

前記メゾスコピック位相素子が、位相キュビットであることを特徴とする請求項 6 1 に記載の方法。

【請求項 7 8】

前記移相キュビットの量子状態を読み出す前記方法が、量子計算で使用される量子読み出しオペレーションであることを特徴とする請求項 7 7 に記載の方法。

【請求項 7 9】

複数の第 1 の位相キュビットと複数の第 2 の電荷キュビットとを含む、不均一な量子レジスタのキュビットの量子状態を読み出す方法であって、該方法が、 20

前記不均一な量子レジスタにおける第 1 の電荷キュビット又は第 1 の位相キュビットを選択し、

持続時間  $t_0$  の間、メゾスコピック電荷素子に前記第 1 の位相キュビット又は前記第 1 の電荷キュビットをコヒーレントに結合させ、

前記持続時間  $t_0$  が経過した後、前記メゾスコピック電荷素子の量子状態を読み出す、ステップを有することを特徴とする方法。

【請求項 8 0】

前記第 1 の位相キュビット又は前記第 1 の電荷キュビットが、前記第 1 の位相キュビット又は前記第 1 の電荷キュビットと前記メゾスコピック電荷素子との間の接続を調整する位相干渉スイッチの量子状態を調整することにより選択される、ことを特徴とする請求項 7 9 に記載の方法。 30

【請求項 8 1】

前記位相干渉スイッチがフラックスを印加することにより調整される、ことを特徴とする請求項 8 0 に記載の方法。

【請求項 8 2】

前記位相干渉スイッチがゲート電圧を印加することにより調整される、ことを特徴とする請求項 8 0 に記載の方法。

【請求項 8 3】

前記持続時間  $t_0$  が、前記第 1 の位相キュビット又は前記第 1 の電荷キュビットのトンネリング振幅に近いことを特徴とする請求項 7 9 に記載の方法。 40

【請求項 8 4】

前記持続時間  $t_0$  が、約 1 マイクロ秒以下であることを特徴とする請求項 7 9 に記載の方法。

【請求項 8 5】

前記持続時間  $t_0$  が、約 1 ナノ秒以下であることを特徴とする請求項 7 9 に記載の方法。

【請求項 8 6】

前記メゾスコピック電荷素子の量子状態を読み出すステップが、  
前記メゾスコピック電荷素子のリードにおいてバイアス電流を駆動させ、  
前記メゾスコピック電荷素子にわたる電圧降下を測定する、

ステップを含むことを特徴とする請求項 79 に記載の方法。

【請求項 87】

位相キュビットと電荷キュビットとの間の量子計算絡み合いオペレーションを実行する方法であって、

該方法が、

前記移相キュビットの量子状態と前記電荷キュビットの量子状態とを互いに相互作用させることができる、前記移相キュビットと前記電荷キュビットとの間のコヒーレントな接続を提供し、

持続時間  $t_c$  の間、前記コヒーレントな接続を調整するステップを有し、前記位相キュビットが、前記移相キュビットの量子状態及び前記電荷キュビットの量子状態を制御可能に絡み合わせるために、持続時間  $t_c$  の少なくとも一部の間、前記電荷キュビットに接続される、ことを特徴とする方法。

10

【請求項 88】

前記コヒーレントな接続が更に、移相素子を含むことを特徴とする請求項 87 に記載の方法。

【請求項 89】

前記コヒーレントな接続を調整するステップが、位相干渉スイッチを調整するステップを含むことを特徴とする請求項 87 に記載の方法。

【請求項 90】

前記位相干渉スイッチが、第 1 の分岐に第 1 のジョセフソン接合及び第 2 の分岐に第 2 のジョセフソン接合を含む超伝導ループであることを特徴とする請求項 89 に記載の方法。

20

【請求項 91】

前記位相干渉スイッチを調整するステップが、印加された磁束を制御するステップを含むことを特徴とする請求項 89 に記載の方法。

【請求項 92】

前記位相干渉スイッチが、前記位相キュビットに導く前記コヒーレントな接続に前記 SS ET の第 1 のリードを接続し、前記電荷キュビットに導く前記コヒーレントな接続に前記 SS ET の第 2 のリードを接続する前記コヒーレントな接続に接続された超伝導単一電子トランジスタ (SSET) であることを特徴とする請求項 89 に記載の方法。

30

【請求項 93】

前記位相干渉スイッチの状態の調整が、ゲート電圧を制御することを含むことを特徴とする請求項 89 に記載の方法。

【請求項 94】

前記持続時間  $t_c$  が約 1 マイクロ秒以下であることを特徴とする請求項 89 に記載の方法。

【請求項 95】

前記持続時間  $t_c$  が約 1 マイクロ秒以下であることを特徴とする請求項 94 に記載の方法。

【請求項 96】

前記移相素子が、  $\pi/2$  移相を生じることを特徴とする請求項 88 に記載の方法。

40

【請求項 97】

前記移相素子が、  $\pi/2 \pm 0.20$  移相を生じることを特徴とする請求項 88 に記載の方法。

【請求項 98】

前記移相素子が、  $\pi/2 \pm 0.10$  移相を生じることを特徴とする請求項 88 に記載の方法。

【請求項 99】

前記移相素子が、  $\pi/2 \pm 0.05$  移相を生じることを特徴とする請求項 88 に記載の方法。

50

## 【請求項 100】

複数の移相キュビットと複数の電荷キュビットを含む不均一な量子レジスタのキュビットを絡み合わせる方法であって、

該方法が、

前記不均一な量子レジスタの各キュビットがコヒーレントに接続及び切断されるように構成された、バスを有する量子レジスタを準備し、

前記不均一な量子レジスタの前記複数のキュビットから第1のキュビットを選択し、

持続時間  $t_1$  の間、メゾスコピック電荷素子に前記第1のキュビットを結合させ、

前記不均一な量子レジスタの前記複数のキュビットから第2のキュビットを選択し、

持続時間  $t_2$  の間、前記メゾスコピック電荷素子に前記第2のキュビットを結合させる

10

、  
ステップを有することを特徴とする方法。

## 【請求項 101】

第1のキュビットを選択するステップが、第1の位相干渉スイッチを調整するステップを含み、前記第1の位相干渉スイッチが前記第1のキュビットと相関し、前記第1の位相干渉スイッチが閉じているとき、前記第1のキュビットが前記バスに接続され、前記第1の位相干渉スイッチが開いているとき、前記第1のキュビットが前記バスから絶縁されていることを特徴とする請求項 100 に記載の方法。

## 【請求項 102】

第2のキュビットを選択するステップが、第2の位相干渉スイッチを調整するステップを含み、前記第2の位相干渉スイッチが前記第2のキュビットと相関し、前記第2の位相干渉スイッチが閉じているとき、前記第2のキュビットが前記バスに接続され、前記第2の位相干渉スイッチが開いているとき、前記第2のキュビットが前記バスから絶縁されることを特徴とする請求項 100 に記載の方法。

20

## 【請求項 103】

前記第1のキュビットを前記メゾスコピック電荷素子に結合させるステップが、前記メゾスコピック電荷素子を選択するステップを含み、前記メゾスコピック電荷素子が、持続時間  $t_s$  の間、前記バスに結合されている、ことを特徴とする請求項 101 に記載の方法。

## 【請求項 104】

前記メゾスコピック電荷素子を選択するステップが、  
前記位相干渉スイッチが開いているとき、前記メゾスコピック電荷素子が前記選択された第1のキュビットから切断され、前記位相干渉スイッチが閉じているとき、前記メゾスコピック電荷素子が前記選択された第1のキュビットに結合されるように、位相干渉スイッチを調整するステップを含む、  
ことを特徴とする請求項 103 に記載の方法。

30

## 【請求項 105】

前記持続時間  $t_1$  が約 1 マイクロ秒以下であることを特徴とする請求項 100 に記載の方法。

## 【請求項 106】

前記持続時間  $t_1$  が約 1 ナノ秒以下であることを特徴とする請求項 100 に記載の方法。

40

## 【請求項 107】

前記持続時間  $t_2$  が約 1 マイクロ秒以下であることを特徴とする請求項 100 に記載の方法。

## 【請求項 108】

前記持続時間  $t_2$  が約 1 ナノ秒以下であることを特徴とする請求項 100 に記載の方法。

## 【請求項 109】

前記メゾスコピック電荷素子の状態を読み出すことにより前記メゾスコピック電荷素子

50

からの情報をクリアするステップを更に有することを特徴とする請求項100に記載の方法。

【請求項110】

前記メゾスコピック電荷素子の状態を読み出すことが、前記不均一な量子レジスタでエラー訂正アルゴリズムを実行するようにフィードバックとして使用される情報を提供することであることを特徴とする請求項109に記載の方法。

【請求項111】

不均一な量子レジスタが新しい絡み合いオペレーションを開始するのに適当な状態にあるように、メゾスコピック電荷素子をクリアするステップを更に有することを特徴とする請求項100に記載の方法。

【請求項112】

前記メゾスコピック電荷素子の前記クリアするステップが、前記メゾスコピック電荷素子の量子状態を読み出すステップを含むことを特徴とする請求項111に記載の方法。

【請求項113】

前記クリアオペレーションが、前記量子レジスタの量子状態についての情報を提供することであることを特徴とする請求項112に記載の方法。

【請求項114】

前記クリアオペレーションが、前記量子レジスタの量子状態のエラー訂正オペレーションを実行するのに有用な情報を提供することであることを特徴とする請求項112に記載の方法。

【請求項115】

量子演算が、前記清浄オペレーションを実行した結果の情報を条件として前記量子レジスタのキュビットで実行される、ことを特徴とする請求項112に記載の方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

この出願は、2002年3月16日に出願された米国特許仮出願シリアル番号60/365,490号「Quantum Phase-Charge Coupled Device(量子位相電荷結合素子)」(代理人事件番号11090-005-888); 2002年4月12日に出願された米国特許出願シリアル番号10/121,800号「Quantum Phase-Charge Coupled Device(量子位相電荷結合素子)」(代理人事件番号11090-005-999); 2002年4月12日に出願された米国特許出願シリアル番号10/121,817号「Quantum Phase-Charge Coupled Device(量子位相電荷結合素子)」(代理人事件番号11090-006-999); 及び、2002年4月12日に出願された米国特許出願シリアル番号10/121,810号「Quantum Phase-Charge Coupled Device(量子位相電荷結合素子)」(代理人事件番号11090-007-999)に基づく優先権を主張するものである。

【0002】

本発明は、量子計算の分野に関し、特に超伝導量子計算に関する。

【背景技術】

【0003】

メゾスコピック超伝導システムは、長年の間、複雑な物理現象を示すシステムとして注目されてきた。最近、これらの現象は、量子計算の分野で実際的な用途があると理解されている。例えば、A. Assime, G. Tohansson, G. Wendin, R. Schoelkopf, and P. Delsingによる「Radio-Frequency Single-Electron Transistor as Readout Device for Qubits: Charge Sensitivity and Backaction(キュビットの読み出し素子としての無線単一電子トランジスタ: 電荷感度及びバックアクション)」, Phys. Rev. Lett. 86, p.3376 (2001年4月) 及びそこで引用された参照文献、及び、Alexandra Zagoskinによる1999年12月1日の米国特許出願シリアル番号09/452749号「Permanent Readout Superconducting Qubit(永久読み出し超伝導キュビット)」を参照し、それらの全体を引用によりここに組み入れる。

【0004】

10

20

30

40

50

量子計算は、一般的には、Nキュビット（量子ビット）の状態を初期化し、それらの間の制御された絡み合いを生成し、これらの状態を進展させることができ、進展の後、量子ビットの状態を読み出すことを含む。キュビットは量子ビットであり、量子計算における、2進数字又は古典的な計算のビットに対応するものである。まさにビットは、古典的なコンピュータでは情報の基本単位であるが、キュビットは量子コンピュータにおける情報の基本単位である。通常は、キュビットは2つの縮退した（例えば、等しいエネルギーのものである）量子状態を備えた系であり、キュビットの量子状態は、2つの縮退した状態の重ね合わせにある。2つの縮退した状態はまた、基本的な状態とも呼ばれる。更に、2つの縮退又は基本的な状態は、 $|0\rangle$ 及び $|1\rangle$ で表される。キュビットは、これらの2つの縮退状態の重ね合わせとすることができ、普通のデジタルコンピュータのビットとは基本的に異なる状態を作る。所定の条件を満たすならば、Nキュビットは、 $2^N$ という古典的状态の組み合わせである初期状態を定義することができる。この初期状態は、キュビットがそれら自身の間にも有する相互作用と、外部の影響との相互作用によって決定されて進展し、古典的な計算とは似ていない量子力学的演算を提供する。Nキュビットの状態の進展は、計算、即ち、実質的には $2^N$ という同時の古典的計算（例えば、従来のコンピュータを使用してそれらにおいて実行される従来の計算）を定義する。進展後のキュビットの状態を読み出すことにより、計算の結果を完全に決定する。

#### 【0005】

古典的状态の組み合わせの $2^N$ を表し、Nキュビットに関する必要な状態を認めるために、重ね合わせ及び絡み合いの原理を導入する必要がある。重ね合わせは、磁界の粒子としてキュビットを考慮することにより説明することができる。粒子のスピンは、スピナップ状態として知られる磁界に沿った配置か、スピンドアウン状態として知られる磁界に対抗する配置のいずれかである。ある状態から別の状態への粒子スピンの変化は、レーザなどのパルスエネルギーを使用して達成される。ある状態から別の状態に粒子のスピンを変化させるのにある任意単位のレーザエネルギーが要するならば、半分だけのレーザエネルギーが使用され、粒子が全ての外部の影響から隔離されているならば、何が起こるのかという疑問が生じる。量子力学原理によれば、粒子は同時に重ね合わせの状態に入り、まるで同時に両方の状態があるように振る舞う。各キュビットは、0と1の両方の重ね合わせをとることができるように利用される。この特性により、量子コンピュータが保証することができる状態の数は $2^n$ であり、ここでnは、計算を実行するのに使用されるキュビットの数である。500キュビットからなる量子コンピュータは、単一ステップで2500演算をする可能性を有する。従来のデジタルコンピュータは、合理的な時間で2500演算に近いスケールの計算を実行することはできない。量子コンピュータによって示される巨大な処理パワーを達成するために、キュビットは、量子絡み合い（entanglement）として知られる仕方で互いに相互作用する必要がある。

#### 【0006】

ある点で互いに相互作用するキュビットは、結びつきのタイプを維持し、相関として知られるプロセスで、対で互いに絡み合うことができる。第1のキュビットが第2のキュビットと絡み合うとき、第1及び第2の量子状態は、量子力学的に相関する。絡み合いは、従来の計算では類似するものがない量子計算演算である。キュビットの対がいったん絡み合ったならば、片方のキュビットからだけの情報は、他のキュビットの状態に必然的に影響し、逆もまた同じである。例えば、いったん一对のキュビットが絡み合ったならば、対の一方で実行される演算は、対の両キュビットに同時に影響する。量子絡み合いにより、より大きな距離だけ離れたキュビットが、（光の速度に制限されない）瞬間的に互いに相互作用することができる。相関した粒子の間の距離がどれくらい大きいかという問題ではなく、粒子は、それらが隔離されている限り絡み合いを維持する。

#### 【0007】

量子重ね合わせと絡み合いとを一緒にすると、大きく増強された計算パワーを作り出す。通常のコンピュータの2ビットレジスタは、所定の時間で4つのバイナリ構成（00, 01, 10又は11）のうちの1つだけをストアすることができ、量子コンピュータの2

キュビットレジスタは、各キュビットが2つの値を表すので、同時に4つ全ての数をストアすることができる。より多くのキュビットが絡み合うならば、容量の増加は指数関数的に増大する。

#### 【0008】

種々の物理系が、量子コンピュータのキュビットに関して提唱されている。ある系は、縮退した核スピン状態を備えた分子を用いる。N. Gershenfeld及びI. Chuangによる米国特許第5,917,322号「Method and Apparatus for Quantum Information Processing (量子情報処理の方法及び装置)」を参照し、その全体を引用によりここに組み入れる。核磁気共鳴(NMR)技術は、スピン状態を読むことができる。これらのシステムは、探索アルゴリズムがうまく実行され、例えば、M. Mosca, R.H. Hansen及びJ.A. Jonesによる「Implementation of a quantum search algorithm on a quantum computer (量子コンピュータの量子探索アルゴリズムの実装)」, Nature 393, 344 (1998年)及びその参照文献を参照し、数の順序付けアルゴリズムについては、例えば、L.M.K. Vandersypen, M. Steffen, G. Breyta, C.S. Yannoni, R. Cleve及びI.L. Chuangによる「Experimental realization of order-finding with a quantum computer (量子コンピュータによる順序探知の実験的具現化)」の前刷り(quant-ph/0007017)及びその参照文献を参照し、その全体を引用によりここに組み入れる。数の順序付けアルゴリズムは、量子フーリエ変換に関係し、Shorの因数分解アルゴリズム(P. Shor, 1994年, Proc. 35th Ann. Symp. On Found. Of Comp. Sci., pp.124-134, IEEE Comp. Soc. Press, Los Alamitos, CA)と、Groverのalgorithm for searching unsorted databases (選別されていないデータベース探索のアルゴリズム)(Grover, 1997年, Phys. Rev. Lett. 78, 325頁)の両方の本質的な要素に関係し、その全体を引用によりここに組み入れる。しかしながら、かかるシステムを商業利用数のキュビットに拡張することは困難である。より一般的には、現在提案されているものの多くは、最も実用的な計算に必要な2, 3キュビットから10<sup>2</sup>-10<sup>3</sup>キュビットまで拡張しないものである。

#### 【0009】

あいにく、キュビットを絡み合わせる現在の方法は、干渉の損失に影響されやすい。干渉の損失は、環境との相互作用の結果としてのキュビットの量子重ね合わせの位相の損失である。従って、干渉の損失は、キュビットの状態の重ね合わせの損失を生じる。例えば、ZurekによるPhys. Today 44, 36頁(1999年)、Leggett等によるRev. Mod. Phys. 59, 1頁(1987年)、Weissによる「Quantitative Dissipative Systems」第2版, World Scientific, Singapore(1999年)、及び、Hu等によるarXiv:cond-mat/0108339を参照し、これらの全体を引用によりここに組み入れる。キュビットの量子状態の絡み合いは、量子アルゴリズムの応用では重要なステップである。例えば、P. Shor, SIAM J. of Comput., 26:5, 1484-1509頁(1997年)を参照し、その全体を引用によりここに組み入れる。位相キュビットを絡み合わせる現在の方法は、キュビットの各々のフラックスの相互作用を要し、Yuriy Makhlin, Gerd Schon, Alexandre Shnirmanによる「Quantum state engineering with Josephson junction devices (ジョセフソン接合素子の量子状態エンジニアリング)」LANL前刷り, cond-mat/0011269 (2000年11月)を参照し、その全体を引用によりここに組み入れる。この絡み合いの形態は、周辺場と結合するキュビットに対して敏感であり、それにより干渉性が消失し、情報の損失が生じる。

#### 【0010】

上で議論したように、現在提案されているキュビットの読み出し、初期化、及び、絡み合わせは、キュビットの位置での磁束の検出又は操作を含み、これらの方法は、干渉性の消失に対して影響を受けやすく、結果として生じる量子計算素子の全体的な拡張性を制限する。従って、当該技術分野において、キュビットの絡み合わせ、さもなければキュビットの制御の方法が必要である。かかる方法は、干渉性の消失、及び、ノイズの他のソースを最小にし、拡張性が改善されるという効率的な量子レジスタを作るのに使用することができる。

#### 【発明の開示】

## 【課題を解決するための手段】

## 【0011】

本発明は、キュビットを絡み合わせ且つ制御するために当該技術分野で必要なことに対処するものである。本発明の方法及び装置は、電荷キュビットのような電荷素子を、位相キュビットのような位相素子と絡み合わせる方法の意外な発見に基づき、かかる方法では、電荷素子は位相素子の量子状態を読み出すのに使用することができる。本発明では、位相素子及び電荷素子は、 $\pi/2$ 移相素子により接続されている。いかなる特定の理論に制限されることなく、 $\pi/2$ 移相素子は、電荷素子の電流が位相素子のフラックスの変化に対して最大に敏感であるオペレーションのポイントに、位相素子及び電荷素子を含む回路を押し入れる。この現象のため、電荷素子は位相素子の量子状態を読み出すことができる。

10

## 【0012】

本発明のある実施形態は、メゾスコピック位相素子の量子力学状態とメゾスコピック電荷素子の量子力学状態が相互作用するような、メゾスコピック位相素子、メゾスコピック電荷素子、及び、メゾスコピック位相素子とメゾスコピック電荷素子とを結合する機構を有する超伝導構造体を提供する。ある実施形態では、メゾスコピック位相素子は、電荷エネルギー $E_c$ 及びジョセフソン結合エネルギー $E_J$ によって特徴付けられる超伝導メゾスコピック島を含む。更に、メゾスコピック島の電荷エネルギー $E_c$ は、ジョセフソン結合エネルギー $E_J$ と比較して大きい。即ち、 $E_c$ は、 $E_J$ より少なくとも10倍、乃至約100倍大きい。

## 【0013】

本発明のある実施形態では、メゾスコピック位相素子は、超伝導メゾスコピック島を含み、メゾスコピック島の電荷エネルギー $E_c$ は、島のジョセフソン結合エネルギー $E_J$ と同じオーダーである。本発明のある実施形態では、メゾスコピック位相素子は、時間反転対称を乱す超伝導材料からなる。時間反転対称を乱す材料は、 $\text{Yb}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ 、 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_{n-1}\text{Cu}_n\text{O}_{2n+4}$ 、 $\text{Tl}_2\text{Ba}_2\text{CuO}_{6+x}$ 及び $\text{HgBa}_2\text{CuO}_4$ のようなd波超伝導体と、 $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$ 又は $\text{CeIrIn}_5$ のようなp波超伝導体を含む。

20

## 【0014】

本発明の別の実施形態では、メゾスコピック位相素子は、島、バルク領域、及び、バルク領域から前記メゾスコピック島を分離する清浄ジョセフソン接合を含む。清浄ジョセフソン接合は、散乱サイトが自由なジョセフソン接合である。本発明の更に別の実施形態では、メゾスコピック位相素子は、1又はそれ以上のジョセフソン接合を含む内側超伝導ループと、2又はそれ以上のジョセフソン接合を含む外側超伝導ループとを含む。更に、内側超伝導ループは、外側超伝導ループに誘導的に結合される。ある実施形態では、メゾスコピック位相素子の内側超伝導ループは、アルミニウム(AI)、ニオブ(Nb)及び鉛(Pb)のような従来の超伝導材料からなる。他の実施形態では、内側超伝導ループは、時間反転対称を乱す超伝導材料からなる。本発明のある実施形態では、外側超伝導ループは、アルミニウム(AI)、ニオブ(Nb)及び鉛(Pb)のような従来の超伝導材料からなる。本発明のある実施形態では、外側超伝導ループは、 $\pi/2$ 移相素子のような移相素子を含む。

30

## 【0015】

本発明の更に別の実施形態では、メゾスコピック電荷素子は、電荷エネルギー $E_c$ 及びジョセフソン結合エネルギー $E_J$ によって特徴付けられたメゾスコピック島を含む。メゾスコピック超伝導領域の電荷エネルギー $E_c$ は、ジョセフソン結合エネルギー $E_J$ と比較して小さい。

40

## 【0016】

本発明のある実施形態では、メゾスコピック電荷素子は、素子リードと、メゾスコピック島と、素子リードに接続された2つのジョセフソン接合とを含む。2つのジョセフソン接合は、メゾスコピック島に結合され、それにより素子リードからメゾスコピック島を絶縁する。メゾスコピック電荷素子は更に、メゾスコピック島に容量的に結合された電極と、容量的に結合された電極の電荷を制御する機構とを含む。

## 【0017】

50

本発明のある実施形態では、結合の機構は、移相を導入する機構を含む。ある実施形態では、移相を導入する機構は、移相ジョセフソン接合のような  $\pi/2$  移相素子である。本発明のある実施形態では、移相ジョセフソン接合は、移相ジョセフソン接合のリードの間に配置された強磁性材料を含む。ある実施形態では、移相ジョセフソン接合は、従来にない超伝導材料（例えば、d波又はp波）を含み、移相ジョセフソン接合のリードは、粒界ジョセフソン接合にわたって接続され、その結果、移相は前記粒界にわたる遷移の累積である。本発明のある実施形態では、前記粒界にわたる結晶の異方性の角度は、粒界の角度に対して  $0^\circ$  乃至  $45^\circ$  である。ある実施形態では、メゾスコピック位相素子とメゾスコピック電荷素子とを結合する機構は、メゾスコピック位相素子とメゾスコピック電荷素子とを干渉的に結合する。本発明のある実施形態では、メゾスコピック位相素子とメゾスコピック電荷素子とを結合する機構は、メゾスコピック位相素子とメゾスコピック電荷素子とを絡み合わせることができる。

10

**【0018】**

本発明の別の態様は、メゾスコピック位相素子と、メゾスコピック電荷素子と、及び、メゾスコピック位相素子の状態とメゾスコピック電荷素子の状態とが相互作用するようにメゾスコピック電荷素子にメゾスコピック位相素子を結合する機構とを有する超伝導構造体を提供する。更に本発明は、メゾスコピック電荷素子の状態を読み出す機構を提供する。ある実施形態では、メゾスコピック電荷素子は、素子リードを含み、メゾスコピック電荷素子の状態を読み出す機構は、シャント抵抗と、電流源と、メゾスコピック電荷素子のリードにわたる電圧降下を測定する機構と、メゾスコピック電荷素子のリードを接地する機構とを含む。シャント抵抗、電流源、電圧降下を測定する機構、及び、接地させる機構は、メゾスコピック電荷素子の素子リードと並列である。

20

**【0019】**

本発明の別の態様は、メゾスコピック位相素子と、メゾスコピック電荷素子と、メゾスコピック位相素子の状態とメゾスコピック電荷素子の状態とが相互作用するようにメゾスコピック電荷素子にメゾスコピック位相素子を結合する機構と、メゾスコピック位相素子の状態を読み出す機構とを含む。ある実施形態では、メゾスコピック電荷素子は、リードを含み、メゾスコピック電荷素子の状態を読み出す機構は、シャント抵抗と、電流源と、メゾスコピック電荷素子のリードにわたる電圧降下を測定する機構と、メゾスコピック電荷素子のリードを接地する機構とを含む。かかる実施形態では、シャント抵抗と、電流源と、電圧降下を測定する機構と、接地させる機構とは、メゾスコピック電荷素子のリードと並列に配置される。

30

**【0020】**

本発明の更に別の態様は、複数のメゾスコピック位相素子を含む超伝導構造体を提供する。複数のメゾスコピック位相素子の各メゾスコピック位相素子は、並列に配置される。超伝導構造体は更に、メゾスコピック電荷素子、第1のメゾスコピック位相素子の状態とメゾスコピック電荷素子の状態とが相互作用するように、複数のメゾスコピック位相素子の第1のメゾスコピック位相素子をメゾスコピック電荷素子と結合する機構と、前記メゾスコピック電荷素子の状態を読み出す機構とを含む。ある実施形態では、複数のメゾスコピック位相素子の各メゾスコピック位相素子は、位相キュービットであり、超伝導構造体は、量子レジスタを形成する。

40

**【0021】**

本発明のある実施形態は、超伝導構造体を提供する。該構造体は、複数のメゾスコピック位相素子と複数のメゾスコピック電荷素子とを含む。複数のメゾスコピック位相素子の各メゾスコピック位相素子は並列に配置される。構造体は更に、特定の第1の位相素子の状態と第1のメゾスコピック電荷素子の状態とが相互作用するように、複数のメゾスコピック位相素子の第1のメゾスコピック位相素子と複数のメゾスコピック電荷素子の第1の電荷素子とを結合する機構を設ける。構造体は更に、第1のメゾスコピック電荷素子又は前記メゾスコピック位相素子の状態を読み出す機構を設ける。ある実施形態では、複数のメゾスコピック位相素子の各メゾスコピック位相素子、及び、複数のメゾスコピック電荷

50

素子の各メゾスコピック電荷素子は、キュビットである。更に、超伝導構造体は不均一な量子レジスタを形成する。

【発明を実施するための最良の形態】

【0022】

本発明は、超伝導又は量子計算の分野における基本的な制限の存在 - キュビットの絡み合いについて取り扱う。量子計算の十分な可能性を達成するために、ここでは、 $N$ キュビットは、初期状態、即ち、 $2^N$ 計算を同時に実行することができる $2^N$ 状態の組み合わせを定義し、 $N$ キュビットは適当に絡み合っている必要がある。

【0023】

第1のキュビットの量子力学状態が、第2のキュビットの量子力学状態により影響されるとき、2又はそれ以上のキュビットが絡み合っている。例えば、第1のキュビットがその第1の基本状態にある確率が、第2のキュビットの基本状態の関数であるとき、第1のキュビットの量子力学状態は第2のキュビットの量子力学状態によって影響される。第1及び第2のキュビットの間の絡み合いを達成するために、第1及び第2のキュビットの各々の量子状態が、結合の緊密さの最小限の損失で相互作用するように、緊密に結合する必要がある。クーパ対（即ち、超伝導媒体の対向スピン及び運動量が束縛された電子の対）が第1及び第2のキュビットの間を流れることができるとき、キュビットは、緊密に結合されている。第1及び第2のキュビットの直接結合の場合、干渉性結合は、キュビット間の距離がクーパ対の位相干渉長よりも短いキュビットを位置決めすることにより達成することができる。クーパ対の位相干渉長は、材料に依存する。ある材料では、位相干渉長は、100nm以下のオーダーである。

【0024】

キュビットを絡み合わせるための知られた方法がある。本発明は、キュビットを絡み合わせる装置及び方法を提供し、その作動に係するキュビットは異なる体制で異なる特徴を有する。有利なことに、本発明の絡み合わせ方法は、干渉性の損失無く、種々のキュビットを絡み合わせるために率に応じて決めることができる。本発明のある実施形態では、位相素子は、移相ジョセフソン接合のような $\pi/2$ 移相素子を使用した電荷素子に干渉的に結合される。 $\pi/2$ 移相素子は、絡み合った相及び電荷キュビットを含む、素子の作動のポイントを $\pi/4$ に動かすように使用され、電荷素子の磁束に対する切換電流の依存性は最も強い。従って、 $\pi/2$ 移相素子は、位相キュビットの状態を変化させるのに最も敏感な状態に電荷キュビットを置く。

【0025】

電荷素子は、位相素子の状態を読み出すのに使用することができる。本発明の別の実施形態では、電荷素子は、位相素子の並列アレイに結合される。電荷素子は、位相素子のいかなる組み合わせをも読み出すように使用することができる。

【0026】

超伝導エレクトロニクスは、「電荷素子」と「位相素子」の2つの広い分類に分けることができる。電荷素子は、電荷キュビットを含む。電荷キュビットは、超伝導である島を含む。電荷キュビットは、該島にトラップされた電荷を介して異なる状態にエンコードする。例えば、Makhlin等による1999年のNature 398, 305頁を参照し、引用によりその全体をここに組み入れる。位相素子は位相キュビットを含む。同様な電荷キュビット、位相キュビットは、超伝導の島を含む。位相キュビットでは、各状態は、低インダクタンスSQUIDループにおける超伝導島の位相の値により大きく異なる。例えば、Ivanov及びFeigelmanによる1988年のJETP87の349頁、Ioffe等による1999年のNature 398, 679頁を参照し、引用によりその全体をここに組み入れる。SQUIDループは、1又はそれ以上のジョセフソン接合を含む小さな超伝導ループである。SQUIDは、「超伝導量子干渉素子 (Superconducting QUantum Interference Device)」を表す。SQUIDは、ループの領域を通過する磁界の総量に対して非常に敏感であり、素子にわたって測定された電圧は、ループの周りの総磁界と非常に強く相関する。メゾスコピック位相素子及びメゾスコピック電荷素子では、超伝導島は、メゾスコピック（中間視的）である。

## 【0027】

長いレンジのクーロン力の結果として、電荷キュビットは、環境及び他のキュビットと強く相互作用する。反対に、位相キュビットは、環境からより有効に切り離される。実際に、 $\phi$ の値だけ異なる状態の純粋な位相キュビットは、環境と事実上ゼロの相互作用である。Feigel'man等による1999年7月21日のarXiv:cond-mat/9907317v.1を参照し、引用によりその全体をここに組み入れる。従って、位相キュビットのアレイは、電荷キュビットのアレイよりも干渉性が消失するようにされるのが小さい。

## 【0028】

ジョセフソン接合は、ある超伝導体から別の超伝導体に印加電圧なしで接合を介して超伝導電子の対(クーパー対)を「トンネル」させることができる接合である。ジョセフソン接合は、超伝導体の間の電位差の欠如が対等な、近くに配置された超伝導体の間を電子対がトンネルする可能性があるという仮説を立てた、B.D.ジョセフソンから名付けられた。B.D. Josephsonによる「超伝導トンネリングにおける新しい効果の可能性(Possible new effects in superconducting tunneling)」、Phys.Lett, 1, 251乃至253頁(1962年)を参照。より一般的には、超伝導電子の対(クーパー対)が、印加電圧なしである超伝導体から別の超伝導体にリンクを介して「トンネル」することができるジョセフソン接合のようなリンクを、弱いリンクと呼ぶ。

## 【0029】

クーパー対は、超伝導体の基本的な電流キャリアである。特に、クーパー対は、超伝導媒体の対向するスピン及び運動量の束縛電子の対である。超伝導体の基本状態では、全ての電子はクーパー対に束縛される(従って、基本状態は偶数の電子だけを包含することができる)。従って、余分な電子は、bogolonのような励起状態を占め、基底状態エネルギーから測定されたその最小エネルギーは、 $\Delta$ である。

## 【0030】

本発明は、位相素子、電荷素子を含む量子位相電荷結合素子、及び、位相素子及び電荷素子が互いに相互作用する2つの素子を結合する機構を含む機構を提供する。本発明のある実施形態では、位相素子は、位相量子ビット(位相キュビット)であり、電荷素子は電荷キュビットである。他の実施形態では、位相素子又は電荷素子はキュビットであり、他の素子はキュビットの状態を読み出すのに使用することができる。本発明のある実施形態では、位相素子は、メソスコピック位相素子であり、電荷素子はメソスコピック電荷素子である。

## 【0031】

位相素子及び電荷素子を結合する機構は、素子間の移相を導くための機構を含む。本発明のある実施形態では、移相は  $\pi/2$ -移相である。 $\pi/2$ -移相の目的は、素子間に適切な結合を提供することである。普通は、 $\pi/2$ 接合は、素子を通じてフラックスに対する電流の依存性が最も強いポイントにSQUID素子の作動のポイントを移動させるのに使用される。位相素子110及び電荷素子120(図1)の所定の実施形態では、 $\pi/2$ 接合は、素子110及び120の間のコヒーレント結合の正確な形態を提供するのに用いられる。 $\pi/2$ 接合は、強い接合である(即ち、接合は、大きなジョセフソン結合エネルギー $E_J$ を有し、それ故、強い臨界電流を有する)。

## 【0032】

本発明の移相素子は、相当の許容度を有していることを認識すべきである。即ち、それらは、完全な  $\pi/2$ 移相に従わない。ある実施形態では、本発明の移相素子は、 $\pi/2 \pm 0.25$ 移相を許す。より好ましい実施形態では、本発明の移相素子は、 $\pi/2 \pm 0.20$ 移相に従う。本発明の更に別の実施形態では、本発明の移相素子は、 $\pi/2 \pm 0.10$ 移相に従う。本発明の更に別の実施形態では、本発明の移相素子は、 $\pi/2 \pm 0.05$ 移相に従う。更に、本発明の移相素子が、素子115(図1)のような単一素子として記載されているが、複数の素子の合計が  $\pi/2$ の全移相を達成するように、連続して複数の素子を用いることができることを認識すべきである。

## 【0033】

10

20

30

40

50

メゾスコピック位相素子又はメゾスコピック電荷素子のようなメゾスコピック素子は、巨視的よりも小さく、微視的よりも大きい寸法を備えた（島、メゾスコピック（中間視的）島、メゾスコピック領域、及び、メゾスコピック超伝導領域、と交換可能に名付けられた）構造を含む素子であり、素子が量子力学的に振る舞うような素子の寸法をとる。それゆえ、ハイゼンベルグの不確定性原理は、素子内のメゾスコピック島の電荷と位相との間の関係を規定する。この原理は、以下のように記述することができ、

$$n \quad 1/2 \quad (\text{式 1})$$

ここで、 $n$  は、メゾスコピック島（メゾスコピック領域）の電荷の不確定性（又は、電荷のゆらぎ）を表し、 $1/2$  は、メゾスコピック島の位相の不確定性（又は、位相のゆらぎ）を表す。従って、メゾスコピック素子は、メゾスコピック島の位相の不確定性が電荷の不確定性と比較して大きい、電荷体制と、メゾスコピック島の電荷の不確定性が位相の不確定性と比較して大きい、位相体制との2つの体制を有することができる。

10

#### 【0034】

典型的には、電荷及び位相体制は、素子の条件のジョセフソン結合エネルギー $E_J$ とクーロンエネルギー $E_C$ の比によって決定される。例えば、比 $E_C/E_J < 1$ のとき素子は電荷体制にあり、比 $E_C/E_J > 1$ のとき、素子は位相体制にある。更に、本発明の実施形態では、 $E_C > E_J$ もまた利用することができる。

#### 【0035】

メゾスコピック素子が、電荷体制（ $E_C > E_J$ ）にあるとき、素子は、メゾスコピック電荷素子と呼ばれる。メゾスコピック電荷素子の電荷は、良好な量子数を表し、有限の数の電荷状態を有する。この場合の良好な量子数は、上の式1の不確定な関係により、その電荷における小さな不確定性を意味する。例えば、Y.Nakamura, Yu.Pashkin及びJ.Tsaiによる「単一のクーパー対ボックスにおける微視的な量子状態の干渉制御（Coherent control of macroscopic quantum state in a single-Cooper-pair box）」Nature 398、786頁（1999年4月）及びそれに参照された参照文献を参照し、引用によりここに組み入れる。メゾスコピック素子が位相体制（ $E_C < E_J$ ）にあるとき、素子はメゾスコピック位相素子と呼ばれる。メゾスコピック位相素子の位相は、有限の数の位相状態を備えた良好な量子数（不確定性が小さい程度まで）である。メゾスコピック位相素子は、式1の不確定性の関係により、その位相において小さな不確定性を有する。

20

#### 【0036】

メゾスコピック電荷素子の状態（電荷の不確定性）及びメゾスコピック位相素子（位相の不確定性）における不確定性は、量子計算のために活用することができる。メゾスコピック位相素子の位相の小さな不確定性は、キュビットの基本状態を形成するのに用いられる。更に、メゾスコピック位相素子は固定された電荷を有し、その位相における不確定性は、量子計算の目的のために同様に用いられる。

30

#### 【0037】

本発明の実施形態による、量子位相電荷結合素子により、メゾスコピック電荷素子の電荷の不確定性が位相素子の位相に影響を及ぼすことができ、位相素子の位相の不確定性が電荷素子の電荷に影響を及ぼすことができる。従って、本発明の実施形態は、電荷キュビットを位相キュビットと干渉結合させる。即ち、電荷キュビット及び位相キュビットは、位相キュビットの電子波動関数の位相と、電荷キュビットの電子波動関数の位相とが、位相キュビットと電荷キュビットとの結合によっては破壊（位相をずらす）されないような仕方で結合される。電荷キュビットと位相キュビットとの干渉結合は、量子計算中に、不均一な絡み合いオペレーションを適用する機構を提供する。不均一な絡み合いオペレーションは、位相キュビットのような位相素子と、電荷キュビットのような電荷素子とを使用して実行されるオペレーションであり、ここで、位相素子と電荷素子は絡み合っている。

40

#### 【0038】

図1は、電荷素子120に直接干渉接続された位相素子110を含む量子位相電荷結合素子と呼ばれる超伝導構造体を図示する。本発明のある実施形態では、位相素子110は、位相キュビットである。位相キュビットの製造及び挙動は当技術分野では周知である。

50

例えば、Alexandre Zagoskinにより1999年12月1日出願された米国特許出願シリアル番号09/452749「永久読み出し超伝導キュビット (Permanent Readout Superconducting Qubit)」を参照し、その全体を引用によりここに組み入れる。

#### 【0039】

本発明のある実施形態では、位相素子110は、永久読み出し超伝導キュビット (PRSQ) である。PRSQは、Zagoskinによる上記永久読み出し特許出願に完全に記載されている。簡単に言うと、PRSQは、それが凍結 (基底及び崩壊) 状態にあるとき、キュビットの自然磁束は、所定のタイプの磁束測定装置の位相をずらす効果に対して、熱揺らぎを除いて、反応しない性質を有するキュビットである。従って、凍結 (基底及び崩壊) キュビットの自然磁束は、熱揺らぎを除いて固定されたままである。

10

#### 【0040】

位相素子110は、ジョセフソン接合110-3によって分離された、バルク領域110-2と、メゾスコピック島領域110-1 (メゾスコピック島及び/又はメゾスコピック領域とも呼ぶ) を含む。メゾスコピック島 (メゾスコピック領域) は、2つの縮退状態 (基本状態)  $|0\rangle$  及び  $|1\rangle$  のうちの1つであるゼロでない可能性を有する位相を備えた超伝導電流を支持することができ、位相素子110のようなキュビットのコンテキストにおいては、島である。かかる電流を支持するために、メゾスコピック島は、島内の電子の数に対して敏感にさせる寸法を有する必要がある。かかる寸法は、キュビットの精密な構成に依存して変化するが、一般的にはマイクロメータの範囲内である。ある実施形態では、メゾスコピック島は、 $0.2\mu\text{m}$ 以下の幅を有し、その長さは約 $0.5\mu\text{m}$ 以下であり、その厚さは約 $0.2\mu\text{m}$ である。位相素子110の基本状態  $|0\rangle$  及び  $|1\rangle$  は、110の2つの明確かつ縮退した基底状態位相によって表される。

20

#### 【0041】

図1に示した位相キュビットの製造は、当技術分野で周知である技術を用いて成し遂げられる。例えば、粒界ジョセフソン接合は、チタン酸ストロンチウム (化学技術社、東京、日本) 及び標準的な薄膜成長のような、bi-crystal基板を用いて形成することができる。別の粒界接合は、bi-epitaxial法を用いて形成することができる。位相キュビット110のメゾスコピック島及びバルク超伝導領域は、例えば、電子ビームリソグラフィを使用してパターン形成することができる。例示的な製造技術は、Van Zant、2000、Microchip Fabrication、第4版、McGrawHill、New Yorkに見られる。また、Il'ichev等のarXiv:cond-mat/9811017及び、1999年12月1日出願された米国特許出願シリアル番号09/452749「永久読み出し超伝導キュビット (Permanent Readout Superconducting Qubit)」を参照し、その全体を引用によりここに組み入れる。

30

#### 【0042】

図1を参照すると、電荷素子120は、超伝導単一電子トランジスタ (SSET) を示す。SSETは、トンネルバリア (ジョセフソン接合) によって外部回路から絶縁された超伝導材料のメゾスコピック島を含む。通常のトンネルバリア抵抗 ( $R > h/4e^2 \sim 6.5k$ ) は、メゾスコピック島の過剰な電荷に  $e$  の整数の倍数を強要するのに十分である。平衡で、電氣的に中性なメゾスコピック島に電子を追加することは、電荷エネルギー  $E_c = e^2/2C$  を要し、ここで、 $C$  はメゾスコピック島の総容量である。この「クーロン封鎖」は、ゲート電圧をSSETに印加することにより持ち上げられ、十分なソース-ドレインバイアス電圧を加えることにより乗り越えられる。例えば、Dixon等のarXiv:cond-mat/9909442v1を参照。

40

#### 【0043】

電荷素子 (SSET) 120は、素子のリードからメゾスコピック島120-4を絶縁した、2つのジョセフソン接合120-1及び120-2を含む。上述のように、SSETは典型的には、素子のリードからメゾスコピック島を絶縁する2つのジョセフソン接合と、メゾスコピック島を容量的に荷電する機構を含む。作動中、メゾスコピック島120-4の荷電エネルギーを制御することにより、素子のリードを介した電流の流れを操作することができる。典型的には、SSET120は、単一のクーパー対にわたった制御を提供する。例えば、メゾスコピック島の電荷が、最初の体制にあるとき、素子を流れる電流の流れは許容され

50

ず、メゾスコピック島の電荷が第2の体制の場合、素子を通る電流の流れは許容される。メゾスコピック島の電荷は、例えば、メゾスコピック島に容量的に結合された電圧ソース125によって制御される。

【0044】

荷電素子(SSET)120は更に、(電圧ソース125から)メゾスコピック島120-4にゲート電圧 $V_g$ を容量的に結合するキャパシタ120-3を含む。作動中、ゲート電圧 $V_g$ は、メゾスコピック島120-4の電荷エネルギー $E_c$ にわたって制御を行い、従って、超伝導電流の流れを許容する状態と、超伝導電流の流れを許容しない状態との間に素子を調整する機構を提供する。SSETはメゾスコピック荷電素子の例であり、ここで、メゾスコピック島120-4の位相不確定性は、その荷電不確定性と比べて大きく、荷電エネルギーは、ゲート電圧 $V_g$ によって制御される。SSETがメゾスコピック荷電素子であるので、それは、量子力学の法則に影響されやすい。従って、SSETは、荷電に干渉量子力学波動を有し、それ自体、荷電キュビットとして使用することができる。

10

【0045】

ゲート電圧 $V_g$ は、クーロンエネルギーの比を電荷素子120のジョセフソンエネルギーに変化させ、従って、メゾスコピック島120-4にわたって電流の流れを制御する。ジョセフソン接合(トンネルジョセフソン)120-1及び120-2の中間層を形成する材料は、誘電率を有する。トンネル接合120-1及び120-2の中間層の容量は、誘電率と相関し、この厚さは $E_c$ と $E_J$ の間の比を設定するのに使用することができる。

【0046】

接合の中間層を形成するのに有用ないくつかの材料は、酸化アルミニウム( $Al_2O_3$ )、金(Au)又は銀(Ag)のような通常の金属である。トンネル接合120-1及び120-2とメゾスコピック島120-4は、例えば、電子ビームリソグラフィ又はシャドーマスク蒸着技術を使用して製造することができる。トンネル接合120-1及び120-2のようなトンネル接合を形成するための方法は、当該技術分野では記載したように周知である。ある実施形態では、接合120の面積は約 $0.5\mu m^2$ 以下である。本発明の他の実施形態では、トンネル接合120の面積は約 $0.1\mu m^2$ 以下であり、更に別の実施形態では、トンネル接合120の面積は約 $60nm^2$ 以下である。

20

【0047】

SSETの挙動は、P.Joyez等による「Observation of Parity-Induced Suppression of Josephson Tunneling in the Superconducting Single Electron Transistor(超伝導単一電子トランジスタにおけるジョセフソントンネリングのパリティ導入抑制の観察)」Physical Review Letters, Vol.72, No.15(1994年4月11日)、及び、D.Born, T.Wagner, W.Krech, U.Hubner及びL.Fritzchによる「Fabrication of Ultrasmall Tunnel Junctions by Electron Beam Direct-Writing(電子ビーム直接描画による超小型トンネル接合の製造)」IEEE Trans. App. Superconductivity, 11, 373(2001年3月)及びそこに引用された参考文献に定義され、詳細に議論されており、引用によりその全体をここに組み入れる。本発明のある実施形態では、 $E_J > E_c$ の場合、メゾスコピック素子の位相の小さな揺らぎがメゾスコピック素子の電荷に影響し、メゾスコピック素子の電荷の小さな変化がメゾスコピック素子の位相に影響する、体制に電荷素子を作ることができる。

30

40

【0048】

図1は更に、位相素子110と電荷素子120との間の接続140を図示する。接続140は、電荷素子120の電荷状態と相互作用する位相素子110の位相状態のための機構である。図1に示した本発明の実施形態では、接続140は、位相キュビット110のメゾスコピック島領域110-1に接続された第1の端と、電荷キュビット120のメゾスコピック島領域120-4に接続された第2の端とを有する。

【0049】

接続140は、移相ジョセフソン接合115と、任意に、位相干渉スイッチ130を含む。本発明のある実施形態では、移相ジョセフソン接合115は、そのリードの間に $\pi/2$ 移相をもたらす。本発明のいくつかの実施形態では、移相ジョセフソン接合は、強磁性

50

材料を含む。この強磁性材料は、移相ジョセフソン接合のリード間に位置決めされる。本発明のある実施形態では、移相ジョセフソン接合は、s波超伝導体のような従来の超伝導材料を含む。更に、移相ジョセフソン接合のリードは、粒界ジョセフソン接合にわたって接続され、移相が粒界にわたる遷移に蓄積される。粒界ジョセフソン接合は、2つの超伝導領域の間の接合であり、2つの領域の結晶学的な方位は、弱いリンク接合を作り出すのに十分な量だけ異なる。2つの領域の結晶学的な方位の差は、粒界にわたる結晶ミスオリエンテーションの角度と呼ばれる。本発明のある実施形態では、粒界にわたる結晶ミスオリエンテーションは0度乃至45度である。

#### 【0050】

位相干渉スイッチ130は、位相素子110と電荷素子120との間の結合を越えた更なる制御を行う。位相干渉スイッチ130は、素子110と120との間の制御可能な接続と干渉を提供する。位相干渉スイッチ130は、スイッチ130内のループをスレディングする印加された外部フラックス  $x$  (印加された磁束) を制御することにより調整することができる。スイッチ130は、例えばSSETのような干渉スイッチでもよい。本発明のある実施形態はスイッチ130を含まない。

#### 【0051】

図1の移相ジョセフソン接合115のような移相素子の実施形態は当該技術分野では周知である。例えば、2001年12月21日にG.Rose, M.Amin, T.Duty, A.Zagoskin, A.Omelyanchouk及びJ.Hiltonによって出願された米国特許出願10/032,157号「Phase Shift Device in Superconductor Logic (超伝導理論における移相素子)」及びそれに引用された参考文献を参照し、その全体を引用によりここに組み入れる。本発明のある実施形態では、移相ジョセフソン接合115は、接続140の他の部分を製造するように要求されたそれらとは異なる方法を使用して製造される。上で参照した出願に記載されているように、かかる問題は、別の製造層で115を製造し、115を絶縁し、接続140を完成させるために素子115にわたって接続を形成する接続ターミナルを提供するようにエッチングを使用することにより克服される。本発明の他の実施形態では、移相ジョセフソン接合115は、ニオブ(Nb)、アルミニウム(Al)、鉛(Pb)又は錫(Sn)並びに、銅及びニッケルの合金(Cu:Ni)のような強磁性材料のような従来の超伝導材料を使用して形成される。

#### 【0052】

図1を参照すると、位相素子110は、ゼロでない角運動量を備えた対称性を有する従来のない超伝導材料からなってもよい。ある実施形態では、位相素子110を形成するのに有用な材料は、d波超伝導体又はp波超伝導体のような時間反転を乱す材料を含む。例えば、ArXiv.org/pdf/condmat/0008235を参照。ある特定の実施形態では、位相素子110を形成するのに有用な材料は、d波超伝導体 $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ を含み、ここで $x$ は0から0.6の間である。更に、 $Bi_2Sr_2Ca_{n-1}Cu_nO_{2n+4}$ 、 $Tl_2Ba_2CuO_{6+x}$ 及び $HgBa_2CuO_4$ のような超伝導体を使用することもできる。別の実施形態では、素子110を形成するのに使用される材料は、 $Sr_2RuO_4$ 又は $CeIrIn_5$ のようなp波超伝導体を含む。

#### 【0053】

本発明のある実施形態では、位相素子110は、メソスコピック島、バルク領域、及び、バルク領域からメソスコピック島を分離するクリーンなジョセフソン接合とを含むメソスコピック位相素子である。クリーンなジョセフソン接合は、散乱サイトが自由である接合である。

#### 【0054】

荷電素子120は典型的には、例えば、アルミニウム又はニオブのような従来の超伝導材料で形成される。超伝導構造体100の基板に有用な材料は、サファイア及び $SrTiO_3$  (チタン酸ストロンチウム)を含むが、それらに限定されない。基板はbi-crystallineであってよく、超伝導層の成長の際に粒界の形成を容易にする。粒界は、弱いリンク接合特性を備えた2つの結晶性薄膜の間の界面である。例えば、Char等による米国特許第5,157,466号を参照。粒界は、ジョセフソン接合を作るように用いることができる。従って、bi-crystal基板は、位相素子110並びに移相ジョセフソン接合115の形成に有用である。b

10

20

30

40

50

i-crystal製造方法に基づく粒界ジョセフソン接合の製造及び特性測定方法は、当技術分野で周知である。例えば、E. Il'ichev, M. Grajcar, R. Hlubina, R. Ijsselsteijn, H. Hoenig, H. Meyer, A. Golubov, M. Amin, A. Zagoskin, A. Omelyanchouk及びM. Kupriyanovによる「Degenerate Ground State in a Mesoscopic  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  Grain Boundary Josephson Junction (メソスコピック $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ 粒界ジョセフソン接合の縮体基底状態)」Phys. Rev. Letters, 86, 5369 (2001年6月)及びそれに引用された参照文献を参照し、その全体を引用によりここに組み入れる。

#### 【0055】

別の実施形態では、超伝導構造体100の基板は、bi-epitaxial製造方法を使用して形成することができる。かかる方法では、種層は、単一の結晶基板の第1の領域の上に形成される。種層は典型的には、単一結晶基板を基礎とするのではなく、異なる格子方位を有する。続いて成長される超伝導薄膜は、基板を基礎とするように同様な近い結晶格子方位を全体的にとる。薄膜が高い指向性の仕方成長するならば、薄膜内の材料の隣接する粒子は、5度よりも小さく誤った方向に向き、薄膜の超伝導電子輸送特性を低下させない。それ故、種層(第1の領域)に成長した高指向性超伝導薄膜の特性は、覆われていない元の基板(第2の領域)に成長した超伝導薄膜の特性とは異なる格子方位を有する。第1及び第2の領域に成長した超伝導材料の間の界面は、弱いリンク特性を備えた粒界を形成する。即ち、粒界により、超伝導電子の対(クーパー対)は、印加電圧なしである領域から次の領域にリンクを介して「トンネル」することができる。一般的には、粒界は、(各領域内の隣接する粒子の間に5度より小さい異なる方位がある領域である)2つの高い指向性領域の間の境界として定義され、第1の領域と第2の領域の結晶学的な方位の全体が、約5度よりも大きく異なる。

#### 【0056】

別の実施形態では、第1の結晶学的方位を備えた第1の種層は、基板を基礎とした第1の部分に形成され、第2の結晶学的方位を備えた第2の種層は、基板を基礎とした第2の部分に形成され、第1の部分は第2の部分と隣接する。第1の種層に成長した超伝導薄膜の部分は、第1の結晶学的方位をとり、第2の種層に成長した超伝導薄膜の部分は、第2の結晶学的方位をとる。従って、弱いリンク粒界は、超伝導層の第1と第2の領域の間の界面の間に形成される。

#### 【0057】

上述の製造方法は、粒界領域の制御可能な形成を提供し、従って、チップ上に複数の構造体を形成するのに有用であり、粒界の使用を要求する。bi-epitaxial粒界接合を形成するための方法は周知であり、当該技術分野では記載されている。例えば、S. Nicolletti, H. Moriceau, J. Villegier, D. Chateigner, B. Bourgeois, C. Cabanel及びJ. Lavalによる「Bi-epitaxial YBCO grain boundary Josephson junctions on  $\text{SrTiO}_3$  and sapphire substrates ( $\text{SrTiO}_3$ 及びサファイア基板上のBi-epitaxial YBCO粒界ジョセフソン接合)」Physics C, 269, 255 (1996)とそれに引用された参照文献、及び、F. Tafuri, F. Carrillo, F. Lombardi, F. Mileto Granozio, F. Ricci, U. Scotti di Uccio, A. Barone, G. Testa, E. Sarnelli及びJ. Kirtleyによる「Feasibility of biepitaxial YBCO Josephson junctions for fundamental studies and potential circuit implementation (基礎的な研究及び可能な回路実装のためのbiepitaxial YBCOジョセフソン接合の可能性)」Phys. Rev. B, 62, 14431 (2000年12月)とそれに引用された参照文献を参照し、引用によりここに組み入れる。

#### 【0058】

図1を再び参照すると、位相素子110のバルク領域110-2は、回路接地ノード190に接続され、バルク領域110-2は、一定の位相を維持し、メソスコピック島110-1は、 $\pm \phi_0$ の揺らぐ位相を有し、 $\phi_0$ は0.001の磁束量子(0.001  $\phi_0$ )である。更に、ジョセフソン接合120-1及び120-2にそれぞれ接続する荷電素子120のリードは、同様に接地190に接続する。

#### 【0059】

10

20

30

40

50

上述のように、本発明のいくつかの実施形態では、本発明の素子を製造することは、異なる製造技術を要求する。例えば、接続 1 4 0 及び荷電素子 1 2 0 のような図 1 に示した従来の超伝導回路を形成するために要求される製造設備は、位相素子 1 1 0 及び移相ジョセフソン接合 1 1 5 のような図 1 に示した従来とは異なる回路を形成するのに要求される製造方法とは異なるツールを要求する場合がある。かかる製造の問題点は、異なる製造段階において素子を製造することにより解決することができる。

#### 【 0 0 6 0 】

図 2 A 乃至 2 C は、本発明の実施形態を製造するための方法を図示する。図 2 A は、基板 2 5 0、移相ジョセフソン接合 1 1 5、及び位相素子 1 1 0 を図示する。本発明の種々の実施形態を構築するのに使用されるいくつかの製造方法では、第 1 の製造段階で形成される素子の数が変化する。図 2 B は、絶縁層 2 6 0 の堆積を図示する。絶縁層 2 6 0 は、第 1 の製造段階で形成された素子とその後の製造段階で形成された素子との間にバリアを形成する。ある実施形態では、絶縁層 2 6 0 は、酸化シリコン又は酸化アルミニウムのような材料で作られ、蒸着のような技術を使用して堆積される。酸化アルミニウム及び酸化シリコンは、例えば蒸着を使用して堆積され、例えば、四フッ化炭素反応イオンエッチングを使用してエッチングされ、又は他の適当な堆積及びエッチング技術により堆積及びエッチングされる。構造体は、光学又は電子ビームリソグラフィのような知られた技術を使用してパターンニングすることができる。例えば、R.Stolz等のSupercond. Sci. Technol. 12, 806頁(1999年)を参照し、引用によりその全体をここに組み入れる。ある実施形態では、配線層は、浮遊容量又は寄生容量を除去するために酸化シリコンの約800nm厚の絶縁層により互いに分離される。図 2 C は更に、各素子 1 1 5 及び 1 1 0 それぞれに関する接点 1 1 5 - A、1 1 5 - B、1 1 0 - A 及び 1 1 0 - B の構成を図示する。図 2 C に図示されたチップ 2 0 0 は、本発明による残りのコンポーネントの更なる製造のための基板を構成する。接点 1 1 5 - A 乃至 1 1 0 - B の各々は、Alexander Tzalenchuk, Zdravko Ivanov 及び Miles F.H. Steiniger により 2001 年 12 月 6 日に出版された「Trilayer Heterostructure Junctions (三層ヘテロ構造接合)」(代理人参照文献番号 M-12300) に記載された技術を使用して構成することができ、引用によりその全体をここに組み入れ、従来の超伝導体と従来にない超伝導体との間に干渉量子接触を形成するための方法を提供する。

#### 【 0 0 6 1 】

図 3 は、本発明の別の実施形態を図示し、位相素子 3 1 0 は磁束キュビットである。例えば、J. Mooij, T. Orlando, L. Levitov, L. Tian, C. van der Wal 及び S. Lloyd による「Josephson Persistent-Current Qubit (ジョセフソン永久電流キュビット)」Science, 285, 1036 (1999年8月) 及びそこで引用された参照文献を参照し、引用によりその全体をここに組み入れる。磁束キュビット 3 1 0 は、外側超伝導ループ 3 1 0 - 2 及び内側超伝導ループ 3 1 0 - 1 を含む。外側ループ 3 1 0 - 2 は、3つのジョセフソン接合を含む。ジョセフソン接合のひとつは、移相ジョセフソン接合 1 1 5 である。内側ループ 3 1 0 - 1 はまた、3つのジョセフソン接合を含む。外側ループ 3 1 0 - 2 は、従来の超伝導材料で形成することができ、内側ループ 3 1 0 - 1 は従来の超伝導材料又は従来にない超伝導材料の何れかで形成することができる。従来にない超伝導材料の例は、d波及びp波超伝導体を含む。従来の超伝導材料の例は、アルミニウム (Al)、ニオブ (Nb) 及び鉛 (Pb) のような s 波超伝導体を含む。移相ジョセフソン接合 1 1 5 は、典型的には  $\pi/2$ -移相ジョセフソン接合である。別の実施形態では、移相素子 1 1 5 は、外部フラックスが干渉を保存するのに十分に安定しており、測定プロセスを破壊しない拘束と外部フラックスを置換することができる。図 3 は更に、超伝導貯蔵器 1 4 5 及び容量性の結合された接地 1 9 0 - Q を図示する。超伝導貯蔵器 1 4 5 は、磁束キュビット 1 1 0 の外側ループ 1 1 0 - 2 を接地 1 9 0 - Q に接続する大きな超伝導リードでもある。位相素子 3 1 0 の製造は、当業界で周知であり、Mooij 等の Id を参照する。

#### 【 0 0 6 2 】

本発明のある実施形態では、内側ループ 3 1 0 - 1 (図 3) は、1 1 0 (図 1) のような位相素子と置換することができる。位相素子は、外側ループ 3 1 0 - 2 を介して誘電結

合される。誘電結合は、不必要な製造方法の接触準備段階を作る。

【0063】

M.Matters, W.Eljion及びJ.Mooijによる「Influence of Controlled Quantum-Mechanical Charge and Phase Fluctuations on Josephson Tunneling(ジョセフソントンネリングの制御された量子力学電荷及び位相揺らぎの影響)」Phys. Rev. Lett., 75, 721(1995年7月)及びそれに引用された参考文献(その全体を引用によりここに組み入れる)では、SSETのメゾスコピック島の位相又は結合エネルギーにわたる制御が記載されている。それらの実験作業は、SSETのメゾスコピック島にスイッチを介して接続され、固定された位相を備えた位相貯蔵器のような大きな接地された超伝導体を含む。SSETのメゾスコピック島と位相貯蔵器との間の接続を調整することにより、それらは、SSET素子を介して超伝導電流の量子トンネリングをするジョセフソン結合エネルギーの効果の直接的な証拠を集めることができる。位相貯蔵器の構成は、「接地に対して大きな容量を有し、さもなければ接続されていない巨視的な測定リード」(721頁、第2列、第2段落第8行)からなるように記載され、従って、素子はメゾスコピック体制にはなく、一定の位相を有する。本発明のある実施形態は、メゾスコピック位相素子の量子位相揺らぎがメゾスコピック電荷素子の電荷と相互作用することを明らかにする。かかる体制は、従来技術では考慮も予想もされていない。更にかかる体制は、例えば、位相キュビットに関する作動の読み出しを実行し、又は、キュビットの制御された絡み合いを実行するのに有用であり、それらの両方は量子演算を可能にする臨界作動である。

10

【0064】

本発明によれば、位相結合素子の実施形態は、位相キュビット、超伝導単一電子トランジスタ(SSET)、SSETをバイアスする機構、及び、素子にわたって電位降下を測定する機構を含む。SSETは、メゾスコピック島を含み、ジョセフソントンネル接合によって素子リードから絶縁され、更に、素子のメゾスコピック島を容量的に荷電する荷電電極を含む。作動中、SSETの荷電機構は、メゾスコピック島のクーロンエネルギーを制御し、従って、SSETリード間の電流の流れに関するSSETの容量を制御する。

20

【0065】

本発明の実施形態は、位相素子、電荷素子、電荷素子と位相素子のメゾスコピック領域を結合する機構を含む。結合機構は、干渉スイッチ及び移相素子、及び、SSETを介して電流を直接又は間接に測定する機構を含む。キュビットは、2つの基本状態 $|0\rangle$ 及び $|1\rangle$ を有し、それらは古典的な計算ビット状態0及び1に類似する。しかしながら、量子計算は、キュビットをその基本状態の重ね合わせに位置することができるので、古典的な計算とは著しく異なる。一般的には、量子コンピュータは、量子レジスタを含み、それは1又はそれ以上のキュビットからなり、キュビットとの相互作用を容易にする。本発明の実施形態では、量子計算演算は、干渉性の消失が最小になるような環境で実行され、作動する。量子演算中に考慮される重要な干渉性の消失の影響は、熱励起及び漂遊磁界である。干渉量子演算に有用な温度は、1°K以下のオーダ又は、10mK乃至50mKのオーダである。

30

【0066】

図4は、本発明の実施形態を図示する。位相干渉スイッチ130は、移相素子110及び電荷素子120の相互作用を制御するスイッチとして作用する。作動中、外部フラックス $\Phi_x$ は、130の状態、その結果としての、移相素子110及び電荷素子120の相互作用を制御するのに用いられる。外部フラックス $\Phi_0$ は、スイッチ130に誘導結合された第2のループ135を提供することにより印加することができる。制御ループ135は、電流ソース $I_x$ 及びインダクタ135-1を含む。ループ135を介した電流の制御は、位相素子110が電荷素子120に干渉結合されるようにスイッチ130を調整することができる。スイッチ130は、位相素子110を電荷素子120に制御可能に結合するいかなる干渉スイッチであってもよい。例えば、かかる用途に有用な別のスイッチは干渉SSETであり、例えば、R.J.Schoelkopf, P.Wahlgren, A.A.Kozhevnikov, P.Delsing, D.E. Proberによる「The Radio-Frequency Single-Electron Transistor (RF-SET): A Fast an

40

50

d Ultrasensitive Electrometer (無線単一電子トランジスタ(RF-SET): 高速且つ超高感度電位計)」Science, 280, 1238 (1998年5月)を参照し、その全体を引用によりここに組み入れる。

【0067】

図4は更に、電荷素子120を制御し、電荷素子120と相互作用する回路を含む。図4の回路は、シャント抵抗371、電流ソース370、接地190-3及び電圧計373を含む。更に、図4は、電荷素子120及び位相素子110のゲート電圧をそれぞれ回路接地に接続する接地190-C及び190-Qと、位相素子110を介して制御を行う位相電流ソース370-Qを図示する。シャント抵抗371は、荷電素子120の挙動を非ヒステシス過減衰モードに変化させる役割を果たす。シャント抵抗371は、通常 10の金属、又は、例えば、大きな標準コンダクタンス及び小さな抵抗を備えたジョセフソン接合であって良い。電流ソース370及び370-Qを提供する方法は、当該技術分野で周知である。電流ソース370は、適切な低温フィルタのような室温装置から制御することができる。接地190-3, 190-C及び190-Qは、例えば巨視的な超伝導体であって良い。電圧計373及び373-Qを提供する方法は、当該技術分野では周知である。本発明のいくつかの実施形態では、電圧計373に接続するリードは、室温でサンプリングされるコールドアンプを貫通する。

【0068】

荷電素子と相互作用する、図4に図示されたものと似ている読み出し回路は、当該技術分野で記載されている。例えば、A.Zorinによる「Quantum-Limited Electrometer Based on Single Cooper Pair Tunneling (単一クーパー対トンネリングに基づく量子制限電位計)」Phys. Rev. Lett., 76, 4408 (1996年6月)及びそこに引用された参考文献を参照し、その全体を引用によりここに組み入れる。

【0069】

本発明の実施形態では、位相素子の容量 $C_p$ は、電荷素子の容量 $C_j$ よりもかなり大きい。更に、 $C_j$ は電荷素子ゲートの容量 $C_g$ 、及び、位相素子及び荷電素子を分離するスイッチの容量 $C_{js}$ よりもかなり大きく、以下の関係を導く：

$$C_q < C_j < C_g, C_{js} \quad (\text{式2})$$

最初の不等式( $C_q < C_j$ )は、位相素子が位相体制にあり、電荷素子が電荷体制にあることを考慮している。最後の不等式( $C_j < C_g, C_{js}$ )は、電荷素子の電荷と位相素子の電荷の相互作用が小さいと仮定する。

【0070】

図4による本発明のある実施形態では、ジョセフソン接合120-1は、2.38K(ケルビン)のオーダーのジョセフソンエネルギー $E_{j1}$ 及び100nA(ナノアンペア)のオーダーの臨界電流 $I_{c0}$ を有する。更に、ジョセフソン接合120-2は、 $1.015 * E_{j1}$ オーダーの荷電エネルギー $E_{j2}$ を有し、メゾスコピック島領域120-4は、 $E_{j1}$ オーダーの荷電エネルギー $E_{c0}$ を有し、スイッチ130は、 $3 * E_{j1}$ のオーダーのジョセフソンエネルギー $E_{js}$ を有する。上記比率を満たす本発明の実施形態に関して、 $E_{j2} / E_{j1}$ 比は変化し、製造エラーに対して発明を頑強にする。更に、本発明のある実施形態では、シャント抵抗371は、100のオーダーの抵抗値を有することができる。

【0071】

本発明の実施形態は、熱励起が量子干渉作動で実行するために十分に抑制されたような温度で作動する。本発明のある実施形態では、かかる温度は、1K以下のオーダーであって良い。本発明の他の実施形態では、かかる温度は50mK以下のオーダーであって良い。

【0072】

いかなる超伝導ジョセフソン素子でも、素子が直流ジョセフソン挙動を有するものから交流ジョセフソン挙動を有するものに変化するスイッチ電流又は臨界電流を有する。この電荷は、ジョセフソン素子の力学的効果と関係する。従って、かかる超伝導素子の臨界電流が、あるバイアス電流を超えているならば、電圧を素子にわたって測定することができ

る。しかしながら、バイアス電流が素子の臨界電流よりも小さいとき、電圧を測定することができない。

#### 【0073】

図4を参照すると、本発明のいくつかの実施形態は、メゾスコピック位相素子110の状態を読み出すための方法を提供する。方法は、移相素子115を使用したメゾスコピック電荷素子120にメゾスコピック位相素子110を干渉結合し、メゾスコピック電荷素子120の状態を測定することを含む。ある実施形態では、メゾスコピック位相素子110を、メゾスコピック電荷素子120に干渉接続するステップは、メゾスコピック位相素子110とメゾスコピック電荷素子120との間に干渉接続を提供することを更に有する。いくつかの実施形態では、干渉接続は、位相素子15を含む。干渉接続は、メゾスコピック位相素子の量子状態と、メゾスコピック電荷素子の量子状態を維持する。メゾスコピック位相素子110をメゾスコピック電荷素子120に干渉結合するステップは、メゾスコピック位相素子110とメゾスコピック電荷素子120との間の干渉接続を制御する位相干渉スイッチ130を提供することを更に有する。更に、メゾスコピック位相素子110をメゾスコピック電荷素子120に干渉結合するステップは、持続時間 $t$ の間、移相干渉スイッチ130の状態を調整することを含む。いくつかの実施形態では、移相素子は、 $1/2$ 移相素子である。ある実施形態では、位相干渉スイッチ130は、第1の分岐に第1のジョセフソン接合と、第1の分岐に第2のジョセフソン接合を含む超伝導ループである。ある実施形態では、位相干渉スイッチ130の状態は、時間 $t$ の間、外部フラックス $\Phi_x$ を印加こと（印加された磁束）により調整される。ある実施形態では、位相干渉スイッチ130は、SSETの第1のリードがメゾスコピック位相素子110に導く干渉接続に接続し、SSETの第2のリードがメゾスコピック電荷素子120に導く干渉接続を接続するような、干渉接続に接続された超伝導単一電子トランジスタ（SSET）である。本発明のある実施形態では、位相干渉スイッチ130の状態は、時間 $t$ の間、ゲート電圧をSSETに印加することにより調整される。ある実施形態では、位相干渉スイッチ130が調整される時間 $t$ （例えば、外部フラックス $\Phi_x$ 又はゲート電圧が印加される時間）は、約2マイクロ秒以下である。ある実施形態では、持続時間 $t$ は、メゾスコピック位相素子110の量子状態の回転速度と相関する。メゾスコピック位相素子110の量子状態の回転速度は、そのトンネリング振幅と相関し、それ故、持続時間 $t$ はメゾスコピック位相素子110のトンネリング振幅と相関する。

#### 【0074】

ある実施形態では、メゾスコピック素子の状態の測定は、時間 $t_b$ の持続時間の間、メゾスコピック電荷素子120のリードにわたってバイアス電流を駆動し、次いで、素子120にわたって電圧降下を測定することを含む。ある実施形態では、この測定はシャント抵抗371（図4）と並列に素子120を配置することにより行われ、メゾスコピック電荷素子にわたる電圧降下を測定することは、シャント抵抗371にわたる電圧降下を含む。ある実施形態では、シャント抵抗371は、通常の金属、又は、大きな通常のコンダクタンス及び小さな抵抗を備えたジョセフソン接合である。ある実施形態では、持続時間 $t_b$ は約1ナノ秒以下である。他の実施形態では、持続時間 $t_b$ は1マイクロ秒以下である。ある実施形態では、メゾスコピック電荷素子120にわたって測定された電圧降下は、メゾスコピック位相素子110の状態と相関する。

#### 【0075】

本発明のある実施形態では、量子位相電荷結合素子は、量子の状態を読み出す（測定する）のに使用される。位相素子110で作動を読み出すのを実行するために、メゾスコピック島領域110-1（図1）の位相を測定することができる。好ましくは、本発明のある実施形態では、位相素子の位相を読み出すための方法を提供する。本発明の方法は、位相素子を電荷素子に結合し、電荷素子のリードにわたってバイアス電流を駆動し、結果の電圧を測定することを含む。本発明のある実施形態では、電流バイアスを印加した結果の電圧は、位相素子の位相状態に依存する。例えば、位相素子が第1の位相状態及び第2の位相状態を有するならば、第1の位相状態は電荷素子の第1の臨界電流 $I_{c1}$ と相関し、第

10

20

30

40

50

2の位相状態は電荷素子の第2の臨界電流 $I_{c2}$ と相関する。電荷素子120をとめる電流は、

$$I = I_c \sin \theta / 2 \times \cos \theta \quad (\text{式3})$$

であり、ここで、 $\theta$ は電荷素子120の各ジョセフソン接合にわたる位相差の合計である。更に、 $\phi$ は、電荷素子120のメゾスコピック島の位相である。それ故、電荷素子120を流れる電流は、電荷素子120のメゾスコピック島の位相によって影響を受ける。この関係は、ジョセフソン効果の一部である。メゾスコピック島の電荷状態はこの位相に影響を及ぼす。 $\cos \theta$ の値は、余分なクーパ対が負及び正の電流120を導く電荷素子120のメゾスコピック島にあるかどうかによって依存する負又は正の値をとる。一方が電荷素子120に電流を印加するとき、ジョセフソン効果が印加電流を加え又は減ずることができるように電流が既に存在するので、2つの臨界電流の値( $I_{c1}$ 及び $I_{c2}$ )が存在する。

【0076】

電荷素子120の状態を読み出す方法の他の実施形態は、バイアス電流を印加することを含む。バイアス電流は、電荷素子の第1及び第2の状態と相関する臨界電流値 $I_{c1}$ 及び $I_{c2}$ の両方を超える。かかる方法では、結果として生じる電圧が、電荷素子にわたって測定される。バイアス電流が臨界電流値 $I_{c1}$ 及び $I_{c2}$ の両方よりも大きいので、電荷素子は、電圧状態に入り、結果として生じる電圧は電荷素子の状態に依存する。

【0077】

図4に図示した回路は、電荷素子と位相素子の両方にわたって別々に制御を行うことができる。スイッチが開いているならば、位相素子110及び電荷素子120は、互いに切断されており、互いに取り付けられた回路は、各素子の状態を制御及び測定するのに別々に使用することができる。例えば、スイッチ130が開いているとき、位相素子110の状態は電流源370-Qを使用して初期化することができ、また、電荷素子120の状態は電流源370及びゲート電圧125を使用して制御することができる。更に、いったん切断されたならば、各素子の状態を別々に読み出すことができる。各素子の状態を別々に読み出す方法は、当該技術分野では周知である。

【0078】

本発明の実施形態では、位相素子の位相状態を読み出す方法は、第1の臨界電流 $I_{c1}$ よりも大きく、第2の臨界電流 $I_{c2}$ よりも小さいバイアス電流を電荷素子にバイアスすることを含む。図4を参照すると、 $I_{c1}$ 及び $I_{c2}$ が位相素子110の位相状態と相関するので、電荷素子120が第1の臨界電流 $I_{c1}$ を有するならば、電圧はシャント抵抗371にわたって生じ、電荷素子120が第2の臨界電流 $I_{c2}$ を有するならば、電圧はシャント抵抗371にわたって生じない。

【0079】

本発明の実施形態では、位相キュビットはメゾスコピック電荷素子に干渉的に制御可能に結合され、キュビットのバイアス状態はメゾスコピック電荷素子の臨界電流 $I_{c1}$ に相関する。メゾスコピック電荷素子の臨界電流は、素子が非超伝導になる前に取り扱うことができる最大電流を表し、メゾスコピック電荷素子(上記参照)の主なコンポーネントの特徴により実質的に判断される。例えば、位相キュビットの第1のバイアス状態は、 $|0\rangle$ であってよく、メゾスコピック電荷素子の第1の臨界電流 $I_{c1}$ と相関し、位相キュビットの第2のバイアス状態は、 $|1\rangle$ であってよく、メゾスコピック電荷素子の第2の臨界電流 $I_{c2}$ と相関する。印加電流がメゾスコピック電荷素子の臨界電流を超えるならば、電圧がそのリードにわたって生じ、印加電圧がメゾスコピック電荷素子の臨界電流を超えないならば、それは超伝導を維持し、そのリードの間で実質的にゼロの電圧降下を有する。

【0080】

本発明のある実施形態によれば、キュビットの読み出し作動を実行するための方法は、SSETのリードにわたるバイアス電流を印加することを含み、SSETのメゾスコピック島は、位相キュビットに干渉的に結合され、更に、SSETのリードにわたって生じた電圧を測定することを含む。バイアス電流 $I_b$ は、位相キュビットのバイアス状態と相関し、SSET素子のメゾスコピック島の臨界電流の間になるように選択され、位相キュビットが第1のバイ

10

20

30

40

50

アス状態を占めているならば、 $I_b$ は臨界電流を超え、SSETを動的体制内に駆動し、SSETリードにわたって電圧降下をさせ、位相キュービットが第2のバイアス状態を占めているならば、 $I_b$ はSSETの臨界電流を超えず、リードにわたって測定される電流はない。

#### 【0081】

本発明の実施形態によれば、位相-電荷素子は、アレイの複数の素子を含むことができ、素子は位相素子又は電荷素子のいずれかであってよい。位相又は電荷素子の各々が、それぞれ互いに結合され、アレイの2つの素子が干渉的に結合される。本発明の実施形態では、アレイは位相素子からなり、各々が別々の干渉スイッチを介して単一電荷素子に結合され、アレイの位相素子は、必要であれば、電荷素子に接続することができる。

#### 【0082】

図5は、複数の位相素子500-1乃至500-Nに接続された電荷素子を含む位相電荷素子505を図示する。位相素子500-1乃至500-Nの各々は、並列に配置され、各分岐はスイッチ130-1乃至130-Nをそれぞれ含み、スイッチ130-1乃至130-Nは閉じているとき、それぞれ位相素子500を電荷素子120に結合し、開いているとき、それぞれ位相素子500を電荷素子120から切断する。図5は更に、図4に図示された回路を読み出すのに類似しており、シャント抵抗又はジョセフソン接合371、電流源370、電位計373、及び接地190-3を含む、回路を読み出すことを図示する。本発明の実施形態では、電荷素子120の状態を判断するのに用いられる読み出し回路は変化する。

#### 【0083】

図5を再び参照すると、電荷素子120、移相素子115、位相素子500-1乃至500-N、及び、スイッチ130-1は、アレイの位相素子の状態を絡み合わせる回路を形成する。更に、素子505は、各キュービット分岐がスイッチ130-1乃至130-Nを制御することにより結合又は切断することができるバス501を含む。量子レジスタの絡み合わせ作動の実装に関する以前の提案は、最も近い隣とだけの結合だけを含んでいる。例えば、A. BlaisによるPhys. Rev A 022312 (2001年)、及び、Y. Makhlin, G. Schon, A. Shnirmanによる「Quantum state engineering with Josephson-junction devices (ジョセフソン接合素子の量子状態エンジニアリング)」LANL前刷り, cond-mat/0011269 (2000年11月)を参照し、その全体を引用によりここに組み入れる。しかしながら、本発明の実施形態は、最も近いものでない隣との結合のための機構を提供する。本発明によれば、位相素子のアレイは形成され、アレイの位相素子の状態を絡ませるための機構が、最も近い隣の結合を超えて達成されることができる。

#### 【0084】

絡み合いオペレーションを提供する方法の実施形態は、第1の位相素子500(図5)を選択することを含み、第1の位相素子は、持続時間 $t_1$ の間電荷素子120と相互作用し、持続時間 $t_2$ の間第2の位相素子500を選択することを含み、第2の位相素子の状態は電荷素子120と相互作用し、それ故、第1の位相素子及び第2の位相素子の状態を絡み合わせることを含む。持続時間 $t_1$ 及び $t_2$ は、10マイクロ秒以下であってよく、本発明の実施形態に依存する。本発明のある実施形態では、持続時間 $t_1$ 及び $t_2$ は、100ナノ秒以下であって良い。かかる方法は、位相素子500の所望の数について繰り返すことができる。

#### 【0085】

絡み合いオペレーションを終えるために、電荷素子120の状態を読み出すことにより電荷素子120の状態でもつれを解くオペレーションを実行することができ、位相素子500は選択解除される。もつれを解くオペレーションは、以前の絡み合いからの情報が除去されることを保証し、アレイの位相素子500と電荷素子120の間に形成された新しい結合から独立している。

#### 【0086】

もつれを解く方法は更に、アレイの状態に関する情報を収集するために用いられることができる。例えば、大規模量子計算オペレーションを実行するために、量子レジスタにお

10

20

30

40

50

ける量子状態は干渉性の消滅を低下させるようにエンコードすることができる。例えば、P.W. Shorによる米国特許第5,768,297号「Method for reducing decoherence in quantum computer memory (量子コンピュータメモリにおける干渉性の消失を低減させる方法)」、及び、D. Gottesmanによる米国特許第6,128,764号「Quantum error-correcting codes and devices (量子エラー訂正コード及びデバイス)」を参照。かかるエンコード方法は典型的には、量子レジスタの1又はそれ以上のキュビットの状態を測定する際の不確定なオペレーションのセットを適用することを含む。従って、もつれを解くプロセス中、電荷素子の状態は、エンコードされた状態を維持するために要求される情報を収集するのに役立ち、それ故、量子レジスタの干渉性を増大させる。

#### 【0087】

アレイの他の位相素子500と並列に、電荷素子120と直列に配置されている位相素子500の状態を読み出すための方法は、アレイのそれぞれの位相素子500を選択し、電荷素子120の状態を読み出すことを含む。特定の位相素子500の選択は、電荷素子120に結合された位相素子500を要求し、位相素子500の状態は電荷素子120の状態と関連し、上記詳細の通り、アレイの他の位相素子500は電荷素子120から切り離される。

#### 【0088】

位相素子500の並列アレイと直列に配置された電荷素子120の状態を読み出すための方法は、読み出されるそれぞれの位相素子500を選択し、バイアス電流で電荷素子120をバイアスし、電荷素子120にわたって電圧降下を測定することを含む。本発明の実施形態では、位相素子500を選択することは、それぞれの位相素子500を電荷素子120に結合するように、スイッチ130を閉じることを含む。次いで、読み出し方法は、アレイにおける位相素子500の各々に関してそれぞれ繰り返すことができる。例えば、図5を参照すると、位相素子500-1乃至500-Nの状態を読み出すことは、スイッチ130-1を閉じ、電流源370を使用してバイアス電流を駆動し、電位計373を使用して電圧降下を測定し、スイッチ130-1を選択解除又は開け、素子500-2乃至500-Nに関するプロセスを繰り返すことである。

#### 【0089】

本発明によれば、位相電荷結合素子は、2キュビット量子レジスタである。キュビットの各々は初期化及び読み出しを介して制御され、更に、電荷及び位相キュビットそれぞれの量子状態は絡み合うことができる。かかる量子レジスタは、複数のキュビットを含む量子レジスタに対して完全に基準化することができる。複数のキュビットの各キュビットは、上述のように、電荷キュビット又は位相キュビットのいずれかであってよい。かかる量子レジスタは、不均一量子レジスタとして定義される。本発明の実施形態では、位相キュビット及び電荷キュビットを含む不均一对のキュビットの間絡み合いオペレーションを実行するための方法は、ある持続時間 $t$ の間、結合機構を使用して対を結合することを含む。かかる結合機構は、詳細が上に述べられている。絡み合いオペレーションの持続時間 $t$ は、マイクロ秒以下のオーダーであってよく、本発明の実施形態に依存する。本発明のある実施形態では、持続時間 $t$ は、ナノ秒以下のオーダーである。ある実施形態では、絡み合いオペレーションの持続時間 $t$ は、不均一对のキュビットの一つのトンネリング振幅と関連する。

#### 【0090】

再び図5を参照すると、電荷素子120は、電荷キュビットであってよく、位相素子500-1乃至500-Nは位相キュビットであってよい。アレイ又は量子レジスタの位相キュビットの一つが選択されたとき、それぞれの位相キュビットの状態は、電荷キュビット120の状態で絡み合わされる。更に、同時にアレイの位相キュビットを相互に選択することにより、電荷キュビットと一緒に各位相キュビットを絡み合わせることができる。電荷素子120が電荷キュビットでない体制では、図5に図示したアレイは、位相キュビット500-1乃至500-Nを絡み合わせるのに使用され、並びに、位相キュビット500-1乃至500-Nの状態を読み出すのに使用される。

10

20

30

40

50

## 【0091】

図6は、本発明の実施形態を図示する。回路600では、電荷及び位相素子500-1乃至500-Nの並列アレイは、読み出し回路に接続される。読み出し回路は、上記図4及び5の議論と一緒に記載したものと同一である。図6の回路600は更に、スイッチ130-1乃至130-N-1と、ジョセフソン接合115-1乃至115-N-1のそれぞれを含むアレイに隣接した分岐の間に結合機構を図示する。回路の各分岐は、位相又は電荷素子500-1乃至500-Nと、各位相又は電荷素子を読み出し回路と結合させるためのスイッチ685-1乃至685-Nを含む。

## 【0092】

本発明のある実施形態は、不均一な量子レジスタのキュビットの状態を読み出すための方法を提供する。不均一量子レジスタは、第1の複数の位相キュビット及び第2の複数の電荷キュビットを含む。方法は、量子レジスタの第1のキュビットを選択することを含む。第1のキュビットは、第1の電荷キュビット又は第1の位相キュビットである。第1のキュビットは、ある持続時間 $t_c$ の間、メゾスコピック電荷素子に干渉的に接続される。次いで、持続時間 $t_c$ が経過した後、メゾスコピック電荷素子の状態が読み出される。ある実施形態では、第1のキュビットは、キュビットとメゾスコピック電荷素子との間の接続を調整する位相干渉スイッチの状態を調整することにより量子レジスタのメゾスコピック電荷素子に結合される。ある実施形態では、位相干渉スイッチは、フラックスを印加することにより調整される。ある実施形態では、位相干渉スイッチは、ゲート電圧を印加することにより調整される。ある実施形態では、持続時間 $t_c$ は、第1のキュビットのトンネリング振幅と相関する。他の実施形態では、持続時間 $t_c$ は約1マイクロ秒以下である。更に他の実施形態では、持続時間 $t_c$ は、約1ナノ秒以下である。ある実施形態では、メゾスコピック電荷素子の状態は、メゾスコピック電荷素子のリードにわたってバイアス電流を駆動し、前記メゾスコピック電荷素子にわたる電圧降下を測定することにより読み出される。

## 【0093】

ある実施形態では、アレイの隣接する素子は、いくつかの体制のものである。かかる配置は、電荷-電荷対、並びに、位相-位相対を含む。かかる状況では、移相素子115は、隣接する素子の間に要求されない。位相又は電荷素子の状態を読み出す方法の実施形態は、位相又は電荷素子のそれぞれを選択し、素子にわたりバイアス電流を駆動し、素子にわたり電圧降下を測定することを含む。

## 【0094】

電荷素子と位相素子を結合するための実施形態は、それぞれの素子間の結合スイッチを閉じることを含む。図6を再び参照すると、電荷素子500-1は、ある持続時間 $t_c$ の間、スイッチ130-1を閉じることにより位相素子500-2に接続され、次いで、素子500-1と500-2が結合されないようにスイッチ130-1を開ける。図6に図示した回路のいかなる2つの隣接する素子も同様に結合することができる。本発明の実施形態では、位相及び結合素子は、それぞれ位相キュビット及び電荷キュビットであってよく、600は、読み出し、初期化、及び、絡み合いオペレーション、並びに、キュビット500-1乃至500-Nの各々に関するシグマ $\Sigma$ 又はバイアスオペレーションのような他の重要な量子計算演算を提供する量子レジスタとして作動する。600のキュビットのそれぞれのオペレーションを実行するための方法は、2001年6月1日にM.Amin, G.Rose, A.Zagoskin及びJ.Hiltonにより出願された米国特許出願09/872,495「Quantum Processing System for Superconducting Phase Qubit (超伝導位相キュビットに関する量子処理システム)」及びそれに引用された参照文献に記載されており、その全体を引用によりここに組み入れる。

## 【0095】

図7は、電荷素子120に結合された位相素子110を図示し、電荷素子120は読み出し回路790に結合されている。読み出し回路790は、電荷素子120及び接地190-3に直列に接続されたタンク回路790-1を含む。接続791は、無線信号が回路

に入ることができ、出ることができる、入力及び出力ラインである。図7に図示された読み出し回路790は、無線SET (rf-SET) であり、当該技術分野で電位計として使用するように記載されているものである。例えば、A. Assime, G. Johansson, G. Wendin, R. Schoelkopf及びP. Delsingによる「Radio-Frequency Single-Electron Transistor as Readout Device for Qubits: Charge Sensitivity and Backaction (キュビットに関する読み出しデバイスとしての無線単一電子トランジスタ: 電荷感度及びバックアクション)」Phys. Rev. Lett., 86, 3376 (2001年4月)を参照し、その全体を引用によりここに組み入れる。

【0096】

この参照文献では、rf-SET素子は、電位計又は、電荷キュビットに関する電荷読み出しデバイスとして使用されている。しかしながら、位相キュビットの読み出しは考慮されておらず、電荷キュビットの読み出しは、キュビットの電荷状態を測定することにより達成される。

【0097】

図8は、タンク回路895及び超伝導ループ896の間に誘導結合を提供する別の読み出し回路800を図示し、ループ896は、電荷素子120のリードを一緒に接続することにより形成される。894は、2つの素子の間の誘導結合を表す。読み出し回路は、A. Zorinによる「Cooper-pair qubit and Cooper-pair electrometer in one device (素子中のクーパー対キュビット及びクーパー対電位計)」及びその参照文献に記載され、その全体を引用によりここに組み入れる。

【0098】

本発明のある態様は、位相キュビットと電荷キュビットの間で量子計算絡み合いオペレーションを実行するための方法を提供する。その方法では、干渉接続が、位相キュビットと電荷キュビットとの間に提供される。干渉接続により、位相キュビットの量子状態及び電荷キュビットの量子状態が互いに相互作用することができる。更に、干渉接続は、持続時間 $t_c$ の間調整される。位相キュビットは、位相キュビットの量子状態及び電荷キュビットの量子状態を制御可能に絡み合わせるために少なくとも持続時間 $t_c$ の間、荷電キュビットに接続することができる。ある実施形態では、持続時間 $t_c$ は1マイクロ秒以下である。ある実施形態では、持続時間 $t_c$ は1ナノ秒以下である。

【0099】

ある実施形態では、干渉接続は、移相素子の使用を含む。ある実施形態では干渉接続は、位相干渉スイッチを調整することにより調整される。ある実施形態では、位相干渉スイッチは、第1の分岐の第1のジョセフソン接合及び第2の分岐の第2のジョセフソン接合を含む超伝導ループである。更に別の実施形態では、位相干渉スイッチの調整は、印加された磁束又はゲート電圧を制御することを含む。本発明のある実施形態では、位相干渉スイッチは、干渉接続に接続されたSSETであり、SSETの第1のリードは位相キュビットに繋がる干渉接続に接続し、SSETの第2のリードは電荷キュビットに繋がる前記干渉接続に接続する。

【0100】

本発明の別の態様は、不均一な量子レジスタのキュビットを絡み合わせるための方法を提供する。不均一な量子レジスタは、複数の位相キュビット及び複数の電荷キュビットを含む。当該方法では、バスを有する量子レジスタが用いられる。不均一な量子レジスタのいかなるキュビットもバスに対して干渉的に接続又は切断することができる。第1のキュビットは、不均一な量子レジスタの複数のキュビットから選択される。更に、第1のキュビットは、持続時間 $t_1$ の間、メゾスコピック電荷素子に結合される。第2のキュビットは、不均一な量子レジスタの複数のキュビットから選択される。第2のキュビットは、持続時間 $t_2$ の間、メゾスコピック電荷素子に接続される。ある実施形態では、第1のキュビットの選択は、第1の相関干渉スイッチを調整することを含む。第1の位相干渉スイッチは、第1のキュビットと相関し、第1の位相干渉スイッチが閉じられたとき、第1のキュビットはバスに接続され、第1の位相干渉スイッチが開いたとき、第1のキュビットは

10

20

30

40

50

バスから絶縁される。ある実施形態では、第2のキュビットの選択は、第2の位相干渉スイッチを調整することを含む。第2の位相干渉スイッチは、第2のキュビットと相関し、第2の位相干渉スイッチが閉じたとき、第2のキュビットはバスに接続され、第2の位相干渉スイッチが開いたとき、第2のキュビットは前記バスから絶縁される。ある実施形態では、第1のキュビットをメゾスコピック電荷素子に結合することは、メゾスコピック電荷素子を選択することを含み、メゾスコピック電荷素子は、持続時間  $t_0$  の間、バスに接続される。ある実施形態では、メゾスコピック電荷素子は、位相干渉スイッチを調整することを含み、位相干渉スイッチが開いているとき、メゾスコピック電荷素子は選択された第1のキュビットから切断され、位相干渉スイッチが閉じているとき、メゾスコピック電荷素子は選択された第1のキュビットに接続される。ある実施形態では、持続時間  $t_1$  は約1マイクロ秒以下である。他の実施形態では、持続時間  $t_1$  は約1ナノ秒以下である。ある実施形態では、持続時間  $t_2$  は約1マイクロ秒以下である。更に別の実施形態では、持続時間  $t_2$  は約1ナノ秒以下である。

10

#### 【0101】

ある実施形態では、方法は、メゾスコピック電荷素子の状態を読み出すことによりメゾスコピック電荷素子からの情報を清浄することを更に含む。ある実施形態では、メゾスコピック電荷素子の状態の読み出しは、不均一な量子レジスタでエラー訂正アルゴリズムを実行するためにフィードバックとして使用される情報を提供する。

#### 【0102】

ある実施形態では、方法は、不均一な量子レジスタが、新しい絡み合いオペレーションを開始することができる状態にあるように、メゾスコピック電荷素子を清浄することを含む。ある実施形態では、メゾスコピック電荷素子を清浄することは、メゾスコピック電荷素子の量子状態を読み出すことを含む。ある実施形態では、清浄オペレーションは、量子レジスタの量子状態についての情報を提供する。ある実施形態では、清浄オペレーションは、量子レジスタの量子状態でエラー訂正オペレーションを実行するのに有用な情報を提供する。ある実施形態では、量子演算は、清浄オペレーションを実行した結果の情報を条件として量子レジスタのキュビットで実行される。2, 3の特定の実施形態を参照して本発明を記載したが、記述は本発明の例示的なものであり、本発明を限定するように解釈されるべきではない。添付した特許請求の範囲によって定義された本発明の真の精神及び範囲から逸脱することなく当業者によって種々の修正が可能である。

20

30

#### 【0103】

ここで引用した全ての参照文献は、各々個別の出版物又は特許若しくは特許出願が、全ての目的に関してその全体を引用により組み入れるように明確且つ個別に示されたのと同じ範囲の目的について、及び、それらの全体を引用によりここに組み入れる。

#### 【図面の簡単な説明】

#### 【0104】

【図1】本発明のある実施形態による量子位相電荷結合素子とも称される超伝導構造を図示する。

【図2A】本発明のある実施形態による量子位相電荷結合素子を製造するための方法を図示する。

40

【図2B】本発明のある実施形態による量子位相電荷結合素子を製造するための方法を図示する。

【図2C】本発明のある実施形態による量子位相電荷結合素子を製造するための方法を図示する。

【図3】本発明のある実施形態によるフラックスキュビットを含む量子位相電荷結合素子を図示する。

【図4】本発明の別の実施形態により、電荷素子と相互作用し、該電荷素子を制御する回路を含む量子位相電荷結合素子を図示する。

【図5】本発明の別の実施形態により、位相素子のアレイ、並びに、該位相素子のアレイを絡み合わせる回路を含む量子位相電荷結合素子を図示する。

50

【図6】本発明の別の実施形態による、読み出し回路に接続された電荷及び位相素子の並行アレイを含む超伝導構造を図示する。

【図7】本発明のある実施形態による、電荷素子が読み出し回路と、位相素子とに接続された量子位相電荷結合素子を図示する。

【図8】本発明のいくつかの実施形態で使用される読み出し回路を図示する。

【図1】

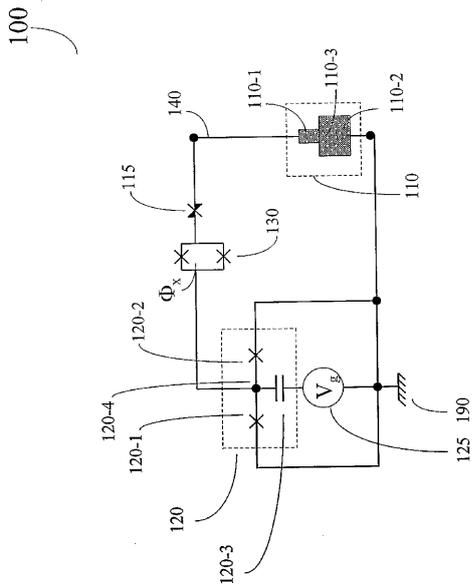


Figure 1

【図2A】

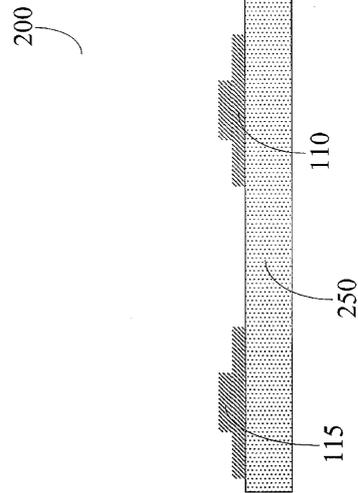


Figure 2A

【 図 2 B 】

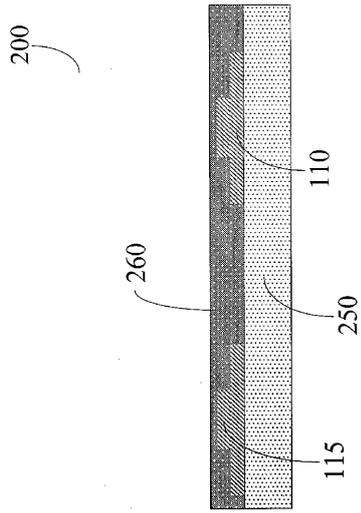


Figure 2B

【 図 2 C 】

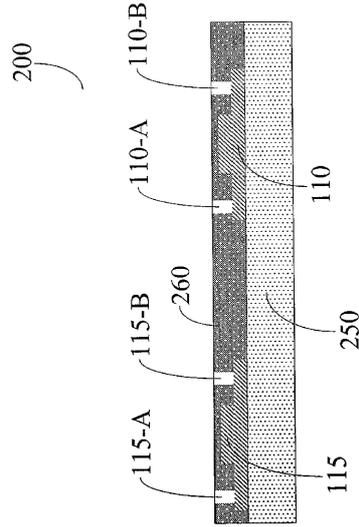


Figure 2C

【 図 3 】

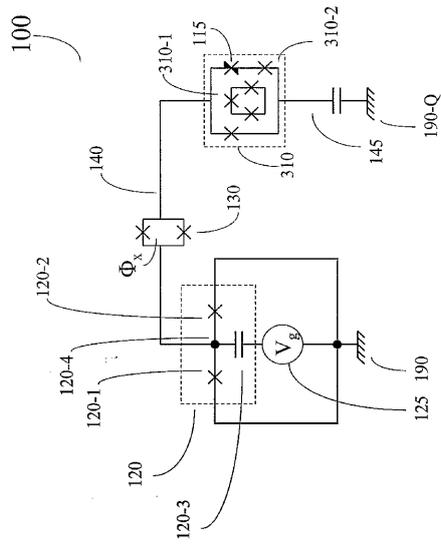


Figure 3

【 図 4 】

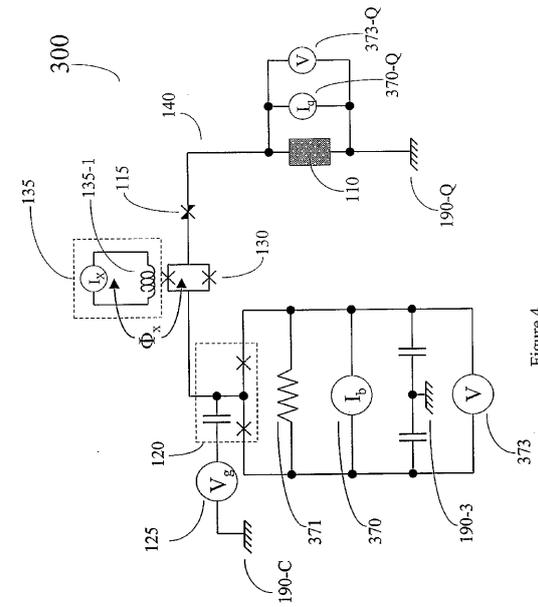


Figure 4

【 図 5 】

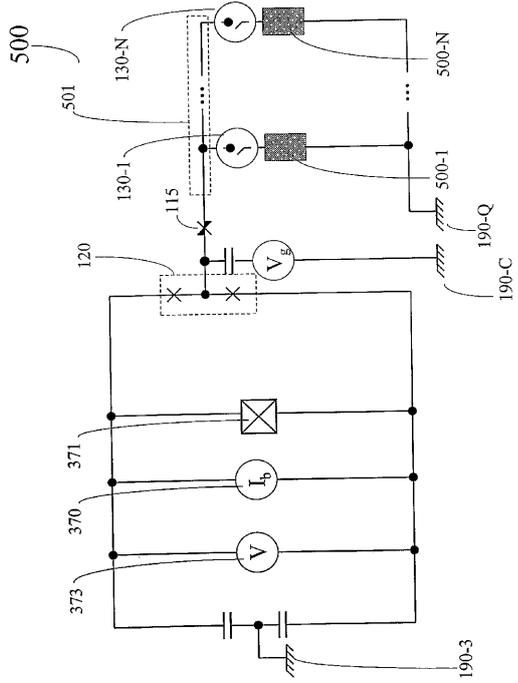


Figure 5

【 図 6 】

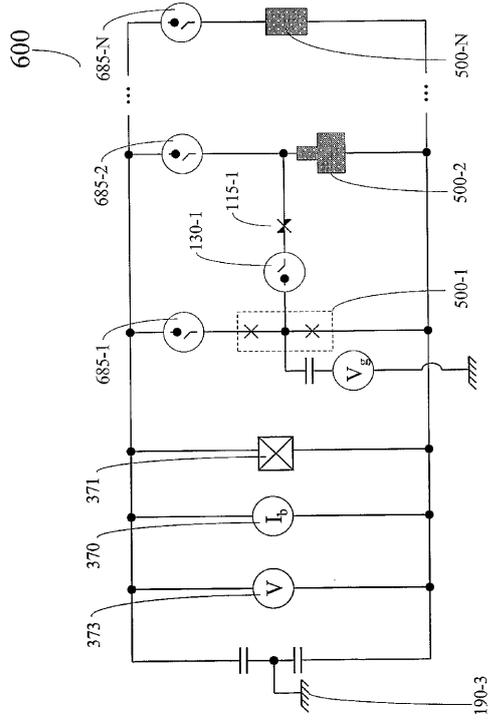


Figure 6

【 図 7 】

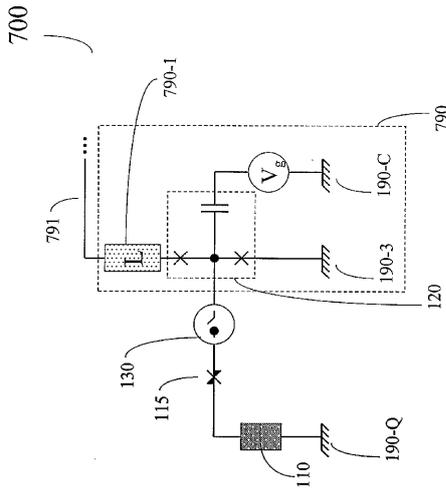


Figure 7

【 図 8 】

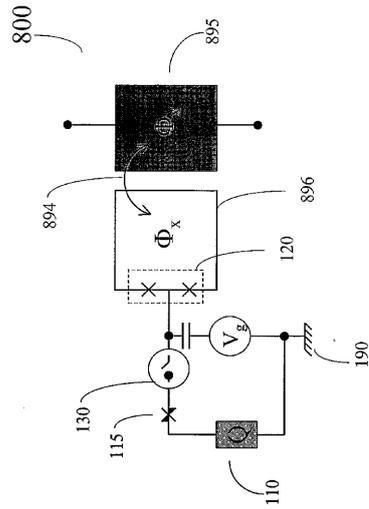


Figure 8

## 【 国際調査報告 】

INTERNATIONAL SEARCH REPORT		International Application No. PCT/CA 03/00357
A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER IPC 7 H01L27/18 H01L39/22 G06N1/00		
According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC		
B. FIELDS SEARCHED		
Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols) IPC 7 G06N H01L		
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, WPI Data, PAJ, INSPEC		
C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category *	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	US 2001/020701 A1 (ZAGOSKIN ALEXANDRE M) 13 September 2001 (2001-09-13)  paragraphs '0031!', '0052!', '0053!'; figure 8	1-6, 10, 20-23, 31, 32, 34, 55
Y	-	7-9
A	-	60, 79-86, 100-115
	---	
	-/--	
<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  10 December 2003		Date of mailing of the international search report  29/12/2003
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  Meul, H

## INTERNATIONAL SEARCH REPORT

 International Application No  
 PCT/CA 03/00357

C.(Continuation) DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category *	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	COTTET A ET AL: "Implementation of a combined charge-phase quantum bit in a superconducting circuit" PHYSICA C, NORTH-HOLLAND PUBLISHING, AMSTERDAM, NL, vol. 367, no. 1-4, 15 February 2002 (2002-02-15), pages 197-203, XP004332029 ISSN: 0921-4534 page 197, left-hand column, paragraph 1 -page 199, left-hand column, paragraph 2 page 202, right-hand column, paragraph 1 figure 1 ---	1-3, 20-25, 31,32,35
X	MAKHLIN Y ET AL: "Josephson quantum bits in the flux regime" PHYSICA C, NORTH-HOLLAND PUBLISHING, AMSTERDAM, NL, vol. 368, no. 1-4, 1 March 2002 (2002-03-01), pages 276-283, XP004336223 ISSN: 0921-4534 page 276, right-hand column, line 10-21 page 280, right-hand column, line 32-41 page 283, left-hand column, line 14-22 -	1-3,20, 21,33,34
Y	-	7-9, 24-30,35
A	-	39-54, 56-59, 61-78, 87-99
Y	KITAOKA Y ET AL: "NMR probe of magnetism and superconductivity in ruthenate oxides" MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING B, ELSEVIER SEQUOIA, LAUSANNE, CH, vol. 63, no. 1-2, 16 August 1999 (1999-08-16), pages 83-87, XP004180564 ISSN: 0921-5107 page 83, left-hand column, paragraph 1 -right-hand column, paragraph 1 page 86, right-hand column, paragraphs 2,3 --- -/--	7,8

## INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International Application No  
PCT/CA 03/00357

C.(Continuation) DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category *	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	MOVSHOVICH R ET AL: "Unconventional superconductivity in CeIrIn5 and CeCoIn5" PROCEEDINGS OF INTERNATIONAL CONFERENCE ON STRONGLY CORRELATED ELECTRON SYSTEMS, ANN ARBOR, MI, USA, 6-10 AUG. 2001, vol. 312-313, pages 7-12, XP002264441 Physica B, March 2002, Elsevier, Netherlands ISSN: 0921-4526 page 11, right-hand column, paragraphs 2,3	9
A	MOOIJ J E ET AL: "Josephson persistent-current qubit" SCIENCE, 13 AUG. 1999, AMERICAN ASSOC. ADV. SCI, USA, vol. 285, no. 5430, pages 1036-1039, XP002264442 ISSN: 0036-8075 figure 1B	11-19
A	JOYEZ P ET AL: "Observation of parity-induced suppression of Josephson tunneling in the superconducting single electron transistor" PHYSICAL REVIEW LETTERS, 11 APRIL 1994, USA, vol. 72, no. 15, pages 2458-2461, XP002264443 ISSN: 0031-9007 page 2458, left-hand column, line 1 -right-hand column, line 9; figure 1	1,20-23
Y	ZAGOSKIN A M: "d-Wave superconductors and quantum computers" PHYSICA C, NORTH-HOLLAND PUBLISHING, AMSTERDAM, NL, vol. 368, no. 1-4, 1 March 2002 (2002-03-01), pages 305-309, XP004336228 ISSN: 0921-4534 page 306, left-hand column, paragraph 3 -right-hand column, paragraph 1	24-27, 29,30,35
A		36-38
Y	BLATTER G ET AL: "Design aspects of superconducting-phase quantum bits" PHYSICAL REVIEW B (CONDENSED MATTER AND MATERIALS PHYSICS), 1 MAY 2001, APS THROUGH AIP, USA, vol. 63, no. 17, pages 174511/1-9, XP002264444 ISSN: 0163-1829 page 174511-8, left-hand column, paragraph 2 -right-hand column, paragraph 1	28

International Application No. PCT/CA 03 00357

**FURTHER INFORMATION CONTINUED FROM PCT/ISA/ 210**

This International Searching Authority found multiple (groups of) inventions in this international application, as follows:

1. Claims: 1-23,31

Superconducting structure of coupled mesoscopic phase and charge devices wherein the phase device includes inductively coupled inner and outer superconducting loops with Josephson junctions

2. Claims: 24-30,35-38

Mechanism for controlling the phase shift between a mesoscopic phase device and a mesoscopic charge device in a quantum charge-phase coupled structure

3. Claims: 39-86

Structure and method for reading out the quantum state of a mesoscopic charge device in a quantum phase-charge coupled device

4. Claims: 32-34,87-115

Structure and method for performing quantum computing entanglement operation between a phase qubit and a charge qubit in a quantum phase-charge coupled device

## INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.  
PCT/CA 03/00357

**Box I Observations where certain claims were found unsearchable (Continuation of item 1 of first sheet)**

This International Search Report has not been established in respect of certain claims under Article 17(2)(a) for the following reasons:

1.  Claims Nos.:  
because they relate to subject matter not required to be searched by this Authority, namely:
  
2.  Claims Nos.:  
because they relate to parts of the International Application that do not comply with the prescribed requirements to such an extent that no meaningful International Search can be carried out, specifically:
  
3.  Claims Nos.:  
because they are dependent claims and are not drafted in accordance with the second and third sentences of Rule 6.4(a).

**Box II Observations where unity of invention is lacking (Continuation of item 2 of first sheet)**

This International Searching Authority found multiple inventions in this international application, as follows:

see additional sheet

1.  As all required additional search fees were timely paid by the applicant, this International Search Report covers all searchable claims.
  
2.  As all searchable claims could be searched without effort justifying an additional fee, this Authority did not invite payment of any additional fee.
  
3.  As only some of the required additional search fees were timely paid by the applicant, this International Search Report covers only those claims for which fees were paid, specifically claims Nos.:
  
4.  No required additional search fees were timely paid by the applicant. Consequently, this International Search Report is restricted to the invention first mentioned in the claims; it is covered by claims Nos.:

**Remark on Protest**

- The additional search fees were accompanied by the applicant's protest.
- No protest accompanied the payment of additional search fees.

**INTERNATIONAL SEARCH REPORT**  
Information on patent family members

International Application No  
PCT/CA 03/00357

Patent document cited in search report	Publication date	Patent family member(s)	Publication date
US 2001020701	A1	NONE	13-09-2001

## フロントページの続き

(31)優先権主張番号 10/121,810

(32)優先日 平成14年4月12日(2002.4.12)

(33)優先権主張国 米国(US)

(81)指定国 AP(GH,GM,KE,LS,MW,MZ,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,IT,LU,MC,NL,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,BY,BZ,CA,CH,CN,CO,CR,CU,CZ,DE,DK,DM,DZ, EC,EE,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,M W,MX,MZ,NI,NO,NZ,OM,PH,PL,PT,RU,SC,SD,SE,SG,SK,SL,TJ,TM,TN,TR,TT,TZ,UA,UG,UZ,VC,VN,YU,ZA,ZM,ZW

(72)発明者 ブレイス アレクサンドル

カナダ ケベック ジェイ1ケイ 2ワイ9 シャーブルック ラフレッチ 1413

(72)発明者 ヒルトン ジェルミ ピー

カナダ プリティッシュ コロンビア ヴィー6ケイ 4ヴィー7 バンクーバー レッドバッド  
レーン 322-2263

Fターム(参考) 4M113 AA04 AA05 AA14 AA15 AA25 AC45 AD36 BB09 CA12 CA13

CA14 CA16 CA31 CA34 CA35 CA36