(19)日本国特許庁(JP)

(12) 特許公報(B2)

Κ

(11)特許番号

特許第7340878号 (P7340878)

(45) 発行日 令和5年9月8日(2023.9.8)

- (24)登録日 令和5年8月31日(2023.8.31)
- (51) Int. Cl.
 F I

 H10N 60/10
 (2023.01)
 H10N 60/10

 G06N 10/00
 (2022.01)
 G06N 10/00

請求項の数 6 (全 18 頁)

(21)出願番号	特願2021-539811(P2021-539811)	(73)特許権者	香 503360115
(86)(22)出願日	令和2年2月28日(2020.2.28)		国立研究開発法人科学技術振興機構
(86)国際出願番号	PCT/JP2020/008489		埼玉県川口市本町四丁目1番8号
(87)国際公開番号	W02021/029095	(74)代理人	110001069
(87)国際公開日	令和3年2月18日(2021.2.18)		弁理士法人京都国際特許事務所
審査請求日	令和4年9月2日(2022.9.2)	(72)発明者	野口篤史
(31)優先権主張番号	特願2019-148136(P2019-148136)		東京都目黒区駒場4-6-1 国立大学法
(32)優先日	令和1年8月9日(2019.8.9)		人東京大学内
(33)優先権主張国・地域又は機関		(72)発明者	中村泰信
	日本国(JP)		東京都目黒区駒場4-6-1 国立大学法
			人東京大学内
		審査官	上田智志
			最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 量子ゲート装置

(57)【特許請求の範囲】

【請求項1】

a) 第1の超伝導回路であって、

a1)1個のジョセフソン素子である第1ジョセフソン素子と、

a 2) n個のジョセフソン素子を超伝導体から成る配線で直列に接続するものであって、該n個のジョセフソン素子の各々が前記第1ジョセフソン素子のジョセフソンエネルギ

ーのn倍よりも大きいジョセフソンエネルギーを有する、第2ジョセフソン素子群と、

a 3) 第1キャパシタと、

a 4)前記第1ジョセフソン素子と前記第2ジョセフソン素子群を環状に接続することにより部分超伝導回路を形成すると共に、前記部分超伝導回路と前記第1キャパシタを 並列に接続する、超伝導体から成る第1配線と

を備え、第1共振周波数で共振する第1超伝導回路と、

b) 少なくとも1個のジョセフソン素子と、第2キャパシタと、超伝導体から成る第2配線とを備え、第2共振周波数で共振する第2超伝導回路と、

c) 接続部キャパシタと該接続部キャパシタの両極にそれぞれ接続された超伝導体から成る第3 配線とを有し、前記第1 超伝導回路と前記第2 超伝導回路を接続する接続部と、

d)前記部分超伝導回路内に静磁界を印加する磁界印加部と

e)前記第1超伝導回路に、前記第1共振周波数と前記第2共振周波数の差である差周 波数を有する電磁波を照射する電磁波照射部と、

を備えることを特徴とする量子ゲート装置。

20

【請求項2】

前記第2超伝導回路が、1個のジョセフソン素子と1個の第2キャパシタを前記第2配線 により環状に接続して成るトランズモンであることを特徴とする請求項1に記載の量子ゲ ート装置。

【請求項3】

前記第1ジョセフソン素子が、絶縁体から成る第1薄膜を有する接合部を2個の超伝導体で挟んだものであって、

前記第2ジョセフソン素子群を構成するジョセフソン素子の各々が前記第1薄膜と同種の絶縁体から成る第2薄膜を有する接合部を2個の超伝導体で挟んだものであって、

前記第1ジョセフソン素子におけるトンネル抵抗の値が、前記第2ジョセフソン素子群 を構成する各ジョセフソン素子におけるトンネル抵抗の値のn倍よりも大きい

ことを特徴とする請求項1又は2に記載の量子ゲート装置。

【請求項4】

さらに、

前記第1超伝導回路に、量子ビットの位相を反転させる電磁波である残留相互作用解消 電磁波を照射する残留相互作用解消電磁波照射部と、

前記電磁波照射部による電磁波の照射を行い、その後、前記残留相互作用解消電磁波照 射部による残留相互作用解消電磁波の照射を所定の時間間隔で2回行うよう、該電磁波照 射部及び該残留相互作用解消電磁波照射部による照射のタイミングを調整する照射調整部 と

を備えることを特徴とする請求項1~3のいずれか一項に記載の量子ゲート装置。

【請求項5】

前記残留相互作用解消電磁波照射部が前記電磁波照射部と同一の装置から成るものであることを特徴とする請求項4に記載の量子ゲート装置。

【請求項6】

請求項1~5のいずれか一項に記載の量子ゲート装置を複数個備える集積量子回路。 【発明の詳細な説明】

【技術分野】

[0001]

本発明は、量子コンピュータの構成要素である量子ゲート装置に関する。

【背景技術】

【 0 0 0 2 】

近年、量子コンピュータの研究開発が盛んに行われている。従来のコンピュータでは2 値(一般に「0」及び「1」)のいずれかで表されるデータを最小単位として計算がなされ るのに対して、量子コンピュータでは、量子力学で取り扱われる2つの状態の重ね合わせ 状態を最小単位として計算を行うことによって、計算能力が高くなることが期待されてい る。

【 0 0 0 3 】

従来のコンピュータでは、データを入力して論理積(AND)、論理和(OR)、論理否定 (NOT)等の論理演算を行い、その結果を出力するという、論理ゲートと呼ばれる操作が 行われている。量子コンピュータにおいても同様に、データを入力して所定の論理演算を 行ったうえで結果を出力するという、量子ゲートと呼ばれる操作が行われる。そのような 操作を行う装置を量子ゲート装置と呼ぶ。量子ゲート装置では、2つの状態の重ね合わせ 状態を実現する前提として、量子力学的に離散化された多数の状態から2つの状態を選択 的に取る(それら2つ以外の状態は取らない)ことが必要である。

[0004]

非特許文献1には、量子ゲート装置の構成要素であるトランズモン(transmon)と呼ば れる回路が記載されている。トランズモンは、1個のジョセフソン素子と1個のキャパシタ が超伝導体から成る配線により環状に接続されている回路である。ここでジョセフソン素 子は、2個の超伝導体を絶縁体から成る薄膜で挟んだものである。

20



[0005]

ジョセフソン素子及び配線の超伝導体が超伝導状態となる温度に量子ゲート装置を冷却 すると、ジョセフソン効果によってジョセフソン素子を通過するようにトランズモン内に 電流が流れる。これにより、トランズモンは共振回路として機能し、この共振回路は、量 子力学的な作用によって、離散化した複数のエネルギー状態のいずれかを取る。この共振 回路内にジョセフソン素子が存在することにより、複数のエネルギー状態は非等間隔で並 ぶ。そこで、最も小さい間隔に対応するエネルギーを有する電磁波をジョセフソン素子に 入射させると、トランズモンは基底状態と1つの励起状態という、2つのエネルギー状態の みを選択的に取ることができる(なお、トランズモンからジョセフソン素子を除いた回路 では、複数のエネルギー状態が等間隔で並び、その間隔に対応するエネルギーを有する電 磁波を入射させると3つ以上のエネルギー状態を取ってしまう)。このように2つのエネル ギー状態のみを取るトランズモンを複数、あるいは1つ又は複数のトランズモンと他の回 路を組み合わせて、量子ゲート装置が構成される。

【先行技術文献】

【非特許文献】

[0006]

【非特許文献1】J. Koch 他9名、"Charge insensitive qubit design derived from the Cooper pair box"、Physical Review A、(米国)、米国物理学会発行、2007年10月12日 、第76巻、論文番号042319

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

量子ゲート装置では、量子力学的な作用によるエネルギー状態を有限の時間しか維持す ることができない(その時間の平均値を「コヒーレンス時間」という)ため、演算に時間 を要すると、演算の誤りが発生する率が高くなる。量子コンピュータでは、量子ゲート装 置においてそのような誤りが発生してもそれを訂正する機能が設けられるものの、誤りの 発生率が低い方が、すなわち演算時間が短い方が、訂正の処理が少なくなるため性能が高 くなる。もちろん、演算時間が短いこと自体も量子コンピュータの性能を高くすることに 寄与する。そのためには、量子ゲート装置において、一方のエネルギー状態から他方のエ ネルギー状態に遷移する時間を短くすることが望まれる。

【0008】

本発明が解決しようとする課題は、2つのエネルギー状態間において、一方のエネルギー状態から他方のエネルギー状態に高速に遷移することができる量子ゲート装置を提供することである。

【課題を解決するための手段】

[0009]

上記課題を解決するために成された本発明に係る量子ゲート装置は、

a) 第1の超伝導回路であって、

a1)1個のジョセフソン素子である第1ジョセフソン素子と、

a 2) n個のジョセフソン素子を超伝導体から成る配線で直列に接続するものであって、該n個のジョセフソン素子の各々が前記第1ジョセフソン素子のジョセフソンエネルギーのn倍よりも大きいジョセフソンエネルギーを有する、第2ジョセフソン素子群と、

a 3) 第1キャパシタと、

a 4)前記第1ジョセフソン素子と前記第2ジョセフソン素子群を環状に接続することにより部分超伝導回路を形成すると共に、前記部分超伝導回路と前記第1キャパシタを 並列に接続する、超伝導体から成る第1配線と

を備え、第1共振周波数で共振する第1超伝導回路と、

b) 少なくとも1個のジョセフソン素子と、第2キャパシタと、超伝導体から成る第2配線とを備え、第2共振周波数で共振する第2超伝導回路と、

c)接続部キャパシタと該接続部キャパシタの両極にそれぞれ接続された超伝導体から

20

30

成る第3配線とを有し、前記第1超伝導回路と前記第2超伝導回路を接続する接続部と、 d)前記部分超伝導回路内に静磁界を印加する磁界印加部と

e)前記第1超伝導回路に、前記第1共振周波数と前記第2共振周波数の差である差周 波数を有する電磁波を照射する電磁波照射部と、 を備える。

本発明に係る量子ゲート装置は、第1超伝導回路と第2超伝導回路という2つの超伝導 回路が接続部で接続されているという構成の回路を有する。これら2つの超伝導回路はそ れぞれ、後述のように1ビットの情報を有する量子ビットとして機能する。本発明のよう に2つの量子ビットを有する量子ゲート装置は一般に「2量子ビットゲート装置」と呼ば れる。

[0011]

第1超伝導回路は、第1ジョセフソン素子と前記第2ジョセフソン素子群が第1配線に よって環状に接続された部分超伝導回路と、第1キャパシタとを有する。磁界印加部から 部分超伝導回路に(磁界を印加していない状態から)静磁界を印加することにより、第1 超伝導回路内に電流が生成され、この静磁界を維持した状態で第1超伝導回路を共振回路 として機能させる。このとき、部分超伝導回路が有するインダクタンスエネルギーUは、 第2ジョセフソン素子群がすべて等しいとして、

 $U() = E_{11}\cos() nE_{12}\cos((e_x)/n)$ (1)

と記述される。ここでEnは第1ジョセフソン素子のジョセフソンエネルギー、Enは各第 2ジョセフソン素子のジョセフソンエネルギーを表す。 nは、磁界印加部が印加する静 磁界により部分超伝導回路に導入される磁束 と、磁束量子と呼ばれる定数 nにより、

№=2 / 『で定義される。磁束量子 』は、プランク定数h及び電荷素子eにより、 =h/2eで表される。 は、第1ジョセフソン素子の2つの超伝導体の位相差を表す。式(1) は、U()が最小値を取る周りにおけるテイラー展開によって

U()~a² '+a³ '+a⁴ ' (2) と近似される。a², a¹, a¹はそれぞれ定数である。このように第1超伝導回路はインダク タンスエネルギーが ²の項と ⁴の項に加えて ³の項を有する。それに対して前述のト ランズモンはジョセフソン素子を1個しか有さないため、そのインダクタンスエネルギー は余弦関数のテイラー展開となり、 ²の項と ⁴の項の和で近似され ³の項を有しない

【0012】

本発明に係る量子ゲート装置は、第1超伝導回路のインダクタンスエネルギーUが³の 項を有することにより、以下の作用を奏する。一般に、単に2つの量子ビットを接続する だけでは、両者の共振周波数が異なることから、両者は結合せず(個別に動作するに過ぎ ず)、2量子ビットゲート装置として機能しない。それに対して本発明に係る量子ゲート 装置は、第1超伝導回路のインダクタンスエネルギーUが³の項を有することにより、第 1超伝導回路の外部から振動電界を印加することで共振周波数を変調することができる。 前記電磁波照射部は、このような振動電界として、第1超伝導回路の(振動電界が無い状 態での)共振周波数である第1共振周波数(1とする)と第2超伝導回路の共振周波数 である第2共振周波数(2とする)の差である差周波数 2 1を有する電磁波を第1 超伝導回路に照射する。これにより、共振周波数が変調され、第1超伝導回路と第2超伝 導回路が共振して相互作用するため、本発明に係る量子ゲート装置は2量子ビットゲート 装置として機能する。

[0013]

第1超伝導回路のインダクタンスエネルギーを式(2)のようにテイラー展開によって記述するためには、式(1)のU()が任意の exの下で、n < <n の間で唯一の極小値を 持つ必要がある。そのためには、第2ジョセフソン素子群を構成するn個のジョセフソン 素子の各々(以下、これらを合わせて「各第2ジョセフソン素子」と呼ぶ)が、第1ジョ セフソン素子のジョセフソンエネルギーのn(すなわち、第2ジョセフソン素子群が有す 30

20

10

るジョセフソン素子の個数と同数)倍よりも大きいジョセフソンエネルギーを有すること が必要である。ここでジョセフソンエネルギーは、ジョセフソン素子が有する2つの超伝 導体の間のトンネル結合のエネルギーをいう。

(5)

【0014】

第1超伝導回路では、量子力学的な作用によってエネルギーが離散化し、隣接するエネ ルギー状態間のエネルギー間隔が相違する。これにより、最もエネルギー間隔が小さい2 つのエネルギー状態を選び、その間で遷移させることができる。以下、第1超伝導回路に おける2つのエネルギー状態のうち低い方を基底状態「g1」、高い方を第1励起状態「e1 」と表記する。第1超伝導回路では、これら2つのエネルギー状態によって1ビットの情報 が表される。

【0015】

第2超伝導回路には、例えば前述したトランズモンや、後述する電荷量子ビット(Char ge qubit)、磁束量子ビット(Flux qubit)、フラキソニウム(Fluxonium)等を用いる ことができる。これらの例のうちトランズモンは、他の例のものよりもコヒーレンス時間 が長いという点で、好適である。第2超伝導回路は、少なくとも1個のジョセフソン素子 と、第2キャパシタと、超伝導体から成る第2配線とを備え、ジョセフソン素子の非線形 性により複数のエネルギー状態が非等間隔で並び、それらのうちエネルギー間隔が最も小 さい、隣接する2つのエネルギー状態(低い方を基底状態「g2」、高い方を第1励起状態 「e2」と表記する)を選択的に取り得る。第2超伝導回路では、これらのエネルギー状態 によって1ビットの情報が表される。

[0016]

本発明に係る量子ゲート装置における量子ゲートの動作の一例として、「スワップゲート」(SWAP gate)と呼ばれる動作を説明する。第1超伝導回路と第2超伝導回路のエネ ルギー状態の組み合わせが「g1e2」と「e1g2」のいずれか一方の状態である場合において 、電磁波照射部は第1超伝導回路に差周波数 2 1を有する電磁波を照射する。これ により、当該差周波の電磁波を照射している間、量子ゲート装置のエネルギー状態の組み 合わせは、「g1e2」と「e1g2」を一定の周期で交互に取る。従って、この周期の半整数倍 の時間だけ電磁波を照射することによって、「g1e2」及び「e1g2」のうちの一方の状態か ら他方の状態に変化させることができる。このような操作は、第1超伝導回路と第2超伝 導回路の間で基底状態(g1又はg2)と第1励起状態(e1又はe2)を交換することに相当す るため、「スワップゲート(SWAP gate)」と呼ばれる。

【0017】

また、本発明に係る量子ゲート装置は、第1超伝導回路及び/又は第2超伝導回路に照 射する電磁波の位相を90。変更することにより、第1超伝導回路と第2超伝導回路の間で 基底状態(g1又はg2)と第1励起状態(e1又はe2)を交換すると共に、第1超伝導回路と 第2超伝導回路のいずれか一方において位相を反転させる、すなわち「g1e2」を「ie1g2」 (iは虚数単位)に、「e1g2」を「ig1e2」に、それぞれ変化させる。このような量子ゲ ートの操作は一般に「アイスワップゲート(iSWAP gate)」と呼ばれる。

【0018】

さらに、量子ゲート装置のエネルギー状態の組み合わせが「e1e2」である場合において 、差周波数 2 2 1を有する電磁波を第1超伝導回路及び/又は第2超伝導回路に 照射すると、「e1e2」と「g1f2」という2つの状態を交互に取る。ここで「f2」は、第2 超伝導回路が第1励起状態の次にエネルギーが高い第2励起状態を取ることを意味し、 2 2は「f2」状態と「e2」状態間の共振による共振周波数(この場合には、この共振周 波数を前記第2共振周波数とする)を意味する。この操作によって「e1e2」を一度「g1f2 」に変化させ、さらに照射を続けて元に戻すと、状態は180°の位相を受け取り「e1e2」 に変化する。このような操作は「CZゲート(CZ gate)」と呼ばれる。 【0019】

以上のように本発明に係る量子ゲート装置は、スワップゲート、アイスワップゲート及びCZゲートという3つの量子ゲートのいずれか1つ若しくは2つ、又は全て(3つ)として

10

20

機能させることができる。

[0020]

従来の2量子ビットゲート装置(例えば2個のトランズモンを組み合わせたもの)では 一方のエネルギー状態から他方のエネルギー状態に遷移する際に100ナノ秒以上の時間を 要していた。それに対して、後述のように本発明の量子ゲート装置を作製して実験を行っ たところ、従来よりも短い16ナノ秒程度の時間で2つのエネルギー状態間を遷移させるこ とができた。このように2つのエネルギー状態間を遷移させる時間を短くすることができ る理由の1つとして、部分超伝導回路のインダクタンスエネルギーU()が³という、非 線形性を有し且つ次数が低い項を有することによって、第1超伝導回路と第2超伝導回路 の相互作用が強くなることが挙げられる。

(6)

【0021】

なお、前記静磁界の強度は、各ジョセフソン素子(第1ジョセフソン素子及び各第2ジ ョセフソン素子)が有する超伝導体、及び部分超伝導回路が有する第1配線の超伝導体の 超伝導状態が破壊される磁界よりも小さければ特に限定されない。実用上は、磁束量子の 5倍以下の磁束を部分超伝導回路内に生成する強度であることが望ましく、磁束量子の1倍 以下の磁束を部分超伝導回路内に生成する強度であることがより望ましい。

【0022】

第1ジョセフソン素子、各第2ジョセフソン素子、第1配線、第2配線及び第3配線が それぞれ有する超伝導体は同種のものであってもよいし、異種のものであってもよい。ま た、第1ジョセフソン素子の接合部と各第2ジョセフソン素子の接合部に用いる絶縁体も 、同種のものであってもよいし、異種のものであってもよい。

【0023】

第1ジョセフソン素子に絶縁体から成る第1薄膜を有する接合部を2個の超伝導体で挟んだものを、各第2ジョセフソン素子に第1薄膜と同種の絶縁体から成る第2薄膜を有する接合部を2個の超伝導体で挟んだものを、それぞれ用いる場合には、第1ジョセフソン素子におけるトンネル抵抗の値が、各第2ジョセフソン素子におけるトンネル抵抗の値の n倍よりも大きくなるようにするとよい。これにより、各第2ジョセフソン素子のジョセ フソンエネルギーを第1ジョセフソン素子のジョセフソンエネルギーのn倍よりも大きく することができる。なお、トンネル抵抗(R)は、接合部に電圧を印加したときに、その電 圧の値(V)を、流れる電流の値(I)で除した値(R=V/I)で求められる。

【0024】

なお、前記電磁波照射部は、第1超伝導回路に加えて第2超伝導回路に電磁波を照射し てもよい。

[0025]

一般に、2つの超伝導回路を用いて量子ゲートとしての動作を行う量子ゲート装置では 、量子ゲートの動作を実行した後に一方の超伝導回路が有する電子と他方の超伝導回路が 有する電子の間に、残留相互作用と呼ばれる不所望の相互作用が生じ、量子ゲートの動作 で形成された状態を維持することができなくなるおそれがある。そこで、本発明に係る量 子ゲート装置はさらに、

前記第1超伝導回路に、量子ビットの位相を反転させる電磁波である残留相互作用解消 電磁波を照射する残留相互作用解消電磁波照射部と、

前記電磁波照射部による電磁波の照射を行い、その後、前記残留相互作用解消電磁波照 射部による残留相互作用解消電磁波の照射を所定の時間間隔で2回行うよう、該電磁波照 射部及び該残留相互作用解消電磁波照射部による照射のタイミングを調整する照射調整部 と

を備えることが望ましい。

【0026】

これら残留相互作用解消電磁波照射部及び照射調整部を備える本発明の量子ゲート装置 によれば、差周波数を有する電磁波を電磁波照射部によって第1超伝導回路に照射するこ とで量子ゲートの動作を実行した後に、第1超伝導回路及び前記第2超伝導回路のうちの 10



いずれか一方のみに、量子ビットの位相を反転させる残留相互作用解消電磁波を2回照射 する。1回目の残留相互作用解消電磁波の照射によって、第1超伝導回路と第2超伝導回 路のうち残留相互作用解消電磁波が照射された方のみにおいて量子ビットの位相が反転す ることにより、第1超伝導回路が有する電子と第2超伝導回路が有する電子の間に生じる 残留相互作用が断ち切られる。その後、2回目の残留相互作用解消電磁波の照射によって 、残留相互作用解消電磁波が照射された方の超伝導回路における量子ビットの位相がさら に反転し、量子ゲートの動作で形成された元の状態に戻る。以上の操作により、残留相互 作用の影響を排除して、量子ゲートの動作で形成された状態を維持することができる。 【0027】

残留相互作用解消電磁波として、例えば、従来より磁気共鳴測定におけるスピンエコー 法を実行する際に用いられている、「 パルス」又は「180°パルス」と呼ばれるパルス 電磁波を用いることができる。この場合、パルス電磁波の周波数及び振幅強度に応じてパ ルス幅(時間)を適宜設定することにより、量子ビットの位相を反転させることができる

[0028]

前記所定の時間間隔は特に限定されないが、後述のように予備実験を行うことにより最 適化することができる。また、電磁波照射部による電磁波の照射と1回目の残留相互作用 解消電磁波の照射の時間間隔も特に限定されない。

【0029】

前記残留相互作用解消電磁波照射部は、前記電磁波照射部と同一の装置から成るものと することができる。電磁波照射部と残留相互作用解消電磁波照射部は互いに異なるタイミ ングで電磁波の照射を行うことから、残留相互作用解消電磁波を第1超伝導回路に照射す る場合には、このように電磁波照射部と残留相互作用解消電磁波照射部に同一の装置を用 いることができる。これにより、量子ゲート装置の構成を簡素化することができる。一方 、電磁波照射部と残留相互作用解消電磁波照射部は互いに別の装置から成るものであって もよい。

[0030]

なお、前記残留相互作用解消電磁波照射部は、第1超伝導回路に加えて第2超伝導回路 に残留相互作用解消電磁波を照射してもよい。

- 【発明の効果】
- 【0031】

本発明に係る量子ゲート装置によれば、2つのエネルギー状態間において、一方のエネ ルギー状態から他方のエネルギー状態に高速に遷移することができる。

【図面の簡単な説明】

【0032】

- 【図1】本発明に係る量子ゲート装置の第1実施形態を示す概略構成図。
- 【図2A】第1実施形態の量子ゲート装置が有する第1ジョセフソン素子を示す図。
- 【図2B】第1実施形態の量子ゲート装置が有する第2ジョセフソン素子を示す図。
- 【図3】第1実施形態の量子ゲート装置を作製した例を示す顕微鏡写真、及びその部分拡 大図。
- 【図4A】第1実施形態の量子ゲート装置におけるエネルギー状態の遷移を説明する図で あって、スワップゲート及びアイスワップゲートを示す図。
- 【図4B】第1実施形態の量子ゲート装置におけるエネルギー状態の遷移を説明する図で あって、CZゲートを示す図。

【図5】第1実施形態の量子ゲート装置において、所定周波数の電磁波を所定の時間だけ 照射した際の第1超伝導回路及び第2超伝導回路のエネルギー状態を測定した実験の結果 を示すグラフ。

【図6】本発明に係る量子ゲート装置の第2実施形態を示す概略構成図。

- 【図7】第2実施形態の量子ゲート装置の動作を示すシーケンス図。
- 【図8】第2実施形態の量子ゲート装置における予備実験の動作を示すシーケンス図。

10

20

【図9A】第2実施形態の量子ゲート装置において、2つの残留相互作用解消電磁波の時間間隔 を定めるための予備実験の例のうち、 を或る値に固定したときにおけるデータを示すグラフ。

- 【図9B】 を定めるための予備実験の最終結果の例を示すグラフ。
- 【図10】第1実施形態の量子ゲート装置を複数個集積した集積量子回路の例を示す概略 構成図。
- 【図11A】変形例の量子ゲート装置において用いられる第2超伝導回路であって、電荷 量子ビットを示す図。
- 【図11B】変形例の量子ゲート装置において用いられる第2超伝導回路であって、磁束 量子ビットを示す図。

10

20

30

40

【図11C】変形例の量子ゲート装置において用いられる第2超伝導回路であって、フラキソニウムを示す図。

【発明を実施するための形態】

- 【 0 0 3 3 】
- 図1~図11を用いて、本発明に係る量子ゲート装置の実施形態を説明する。
- 【0034】
- (1) 本発明の第1実施形態に係る量子ゲート装置の構成

図1は、本発明の第1実施形態に係る量子ゲート装置10の構成の概略を示す図である。この量子ゲート装置10は、第1超伝導回路11と、第2超伝導回路12と、接続部13と、磁界印加部14と、第1電磁波照射部151と、第2電磁波照射部152とを有する。なお、第1実施形態における第1電磁波照射部151は、本発明における「電磁波照射部」に該当する。第2電磁波照射部152は、量子ゲート装置10の動作を確認するために設けられたものである。

【0035】

第1超伝導回路11は、第1ジョセフソン素子111と、第2ジョセフソン素子群11 2と、第1キャパシタ114と、第1配線115とを有する。

【0036】

第1ジョセフソン素子111は、絶縁体から成る第1薄膜111」を有する接合部を2 個の超伝導体111S1、111S2で挟んで成るものである(図2A)。第2ジョセフ ソン素子群112は、n個(nは2以上の整数)の第2ジョセフソン素子1121、112 2、112nを超伝導体から成る配線112Lで直列に接続するものである。なお、図 1ではn=2である場合を例として示したが、nは3以上の整数であってもよい。各第2ジョ セフソン素子112k(kは1~nの範囲内の各整数)は、第1薄膜111」と同種の絶縁 体から成る第2薄膜112Jを2個の超伝導体112S1、112S2で挟んだものであ る(図2B)。ここで第1薄膜111J及び第2薄膜112Jの厚み及び面積は、第1ジ ョセフソン素子111におけるトンネル抵抗の値が各第2ジョセフソン素子112kにお けるトンネル抵抗の値のn倍よりも大きくなるように設定する。これにより、各第2ジョ セフソン素子112kのジョセフソンエネルギーは第1ジョセフソン素子111のジョセ フソン素子112kのジョセフソンエネルギーは第1ジョセフソン素子111のジョセ

[0037]

第1ジョセフソン素子111と第2ジョセフソン素子群112は第1配線115によっ て環状に接続され、それにより部分超伝導回路113が形成されている。さらに、部分超 伝導回路113と第1キャパシタ114は第1配線115によって並列に接続されている

[0038]

以上の構成により、第1超伝導回路11は共振回路として機能する。この第1超伝導回路11の共振周波数を「第1共振周波数 1」とする。第1共振周波数 1は、例えば2 × 4GHz~2 × 8GHz程度となる。

【0039】

第2超伝導回路12は、第1実施形態ではトランズモンを用いている。この第2超伝導 50

回路12は、1個のジョセフソン素子121と1個の第2キャパシタ124が、超伝導体から成る第2配線125により環状に接続されたものである。第2超伝導回路12は共振回路であり、その共振周波数を「第2共振周波数」とする。第2超伝導回路12は、基底状態g2と第1励起状態e2の間の共振と、第1励起状態e2と第2励起状態f2の間の共振という2つの共振を生じ得る。前者の共振における共振周波数を2とし、後者の共振における共振周波数を2とし、後者の共振における共振周波数を2とし、いずれも「第2共振周波数」と呼ぶ。第2共振周波数2は、例えば2×4GHz~2×8GHz程度となる。

[0040]

接続部13は、第1超伝導回路11と第2超伝導回路12を接続するものであって、接続部キャパシタ134と超伝導体から成る第3配線135とを有する。

【0041】

磁界印加部14は、部分超伝導回路113内に静磁界を印加するものである。印加する 静磁界の大きさは、第1ジョセフソン素子111及び各第2ジョセフソン素子112kが 有する超伝導体11151、11152、11251、11252及び第1配線115が 有する超伝導体の超伝導状態が破壊される磁界よりも小さければ特に問わないが、小さい 方が好ましい。例えば、磁束量子の5倍以下の磁束を部分超伝導回路113内に生成する 強度であることが望ましく、磁束量子の1倍以下の磁束を部分超伝導回路113内に生成 する強度であることがより望ましい。好ましい静磁界の大きさは、例えば10µT程度であ る。

【0042】

第1電磁波照射部151は、 2 1及び 2 2 1の2つの周波数のうちのいず れかを有する電磁波を選択して第1超伝導回路11に照射するものである。図1中には第 1電磁波照射部151としてコンデンサのみを描いているが、このコンデンサは図示せぬ マイクロ波生成器に接続されており、このマイクロ波生成器から供給されるマイクロ波が 前記電磁波としてコンデンサを介して第1超伝導回路11に照射(印加)される。 【0043】

第1実施形態では、量子ゲート装置10の評価を行うために、第1電磁波照射部151 は第1超伝導回路11に第1共振周波数 1を有する電磁波を照射する機能も有する。また、<u>第2電磁波照射部152</u>は、量子ゲート装置10の評価を行うために、第2超伝導回路12に第2共振周波数 2を有する電磁波を照射する機能を有する。これらの機能は、

本発明の量子ゲート装置における本質的な機能ではない。

[0044]

第1実施形態の量子ゲート装置10はさらに、第1超伝導回路11に接続された第1読 み出しキャビティ171と、第2超伝導回路12に接続された第2読み出しキャビティ1 72とを有する。第1超伝導回路11と第1読み出しキャビティ171の間、及び第2超 伝導回路12と第2読み出しキャビティ172の間にはそれぞれ、キャパシタ161、1 62が設けられている。

【0045】

その他、量子ゲート装置10は、第1超伝導回路11、第2超伝導回路12及び接続部 13が有する超伝導体を超伝導転移温度以下に冷却する冷却装置(図示せず)を有する。 【0046】

図3に、第1実施形態の量子ゲート装置10を実際に作製した例を顕微鏡写真で示す。 但し、量子ゲート装置10の各構成要素のうち磁界印加部14は、図3には示されておら ず、部分超伝導回路113から同図の紙面に垂直な方向に離れた位置に配置されている。 図3では、量子ゲート装置10の全体を示す上図と共に、上図中に破線で囲んで示した部 分を拡大した下図を示す。図3中で、背景の淡灰色よりも濃い灰色の線で囲まれた部分は 、シリコンから成る基板の表面が現れているところであり、淡灰色の部分はニオビウムか ら成り、白色の部分はアルミニウムから成る。ニオビウム及びアルミニウムは超伝導体で ある。この顕微鏡写真には現れていないが、各ジョセフソン素子が有する絶縁体製の薄膜 には、アルミニウムを酸化させたアルミナを用いている。なお、図3には第1キャパシタ

10

114及び第2キャパシタ124の符号が付されていないが、第1キャパシタ114は第 1配線115と接地との間に形成され、第2キャパシタ124は第2配線125と接地と の間に形成されている。

【0047】

なお、本発明では、超伝導体及び絶縁体はこれらの例には限定されず、任意の材料を用いることができる。

【0048】

(2) 第1 実施形態の量子ゲート装置の動作

第1実施形態の量子ゲート装置10の動作を説明する。まず、量子ゲート装置10を冷却装置によって前記超伝導転移温度以下に冷却すると共に、磁界印加部14から部分超伝導回路113内に静磁界を印加する。

[0049]

スワップゲートでは、まず、第1超伝導回路11のエネルギー状態がe1、第2超伝導回 路12のエネルギー状態がg2である(この状態を「e1g2」と記載する)場合、又は第1超 伝導回路11のエネルギー状態がg1、第2超伝導回路12のエネルギー状態がe2である(g1e2)場合に、第1電磁波照射部151から第1超伝導回路11に差周波数 2 1の 電磁波を照射する。これにより、共振周波数が変調され、第1超伝導回路11と第2超伝 導回路12が相互作用し、2つの超伝導回路のエネルギー状態の組み合わせはe1g2とg1e2 という2つの状態を所定の周期で交互に取る。従って、この周期の半整数倍の時間だけ差 周波数 2 1の電磁波を照射することにより、e1g2とg1e2のうちの一方から他方の状 態に変化させることができる。このような動作は、スワップゲートに該当する。 【0050】

図5に、図3に示した量子ゲート装置10において、第1電磁波照射部151から差周 波数 2 1の電磁波を所定の照射時間だけ照射した際の第1超伝導回路11及び第2 超伝導回路12のエネルギー状態を、照射時間を変更しながら測定した実験の結果を示す 。なお、この実験では、始めにe1g2又はg1e2の状態を形成するために、第1電磁波照射部 151から第1超伝導回路11に第1共振周波数 1を有する電磁波を照射するか、又は 第2電磁波照射部152から第2超伝導回路12に第2共振周波数 2を有する電磁波を 照射し、その後、差周波数 2 1の電磁波の照射を行った。図 5 中で縦軸の値が負で ある範囲では基底状態(g1又はg2)にあり、正である範囲では第1励起状態(e1又はe2) であることを示している。この実験結果より、第1超伝導回路11と第2超伝導回路12 は、一方が基底状態であれば他方が第1励起状態となっていることを示している。すなわ ち、この量子ゲート装置10では、前記電磁波の照射中にe1g2である状態とg1e2である状 態という2つの状態を交互に取るようにエネルギー状態が変化している(図4A)。この エネルギー状態の変化の周期をTとすると、一方の状態から他方の状態に変化するのに要 する時間T/2は、図5に示した実験結果によれば約16ナノ秒である。一般に、トランズモ ン等を用いた従来の量子ゲート装置では2つの状態間の変化に100ナノ秒以上の時間を要す るのに対して、第1実施形態によればそれよりも短時間(高速)で2つのエネルギー状態 間を遷移することができる。なお、図4A及び後述の図4Bではe1g2よりもg1e2の方がエ ネルギー状態が高いように記載したが、第1超伝導回路11及び第2超伝導回路12の構 成によってはg1e2よりもe1g2の方がエネルギー状態が高くなり得る。 [0051]

また、第1実施形態の量子ゲート装置10は、第1超伝導回路11及び/又は第2超伝 導回路12に照射する電磁波の位相を90°変更することにより、第1超伝導回路11と第 2超伝導回路12の間で基底状態と第1励起状態を交換すると共に、第1超伝導回路11 と第2超伝導回路12のいずれか一方において位相を反転させる、すなわちg1e2をie1g2 に、あるいはe1g2をig1e2に、それぞれ変化させるアイスワップゲートとして動作させる ことができる。

【 0 0 5 2 】

一方、第1実施形態の量子ゲート装置10は、CZゲートとして動作させることもでき 50

20

10

る。CZゲートでは、2つの超伝導回路のエネルギー状態の組み合わせがe1e2である状態 において、第1電磁波照射部151から第1超伝導回路11に差周波数 2 2 1を 有する電磁波を照射する。これにより、e1e2である状態と、g1f2である状態を交互に取る (図4B)。ここでf2は、第2超伝導回路12が第2励起状態にあることを意味している 。この操作でe1e2をg1f2に変化させ、さらにそのままg1f2をe1e2に戻すとき、位相が獲得 され、状態は e1e2に変化する。このような操作はCZゲートに該当する。

【0053】

以上のように、第1実施形態の量子ゲート装置10によれば、スワップゲート、アイス ワップゲート、及びCZゲートという3種の量子ゲートの操作を行うことができる。

【0054】

図3に示した量子ゲート装置10においてスワップゲート、アイスワップゲート、及び CZゲートとしてそれぞれ動作させたときに、ランダムベンチマークテストと呼ばれる方 法でゲート操作の正確性を確認する実験を行った。その結果、スワップゲートでは99.3% 、アイスワップゲートでは99.2%、CZゲートでは99.1%の確率で、量子ゲートの操作が 誤り無く実行された。すなわち、これらの量子ゲートの操作における誤りの発生率は1% 未満に抑えられる。このように誤りの発生率を低く抑えることができれば、量子ゲート装 置10を量子コンピュータに実装した際には、誤り訂正機構によって問題なく動作させる ことができると共に、訂正の処理が少なくなるため量子コンピュータの性能を高くするこ とができる。

[0055]

なお、ここまでに述べた第1実施形態の量子ゲート装置10の説明では、スワップゲート、アイスワップゲート、あるいはCZゲートとして動作した後に、第1超伝導回路11 が有する電子と第2超伝導回路12が有する電子の間に生じる残留相互作用は充分に小さいものとみなして無視した。

【0056】

(3) 本発明の第2 実施形態に係る量子ゲート装置

図6は、本発明の第2実施形態に係る量子ゲート装置20の構成の概略を示す図である 。この量子ゲート装置20は、第1実施形態の量子ゲート装置10の構成のうち、第1電 磁波照射部(電磁波照射部)151を、以下に述べる第1電磁波照射部(電磁波照射部) 兼残留相互作用解消電磁波照射部251に置き換えると共に、照射調整部21を付加した ものである。従って、第1電磁波照射部兼残留相互作用解消電磁波照射部251及び照射 調整部21以外の構成は、第1実施形態の量子ゲート装置10の構成と同様であるため、 詳細な説明を省略する。

第1電磁波照射部兼残留相互作用解消電磁波照射部251は、マイクロ波生成器251 1と、キャパシタ2512とを備える。マイクロ波生成器2511は、 2 1及び 2 1、 1の3つの周波数のうちのいずれかを有する電磁波(マイクロ波)を生成す るものである。第1電磁波照射部兼残留相互作用解消電磁波照射部251は、マイクロ波 生成器2511で生成された電磁波を、キャパシタ2512を介して第1超伝導回路11 に照射(印加)するものである。上記3つの周波数のうち、 2 1及び 2 2 1 は第1電磁波照射部兼残留相互作用解消電磁波照射部251を上述の電磁波照射部として 機能させる場合に用い、 1は第1電磁波照射部兼残留相互作用解消電磁波照射部251 を上述の残留相互作用解消電磁波照射部として機能させる場合に用いる。

【0058】

照射調整部21は、第1電磁波照射部兼残留相互作用解消電磁波照射部251による電磁波の照射のタイミングを調整するものである。照射調整部21の動作により、第1電磁 波照射部兼残留相互作用解消電磁波照射部251は、電磁波照射部として機能する場合に は周波数 2 1又は 2 2 1を有する電磁波を出力し、残留相互作用解消電磁波 照射部として機能する場合には周波数 1を有する残留相互作用解消電磁波を2回、所定の 時間間隔で出力する。残留相互作用解消電磁波として、例えば、第1超伝導回路11にお

10

ける量子ビットの位相が反転する時間のパルス幅を有するパルス電磁波(パルス、180°パルス)を用いることができる。

【0059】

図7を用いて、第2実施形態の量子ゲート装置20の動作を説明する。図7は、左から 右に向かって時間が進行し、各時間において第1超伝導回路11及び第2超伝導回路12 でそれぞれ生じる動作を示している。量子ゲート装置20では、以下に述べるように、量 子ゲートの動作の後に、残留相互作用を断ち切るための動作を行う。

[0060]

量子ゲート装置20における量子ゲートの動作は、スワップゲート、アイスワップゲート、CZゲートのいずれも、第1実施形態の量子ゲート装置10における動作と同様であ る。すなわち、量子ゲート装置20を冷却装置によって前記超伝導転移温度以下に冷却す ると共に、磁界印加部14から部分超伝導回路113内に静磁界を印加した後、第1電磁 波照射部兼残留相互作用解消電磁波照射部251から第1超伝導回路11に所定の差周波 数を有する電磁波を照射する。ここで差周波数は、スワップゲート及びアイスワップゲー トでは 2 1、CZゲートでは 2 2 1である。これにより、第1超伝導回路1 1及び第2超伝導回路12において、第1実施形態と同様に量子ゲートの動作(図7中の 符号31)が生じる。

[0061]

量子ゲートの動作から第1の所定時間tiが経過した後、第1電磁波照射部兼残留相互作 用解消電磁波照射部251から、周波数 1を有する1回目の残留相互作用解消電磁波32 を第1超伝導回路11に照射する。これにより、第1超伝導回路11における量子ビット の位相が反転し、第2超伝導回路12との間の残留相互作用が断ち切られる。続いて、1 回目の残留相互作用解消電磁波32の照射から第2の所定時間 が経過した後に、周波数

1を有する2回目の残留相互作用解消電磁波33を第1超伝導回路11に照射する。これ により、第1超伝導回路11における量子ビットの位相が元の状態に戻る。以上の動作に より、量子ゲートの動作を行ったうえで残留相互作用を断ち切ることができる。 【0062】

ここで第1の所定時間t₁の長さは特に問わない。第2の所定時間の長さも特に問わないが、以下に述べる予備実験を行うことにより定めることが好ましい。 【0063】

図8及び図9を用いて、第2の所定時間 を定めるための予備実験の例について説明す る。この例の予備実験ではまず、第2電磁波照射部152から第2超伝導回路12に、周 波数 2であって該第2超伝導回路12の量子ビットの位相を90°変化させる電磁波34 (図8参照)を照射する。このような電磁波34として、一般に「 /2パルス」又は「90 °パルス」と呼ばれ、従来より磁気共鳴測定におけるスピンエコー法を実行する際に用い られているパルス電磁波を適用することができる。電磁波34の照射後、量子ゲートの動 作31を行う。なお、電磁波34の照射と量子ゲートの動作31の間の時間の長さは問わ ない。続いて、量子ゲートの動作31から第1の所定時間t(ここでは"t/2"とする)の 経過後に1回目の残留相互作用解消電磁波32の照射を行うが、その後、2回目の残留相互 作用解消電磁波33の照射は行わない。その代わりに、1回目の残留相互作用解消電磁波 32の照射から時間が(+t/2)経過した後に、第2電磁波照射部152から第2超伝導回 路12に、周波数 2であって該第2超伝導回路12の量子ビットの位相を90°変化させ る電磁波(例えば /2パルス)35を照射する。電磁波35の照射後、キャパシタ162 の出力信号の測定36を行う。以上の測定を第1の予備実験とする。この第1の予備実験 を、様々なt及び に関して行う。

【0064】

第1の予備実験と共に、第2の予備実験を行う。第2の予備実験では、まず、第1電磁 波照射部兼残留相互作用解消電磁波照射部251から第1超伝導回路11に、該第1超伝 導回路11の量子ビットの位相を反転させる電磁波(例えば パルス)37(図8中に破 線で示す)を照射する。その後、第1の予備実験と同様の方法により、電磁波34の照射

からキャパシタ162の出力信号の測定36までの操作を行う。なお、電磁波37の照射 と電磁波34の照射の間の時間の長さは問わない。この第2の予備実験を、様々なt及び に関して行う。

【0065】

図9Aに、 を或る値に固定して、様々なtについて第1及び第2の予備実験を行った 結果を示す。これらの予備実験では、ゲートの動作を34ナノ秒間行った。図9A中に「電 磁波37の照射なし」と記載したデータは第1の予備実験のデータであり、「電磁波37 の照射あり」と記載したデータは第2の予備実験のデータである。いずれのデータもtの 変化に伴って出力値が正弦波になるように変化しているが、両データの間には位相差 が生じる。

【0066】

この位相差 ⁽を様々な についてそれぞれ求めると、図9Bに示すように、 を変数 とする ⁽の関数が得られる。図9Bにおいて、負の傾きを有する2本の実線のうち左側に 示したものはスワップゲートの動作を行った場合の ⁽の関数であり、右側に示したもの はCZゲートの動作を行った場合の ⁽の関数である。なお、図9Bにおいて負の傾きを 有する破線は、量子ゲートの動作を行わない場合の ⁽の関数である。これら3つの関数の うち、スワップゲートの動作を行った場合及びゲートの動作を行わない場合の ⁽)の値は 左側の縦軸に示し、CZゲートの動作を行った場合の ⁽)となるときの時間 の値が、 の最適値 ⁽である。

【0067】

第2実施形態の量子ゲート装置20においてランダムベンチマークテストを行ったところ、スワップゲートでは(97.1±0.1)%、アイスワップゲートでは(97.2±0.1)%、CZゲートでは(96.4±0.1)%の確率で、量子ゲートの操作が誤り無く実行された。これらの値は、第1実施形態の場合よりも低く(誤りの発生率は高く)なっているが、これは、量子ゲートの操作を行った後で残留相互作用解消電磁波を2回照射するという操作を行うことにより時間を要していることが原因であると考えられる。

【0068】

(4) 本発明の量子ゲート装置を集積した集積量子回路の例

図10に、第1実施形態の量子ゲート装置10を複数個集積した集積量子回路の例を示 す。この集積量子回路50は、複数個の量子ゲート装置10を2次元状(マトリクス状) に接続したものであって、隣接する量子ゲート装置10同士はキャパシタ51を介して接 続されている。ここでは第1実施形態の量子ゲート装置10を用いた例を示したが、<u>第2</u> 実施形態の量子ゲート装置20を複数個集積することにより集積量子回路を構成してもよ い。

- [0069]
- (5) 変形例

本発明は、上記の実施形態には限定されない。例えば、上記第1及び第2実施形態の量 子ゲート装置10及び20ではトランズモンである第2超伝導回路12を用いたが、第2 超伝導回路12の代わりに、図11A~Cに示す第2超伝導回路12A、12B及び12 Cのいずれかを用いてもよい。図11Aに示す第2超伝導回路12Aは、電荷量子ビット と呼ばれるものであって、ジョセフソン素子121Aとキャパシタ124Aが超伝導体製 の第2配線125Aによって直列に接続されているものである。図11Bに示す第2超伝 導回路12Bは、磁束量子ビットと呼ばれ、ジョセフソン素子121Bが複数個(図11 Bの例では3個)直列に接続されていると共に、各ジョセフソン素子121Bにキャパシ タ124Bが並列に接続されているものである。第2超伝導回路12Bの各構成要素は、 超伝導体製の第2配線125Bによって接続されている。図11Cに示す第2超伝導回路 12Cはフラキソニウムと呼ばれるものであって、ジョセフソン素子121Cとキャパシ タ124Cとコイル126Cが超伝導体製の第2配線125Cによって並列に接続されている。 10

[0070]

第2実施形態の量子ゲート装置20では第1電磁波照射部兼残留相互作用解消電磁波照射部251を用いたが、その代わりに、第1電磁波照射部(例えば第1実施形態の量子ゲート装置10で用いた第1電磁波照射部151と同じもの)と残留相互作用解消電磁波照射部を別々に設けてもよい。

(14)

【0071】

電磁波照射部(第1電磁波照射部151)及び/又は残留相互作用解消電磁波照射部(第1電磁波照射部兼残留相互作用解消電磁波照射部251や、第1電磁波照射部の機能を 兼ねていない残留相互作用解消電磁波照射部)は、第1超伝導回路にのみ電磁波を照射す るようにしてもよいし、第1超伝導回路に加えて第2超伝導回路にも電磁波を照射するよ うにしてもよい。

【0072】

さらには、ここまでに述べた各実施形態及び変形例の構成を組み合わせたり、これら各 実施形態及び変形例の構成を組み合わせた量子ゲート装置を複数個集積することによって 集積量子回路を構成してもよい。

【符号の説明】

【0073】

10、20 量子ゲート装置

11 第1超伝導回路

111 第1ジョセフソン素子

111J 第1薄膜

112 第2ジョセフソン素子群

- 1121、1122 第2ジョセフソン素子
- 112J 第2薄膜
- 112L 配線
- 113 部分超伝導回路
- 114 第1キャパシタ
- 115 第1配線
- 12、12A、12B、12C 第2超伝導回路
- 121、121A、121B、121C ジョセフソン素子

124 第2キャパシタ

- 124A、124B、124C、161、162、21 キャパシタ
- 125、125A、125B、125C 第2配線
- 126C コイル
- 13 接続部
- 134 接続部キャパシタ
- 135 第3配線
- 14 磁界印加部
- 151 第1電磁波照射部(電磁波照射部)
- 1 5 2 第 2 電磁波照射部
- 171 第1読み出しキャビティ
- 172 第2読み出しキャビティ
- 2 1 照射調整部
- 251 第1電磁波照射部(電磁波照射部)兼残留相互作用解消電磁波照射部
- 2 5 1 1 マイクロ波生成器
- 2512 第1電磁波照射部兼残留相互作用解消電磁波照射部のキャパシタ
- 3 1 量子ゲートの動作3 2 1回目の残留相互作用解消電磁波
- 3 3 2回目の残留相互作用解消電磁波
- 34、35、37 予備実験における電磁波

20

30

36 出力信号の測定

50 集積量子回路

51 キャパシタ







【 図 4 A 】 スワップゲート、アイスワップゲート ^{|g1, e2>} 〜 |e1, g2> ____|g1, g2>

















124C 121C 12C

フロントページの続き

特許法第30条第2項適用 https://arxiv.org/abs/1808.03372、http s://arxiv.org/format/1808.03372、https://arxiv.org/ pdf/1808.03372.pdf、https://arxiv.org/e-print/1808. 03372、平成30年8月9日

特許法第30条第2項適用 https://www.cems.riken.jp/sq20th/SQ20 th_booklet_190423_online.pdf、平成31年4月23日

特許法第30条第2項適用 20th ANNIVERSARY of SUPERCONDUCTING Q UBITS、令和1年5月14日

(56)参考文献 特表2005-527902(JP,A) 特表2014-525161(JP,A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

H10N 60/10 G06N 10/00 JSTPlus/JMEDPlus/JST7580(JDreamIII)