

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第6856592号
(P6856592)

(45) 発行日 令和3年4月7日(2021.4.7)

(24) 登録日 令和3年3月22日(2021.3.22)

(51) Int.Cl.	F I					
HO 1 L 39/22 (2006.01)	HO 1 L	39/22	Z A A K			
GO 6 N 10/00 (2019.01)	GO 6 N	10/00				
GO 6 F 7/38 (2006.01)	GO 6 F	7/38	5 1 0			

請求項の数 9 (全 9 頁)

<p>(21) 出願番号 特願2018-170581 (P2018-170581)</p> <p>(22) 出願日 平成30年9月12日 (2018.9.12)</p> <p>(65) 公開番号 特開2020-43259 (P2020-43259A)</p> <p>(43) 公開日 令和2年3月19日 (2020.3.19)</p> <p>審査請求日 令和2年3月13日 (2020.3.13)</p> <p>(出願人による申告) 平成29年度 国立研究開発法人科学技術振興機構、戦略的創造研究推進事業 ERATO巨視的量子機械プロジェクト 「超伝導量子回路における非線形ダイナミクスを活かした量子情報処理の研究」委託研究、産業技術力強化法第19条の適用を受ける特許出願</p>	<p>(73) 特許権者 000003078 株式会社東芝 東京都港区芝浦一丁目1番1号</p> <p>(74) 代理人 100108062 弁理士 日向寺 雅彦</p> <p>(72) 発明者 後藤 隼人 東京都港区芝浦一丁目1番1号 株式会社東芝内</p> <p>審査官 棚田 一也</p>
--	---

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 電子回路及び計算装置

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

第1導電部材及び第2導電部材を含む超伝導素子であって、前記第1導電部材は、第1固有周波数を有する第1量子ビットに容量結合される第1端部と、第2固有周波数を有する第2量子ビットに容量結合される第2端部と、前記第1端部と前記第2端部との間の第1部分と、を含み、前記第2導電部材は、第3端部と、前記第1部分と容量結合する第4端部と、前記第3端部と前記第4端部との間に設けられたジョセフソン接合と、を含み、前記超伝導素子と、

前記第3端部にマイクロ波を供給する供給部と、

を備え、

前記マイクロ波は、第1波、第2波及び第3波のいずれかを含み、

前記第1波の周波数は、前記第1固有周波数及び前記第2固有周波数の和の1/2の0.95倍以上1.05倍以下であり、

前記第2波は、第4波及び第5波を含み、前記第4波の周波数及び前記第5波の周波数の和は、前記第1固有周波数及び前記第2固有周波数の和の0.95倍以上1.05倍以下であり、

前記第3波は、第6波及び第7波を含み、前記第6波の周波数と前記第7波の周波数との差の絶対値は、前記第1固有周波数と前記第2固有周波数との差の絶対値0.95倍以上1.05倍以下である、電子回路。

【請求項2】

前記第 1 導電部材は、ジョセフソン接合を含まない、請求項 1 記載の電子回路。

【請求項 3】

前記第 1 部分と前記第 4 端部との間の部材間キャパシタンスは、前記第 1 端部と前記第 1 量子ビットとの間の第 1 結合用キャパシタンスよりも大きい、請求項 1 または 2 に記載の電子回路。

【請求項 4】

前記部材間キャパシタンスは、前記第 1 結合用キャパシタンスの 2 倍以上である、請求項 3 記載の電子回路。

【請求項 5】

前記部材間キャパシタンスは、前記第 2 端部と前記第 2 量子ビットとの間の第 2 結合用キャパシタンスよりも大きい、請求項 3 または 4 に記載の電子回路。

10

【請求項 6】

前記部材間キャパシタンスは、前記第 2 結合用キャパシタンスの 2 倍以上である、請求項 5 記載の電子回路。

【請求項 7】

前記第 3 端部と前記供給部との間に設けられた第 3 端部キャパシタンスをさらに備えた、請求項 1 ~ 6 のいずれか 1 つに記載の電子回路。

【請求項 8】

前記第 1 波、前記第 2 波及び前記第 3 波の前記いずれかの振幅及び位相の少なくともいずれかを制御する制御部をさらに備えた、請求項 1 ~ 7 のいずれか 1 つに記載の電子回路。

20

【請求項 9】

請求項 1 ~ 8 のいずれか 1 つに記載の電子回路と、

前記第 1 量子ビットと、

前記第 2 量子ビットと、

を備えた計算装置。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明の実施形態は、電子回路及び計算装置に関する。

30

【背景技術】

【0002】

例えば、複数の量子ビットを含む計算装置が提案されている。複数の量子ビットを結合するカブラなどの電子回路において、カップリング係数が調整可能なカブラが望まれる。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0003】

【特許文献 1】米国特許出願公開第 2017 / 0193388 明細書

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

40

【0004】

本発明の実施形態は、カップリング係数が調整可能なカブラに応用できる電子回路及び計算装置を提供する。

【課題を解決するための手段】

【0005】

本発明の実施形態によれば、電子回路は、超伝導素子及び供給部を含む。前記超伝導素子は、第 1 導電部材及び第 2 導電部材を含む。前記第 1 導電部材は、第 1 固有周波数を有する第 1 量子ビットに接続される第 1 端部と、第 2 固有周波数を有する第 2 量子ビットに接続される第 2 端部と、前記第 1 端部と前記第 2 端部との間の第 1 部分と、を含む。前記第 2 導電部材は、第 3 端部と、前記第 1 部分と容量結合する第 4 端部と、前記第 3 端部と

50

前記第4端部との間に設けられたジョセフソン接合と、を含む。前記供給部は、前記第3端部にマイクロ波を供給する。前記マイクロ波は、第1波、第2波及び第3波のいずれかを含む。前記第1波の周波数は、前記第1固有周波数及び前記第2固有周波数の和の $1/2$ の 0.95 倍以上 1.05 倍以下である。前記第2波は、第4波及び第5波を含む。前記第4波の周波数及び前記第5波の周波数の和は、前記第1固有周波数及び前記第2固有周波数の和の 0.95 倍以上 1.05 倍以下である。前記第3波は、第6波及び第7波を含む。前記第6波の周波数と前記第7波の周波数との差の絶対値は、前記第1固有周波数と前記第2固有周波数との差の絶対値 0.95 倍以上 1.05 倍以下である。

【図面の簡単な説明】

【0006】

10

【図1】第1実施形態に係る電子回路及び計算装置を例示する模式図である。

【図2】第1実施形態に係る電子回路の一部を例示する模式的断面図である。

【図3】第1実施形態に係る電子回路及び計算装置を例示する模式図である。

【発明を実施するための形態】

【0007】

以下に、本発明の実施形態について図面を参照しつつ説明する。

図面は模式的または概念的なものであり、各部分の厚さと幅との関係、部分間の大きさの比率などは、必ずしも現実のものとは限らない。同じ部分を表す場合であっても、図面により互いの寸法や比率が異なって表される場合もある。

本願明細書と各図において、既出の図に関して前述したものと同様の要素には同一の符号を付して詳細な説明は適宜省略する。

20

【0008】

(第1実施形態)

図1は、第1実施形態に係る電子回路及び計算装置を例示する模式図である。

図1に示すように、実施形態に係る電子回路151は、超伝導素子50及び供給部60を含む。この例では、電子回路151は、制御部70をさらに含む。制御部70は、電子回路151とは別に設けられても良い。

【0009】

実施形態に係る計算装置251は、上記の電子回路151、第1量子ビット10、及び第2量子ビット20を含む。第1量子ビット10は、第1固有周波数を有する。第2量子ビット20は、第2固有周波数を有する。第2固有周波数は、第1固有周波数とは異なる。

30

【0010】

超伝導素子50は、第1導電部材51及び第2導電部材52を含む。第1導電部材51は、第1端部T1、第2端部T2及び第1部分51pを含む。第1部分51pは、第1端部T1と第2端部T2との間に設けられる。第1端部T1は、第1固有周波数を有する上記の第1量子ビット10に容量結合される。第2端部T2は、第2固有周波数を有する上記の第2量子ビット20に容量結合される。電子回路151は、例えば、カプラ(例えばチューナブルカプラ)である。例えば、第1導電部材51は、ジョセフソン接合を含まない。例えば、第1導電部材51における任意の2点間の臨界電流は十分大きい。この臨界電流は、例えば、 0.1mA よりも大きい。例えば、第1導電部材51における1つの部分と別の1つの部分と間の臨界電流は十分大きい。例えば、第1端部T1と第2端部T2との間の臨界電流は十分大きい。

40

【0011】

第2導電部材52は、第3端部T3、第4端部T4及びジョセフソン接合J1を含む。第4端部T4は、第1部分51pと容量結合する。例えば、第1部分51pと第4端部T4との間に部材間キャパシタンス55aが設けられる。例えば、超伝導素子50は、部材間キャパシタンス55aを含む。ジョセフソン接合J1は、第3端部T3と第4端部T4との間に設けられる。

【0012】

50

供給部 60 は、第 3 端部 T3 にマイクロ波 60w を供給する。供給部 60 は、例えば、マイクロ波供給部である。

【0013】

1つの例（第1例）において、マイクロ波 60w は、第1波を含む。この第1波の周波数は、第1固有周波数及び第2固有周波数の平均値と実質的に等しい。第1固有周波数の固有角周波数を第1固有角周波数 ω_1 とする。第2固有周波数の固有角周波数を第2固有角周波数 ω_2 とする。第1波の角周波数を第1角周波数 ω とする。例えば、 $\omega = (\omega_1 + \omega_2) / 2$ の関係が実質的に満たされる。

【0014】

例えば、第1波の周波数は、第1固有周波数及び第2固有周波数の和の $1/2$ の 0.95 倍以上 1.05 倍以下である。 10

【0015】

別の例（第2例）において、マイクロ波 60w は、第2波を含む。第2波は、第4波及び第5波を含む。第4波の周波数、及び、第5波の周波数の和は、第1固有周波数及び第2固有周波数の和と実質的に等しい。第4波の角周波数を第4角周波数 ω_4 とする。第5波の角周波数を第5角周波数 ω_5 とする。例えば、 $\omega_4 + \omega_5 = \omega_1 + \omega_2$ の関係が実質的に満たされる。

【0016】

例えば、第4波の周波数、及び、第5波の周波数の和は、第1固有周波数及び第2固有周波数の和の 0.95 倍以上 1.05 倍以下である。 20

【0017】

別の例（第3例）において、マイクロ波 60w は、第3波を含む。第3波は、第6波及び第7波を含む。第6波の周波数と第7波の周波数との差の絶対値は、第1固有周波数と第2固有周波数との差の絶対値と実質的に等しい。第6波の角周波数を第6角周波数 ω_6 とする。第7波の角周波数を第7角周波数 ω_7 とする。例えば、例えば、 $\omega_6 - \omega_7 = \omega_1 - \omega_2$ の関係が実質的に満たされる。第1固有角周波数 ω_1 と第2固有角周波数 ω_2 とは、互いに入れ替えが可能である。第6角周波数 ω_6 と第7角周波数 ω_7 とは、互いに入れ替えが可能である。

【0018】

例えば、第6波の周波数と第7波の周波数との差の絶対値は、第1固有周波数と第2固有周波数との差の絶対値 0.95 倍以上 1.05 倍以下である。 30

【0019】

例えば、マイクロ波 60w は、上記の第1～第3波のいずれかを含む。

【0020】

このような電子回路 151 により、互いに固有周波数が異なる第1量子ビット 10 及び第2量子ビット 20 をカップリングできる。固有周波数が異なるため、クロストークの影響が抑制できる。

【0021】

制御部 70 は、上記の第1～第3波のいずれかの振幅及び位相の少なくともいずれかを制御する。これにより、カップリングの状態を制御できる。例えば、カップリングの強さ（例えばカップリング係数）を調整できる。例えば、カップリング係数の位相が制御できる。 40

【0022】

超伝導素子 50 の第1端部 T1 は、第1量子ビット 10 と容量結合する。第2端部 T2 は、第2量子ビット 20 と容量結合する。例えば、第1端部 T1 と第1量子ビット 10 との間の容量結合は、第1結合用キャパシタンス C_1 で行われる。第2端部 T2 と第2量子ビット 20 との間の容量結合は、第2結合用キャパシタンス C_2 で行われる。第1結合用キャパシタンス C_1 及び第2結合用キャパシタンス C_2 は、電子回路 151 に含まれても良い。これらのキャパシタンスは、電子回路 151 とは別に設けられても良い。

【0023】

第3端部T3と供給部60とは、容量結合する。電子回路151は、第3端部キャパシタンス55c(図1参照)をさらに含んでも良い。第3端部キャパシタンス55cは、第3端部T3と供給部60との間に設けられる。第3端部キャパシタンス55cは、超伝導素子50及び供給部60のいずれかに含まれても良い。

【0024】

例えば、超伝導を利用した量子計算機の研究開発が行われている。量子計算機に含まれる量子ビットの1つの例において、例えば、ジョセフソン接合の非調和性(エネルギー準位の間隔が不均一であること)を利用して、基底状態と第1励起状態とが、量子ビットにおける2つの状態とされる。この場合、基底状態と第1励起状態との間のエネルギー差が、量子ビットの固有周波数に対応する。別の例において、共振器または発振器の光子数状態の重ね合わせ状態のうち2つ(例えば位相が互いに反対の2つのコヒーレント状態)が、量子ビットにおける2つの状態とされる。この場合、共振器の共振周波数、または、発振器の発振周波数が、量子ビットの固有周波数に対応する。

10

【0025】

これらの量子ビットにおいて、複数の量子ビットのカップリング強度(カップリング係数)を調整できるチューナブルカプラがある。

【0026】

チューナブルカプラにおいて、例えば、損失が低いことが望まれる。実施形態においては、例えば、第1導電部材51は、ジョセフソン接合を含まない。例えば、第1導電部材51における任意の2点間の臨界電流は、十分大きい(例えば、0.1mAよりも大きい)。これにより、第1導電部材51において、ジョセフソン素子に起因する損失が生じない。実施形態によれば、低損失なチューナブルカプラが提供できる。

20

【0027】

実施形態に係る電子回路151で結合される電子素子は、例えば、量子ビット(第1量子ビット10及び第2量子ビット20など)である。量子ビットのそれぞれにおいて、固有の周波数(または固有角周波数)がある。例えば、基底状態と第1励起状態とを用いる量子ビットにおいて、基底状態と、第1励起状態と、のエネルギー差をプランク定数で割った周波数が、量子ビットの固有の周波数に対応する。

【0028】

電子回路151で結合される電子素子が共振器である場合は、共振周波数が固有の周波数となる。電子回路151で結合される電子素子が発振器である場合は、発振周波数が固有周波数となる。

30

【0029】

実施形態に係る電子回路151(例えば、チューナブルカプラ)は、固有周波数の異なる量子ビット(電子素子)を結合できる。このため、クロストークの影響を低減できる。

【0030】

実施形態に係る電子回路151(例えば、チューナブルカプラ)は、超伝導素子50を含む。超伝導素子50は、例えば、3次の非線形性を有する非線形マイクロ波素子を含む。非線形マイクロ波素子(超伝導素子50)は、キャパシタンス(第1結合用キャパシタンス10C及び第2結合用キャパシタンス20Cなど)を介して、第1量子ビット10及び第2量子ビット20と結合する。

40

【0031】

非線形マイクロ波素子(超伝導素子50)は、ジョセフソン接合を含む。これにより、3次の非線形性が得られる。この非線形マイクロ波素子に、第3端部キャパシタンス55cを介して、上記のマイクロ波60wが供給される。

【0032】

例えば、4光波混合過程を利用して、2つの量子ビットの結合が得られる。結合係数は、例えば、供給するマイクロ波の振幅及び位相の少なくともいずれかにより、調整できる。

【0033】

50

実施形態において、例えば、第1部分51pと第4端部T4との間の部材間キャパシタンス55aは、第1端部T1と第1量子ビット10との間の第1結合用キャパシタンス10Cよりも大きいことが好ましい。例えば、部材間キャパシタンス55aは、第2端部T2と第2量子ビット20との間の第2結合用キャパシタンス20Cよりも大きいことが好ましい。これにより、例えば、クロストークを抑制しつつ、結合を大きくできる。

【0034】

例えば、部材間キャパシタンス55aは、第1結合用キャパシタンス10Cの2倍以上である。例えば、部材間キャパシタンス55aは、第2結合用キャパシタンス20Cの2倍以上である。

【0035】

既に説明したように、実施形態において、第1導電部材51は、ジョセフソン接合を含まない。例えば、第1端部T1と第2端部T2との間の臨界電流は、十分大きい(例えば、0.1mAよりも大きい)。

【0036】

実施形態において、第1固有周波数と第2固有周波数との差の絶対値は、例えば、第1導電部材51を介した、第1量子ビットと第2量子ビットとの間の容量結合の結合係数の絶対値の2倍以上である。

【0037】

以下、非線形マイクロ波素子(超伝導素子50)の例について説明する。以下の図において、「x」の印は、ジョセフソン接合を表す。以下の図において、ジョセフソン接合の両端の間のキャパシタンスは、省略される。

【0038】

図2は、第1実施形態に係る電子回路の一部を例示する模式的断面図である。

図2に示すように、第2導電部材52において、導電膜31A、導電膜31B及び絶縁膜31Iが設けられる。これらの膜は、例えば、基体5sの上に設けられる。導電膜31Aの1つの端部は、第3端部T3となる。導電膜31Bの1つの端部は、第4端部T4となる。絶縁膜31Iは、導電膜31Aの別の端部と、導電膜31Bの別の端部と、の間に設けられる。絶縁膜31Iを含む部分が、ジョセフソン接合J1となる。

【0039】

以下、電子回路151及び計算装置251の例について説明する。

図3は、第1実施形態に係る電子回路及び計算装置を例示する模式図である。

図3に示すように、電子回路151は、超伝導素子50を含む。図3において、供給部60は省略されている。超伝導素子50に、第1導電部材51及び第2導電部材52が設けられている。第1導電部材51の第1部分51pと、第2導電部材52の第4端部T4とは、例えば、インターデジタル構造を有している。第1部分51pと第4端部T4との間に、部材間キャパシタンス55aが形成される。第4端部T4は、導電膜31Aの一部に対応する。第2導電部材52の第3端部T3は、導電膜31Bの一部に対応する。導電膜31Aと導電膜31Bとの間に、ジョセフソン接合J1が形成される。

【0040】

この例では、第3導電部材53が設けられる。第3導電部材53と第3端部T3との間に、第3端部キャパシタンス55cが形成される。この例では、マイクロ波60wは、第3導電部材53に供給される。第3端部キャパシタンス55cを介して、マイクロ波60wが第3端部T3に供給される。

【0041】

例えば、第1量子ビット10は、第1量子ビット導電体11と、ジョセフソン接合10Jを含む。例えば、固定電位(例えば、グランド電位GND)と、ジョセフソン接合10Jと、の間にキャパシタンス11Cが設けられる。キャパシタンス11Cと第1量子ビット導電体11との間に、ジョセフソン接合10Jが設けられる。第1量子ビット導電体11と、第1端部T1と、の間に、第1結合用キャパシタンス10Cが設けられる。

【0042】

10

20

30

40

50

例えば、第2量子ビット20は、第2量子ビット導電体21と、ジョセフソン接合20Jを含む。例えば、固定電位(例えば、グラウンド電位GND)と、ジョセフソン接合20Jと、の間にキャパシタンス21Cが設けられる。キャパシタンス21Cと第2量子ビット導電体21との間に、ジョセフソン接合20Jが設けられる。第2量子ビット導電体21と、第2端部T2と、の間に、第2結合用キャパシタンス20Cが設けられる。

【0043】

実施形態によれば、カップリング係数が調整可能なカブラに適用できる電子回路及び計算装置を提供できる。

【0044】

以上、例を参照しつつ、本発明の実施の形態について説明した。しかし、本発明は、これらの例に限定されるものではない。例えば、電子回路または発振器に含まれる超伝導素子、供給部及び制御部などの各要素の具体的な構成に関しては、当業者が公知の範囲から適宜選択することにより本発明を同様に実施し、同様の効果を得ることができる限り、本発明の範囲に包含される。

10

【0045】

各例のいずれか2つ以上の要素を技術的に可能な範囲で組み合わせたものも、本発明の要旨を包含する限り本発明の範囲に含まれる。

【0046】

本発明の実施の形態として上述した電子回路及び計算装置を基にして、当業者が適宜設計変更して実施し得る全ての電子回路及び計算装置も、本発明の要旨を包含する限り、本発明の範囲に属する。

20

【0047】

本発明の思想の範疇において、当業者であれば、各種の変更例及び修正例に想到し得るものであり、それら変更例及び修正例についても本発明の範囲に属するものと了解される。

【0048】

本発明のいくつかの実施形態を説明したが、これらの実施形態は、例として提示したものであり、発明の範囲を限定することは意図していない。これら新規な実施形態は、その他の様々な形態で実施されることが可能であり、発明の要旨を逸脱しない範囲で、種々の省略、置き換え、変更を行うことができる。これら実施形態やその変形は、発明の範囲や要旨に含まれるとともに、特許請求の範囲に記載された発明とその均等の範囲に含まれる。

30

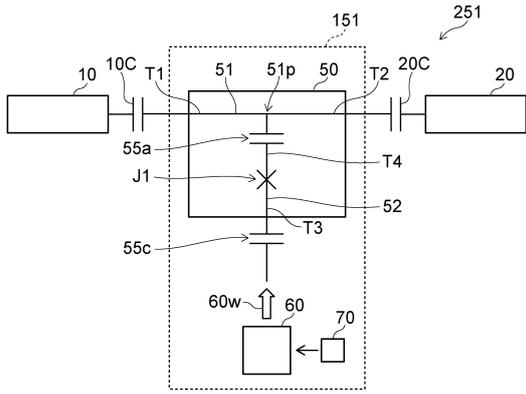
【符号の説明】

【0049】

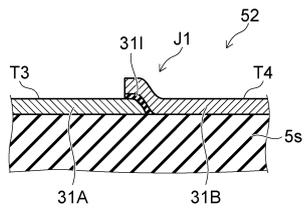
10...第1量子ビット、10C...第1結合用キャパシタンス、10J...ジョセフソン接合、11...第1量子ビット導電体、11C...キャパシタンス、20...第2量子ビット、20C...第2結合用キャパシタンス、20J...ジョセフソン接合、21...第2量子ビット導電体、21C...キャパシタンス、31A...導電膜、31B...導電膜、31I...絶縁膜、50...超伝導素子、51...第1導電部材、51p...第1部分、52...第2導電部材、53...第3導電部材、55a...部材間キャパシタンス、55c...第3端部キャパシタンス、60...供給部、60w...マイクロ波、70...制御部、151...電子回路、251...計算装置、J1...ジョセフソン接合、T1~T4...第1~第4端部

40

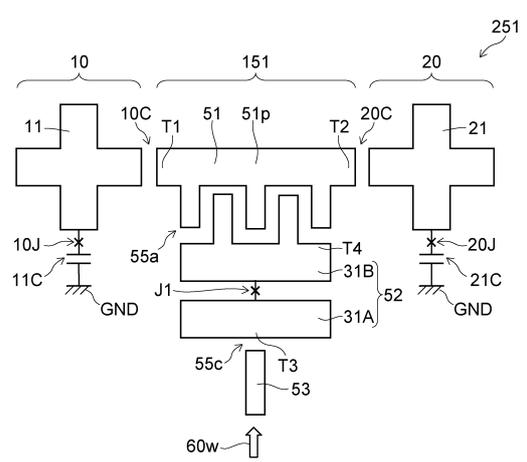
【図1】



【図2】



【図3】



フロントページの続き

- (56)参考文献 国際公開第2017/127205(WO, A1)
特開2007-287933(JP, A)
特表2018-533106(JP, A)
国際公開第2017/222806(WO, A1)
特表2018-516456(JP, A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

H01L	39/22
G06F	7/38
G06N	10/00