

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11) 特許出願公開番号

特開2020-178078

(P2020-178078A)

(43) 公開日 令和2年10月29日(2020.10.29)

(51) Int.Cl. F I テーマコード(参考)  
 HO 1 L 39/22 (2006.01) HO 1 L 39/22 Z A A K 4 M 1 1 3

審査請求 未請求 請求項の数 6 O L (全 13 頁)

(21) 出願番号 特願2019-80292(P2019-80292)  
 (22) 出願日 平成31年4月19日(2019.4.19)

(出願人による申告)平成30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に係る委託研究、産業技術力強化法第19条の適用を受ける特許出願

(71) 出願人 301022471  
 国立研究開発法人情報通信研究機構  
 東京都小金井市貫井北町4-2-1  
 (74) 代理人 110001634  
 特許業務法人 志賀国際特許事務所  
 (72) 発明者 吉原 文樹  
 東京都小金井市貫井北町4-2-1 国立  
 研究開発法人情報通信研究機構内  
 Fターム(参考) 4M113 AC45 AC50 AD03 AD51

(54) 【発明の名称】 可変磁気結合回路、及び回路制御方法

(57) 【要約】

【課題】簡易な構成で、磁束の状態を変化させることなく、結合強度と周波数とを独立して制御する。

【解決手段】可変磁気結合回路は、電流の状態を有する回路要素である被結合対象の間で磁気結合する可変磁気結合回路であって、1つのループ状に循環電流が流れるO字状のループ経路と、O字状のループ経路に配置された第1インダクタ部と、O字状のループ経路に配置され、被結合対象の間の磁気結合強度を変更可能な第1結合強度変更部とを有する第1のループ回路と、経路に交差部分を有し、交差部分の前後で循環電流の向きが逆向きになる超伝導体の8の字状のループ経路と、8の字状のループ経路に配置された第2インダクタ部と、8の字状のループ経路に配置され、被結合対象の間の磁気結合強度を変更可能な第2結合強度変更部とを有する第2のループ回路とを備える。

【選択図】 図1

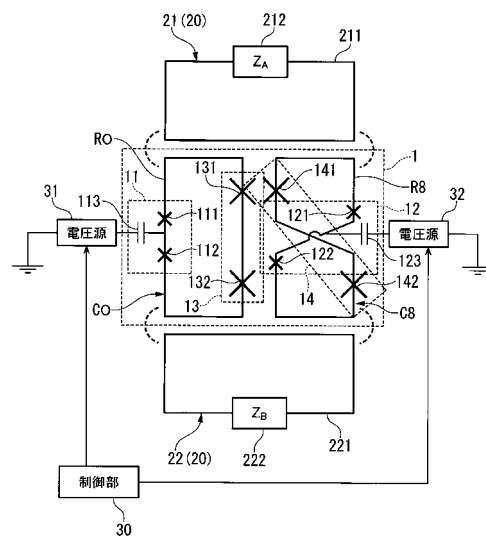


図1

## 【特許請求の範囲】

## 【請求項 1】

電流の状態を有する回路要素である被結合対象の間で磁気結合する可変磁気結合回路であって、

1つのループ状に循環電流が流れる〇字状のループ経路と、前記〇字状のループ経路に配置された第1インダクタ部と、前記〇字状のループ経路に配置され、前記被結合対象の間の磁気結合強度を変更可能な第1結合強度変更部とを有する第1のループ回路と、

経路に交差部分を有し、前記交差部分の前後で循環電流の向きが逆向きになる超伝導体の8の字状のループ経路と、前記8の字状のループ経路に配置された第2インダクタ部と、前記8の字状のループ経路に配置され、前記被結合対象の間の磁気結合強度を変更可能な第2結合強度変更部とを有する第2のループ回路と

を備えることを特徴とする可変磁気結合回路。

## 【請求項 2】

前記8の字状のループ経路は、前記交差部分が3次元的に経路が交差して、前記交差部分において経路が接続されない

ことを特徴とする請求項1に記載の可変磁気結合回路。

## 【請求項 3】

前記8の字状のループ経路は、前記交差部分で経路が接続されている

ことを特徴とする請求項1に記載の可変磁気結合回路。

## 【請求項 4】

前記第1結合強度変更部及び前記第2結合強度変更部のいずれか一方又は両方は、直列接続された少なくとも2つのジョセフソン接合を有し、与えられた電荷に基づいて、前記被結合対象の間の磁気結合強度を変更可能である

ことを特徴とする請求項1又は請求項2に記載の可変磁気結合回路。

## 【請求項 5】

電流の状態を有する回路要素である被結合対象の間で磁気結合する可変磁気結合回路であり、

1つのループ状に循環電流が流れる〇字状のループ経路と、前記〇字状のループ経路に配置された第1インダクタ部と、前記〇字状のループ経路に配置され、前記被結合対象の間の磁気結合強度を変更可能な第1結合強度変更部とを有する第1のループ回路と、

経路に交差部分を有し、前記交差部分の前後で循環電流の向きが逆向きになる超伝導体の8の字状のループ経路と、前記8の字状のループ経路に配置された第2インダクタ部と、前記8の字状のループ経路に配置され、前記被結合対象の間の磁気結合強度を変更可能な第2結合強度変更部とを有する第2のループ回路と

を備える可変磁気結合回路の回路制御方法であって、

前記第1のループ回路及び前記第2のループ回路による前記被結合対象の周波数の変化及び前記磁気結合強度の変化の特性に基づいて、前記周波数が一定になるように、前記第1結合強度変更部及び前記第2結合強度変更部を制御して、前記磁気結合強度を変更することを特徴とする回路制御方法。

## 【請求項 6】

電流の状態を有する回路要素である被結合対象の間で磁気結合する可変磁気結合回路であり、

1つのループ状に循環電流が流れる〇字状のループ経路と、前記〇字状のループ経路に配置された第1インダクタ部と、前記〇字状のループ経路に配置され、前記被結合対象の間の磁気結合強度を変更可能な第1結合強度変更部とを有する第1のループ回路と、

経路に交差部分を有し、前記交差部分の前後で循環電流の向きが逆向きになる超伝導体の8の字状のループ経路と、前記8の字状のループ経路に配置された第2インダクタ部と、前記8の字状のループ経路に配置され、前記被結合対象の間の磁気結合強度を変更可能な第2結合強度変更部とを有する第2のループ回路と

を備える可変磁気結合回路の回路制御方法であって、

10

20

30

40

50

前記第 1 のループ回路及び前記第 2 のループ回路による前記被結合対象の周波数の変化及び前記磁気結合強度の変化の特性に基づいて、前記磁気結合強度が一定になるように、前記第 1 結合強度変更部及び前記第 2 結合強度変更部を制御して、前記周波数を変更することを特徴とする回路制御方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、可変磁気結合回路、及び回路制御方法に関する。

【背景技術】

【0002】

近年、磁束量子ビットなどの回路要素間の可変磁気結合を行う可変磁気結合回路が知られている（例えば、非特許文献 1 を参照）。このような従来の可変磁気結合回路では、可変磁気結合の結合強度を制御することが可能である。

【先行技術文献】

【非特許文献】

【0003】

【非特許文献 1】A. O. Niskanen et al., “Quantum Coherent Tunable Coupling of Superconducting Qubits” Science 316, 723 (2007)

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0004】

しかしながら、上述した従来の可変磁気結合回路では、例えば、磁束量子ビットなどの回路要素間の結合強度を制御する結合強度変調を行う場合に、結合強度変調に伴って、被結合対象の回路要素の周波数、及び磁束の状態のいずれか又は両方が変化してしまい、結合強度と周波数とを独立して制御することが困難であった。また、従来の可変磁気結合回路では、周波数、及び磁束の状態のいずれか又は両方の変化を補償するために、追加の構成を備える必要があった。

【0005】

本発明は、上記問題を解決すべくなされたもので、その目的は、簡易な構成で、磁束の状態を変化させることなく、結合強度と周波数とを独立して制御することができる可変磁気結合回路、及び回路制御方法を提供することにある。

【課題を解決するための手段】

【0006】

上記問題を解決するために、本発明の一態様は、電流の状態を有する回路要素である被結合対象の間で磁気結合する可変磁気結合回路であって、1つのループ状に循環電流が流れる 0 字状のループ経路と、前記 0 字状のループ経路に配置された第 1 インダクタ部と、前記 0 字状のループ経路に配置され、前記被結合対象の間の磁気結合強度を変更可能な第 1 結合強度変更部とを有する第 1 のループ回路と、経路に交差部分を有し、前記交差部分の前後で循環電流の向きが逆向きになる超伝導体の 8 の字状のループ経路と、前記 8 の字状のループ経路に配置された第 2 インダクタ部と、前記 8 の字状のループ経路に配置され、前記被結合対象の間の磁気結合強度を変更可能な第 2 結合強度変更部とを有する第 2 のループ回路とを備えることを特徴とする可変磁気結合回路である。

【0007】

また、本発明の一態様は、電流の状態を有する回路要素である被結合対象の間で磁気結合する可変磁気結合回路であり、1つのループ状に循環電流が流れる 0 字状のループ経路と、前記 0 字状のループ経路に配置された第 1 インダクタ部と、前記 0 字状のループ経路に配置され、前記被結合対象の間の磁気結合強度を変更可能な第 1 結合強度変更部とを有する第 1 のループ回路と、経路に交差部分を有し、前記交差部分の前後で循環電流の向きが逆向きになる超伝導体の 8 の字状のループ経路と、前記 8 の字状のループ経路に配置された第 2 インダクタ部と、前記 8 の字状のループ経路に配置され、前記被結合対象の間の

10

20

30

40

50

磁気結合強度を変更可能な第2結合強度変更部とを有する第2のループ回路とを備える可変磁気結合回路の回路制御方法であって、前記第1のループ回路及び前記第2のループ回路による前記被結合対象の周波数の変化及び前記磁気結合強度の変化の特性に基づいて、前記周波数が一定になるように、前記第1結合強度変更部及び前記第2結合強度変更部を制御して、前記磁気結合強度を変更することを特徴とする回路制御方法である。

【0008】

また、本発明の一態様は、電流の状態を有する回路要素である被結合対象の間で磁気結合する可変磁気結合回路であり、1つのループ状に循環電流が流れる0字状のループ経路と、前記0字状のループ経路に配置された第1インダクタ部と、前記0字状のループ経路に配置され、前記被結合対象の間の磁気結合強度を変更可能な第1結合強度変更部とを有する第1のループ回路と、経路に交差部分を有し、前記交差部分の前後で循環電流の向きが逆向きになる超伝導体の8の字状のループ経路と、前記8の字状のループ経路に配置された第2インダクタ部と、前記8の字状のループ経路に配置され、前記被結合対象の間の磁気結合強度を変更可能な第2結合強度変更部とを有する第2のループ回路とを備える可変磁気結合回路の回路制御方法であって、前記第1のループ回路及び前記第2のループ回路による前記被結合対象の周波数の変化及び前記磁気結合強度の変化の特性に基づいて、前記磁気結合強度が一定になるように、前記第1結合強度変更部及び前記第2結合強度変更部を制御して、前記周波数を変更することを特徴とする回路制御方法である。

10

【発明の効果】

【0009】

本発明によれば、簡易な構成で、磁束の状態を変化させることなく、結合強度と周波数とを独立して制御することができる。

20

【図面の簡単な説明】

【0010】

【図1】第1の実施形態による可変磁気結合回路の一例を示すブロック図である。

【図2】第1の実施形態による可変磁気結合回路の第1の制御モードの動作原理を説明する図である。

【図3】第1の実施形態による可変磁気結合回路の第1の制御モードの動作例を説明する図である。

【図4】第1の実施形態による可変磁気結合回路の第2の制御モードの動作原理を説明する図である。

30

【図5】第2の実施形態による可変磁気結合回路の一例を示すブロック図である。

【発明を実施するための形態】

【0011】

以下、本発明の実施形態による可変磁気結合回路、及び回路制御方法について、図面を参照して説明する。

【0012】

[第1の実施形態]

図1は、第1の実施形態による可変磁気結合回路1の一例を示すブロック図である。

図1に示すように、可変磁気結合回路1は、ループ回路C0と、ループ回路C8とを備える。

40

【0013】

可変磁気結合回路1は、電流の状態を有する回路要素である被結合対象(21、22)の間で磁気結合する超伝導量子回路である。可変磁気結合回路1は、例えば、被結合対象21と、被結合対象22との間に配置され、被結合対象21と被結合対象22との間の磁気結合を制御する。

なお、本実施形態において、被結合対象21と被結合対象22とは、特に区別しない場合には、被結合対象20として説明する。

【0014】

被結合対象20は、電流の状態を有する回路要素であり、例えば、超伝導体のループ経

50

路と、インピーダンス部とを備える超伝導量子回路である。被結合対象 20 は、例えば、磁束量子ビット、超伝導共振回路、等である。なお、超伝導量子回路には、抵抗成分は含まれない。

図 1 において、被結合対象 21 (第 1 の被結合対象の一例) は、超伝導量子回路であり、例えば、量子ビット回路である。被結合対象 21 は、ループ経路 211 と、インピーダンス部 212 とを備える。

#### 【0015】

ループ経路 211 は、超伝導体で構成されたループ状の経路である。また、インピーダンス部 212 は、インピーダンス  $Z_A$  を有する。

また、被結合対象 21 は、ループ経路 211 に電流  $I_A$  が流れている状態であるものとする。

また、被結合対象 22 (第 2 の被結合対象の一例) は、超伝導量子回路であり、例えば、量子ビット回路である。被結合対象 22 は、ループ経路 221 と、インピーダンス部 222 とを備える。

ループ経路 221 は、超伝導体で構成されたループ状の経路である。また、インピーダンス部 222 は、インピーダンス  $Z_B$  を有する。

また、被結合対象 22 は、ループ経路 221 に電流  $I_B$  が流れている状態であるものとする。

#### 【0016】

ループ回路 C0 (第 1 のループ回路の一例) は、例えば、電荷バイアスにより磁気結合強度を制御する電荷制御磁束量子ビットである。なお、本実施形態の説明において、電荷を与えることを、電荷バイアスと表記することがある。ループ回路 C0 は、ループ経路 R0 と、インダクタ部 13 と、結合強度変更部 11 とを備える。

ループ経路 R0 は、超伝導体で構成された経路であり、ループ状に電流が流れる超伝導体の配線である。ループ経路 R0 は、1 つのループ状に循環電流が流れる O 字状の経路である。ループ経路 R0 の経路上には、後述する結合強度変更部 11 と、インダクタ部 13 とが配置されている。

#### 【0017】

インダクタ部 13 (第 1 インダクタ部の一例) は、ループ経路 R0 に配置されたインダクタであり、ジョセフソン接合 131 及びジョセフソン接合 132 を有している。すなわち、インダクタ部 13 は、ループ経路 R0 上に配置された 1 つ以上のジョセフソン接合 (例えば、2 つのジョセフソン接合 131 及びジョセフソン接合 132) を備える。

ジョセフソン接合 131 及びジョセフソン接合 132 は、ループ経路 R0 上に流れる電流が自身の臨界電流よりも十分に小さい場合に、インダクタとして機能する。なお、ジョセフソン接合 131 及びジョセフソン接合 132 は、後述するジョセフソン接合 111 及びジョセフソン接合 112 よりも臨界電流が大きく設定されている。

#### 【0018】

結合強度変更部 11 (第 1 結合強度変更部の一例) は、ループ経路 R0 上に配置され、直列接続された少なくとも 2 つのジョセフソン接合 (111, 112) を有し、与えられた電荷に基づいて、被結合対象 20 の間の磁気結合強度を変更する。結合強度変更部 11 は、例えば、電圧源 31 から電圧を印加することで、ジョセフソン接合 (111, 112) の間の超伝導体に電荷を与えて、アハロノフ・キャッシャー効果 (Aharonov Casher 効果) によって、ループ回路 C0 の周波数  $\omega$  を変更し、周波数  $\omega$  を変化させることで被結合対象 21 と被結合対象 22 との間の磁気結合強度を変更する。このように、結合強度変更部 11 は、2 つの被結合対象 20 の間の磁気結合強度を変更可能である。なお、以下の説明において、磁気結合強度を結合強度と表記することがある。

#### 【0019】

結合強度変更部 11 は、電圧源 31 からの電圧に基づく電荷バイアスを変更することで、被結合対象 20 の磁気結合強度を変更可能である。

また、結合強度変更部 11 は、ジョセフソン接合 111 と、ジョセフソン接合 112 と

10

20

30

40

50

、コンデンサ 113 とを備える。

【0020】

ジョセフソン接合 111 及びジョセフソン接合 112 は、ループ経路 R0 上に、例えば、直列に接続され、ループ経路 R0 上の超伝導体の間に、絶縁体などのトンネル障壁により弱結合を設けることで形成される。

コンデンサ 113 は、第 1 端がジョセフソン接合 111 と、ジョセフソン接合 112 との間の超伝導体（ループ経路 R0）に接続され、第 2 端が電圧源 31 に接続されている。コンデンサ 113 は、電圧源 31 から印加された電圧によって、ジョセフソン接合 111 とジョセフソン接合 112 との間の超伝導体に電荷バイアスを与えるために利用される。

【0021】

電圧源 31 は、例えば、電池などの直流電源であり、結合強度変更部 11 に電荷バイアスを印加するために、結合強度変更部 11 のコンデンサ 113 に電圧を供給する。電圧源 31 は、結合強度変更部 11 に供給する電圧を変更可能に構成されており、後述する制御部 30 の制御に基づいて、供給する電圧を変更することにより、周波数  $\omega$  を変化させ、2 つの被結合対象 20 の間の磁気結合強度を制御可能である。

【0022】

ループ回路 C8（第 2 のループ回路の一例）は、例えば、電荷バイアスにより磁気結合強度を制御する電荷制御磁束量子ビットである。ループ回路 C8 は、ループ経路 R8 と、インダクタ部 14 と、結合強度変更部 12 とを備える。

ループ経路 R8 は、超伝導体で構成された経路であり、ループ状に電流が流れる超伝導体の配線である。ループ経路 R8 は、経路に交差部分を有し、交差部分の前後で循環電流の向きが逆向きになる超伝導体の 8 の字状の経路である。ループ経路 R8 は、交差部分が 3 次元的に経路が交差（立体交差）して、交差部分において経路が接続されない。ループ経路 R8 の経路上には、後述する結合強度変更部 12 と、インダクタ部 14 とが配置されている。

【0023】

インダクタ部 14（第 2 インダクタ部の一例）は、ループ経路 R8 に配置されたインダクタであり、ジョセフソン接合 141 及びジョセフソン接合 142 を有している。すなわち、インダクタ部 14 は、ループ経路 R8 上に配置された 1 つ以上のジョセフソン接合（例えば、2 つのジョセフソン接合 141 及びジョセフソン接合 142）を備える。

ジョセフソン接合 141 及びジョセフソン接合 142 は、上述したループ回路 C0 のジョセフソン接合 111 及びジョセフソン接合 112 と同様の構成である。

【0024】

結合強度変更部 12（第 2 結合強度変更部の一例）は、ループ経路 R8 上に配置され、直列接続された少なくとも 2 つのジョセフソン接合（121, 122）を有し、与えられた電荷に基づいて、ループ回路 C8 の周波数  $\omega$  を変更し、周波数  $\omega$  を変化させることで被結合対象 20 の間の磁気結合強度を変更する。なお、結合強度変更部 12 は、上述したループ回路 C0 の結合強度変更部 11 と同様の構成である。

なお、結合強度変更部 11 及び結合強度変更部 12 の電荷バイアスによる被結合対象 20 の磁気結合強度の変更原理及び動作の詳細については、特願 2018-076790 号公報に記載されている。

【0025】

また、結合強度変更部 12 は、ジョセフソン接合 121 と、ジョセフソン接合 122 と、コンデンサ 123 とを備える。ジョセフソン接合 121、ジョセフソン接合 122、及びコンデンサ 123 は、上述した結合強度変更部 11 のジョセフソン接合 111、ジョセフソン接合 112、及びコンデンサ 113 と同様の構成である。なお、コンデンサ 123 は、電圧源 32 から印加された電圧によって、ジョセフソン接合 121 と、ジョセフソン接合 122 との間の超伝導体に電荷バイアスを与えるために利用される。

【0026】

電圧源 32 は、例えば、電池などの直流電源であり、結合強度変更部 12 に電荷バイア

10

20

30

40

50

スを印加するために、結合強度変更部 1 2 のコンデンサ 1 2 3 に電圧を供給する。電圧源 3 2 は、結合強度変更部 1 2 に供給する電圧を変更可能に構成されており、後述する制御部 3 0 の制御に基づいて、供給する電圧を変更することにより、周波数  $\omega_8$  を変化させ、2 つの被結合対象 2 0 の間の磁気結合強度を制御可能である。

制御部 3 0 は、例えば、CPU (Central Processing Unit) などを含むプロセッサであり、電圧源 3 1 及び電圧源 3 2 を制御して、可変磁気結合回路 1 の制御を行う。制御部 3 0 は、例えば、被結合対象 2 0 の周波数を変更させずに、磁気結合強度を変更する第 1 の制御モードの制御と、例えば、被結合対象 2 0 の磁気結合強度を変更させずに、被結合対象 2 0 の周波数を変更する第 2 の制御モードの制御とを行う。

【 0 0 2 7 】

制御部 3 0 は、例えば、電荷バイアスによるループ回路 C 0 の周波数  $\omega_0$  及びループ回路 C 8 の周波数  $\omega_8$  の変化特性を取得した上で、ループ回路 C 0 及びループ回路 C 8 による被結合対象 2 0 の周波数の変化及び磁気結合強度の変化の特性を予め生成された特性情報として取得する。制御部 3 0 は、例えば、第 1 の制御モードの場合に、当該特性情報に基づいて、ループ回路 C 0 及びループ回路 C 8 による被結合対象 2 0 の周波数の変化が一定になるように、結合強度変更部 1 1 及び結合強度変更部 1 2 を制御して、磁気結合強度を変更する。

また、制御部 3 0 は、例えば、第 2 の制御モードの場合に、当該特性情報に基づいて、ループ回路 C 0 及びループ回路 C 8 による磁気結合強度の変化が一定になるように、結合強度変更部 1 1 及び結合強度変更部 1 2 を制御して、被結合対象 2 0 の周波数を変更する。

【 0 0 2 8 】

次に、図面を参照して、本実施形態による可変磁気結合回路 1 の動作原理、及び動作の詳細について説明する。

図 1 に示す被結合対象 ( 2 1 , 2 2 ) 及び可変磁気結合回路 1 の全回路のハミルトニアン  $H_{total}$  は、下記の式 ( 1 ) により表される。

【 0 0 2 9 】

【 数 1 】

$$\left. \begin{aligned} \hat{H}_{total}/\hbar &= \sum_{i=A',B',0,8} \left( -\frac{\Delta_i}{2} \hat{\sigma}_{zi} \right) + \sum_{(i,j)=(A',0),(A',8),(B',0),(B',8)} g_{ij} \hat{\sigma}_{xi} \hat{\sigma}_{xj} \\ \hat{\sigma}_x &= \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}, \quad \hat{\sigma}_z = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \end{aligned} \right\} \cdots (1)$$

【 0 0 3 0 】

ここで、 $i$  は、 $i = "A' "$  (被結合対象 2 1) ,  $"B' "$  (被結合対象 2 2) ,  $"0 "$  (ループ回路 C 0) ,  $"8 "$  (ループ回路 C 8) の各量子ビットの周波数を示している。また、 $g_{ij}$  は、量子ビット  $ij$  間の結合強度を示している。

【 0 0 3 1 】

また、被結合対象 ( 2 1 , 2 2 ) の結合に注目した実質的なハミルトニアン  $H_{AB}$  は、以下の式 ( 2 ) により表される。

【 0 0 3 2 】

【 数 2 】

$$\hat{H}_{AB}/\hbar = \sum_{i=A,B} \left( -\frac{\Delta_i}{2} \hat{\sigma}_{zi} \right) + g_{AB} \hat{\sigma}_{xA} \hat{\sigma}_{xB} \cdots (2)$$

【 0 0 3 3 】

上述した式 ( 1 ) において、ハミルトニアン  $H_{total}$  の結合強度  $g_{ij}$  を固定して、ループ回路 C 0 の周波数  $\omega_0$  及びループ回路 C 8 の周波数  $\omega_8$  を変更した場合の被結合対象 ( 2 1 , 2 2 ) に着目した実質的なハミルトニアン  $H_{AB}$  のパラメータ変化をグラフ

10

20

30

40

50

にしたものが、図 2 に示すグラフになる。

【 0 0 3 4 】

図 2 は、本実施形態による可変磁気結合回路 1 の第 1 の制御モードの動作原理を説明する図である。

図 2 ( a ) に示すグラフは、ループ回路 C 0 の周波数  $f_0$  及びループ回路 C 8 の周波数  $f_8$  を変更した場合の被結合対象 ( 2 1 , 2 2 ) 間の結合強度の変化を示している。図 ( a ) に示すグラフ内の数値は、結合強度 ( G H z ( ギガヘルツ ) ) の値を示している。

【 0 0 3 5 】

また、図 2 ( b ) に示すグラフは、ループ回路 C 0 の周波数  $f_0$  及びループ回路 C 8 の周波数  $f_8$  を変更した場合の被結合対象 ( 2 1 , 2 2 ) の周波数 (  $f_A = f_B$  ) の変化を示している。図 2 ( b ) に示すグラフ内の数値は、周波数 (  $f_A = f_B$  ) の値を示している。

10

第 1 の制御モードでは、図 2 ( b ) において、周波数 (  $f_A = f_B$  ) が一定になるように、周波数  $f_0$  及び周波数  $f_8$  を変更することで、被結合対象 ( 2 1 , 2 2 ) の周波数 (  $f_A = f_B$  ) を変更させずに、被結合対象 ( 2 1 , 2 2 ) 間の結合強度を変更することが可能である。

例えば、図 2 ( b ) において、周波数 (  $f_A = f_B$  ) が “ 4 . 5 ” ( G H z ) になる制御線 S 1 に沿って、周波数  $f_0$  及び周波数  $f_8$  を変化させると、図 2 ( a ) の制御線 S 1 に示すように、被結合対象 ( 2 1 , 2 2 ) 間の結合強度を “ - 0 . 4 ” ( G H z ) から “ 0 . 4 ” ( G H z ) に変更することが可能である。

20

【 0 0 3 6 】

このように、図 2 に示すような、ループ回路 C 0 及びループ回路 C 8 による被結合対象 2 0 の周波数の変化及び磁気結合強度の変化の特性を特性情報として予め測定又は演算により生成しておき、制御部 3 0 が、当該特性情報に基づいて、ループ回路 C 0 及びループ回路 C 8 による周波数  $f_A$  ( 周波数  $f_B$  ) の変化が一定になるように、結合強度変更部 1 1 及び結合強度変更部 1 2 を制御することで、第 1 の制御モードの制御を実現する。

【 0 0 3 7 】

また、図 3 は、本実施形態による可変磁気結合回路 1 の第 1 の制御モードの動作例を説明する図である。

図 3 ( a ) は、ループ回路 ( C 0 , C 8 ) の周波数変化 (  $f_0$  又は  $f_8$  の変化 ) に対する被結合対象 2 0 間の結合強度の変化を示している。図 3 ( a ) において、波形 W 1 は、ループ回路 C 0 のみを備える場合の結合強度の特性を示し、波形 W 2 は、ループ回路 C 8 のみを備える場合の結合強度の特性を示している。波形 W 1 及び波形 W 2 は、結合強度の極性が逆の特性となっており、本実施形態の可変磁気結合回路 1 では、ループ回路 C 0 とループ回路 C 8 とを組み合わせ、(  $f_0 + f_8$  ) が一定 ( = 4 0 G H z × 2 ) になるように周波数 (  $f_0$  及び  $f_8$  ) を変化させることで、波形 W 3 に示すような結合強度の特性を得る。なお、波形 W 3 についての横軸は、(  $f_0 / 2$  ) が横軸の値、(  $f_8 / 2$  ) が ( 4 0 - 横軸の値 ) を示している。

30

【 0 0 3 8 】

また、図 3 ( b ) は、ループ回路 ( C 0 , C 8 ) の周波数変化 (  $f_0$  又は  $f_8$  の変化 ) に対する被結合対象 2 0 の周波数 (  $f_A = f_B$  ) の変化を示している。図 3 ( b ) において、波形 W 4 は、ループ回路 C 0 のみを備える場合の周波数 (  $f_A = f_B$  ) の特性を示し、波形 W 5 は、ループ回路 C 8 のみを備える場合の周波数 (  $f_A = f_B$  ) の特性を示している。本実施形態の可変磁気結合回路 1 では、ループ回路 C 0 とループ回路 C 8 とを組み合わせ、(  $f_0 + f_8$  ) が一定 ( = 4 0 G H z × 2 ) になるように周波数 (  $f_0$  及び  $f_8$  ) を変化させることで、波形 W 6 に示すような周波数 (  $f_A = f_B$  ) の特性を得る。なお、波形 W 6 についての横軸は、上述した図 3 ( a ) の波形 W 3 と同様である。

40

【 0 0 3 9 】

制御部 3 0 は、図 3 ( b ) において、周波数 (  $f_A = f_B$  ) が一定になるように周波数 (  $f_0$  及び  $f_8$  ) を範囲 R 1 の間で変化させることで、図 3 ( a ) に示す範囲 R 2 の間で

50



、結合強度を変更可能である。

【0040】

図4は、本実施形態による可変磁気結合回路1の第2の制御モードの動作原理を説明する図である。

図4(a)及び図4(b)に示すグラフは、上述した図2(a)及び図2(b)に示すグラフと同様であるためここではその説明を省略する。

第2の制御モードでは、図4(a)において、結合強度が一定になるように、周波数 $f_0$ 及び周波数 $f_8$ を変更することで、被結合対象(21, 22)間の結合強度を変更せずに、被結合対象(21, 22)の周波数( $f_A = f_B$ )を変更することが可能である。

【0041】

例えば、図4(a)において、被結合対象(21, 22)間の結合強度が“0.0”(GHz)になる制御線S2に沿って、周波数 $f_0$ 及び周波数 $f_8$ を変化させると、図4(b)の制御線S2に示すように、周波数( $f_A = f_B$ )を“約4.6”(GHz)から“4.0”(GHz)に変更することが可能である。ここで、結合強度が“0.0”(GHz)の場合、例えば、周波数 $f_0$ と周波数 $f_8$ とを等しく変化させる( $f_0 = f_8$ )。

【0042】

このように、図4に示すような、ループ回路C0及びループ回路C8による被結合対象20の周波数の変化及び磁気結合強度の変化の特性を特性情報として予め測定又は演算により生成しておき、制御部30が、当該特性情報に基づいて、ループ回路C0及びループ回路C8による磁気結合強度の変化が一定になるように、結合強度変更部11及び結合強度変更部12を制御することで、第2の制御モードの制御を実現する。

【0043】

以上説明したように、本実施形態による可変磁気結合回路1は、電流の状態を有する回路要素である被結合対象20の間で磁気結合する可変磁気結合回路であって、ループ回路C0(第1のループ回路)と、ループ回路C8(第2のループ回路)とを備える。ループ回路C0は、1つのループ状に循環電流が流れるO字状のループ経路R0と、O字状のループ経路R0に配置されたインダクタ部13(第1インダクタ部)と、O字状のループ経路R0に配置され、被結合対象20の間の磁気結合強度を変更可能な結合強度変更部11(第1結合強度変更部)とを有する。ループ回路C8は、経路に交差部分を有し、交差部分の前後で循環電流の向きが逆向きになる超伝導体の8の字状のループ経路R8と、8の字状のループ経路R8に配置されたインダクタ部14(第2インダクタ部)と、8の字状のループ経路R8に配置され、被結合対象20の間の磁気結合強度を変更可能な結合強度変更部12(第2結合強度変更部)とを有する。また、本実施形態では、8の字状のループ経路R8は、交差部分が3次元的に経路が交差して、交差部分において経路が接続されない。

【0044】

これにより、本実施形態による可変磁気結合回路1は、ループ回路C0と、ループ回路C8とを組み合わせることで、例えば、図2及び図4に示すように、結合強度と周波数とを独立して制御することができる。また、本実施形態による可変磁気結合回路1は、周波数の変化を補償するための追加の構成を必要としない。よって、本実施形態による可変磁気結合回路1は、簡易な構成で、結合強度と周波数とを独立して制御することができる。

本実施形態による可変磁気結合回路1では、例えば、被結合対象20の間で磁気結合を変更する際に、周波数の変化を完全になくすことができる。

【0045】

また、本実施形態では、結合強度変更部11及び結合強度変更部12のいずれか一方又は両方は、直列接続された少なくとも2つのジョセフソン接合を有し、与えられた電荷に基づいて、被結合対象20の間の磁気結合強度を変更可能である。

これにより、本実施形態による可変磁気結合回路1は、被結合対象20の間のゼロ結合を容易に実現するとともに、制御における磁束バイアス同士の混線を低減することができる。

10

20

30

40

50

## 【 0 0 4 6 】

また、本実施形態では、磁気結合される2つの被結合対象20のうち少なくとも1つは、超伝導量子回路である。例えば、磁気結合される2つの被結合対象20は、いずれも磁束量子ビット（磁束量子ビット回路）であってもよい。また、2つの被結合対象20のうち少なくとも1つは、磁束量子ビット又は超伝導共振回路であってもよい。例えば、磁気結合される2つの被結合対象20は、磁束量子ビットと超伝導共振回路とであってもよい。

これにより、本実施形態による可変磁気結合回路1は、例えば、磁束量子ビットなどの超伝導量子回路の間の磁気結合を適切に制御することができる。

## 【 0 0 4 7 】

なお、本実施形態による可変磁気結合回路1では、様々な超伝導量子回路の間の磁気結合に利用することができる。本実施形態による可変磁気結合回路1は、例えば、超伝導量子アニーリングマシンや超伝導量子コンピュータにおいて、磁束量子ビット同士の変換磁気結合に容易に利用することができる。この場合、超伝導量子アニーリングマシンや超伝導量子コンピュータは、可変磁気結合回路1と同様の効果を奏し、回路構成や演算操作を簡略化できるとともに、混線の低減及び演算操作速度の向上が期待できる。また、本実施形態による可変磁気結合回路1は、従来の単一のループ回路を持つ磁束バイアス制御の可変磁気結合回路1との互換性を有しているため、量子コンピュータの一部の可変磁気結合回路を、本実施形態による可変磁気結合回路1に置き換えることも可能である。

10

20

## 【 0 0 4 8 】

また、本実施形態による回路制御方法は、上述した可変磁気結合回路1の回路制御方法であって、制御部30が、ループ回路C0及びループ回路C8による被結合対象20の周波数の変化及び磁気結合強度の変化の特性に基づいて、ループ回路C0及びループ回路C8による被結合対象20の周波数の変化が一定になるように、結合強度変更部11及び結合強度変更部12を制御して、磁気結合強度を変更する。

これにより、本実施形態による回路制御方法は、被結合対象20の周波数を変化させずに、磁気結合強度を独立に変更することができる（第1の制御モード）。

## 【 0 0 4 9 】

また、本実施形態による回路制御方法は、上述した可変磁気結合回路1の回路制御方法であって、制御部30が、ループ回路C0及びループ回路C8による被結合対象20の周波数の変化及び磁気結合強度の変化の特性に基づいて、ループ回路C0及びループ回路C8による磁気結合強度の変化が一定になるように、結合強度変更部11及び結合強度変更部12を制御して、被結合対象20の周波数を変更する。

30

これにより、本実施形態による回路制御方法は、磁気結合強度を変化させずに、被結合対象20の周波数を独立に変更することができる（第2の制御モード）。

## 【 0 0 5 0 】

## [ 第2の実施形態 ]

次に、図5を参照して第2の実施形態による可変磁気結合回路1aについて説明する。

図5は、本実施形態による可変磁気結合回路1aの一例を示すブロック図である。

40

図5に示すように、可変磁気結合回路1aは、ループ回路C0aと、ループ回路C8aとを備える。本実施形態では、磁束制御（磁束バイアスによる制御）に変更した上で、第1の実施形態のループ回路C8の代わりに、ループ経路R8の形状が異なるループ回路C8aを備える変形例について説明する。本実施形態のループ回路C0a及びループ回路C8aは、例えば、磁束バイアスにより磁気結合強度を制御する磁束制御磁束量子ビットである。

なお、図5において、図1と同一の構成には同一の符号を付与して、その説明を省略する。

## 【 0 0 5 1 】

ループ回路C0aは、ループ経路R0と、インダクタ部13と、結合強度変更部11a

50

とを備える。結合強度変更部 11a は、磁束バイアスに基づいて、ループ回路 C0a の周波数  $\omega$  を変化させることで、被結合対象 20 の間の磁気結合強度を変更する。

結合強度変更部 11a のジョセフソン接合 111 及びジョセフソン接合 112 は、ループ経路 R0 に並列に接続されている。

#### 【0052】

ループ回路 C8a (第2のループ回路の一例) は、ループ経路 R8a と、インダクタ部 14 と、結合強度変更部 12a とを備える。

ループ経路 R8a は、8の字状の経路であるが、ここでの8の字状のループ経路 R8a は、交差部分で経路が接続されているデジタル文字の8の字状になっている。ループ経路 R8a が、交差部分で接続されている場合、ループ回路 C8a は、上下のループで循環電流が逆向きに流れる磁場勾配計型の磁束量子ビットになる。なお、インダクタ部 14 のジョセフソン接合 141 及びジョセフソン接合 142 は、ループ経路 R8a の交差部分に配置されている。

結合強度変更部 12a は、磁束バイアスに基づいて、ループ回路 C8a の周波数  $\omega$  を変化させることで、被結合対象 20 の間の磁気結合強度を変更する。

また、結合強度変更部 12a のジョセフソン接合 121 及びジョセフソン接合 122 は、8の字状の経路の上下のループに1つずつ配置されている。

#### 【0053】

また、本実施形態による制御部 30a は、磁束バイアスにより、結合強度変更部 11a 及び結合強度変更部 12a を制御する点を除いて、上述した第1の実施形態の制御部 30 と同様である。

本実施形態による可変磁気結合回路 1a のその他の構成については、第1の実施形態と同様であるため、ここではその説明を省略する。

また、本実施形態による可変磁気結合回路 1a の動作、及び回路制御方法については、第1の実施形態と同様であるため、ここではその説明を省略する。

#### 【0054】

以上説明したように、本実施形態による可変磁気結合回路 1a は、ループ回路 C0 と、ループ回路 C8a とを備える。また、ループ回路 C8a は、8の字状のループ経路 R8a と、インダクタ部 14 と、結合強度変更部 12 とを備え、8の字状のループ経路 R8 は、交差部分で経路が接続されている。

これにより、本実施形態による可変磁気結合回路 1a は、上述した第1の実施形態と同様の効果を奏し、簡易な構成で、結合強度と周波数とを独立して制御することができる。

#### 【0055】

なお、本発明は、上記の各実施形態に限定されるものではなく、本発明の趣旨を逸脱しない範囲で変更可能である。

例えば、上記の第1の実施形態において、結合強度変更部 11 及び結合強度変更部 12 は、電荷バイアスに基づいて磁気結合強度を変更する例を説明したが、これに限定されるものではなく、第2の実施形態のように、磁束制御(磁束バイアス)に基づいて、磁気結合強度を変更するにしてもよいし、他の方式を利用したものでもよい。

また、上記の各実施形態において、インダクタ部 13 及びインダクタ部 14 は、2つのジョセフソン接合を備える例を説明したが、これに限定されるものではなく、1つ又は3つ以上のジョセフソン接合を備えるようにしてもよい。また、インダクタ部 13 及びインダクタ部 14 は、ジョセフソン接合の代わりに、同程度のインダクタンスを持つインダクタを用いるようにしてもよい。

#### 【符号の説明】

#### 【0056】

1, 1a 可変磁気結合回路、11, 11a, 12, 12a 結合強度変更部、13, 14 インダクタ部、20, 21, 22 被結合対象、30, 30a 制御部、31, 32 電圧源、111, 112, 121, 122, 131, 132, 141, 142 ジョセフソン接合、211, 221, R0, R8, R8a ループ経路、212, 222 イ

10

20

30

40

50

ンピーダンス部、CO, COa, C8, C8a ループ回路

【図1】

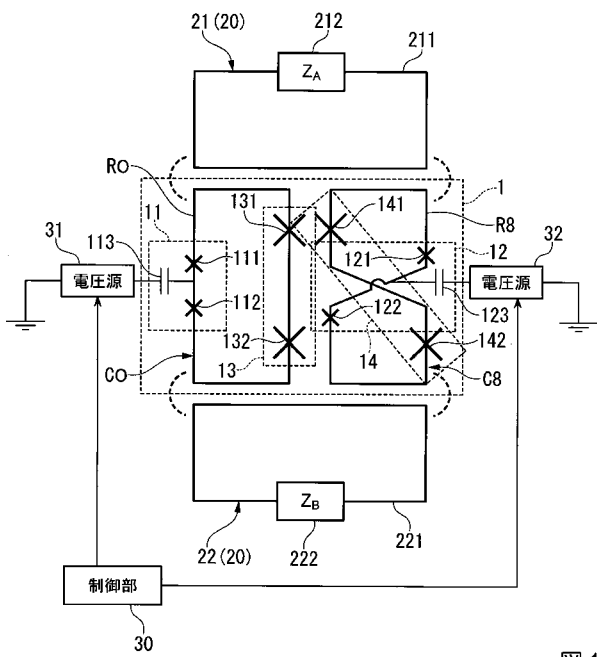


図1

【図2】

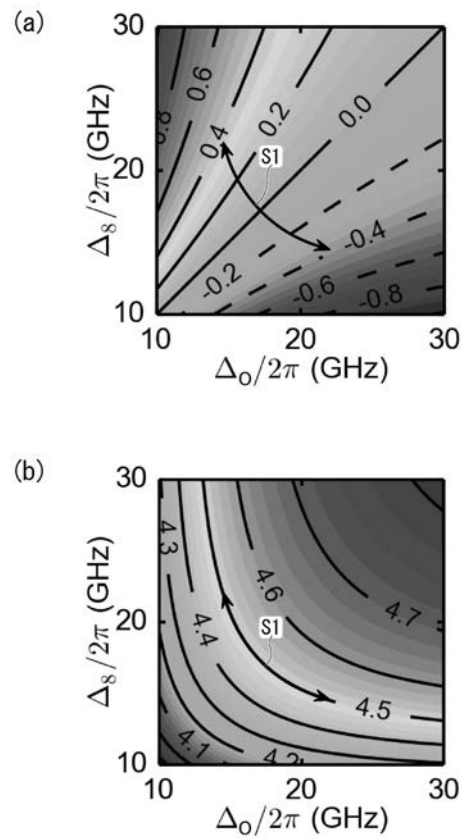


図2

【 図 3 】

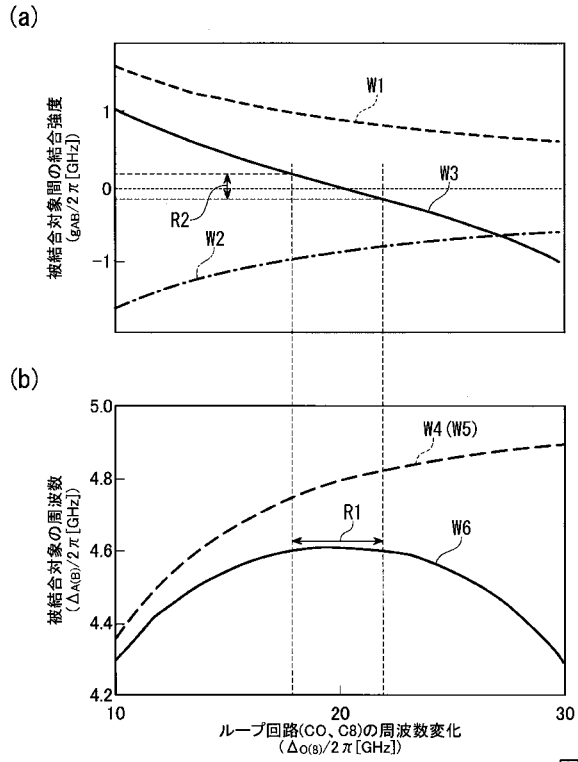


図 3

【 図 4 】

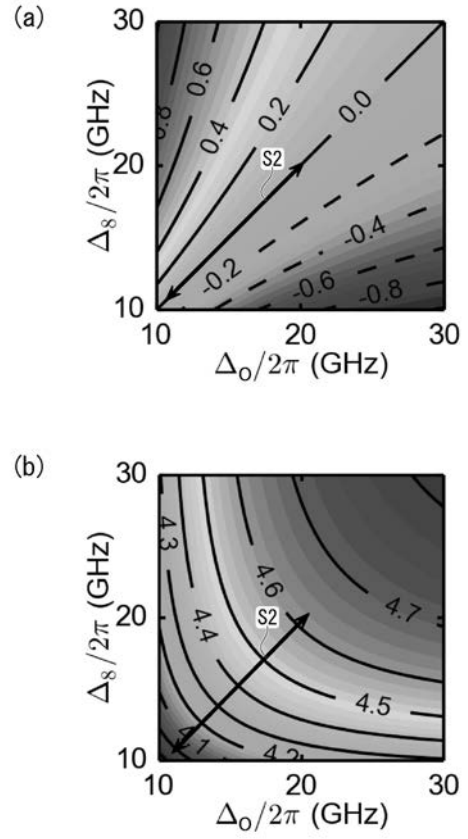


図 4

【 図 5 】

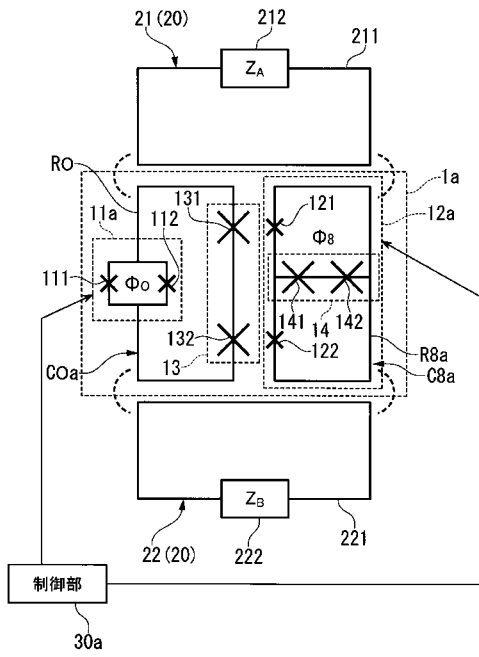


図 5