

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第6498752号
(P6498752)

(45) 発行日 平成31年4月10日(2019.4.10)

(24) 登録日 平成31年3月22日(2019.3.22)

(51) Int.Cl.	F I
H03H 7/20 (2006.01)	H03H 7/20 Z
H01L 39/22 (2006.01)	H01L 39/22 K

請求項の数 15 (全 14 頁)

(21) 出願番号	特願2017-511898 (P2017-511898)	(73) 特許権者	503178185
(86) (22) 出願日	平成27年8月24日 (2015.8.24)		ノースロップ グラマン システムズ コーポレーション
(65) 公表番号	特表2017-532841 (P2017-532841A)		NORTHROP GRUMMAN SYSTEMS CORPORATION
(43) 公表日	平成29年11月2日 (2017.11.2)		アメリカ合衆国 22042-4511
(86) 国際出願番号	PCT/US2015/046569		バージニア州 フォールズ チャーチ フェアビュー パーク ドライブ 2980
(87) 国際公開番号	W02016/076935	(74) 代理人	100105957
(87) 国際公開日	平成28年5月19日 (2016.5.19)		弁理士 恩田 誠
審査請求日	平成29年2月28日 (2017.2.28)	(74) 代理人	100068755
(31) 優先権主張番号	14/490,171		弁理士 恩田 博宣
(32) 優先日	平成26年9月18日 (2014.9.18)	(74) 代理人	100142907
(33) 優先権主張国	米国 (US)		弁理士 本田 淳

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 超伝導位相シフトシステム

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

位相制御電流を供給して、前記位相制御電流の特性に基づいて少なくとも1つの可変インダクタンス素子の可変インダクタンスを制御するように構成された位相コントローラと、

前記少なくとも1つの可変インダクタンス素子を備える全通過フィルタとを備える超伝導位相シフトシステムであって、

前記少なくとも1つの可変インダクタンス素子はそれぞれ、

前記全通過フィルタの入力部および出力部のうちの一方に結合された第1の超伝導量子干渉デバイス (SQUID) と、

第2のSQUIDであって、前記第2のSQUIDおよび低電圧のレールを相互接続するキャパシタに結合され、かつ、前記第1のSQUIDおよび前記第2のSQUIDが導電結合を介して直列に接続されている第2のSQUIDとを備え、前記位相制御電流は、前記第1のSQUIDおよび前記第2のSQUIDの可変インダクタンスを設定するべく前記第1のSQUIDおよび前記第2のSQUIDに印加され、

前記全通過フィルタは、入力信号を受信し、かつ、前記少なくとも1つの可変インダクタンス素子のそれぞれにおいて、前記第1のSQUIDおよび前記第2のSQUIDのそれぞれによって供給される前記可変インダクタンスに基づいて前記入力信号に対して位相シフトされた出力信号として前記入力信号を供給するように構成されている、超伝導位相シフトシステム。

10

20

【請求項 2】

前記少なくとも 1 つの可変インダクタンス素子は、磁束制御可変インダクタとして構成されて、前記位相制御電流の振幅に基づく磁束に応じて前記可変インダクタンスを供給する、請求項 1 に記載の超伝導位相シフトシステム。

【請求項 3】

各 S Q U I D は、前記位相制御電流に基づいて誘導結合を介してバイアスがかけられる並列のジョセフソン接合のペアを備える、請求項 1 に記載の超伝導位相シフトシステム。

【請求項 4】

前記並列のジョセフソン接合のペアは、互いに非対称の臨界電流を有するように構成されている、請求項 3 に記載の超伝導位相シフトシステム。

10

【請求項 5】

前記第 1 の S Q U I D は、第 1 の並列のジョセフソン接合のペアを備え、前記入力部および前記出力部のうちの前記一方と前記位相制御電流への誘導結合とを相互接続して前記第 1 の並列のジョセフソン接合のペアにバイアス電流を供給し、前記第 2 の S Q U I D は、第 2 の並列のジョセフソン接合のペアを備え、前記キャパシタと前記位相制御電流への誘導結合とを相互接続して前記第 2 の並列のジョセフソン接合のペアにバイアス電流を供給する、請求項 1 に記載の超伝導位相シフトシステム。

【請求項 6】

前記第 1 の並列のジョセフソン接合のペアおよび前記第 2 の並列のジョセフソン接合のペアは、それぞれ互いに非対称の臨界電流を有する、請求項 5 に記載の超伝導位相シフトシステム。

20

【請求項 7】

前記少なくとも 1 つの可変インダクタンス素子は、前記全通過フィルタの前記入力部と低電圧のレールに結合された前記キャパシタとを相互接続する第 1 の可変インダクタンス素子であり、前記全通過フィルタは、前記全通過フィルタの前記出力部と前記キャパシタとを相互接続する第 2 の可変インダクタンス素子をさらに備え、前記入力部および前記出力部は、前記入力信号が前記出力信号として供給される第 2 のキャパシタによって分離されている、請求項 5 に記載の超伝導位相シフトシステム。

【請求項 8】

前記少なくとも 1 つの可変インダクタンス素子は、前記全通過フィルタの前記入力部と前記低電圧のレールに結合された前記キャパシタとを相互接続する第 1 の可変インダクタンス素子であり、前記全通過フィルタは、前記全通過フィルタの前記出力部と前記キャパシタとを相互接続する第 2 の可変インダクタンス素子をさらに備え、前記入力部および前記出力部は、前記入力信号が前記出力信号として供給される第 2 のキャパシタによって分離されている、請求項 1 に記載の超伝導位相シフトシステム。

30

【請求項 9】

前記第 1 の可変インダクタンス素子および前記第 2 の可変インダクタンス素子はそれぞれ誘導結合を備え、前記位相制御電流を受信して互いに等しい可変インダクタンスを供給する、請求項 8 に記載の超伝導位相シフトシステム。

【請求項 10】

前記少なくとも 1 つの可変インダクタンス素子はそれぞれ複数の可変インダクタンス部を備え、各可変インダクタンス部は、前記全通過フィルタの前記入力部および前記出力部のうち的一方と前記低電圧のレールに結合された前記キャパシタとの間にカスケード配置でそれぞれの S Q U I D を有する可変インダクタンス部を備え、前記複数の可変インダクタンス部のそれぞれは、前記位相コントローラから供給される複数の位相制御電流のうちの 1 つの振幅に応答して前記可変インダクタンスに対して別々かつ独立した寄与をなす、請求項 1 に記載の超伝導位相シフトシステム。

40

【請求項 11】

全通過フィルタ素子は、前記入力信号の第 1 の位相シフトをもたらすように構成された第 1 の全通過フィルタであり、前記超伝導位相シフトシステムは、前記第 1 の全通過フィ

50

ルタに直列に結合された少なくとも1つの追加の全通過フィルタをさらに備え、前記少なくとも1つの追加の全通過フィルタのそれぞれは、少なくとも1つの追加の可変インダクタンス素子を備え、かつ、前記少なくとも1つの追加の可変インダクタンス素子のそれぞれによって供給される可変インダクタンスに基づいて前記出力信号を供給する際に、前記入力信号の追加の位相シフトをもたらすように構成されている、請求項1に記載の超伝導位相シフトシステム。

【請求項12】

全通過フィルタを介して入力信号を位相シフトするための方法であって、

前記入力信号を前記全通過フィルタの入力部において受信するステップと、

前記入力部に結合された第1の可変インダクタンス素子と前記全通過フィルタの出力部に結合された第2の可変インダクタンス素子とに誘導結合された制御線上に位相コントローラから位相制御電流を供給するステップであって、前記第1の可変インダクタンス素子および前記第2の可変インダクタンス素子のうちの一方は、導電結合を介して直列に接続された第1の超伝導量子干渉デバイス(SQUID)および第2のSQUIDを備える、ステップと、

前記第1のSQUIDおよび前記第2のSQUIDの可変インダクタンスを設定するべく前記第1のSQUIDおよび前記第2のSQUIDに前記位相制御電流を印加するステップと、

前記位相制御電流の振幅を調節し、前記第1の可変インダクタンス素子および前記第2の可変インダクタンス素子のそれぞれと関連付けられた前記可変インダクタンスを制御するステップと、

前記第1の可変インダクタンス素子および前記第2の可変インダクタンス素子の前記可変インダクタンスに基づいて、前記入力信号に対して位相シフトされた出力信号を前記出力部で供給するステップとを含む方法。

【請求項13】

各SQUIDは、互いに非対称の臨界電流を有する並列のジョセフソン接合のペアを備え、前記位相制御電流を供給するステップは、前記制御線上に前記位相制御電流を供給して前記SQUID内で磁束を誘導するステップを含む、請求項12に記載の方法。

【請求項14】

前記位相制御電流を供給するステップは、前記入力部に結合された前記第1の可変インダクタンス素子と前記出力部に結合された前記第2の可変インダクタンス素子とに誘導結合された前記制御線上に前記位相コントローラから前記位相制御電流を供給するステップを含み、前記第1のSQUIDおよび前記第2のSQUIDのそれぞれは、前記位相制御電流によってバイアスがかけられる並列のジョセフソン接合のペアを備える、請求項12に記載の方法。

【請求項15】

前記位相制御電流を供給するステップは、前記入力部と低電圧のレールに結合されたキャパシタとの間のカスケード配置における第1の複数の可変インダクタンス部のそれぞれと、前記出力部と前記キャパシタとの間のカスケード配置における第2の複数の可変インダクタンス部のそれぞれとに複数の位相制御電流を供給するステップを含み、前記第1の複数の可変インダクタンス部および前記第2の複数の可変インダクタンス部のそれぞれは、前記位相コントローラから供給される複数の位相制御電流のうちの1つの振幅に応答して前記可変インダクタンスに対して別々かつ独立した寄与をなし、前記第1の複数の可変インダクタンス部および前記第2の複数の可変インダクタンス部のうちの1つは、前記第1のSQUIDおよび前記第2のSQUIDを備える、請求項12に記載の方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、概して超伝導回路に関し、より具体的には超伝導位相シフトシステムに関する。

【背景技術】

【0002】

超伝導デジタル技術は、従来にはない高速度、低消費電力、および低動作温度の恩恵を受けるコンピュータ計算および／または通信資源をもたらした。超伝導量子ビットおよび半導体量子ビットを含む量子情報処理の実施態様の多くは、量子ビット制御および読み出しの両方のための信号（例えば、整形されたマイクロ波パルス）を必要とする。このようなシステムを実用的な集積化の複雑性にスケーリングするには、低温環境でオンチップの信号を局所的に操縦、および操作するためのツールボックスが通常必要である。一例として、システムは、位相のような信号特性、または、量子ビット制御および読み出しを実施する他の信号特性を調節するための回路部品を含む場合がある。可変位相シフトデバイスによつては、電圧可変キャパシタ（すなわち、バラクタ）を用いて実施可能な場合がある。しかしながら、バラクタの中には低温動作に適合しているものもあるが、それらは通常、1～10ボルトの範囲に分布し得る制御電圧が必要であるため、単一の磁束量子（S F Q : s i n g l e f l u x q u a n t u m）回路では容易に生成することができない。

10

【発明の概要】

【0003】

一実施例は、超伝導位相シフトシステムを含む。そのシステムは、少なくとも1つの可変インダクタンス素子を有する全通過フィルタを備える。全通過フィルタは、入力信号を受信し、かつ、少なくとも1つの可変インダクタンス素子のそれぞれによって供給される可変インダクタンスに基づいて前記入力信号に対して位相シフトされた出力信号として入力信号を供給するように構成されうる。そのシステムは、位相制御電流を供給して、位相制御電流の特性に基づいて少なくとも1つの可変インダクタンス素子の可変インダクタンスを制御するように構成された位相コントローラをさらに含むことができる。

20

【0004】

別の例は、全通過フィルタを介して入力信号を位相シフトするための方法を含む。その方法は、入力信号を全通過フィルタの入力部において受信するステップを含む。その方法は、入力部に結合された第1の可変インダクタンス素子と全通過フィルタの出力部に結合された第2の可変インダクタンス素子とに誘導結合された制御線上に位相コントローラから位相制御電流を供給するステップもまた含む。その方法は、位相制御電流の振幅を調節し、第1の可変インダクタンス素子および第2の可変インダクタンス素子のそれぞれと関連付けられた可変インダクタンスを制御するステップもまた含む。その方法は、第1の可変インダクタンス素子および第2の可変インダクタンス素子の可変インダクタンスに基づいて、入力信号に対して位相シフトされた出力信号を出力部において供給するステップをさらに含む。

30

【0005】

別の例は、超伝導位相シフトシステムを含む。そのシステムは、少なくとも1つの可変インダクタンス素子を備える全通過フィルタを含む。少なくとも1つの可変インダクタンス素子のそれぞれは、ジョセフソン接合（J o s e p h s o n j u n c t i o n）のペアをそれぞれ備える少なくとも1つの超伝導量子干渉デバイス（S Q U I D : S u p e r c o n d u c t i n g Q u a n t u m I n t e r f e r e n c e D e v i c e）として構成することができる。全通過フィルタは、入力信号を受信し、かつ、少なくとも1つの可変インダクタンス素子のそれぞれによって供給される可変インダクタンスに基づいて前記入力信号に対して位相シフトされた出力信号として入力信号を供給するように構成することができる。そのシステムは、可変振幅で位相制御電流を供給して、少なくとも1つの可変インダクタンス素子の可変インダクタンスを制御するように構成された位相コントローラをさらに含むことができる。位相制御電流は、少なくとも1つの可変インダクタンス素子のそれぞれにおいて、少なくとも1つの S Q U I D のそれぞれに誘導結合することができる。

40

【図面の簡単な説明】

【0006】

50

【図1】超伝導位相シフトシステムの一例を示す。

【図2】超伝導位相シフトシステムの別の例を示す。

【図3】超伝導位相シフト回路の一例を示す。

【図4】超伝導量子干渉デバイス（SQUID）の例示的な図を示す。

【図5】超伝導位相シフトシステムのさらに別の例を示す。

【図6】超伝導位相シフトシステムのさらにまた別の例を示す。

【図7】全通過フィルタを介して入力信号を位相シフトするための方法の一例を示す。

【発明を実施するための形態】

【0007】

本開示は、概して超伝導回路に関し、より具体的には超伝導位相シフトシステムに関する。超伝導位相シフトシステムは、信号（例えば、マイクロ波信号）を入力部において受信し、入力信号の位相シフトされたバージョンである出力信号を出力部において供給する全通過フィルタを含むことができる。超伝導位相シフトシステムは、例えば、並列のジョセフソン接合のペアを含むような超伝導量子干渉デバイス（SQUID）として構成することが可能な、少なくとも1つの可変インダクタンス素子を含む全通過フィルタを含む。一例として、全通過フィルタは、入力部に結合された第1の可変インダクタンス素子と出力部に結合された第2の可変インダクタンス素子とを含むことができる。可変インダクタンス素子は、位相制御電流の特性に応じて位相シフトされた出力信号を生成する際に、入力信号に可変インダクタンスを供給するように構成されている。例えば、位相制御電流は、可変インダクタンスの発生に結びつくように可変的である振幅で位相制御電流を供給する位相コントローラによって生成することができる。位相制御電流は、可変インダクタンス素子に誘導結合させることができる。

【0008】

一例として、全通過フィルタは、入力部と出力部とを分離するキャパシタを含むことができ、また、入力部に結合された第1の可変インダクタンス素子と出力部に結合された第2の可変インダクタンス素子とを含むことができる。第1の可変インダクタンス素子および第2の可変インダクタンス素子はそれぞれ、位相制御電流が供給される導体にそれぞれ誘導結合されたSQUIDのペアとして構成することができる。SQUIDはそれぞれ、臨界電流に対して非対称とすることが可能なジョセフソン接合のペアを含むことができる。したがって、位相制御電流の振幅の変動は、SQUIDのそれぞれと関連付けられた磁束を（例えば、ほぼ等しく）変化させることが可能であり、これにより、磁束の変化がSQUIDの可変インダクタンスをもたらし、入力部において受信された入力信号の位相変化をもたらしうことが可能になっており、この入力信号の位相変化が、このように超伝導位相シフトシステムの出力部において供給される。

【0009】

図1は、一例である超伝導位相シフトシステム10を図示する。超伝導位相シフトシステム10は、多種多様な超伝導回路システムのいずれにおいても実施することが可能で、入力信号SIGMWの位相制御をもたらしうことができる。一例として、入力信号SIGMWは、量子ビット上でゲートまたは読み出し動作を実行するような、量子回路用の制御方式で実施されるマイクロ波信号とすることができる。別の例として、入力信号SIGMWは、信号パルスまたは別のタイプの信号とすることができる。超伝導位相シフトシステム10は、入力信号SIGMWの位相シフトされたバージョンに相当し得る出力信号SIGSHを供給する。

【0010】

超伝導位相シフトシステム10は、全通過フィルタ12と位相コントローラ14とを含む。全通過フィルタ12は、入力信号SIGMWの周波数の所与の範囲内などで、入力信号SIGMWの位相シフトをもたらしうように構成されている。全通過フィルタ12は、位相コントローラ14によって生成される位相制御電流IPHに応答する少なくとも1つの可変インダクタンス素子16を含む。一例として、位相制御電流IPHは、可変インダクタンス素子16に誘導結合されており、これにより、位相制御電流IPHの振幅が、可変

10

20

30

40

50

インダクタンス素子16によって供給されるインダクタンスの大きさを制御することが可能になっている。例えば、位相コントローラ14は、電流源（例えば、ACまたはDC）として、またはSFQパルス発生器として構成することができる。可変インダクタンス素子16は、全通過フィルタ12の入力部および／または出力部に結合することが可能であり、これにより、可変インダクタンス素子16によって供給されるインダクタンスが、入力信号SIGMWの位相シフトをもたらすことが可能になっている。したがって、出力信号SIGSHは、入力信号SIGMWの位相シフトされたバージョンとして供給することができる。さらに、位相制御電流IPHの振幅を変えることによって、可変インダクタンス素子16によって供給されるインダクタンスを同様に覚えて、全通過フィルタ12によって入力信号SIGMWに対してもたらされる位相シフトの量を調節することができる。

10

【0011】

一例として、全通過フィルタ12は、入力信号SIGMWを受信する入力部と出力信号SIGSHを供給する出力部とを分離するキャパシタを含むことができる。可変インダクタンス素子16は、入力部に結合された第1の可変インダクタンス素子と出力部に結合された第2の可変インダクタンス素子とを含むことができる。第1の可変インダクタンス素子および第2の可変インダクタンス素子はそれぞれ、位相制御電流IPHが供給される導体にそれぞれ誘導結合された超伝導量子干渉デバイス（SQUID）のペアとして構成することができる。SQUIDはそれぞれ、臨界電流に対して非対称とすることが可能なジョセフソン接合のペアを含むことができる。したがって、位相制御電流IPHの振幅の変動は、SQUIDのそれぞれと関連付けられた磁束を（例えば、ほぼ等しく）変化させることが可能であり、これにより、磁束の変化がSQUIDの可変インダクタンスを供給し、入力部において受信された入力信号SIGMWの位相変化をもたらすことが可能になっており、この入力信号の位相変化が、このように、超伝導位相シフトシステムの出力信号SIGSHとして供給される。すなわち、第1の可変インダクタンス素子および第2の可変インダクタンス素子は、位相制御電流を受けて互いに等しい可変インダクタンスを供給することも可能である。

20

【0012】

図2は、別の例である超伝導位相シフトシステム50を図示する。超伝導位相シフトシステム50は、図1の例における超伝導位相シフトシステム10に対応させることが可能であり、したがって、多種多様な超伝導回路システムにおいて実施して、入力信号SIGMWの位相制御をもたらし、位相シフトされた出力信号SIGSHを供給することができる。

30

【0013】

超伝導位相シフトシステム50は、全通過フィルタ52と位相コントローラ54とを含む。全通過フィルタ52は、入力信号SIGMWの周波数の所与の範囲内などで、入力部56において受信される入力信号SIGMWの位相シフトをもたらし、出力部58から、位相シフトされた出力信号SIGSHを供給するように構成されている。図2の例では、入力部56および出力部58は、キャパシタC1を介して結合されている。全通過フィルタ52は、インダクタL1を介して入力部56に結合された入力可変インダクタンス素子60とインダクタL2を介して出力部58に結合された出力可変インダクタンス素子62とを含む。キャパシタC2は、入力可変インダクタンス素子60と出力可変インダクタンス素子62とを図2の例では接地として表示されている、低電圧のレールに相互接続している。キャパシタC2は、キャパシタC1ならびにインダクタL1およびL2とともに、全通過フィルタ52の特性（例えば、中心周波数およびインピーダンス）を設定するように構成されている。

40

【0014】

入力可変インダクタンス素子60および出力可変インダクタンス素子62はそれぞれ、位相コントローラ54によって生成される位相制御電流IPHにตอบสนองする。一例として、入力可変インダクタンス素子60および出力可変インダクタンス素子62はそれぞれ、インダクタと並列のジョセフソン接合のペアとを備える少なくとも1つのSQUIDを含む

50

ことができる。例えば、入出力部のそれぞれにおける少なくとも1つのSQUIDのインダクタは、位相制御電流IPHが供給される制御線上のインダクタに磁気結合させることができる。したがって、位相制御電流IPHは、入力可変インダクタンス素子60および出力可変インダクタンス素子62のそれぞれに誘導結合させることができる。

【0015】

位相制御電流IPHの振幅は、入力可変インダクタンス素子60および出力可変インダクタンス素子62によって供給されるインダクタンスの大きさを制御することができる。例えば、位相制御電流IPHの振幅を変えることによって、入力可変インダクタンス素子60および出力可変インダクタンス素子62によって供給されるインダクタンスを同様に 10
変えて、全通過フィルタ52によって入力信号SIGMWに対してもたらされる位相シフトの量を調節することができる。一例として、位相制御電流IPHは、入力可変インダクタンス素子60および出力可変インダクタンス素子62のそれぞれにおける少なくとも1つのSQUIDのそれぞれにおいて、並列のジョセフソン接合のペアに対してバイアス電流を供給することが可能である。したがって、位相制御電流IPHを変えて、入力可変インダクタンス素子60および出力可変インダクタンス素子62のそれぞれにおける少なくとも1つのSQUIDのそれぞれに印加される磁束を調節することができる。それに 20
応じて、全通過フィルタ52は、入力信号SIGMWの所定の中心周波数において、かなり大きな（例えば、約90°以上までの）可変位相シフト能力を実現することができるが、位相シフトは、入力信号SIGMWの周波数が中心周波数から逸脱するにつれて逓減する。中心周波数は、例えば、キャパシタC1およびC2のキャパシタンス、および／または、 20
インダクタL1およびL2それぞれのインダクタンスに基づいて調整することができる。したがって、超伝導位相シフトシステム50をコンパクトな、集中素子デバイスとして実施して、伝送線の長さに沿って分散型位相シフト素子を実施するか、または複数のステージのそれぞれにおいて可変キャパシタンスを実施する典型的な位相シフトシステムとは対照的に、可変インダクタンスを実施することに基づき、信号（例えば、マイクロ波信号）の位相シフトをもたらし 30
ることができる。

【0016】

図3は、別の例である超伝導位相シフトシステム100を図示する。超伝導位相シフトシステム100は、図1および図2のそれぞれの例における超伝導位相シフトシステム10および／または超伝導位相シフトシステム50に対応させることが可能であり、したが 30
って、多種多様な超伝導回路システムにおいて実施して、入力信号SIGMWの位相制御をもたらし、位相シフトされた出力信号SIGSHを供給することができる。

【0017】

超伝導位相シフトシステム100は、全通過フィルタ102と位相コントローラ104とを含む。全通過フィルタ102は、入力信号SIGMWの周波数の所与の範囲内などで、入力部106において受信される入力信号SIGMWの位相シフトをもたらし、出力部108から、位相シフトされた出力信号SIGSHを供給するように構成されている。図3の例では、入力部106および出力部108は、キャパシタC1を介して結合されている。全通過フィルタ102は、インダクタL1を介して入力部106に結合された入力可変インダクタンス素子110とインダクタL2を介して出力部108に結合された出力可変インダクタンス素子112とを含む。 40

【0018】

入力可変インダクタンス素子110は、図3の例では、第1のSQUID114および第2のSQUID116として表示されており、これらはそれぞれ、並列のジョセフソン接合のペアJJ1およびJJ2とインダクタのペアL11およびL12とを含む。第1のSQUID114は、インダクタL1に結合されており、第2のSQUID116は、入力可変インダクタンス素子110および出力可変インダクタンス素子112を接地に相互接続するキャパシタC2に結合されている。第1のSQUID114および第2のSQUID116は、第1のSQUID114および第2のSQUID116のそれぞれにおける、それぞれのインダクタL11とL12との間の導電結合を介して、直列に接続されて 50

いる。同様に、出力可変インダクタンス素子112は、図3の例では、第1のSQUID118および第2のSQUID120として表示されており、これらはそれぞれ、並列のジョセフソン接合のペアJJ1およびJJ2と、インダクタのペアL11およびL12を含む。第1のSQUID118は、インダクタL2に結合されており、第2のSQUID120は、キャパシタC2に結合されている。第1のSQUID118および第2のSQUID120は、第1のSQUID118および第2のSQUID120のそれぞれにおける、それぞれのインダクタL11とL12との間の導電結合を介して、直列に接続されている。

【0019】

位相コントローラ104は、複数のインダクタL21およびL22を含む制御線122上に位相制御電流IPHを生成するように構成されている。インダクタL21はそれぞれ、4つのSQUID114、116、118および120のそれぞれにおいて、それぞれのインダクタL11と磁気結合されており、インダクタL22はそれぞれ、4つのSQUID114、116、118および120のそれぞれにおいて、それぞれのインダクタL12と磁気結合されている。したがって、位相制御電流IPHは、SQUID114、116、118および120のそれぞれに誘導結合され、これにより、位相制御電流IPHは、SQUID114、116、118および120のそれぞれにおいて、バイアス電流を誘導するようになっている。その結果、SQUID114、116、118および120はそれぞれ、位相制御電流IPHに応答して磁束を示す。これに応じて、位相制御電流IPHの振幅は、入力可変インダクタンス素子110および出力可変インダクタンス素子112によって供給されるインダクタンスの大きさを制御することができる。例えば、位相制御電流IPHの振幅を変えることによって、SQUID114、116、118、および120のそれぞれによって、したがって、入力可変インダクタンス素子110および出力可変インダクタンス素子112のそれぞれによって供給されるインダクタンスを同様に変えて、全通過フィルタ102によって入力信号SIGMWに対してもたらされる位相シフトの量を調節することができる。

【0020】

図4は、SQUID150の例示的な図を図示する。SQUID150は、図3の例におけるSQUID114、116、118、および120のうちの1つに対応させることができる。このため、図4の例についての以下の説明では、図3の例を参照する。

【0021】

SQUID150は、並列のジョセフソン接合のペアJJ1およびJJ2、ならびにインダクタL11およびL12を含む。インダクタL11およびL12は、インダクタL21およびL22に磁気結合されており、インダクタL21およびL22は、位相制御電流IPHが供給される導体上に設けられている。したがって、位相制御電流IPHは、SQUID150内の並列のジョセフソン接合のペアJJ1およびJJ2に対してバイアス電流を供給することができる。したがって、ジョセフソン接合JJ1およびJJ2、ならびにインダクタL11およびL12は、インダクタL11およびL12に起因する線形インダクタンスを有するループで囲まれている。この線形インダクタンスは、ジョセフソン接合JJ1およびJJ2に起因するインダクタンスよりも小さい。図4の例では、SQUID150は、位相制御電流IPHを伝える、相互に結合された磁束線（例えば、制御線122）を介してSQUID150に供給される磁束ΦXを取り囲んでいる。一例として、並列のジョセフソン接合のペアJJ1およびJJ2は、互いに非対称とすることが可能であり、これにより、ジョセフソン接合JJ1およびJJ2のうちの一方が、もう一方よりも大きな臨界電流を有するようになっている。

【0022】

例えば、ジョセフソン接合JJ1は、約1.5 μAの臨界電流を有することが可能であり、また、ジョセフソン接合JJ2は、約2.5 μAの臨界電流を有することが可能である。したがって、SQUID150の合計臨界電流は、磁束ΦXに周期的に依存し得るが、合計臨界電流は、ゼロよりも大きいままであり、ジョセフソン接合JJ1およびJJ2

10

20

30

40

50

の非対称の臨界電流に基づいて、磁束量子 Φ_0 を2で割ったものにほぼ等しい磁束 Φ_X に
 対応する。例えば、上記の、それぞれのジョセフソン接合JJ1およびJJ2の臨界電流
 の例に基づいて、SQUID150の合計臨界電流は、 $\Phi_X = 0$ で最小約82 pAから $\Phi_X = \Phi_0 / 2$ で最大約330 pAまでのインダクタンスを供給するように、最大で約4 μ Aから最小で約1 μ Aまでの間で変動し得る。

【0023】

図3および図4のそれぞれの例において示した超伝導位相シフトシステム100および
 SQUID150は、信号用の全通過フィルタに基づいた位相シフトシステムの一例を提
 供し、この位相システムは、コンパクトな集中素子の配置で可変インダクタンスを実施す
 る。超伝導位相シフトシステム100は、図3の例に限定されるものではないことを理解
 されたい。一例として、図3の例は、4つのSQUID114、116、118および1
 20を示しているが、この代りに、全通過フィルタ102であれば、入力可変インダクタ
 ンス素子110および出力可変インダクタンス素子112のそれぞれにおいて、異なる数
 のSQUIDを含むことも可能であろう。この代りに、例えば、入力可変インダクタンス
 素子110および出力可変インダクタンス素子112がそれぞれ、単一のSQUIDを含
 むことも可能であり、または、様々なそれぞれの位相制御電流に基づいて動作するよう
 な、複数のSQUIDもしくはSQUIDのペアを含むことも可能であろう。加えて、超伝
 導位相シフトシステム100は、キャパシタC1、ならびにインダクタL1およびL2（
 例えば、このインダクタL1およびL2は省略可能である）に対するフィルタ素子の異な
 る配置を含むことも可能であろう。したがって、超伝導位相シフトシステム100は、様
 々な異なるやり方で構成することができる。

【0024】

図5は、さらに別の例である超伝導位相シフトシステム200を図示する。超伝導位相
 シフトシステム200は、図1の例における超伝導位相シフトシステム10に対応させる
 ことが可能であり、したがって、多種多様な超伝導回路システムにおいて実施して、入力
 信号SIGMWの位相制御をもたらし、位相シフトされた出力信号SIGSHを供給する
 ことができる。

【0025】

超伝導位相シフトシステム200は、全通過フィルタ202と位相コントローラ204
 とを含む。全通過フィルタ202は、入力信号SIGMWの周波数の所与の範囲内などで
 、入力部206において受信される入力信号SIGMWの位相シフトをもたらし、出力部
 208から、位相シフトされた出力信号SIGSHを供給するように構成されている。図
 5の例では、入力部206および出力部208は、キャパシタC1を介して結合されてい
 る。全通過フィルタ202は、インダクタL1を介して入力部206に結合された入力可
 変インダクタンス素子210とインダクタL2を介して出力部208に結合された出力可
 変インダクタンス素子212とを含む。キャパシタC2は、入力可変インダクタンス素子
 210と出力可変インダクタンス素子212とを図5の例では接地として表示されている
 、低電圧のレールに相互接続する。図5の例では、入力可変インダクタンス素子210は
 、複数のN個の入力可変インダクタンス部214を含み、出力可変インダクタンス素子2
 12は、複数のN個の出力可変インダクタンス部216を含む。ここで、Nは、1よりも
 大きい正の整数である。入力可変インダクタンス部214のそれぞれ、および出力可変
 インダクタンス部216のそれぞれの各1つは、位相コントローラ204によって生成され
 た複数のN個の位相制御電流IPH1からIPH_Nのうちの1つにそれぞれ応答する。

【0026】

一例として、入力可変インダクタンス部214および出力可変インダクタンス部216
 はそれぞれ、インダクタと並列のジョセフソン接合のペアとを備える少なくとも1つのS
 QUIDを含むことができる。例えば、入力可変インダクタンス部214および出力可変
 インダクタンス部216はそれぞれ、図3の例に類似するような、それぞれが複数の位相
 制御電流IPH1からIPH_Nのうちの1つに誘導結合されたSQUIDのペアを含むこ
 とができる。その結果、位相制御電流IPH1からIPH_Nのそれぞれは、それぞれの入

力可変インダクタンス部 214 および出力可変インダクタンス部 216 によって供給されるインダクタンスの量全体にわたり、別々かつ独立した、したがって、入力可変インダクタンス素子 210 および出力可変インダクタンス素子 212 の制御をもたらすことが可能である。例えば、入力可変インダクタンス部 214 のそれぞれ、および出力可変インダクタンス部 216 のそれぞれは、他のそれぞれの入力可変インダクタンス部 214 および出力可変インダクタンス部 216 に対して一意的に構成することができる。したがって、超伝導位相シフトシステム 200 の全通過フィルタ 202 は、入力信号 S I G M W の位相シフトの、より多くの制御をもたらすことができる。例えば、全通過フィルタ 202 は、位相制御電流 I P H 1 から I P H N を介して入力信号 S I G M W の位相シフトの精密な設定および概略的な設定を行うことが可能であるか、または、位相シフトに対する漸増的な 2 進調節、もしくは入力信号 S I G M W の位相シフトに対する多種多様な他のタイプの調節のいずれかを行うことが可能である。

10

【0027】

図 6 は、さらにまた別の例である超伝導位相シフトシステム 250 を図示する。超伝導位相シフトシステム 250 は、複数の X 個の全通過フィルタ 252 と、位相コントローラ 254 とを含む。ここで、X は、1 よりも大きい正の整数である。一例として、全通過フィルタ 252 はそれぞれ、図 2、図 3、または図 5 のそれぞれの例における全通過フィルタ 52、全通過フィルタ 102、または全通過フィルタ 202 と実質的に同様に構成することができる。複数の全通過フィルタ 252 は、したがって、それぞれが、入力信号 S I G M W の周波数の所与の範囲内などで、入力信号 S I G M W のそれぞれの位相シフトをもたらしように構成されている。図 6 の例では、全通過フィルタ 252 はそれぞれ、別々の位相シフトの寄与をなして、入力信号 S I G M W の位相シフトされたバージョンに相当する出力信号 S I G S H を供給する。

20

【0028】

図 6 の例では、全通過フィルタ 252 はそれぞれ、位相コントローラ 254 によって生成される位相制御電流 I P H によって制御される。一例として、位相制御電流 I P H は、全通過フィルタ 252 のそれぞれにおいて可変インダクタンス素子に誘導結合された単流を含むことができる。または、全通過フィルタ 252 のうちの 1 つの、少なくとも 1 つの可変インダクタンス素子に誘導結合された、別々かつ独立した電流とすることができる。したがって、第 1 番目の全通過フィルタ 252 は、第 1 番目の全通過フィルタ 252 の入力部において受信された入力信号 S I G M W の第 1 の位相シフトをもたらし、第 1 番目の全通過フィルタ 252 の出力部で信号 S I G S H 1 を供給する。続いて、次の全通過フィルタ 252 が、該次の全通過フィルタ 252 の入力部において受信された信号 S I G S H 1 の位相シフトをもたらし、該次の全通過フィルタ 252 の出力部で信号を供給する。この信号は、最後の全通過フィルタ 252（すなわち、X 番目の全通過フィルタ 252）まで、さらに位相シフトされ、最後の全通過フィルタ 252 の入力部において受信された信号 S I G S H X-1 の位相シフトをもたらし、全通過フィルタ 252 の最後の出力部において、位相シフトされた信号 S I G S H X を供給する。したがって、全通過フィルタ 252 はそれぞれ、入力信号 S I G M W の別々の量の累積的な位相シフトをもたらし、出力信号 S I G S H X を供給する際に任意の量の所望の位相シフトを実現することができる。

30

40

【0029】

上記で説明した前述の構造的および機能的特徴を考慮して、本発明の様々な態様に従う方法が、図 7 を参照して、より良く理解されるであろう。説明を簡単にする目的で、図 7 の方法は順次に実行されるものとして示され説明されるが、本発明は図示された順序によって限定されるのではなく、いくつかの態様は、本発明に従って、異なる順序で、かつ／または、本明細書に示され説明されるものとは別の態様と同時に、発生し得ることを理解、および認識されたい。さらに、図示された特徴のすべてが、本発明の一態様に従う方法を実施するために必要とされるのではない場合がある。

【0030】

図 7 は、全通過フィルタ（例えば、全通過フィルタ 12）を介して入力信号（例えば、

50

入力信号 S I G M W) を位相シフトするための方法である方法 3 0 0 を図示する。3 0 2 において、入力信号が、全通過フィルタの入力部 (例えば、入力部 5 6) において受信される。3 0 4 において、位相制御電流 (例えば、位相制御電流 I P H) が、位相コントローラ (例えば、位相コントローラ 1 4) から制御線 (例えば、制御線 1 2 2) 上に供給される。この制御線は、入力部に結合された第 1 の可変インダクタンス素子 (例えば、入力可変インダクタンス素子 6 0) と、全通過フィルタの出力部 (例えば、出力部 5 8) に結合された第 2 の可変インダクタンス素子 (例えば、出力可変インダクタンス素子 6 2) と、に誘導結合されている。3 0 6 において、位相制御電流の振幅が調節され、第 1 の可変インダクタンス素子および第 2 の可変インダクタンス素子のそれぞれと関連付けられた可変インダクタンスを制御する。3 0 8 において、第 1 の可変インダクタンス素子および第 2 の可変インダクタンス素子の可変インダクタンスに基づいて、入力信号に対して位相シフトされた出力信号 (例えば、出力信号 S I G S H) が、出力部で供給される。

10

【0031】

上記で説明されたものは、本発明の例である。当然ながら、本発明を説明する目的で考えられ得る構成要素または方法のすべての組み合わせを記載することは不可能であるが、当業者であれば、多くのさらなる組み合わせおよび本発明の置換が可能であることを認識するであろう。したがって、本発明は、添付の特許請求の範囲を含む本出願の範囲内に入るすべてのこのような変更形態、修正形態および変形形態を包含するように意図されている。

20

(付記 1)

可変振幅で位相制御電流を供給して、少なくとも 2 つの可変インダクタンス素子の可変インダクタンスを制御するように構成された位相コントローラと、

少なくとも 2 つの可変インダクタンス素子を備える全通過フィルタとを備える超伝導位相シフトシステムであって、

前記少なくとも 2 つの可変インダクタンス素子のそれぞれは、ジョセフソン接合のペアをそれぞれ備える少なくとも 2 つの超伝導量子干渉デバイス (S Q U I D) として構成され、前記少なくとも 2 つの S Q U I D のうちの第 1 の S Q U I D は、前記全通過フィルタの入力部および出力部のうちの一方に結合され、前記少なくとも 2 つの S Q U I D のうちの第 2 の S Q U I D は、前記第 2 の S Q U I D と低電圧のレールとを相互接続するキャパシタに結合され、前記第 1 の S Q U I D および前記第 2 の S Q U I D は導電結合を介して直列に接続され、前記位相制御電流は、前記第 1 の S Q U I D および前記第 2 の S Q U I D の可変インダクタンスを設定するべく誘導結合を介して前記第 1 の S Q U I D および前記第 2 の S Q U I D に印加され、

30

前記全通過フィルタは、入力信号を受信し、かつ、前記第 1 の S Q U I D および前記第 2 の S Q U I D の可変インダクタンスに対応して前記少なくとも 1 つの可変インダクタンス素子のそれぞれによって供給される可変インダクタンスに基づいて前記入力信号に対して位相シフトされた出力信号として前記入力信号を供給するように構成されている、超伝導位相シフトシステム。

(付記 2)

前記少なくとも 2 つの可変インダクタンス素子のうちの 1 つは、前記全通過フィルタの前記入力部と前記低電圧のレールに結合された前記キャパシタとを相互接続する第 1 の可変インダクタンス素子であり、前記少なくとも 2 つの可変インダクタンス素子のうちの別の 1 つは、前記全通過フィルタの前記出力部と前記キャパシタとを相互接続する第 2 の可変インダクタンス素子であり、前記入力部および前記出力部は、前記入力信号が前記出力信号として供給される別のキャパシタによって分離されている、付記 1 に記載のシステム。

40

(付記 3)

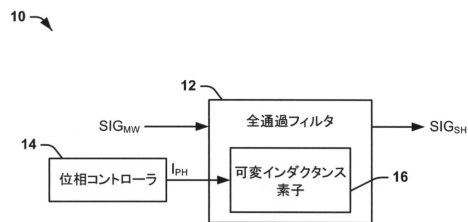
S Q U I D のそれぞれにおける並列のジョセフソン接合のペアは、互いに非対称の臨界電流を有する、付記 1 に記載のシステム。

(付記 4)

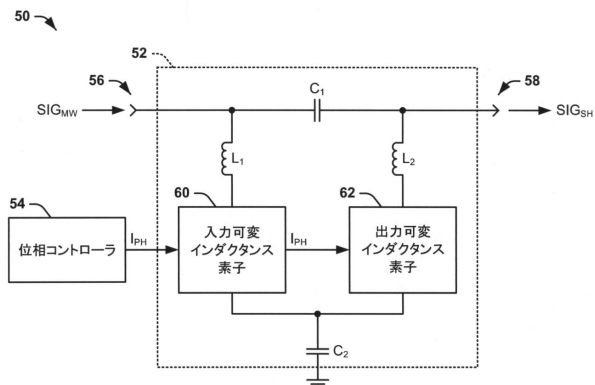
50

前記少なくとも2つの可変インダクタンス素子のそれぞれは、前記全通過フィルタの前記入力部および前記出力部のうちの一方と前記低電圧のレールに結合された前記キャパシタとの間にカスケード配置で複数の可変インダクタンス部を備え、前記複数の可変インダクタンス部のそれぞれは少なくとも1つのSQUIDを備え、前記複数の可変インダクタンス部のそれぞれは、前記位相コントローラから供給される複数の位相制御電流のうちの1つの振幅に応答して前記可変インダクタンスに対して別々かつ独立した寄与をなす、付記1に記載のシステム。

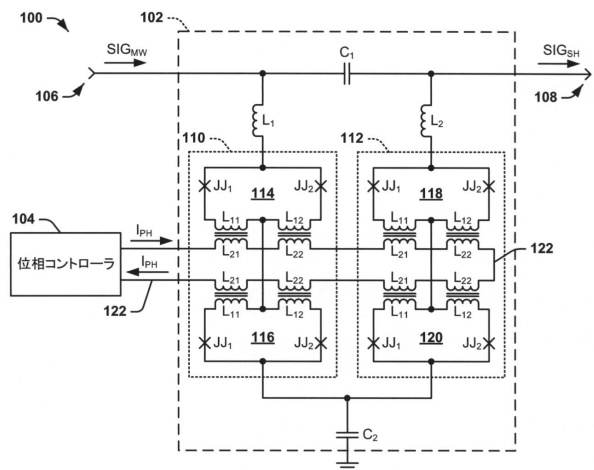
【図1】



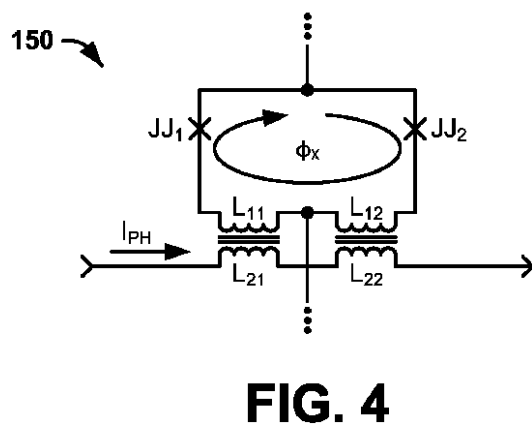
【図2】



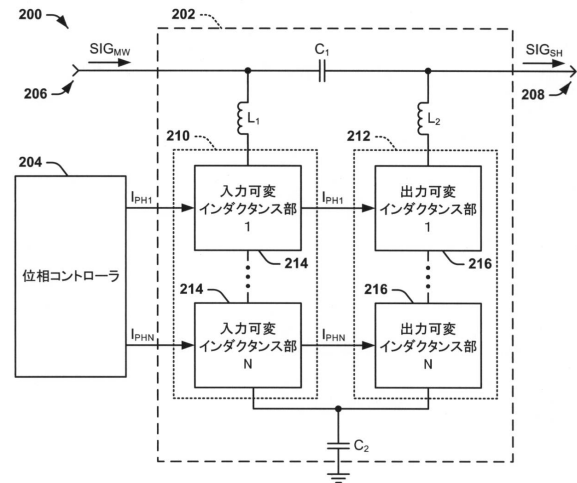
【図3】



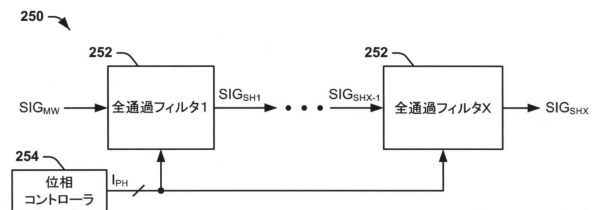
【図 4】



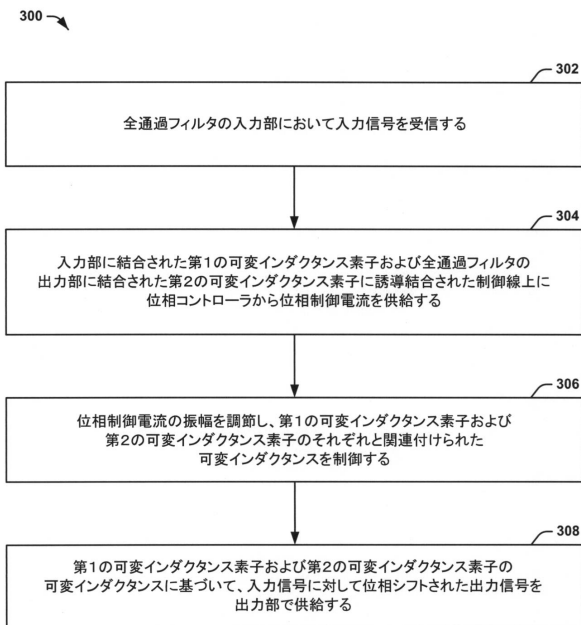
【図 5】



【図 6】



【図 7】



フロントページの続き

(72)発明者 ネイアマン、オフエル
アメリカ合衆国 21043 メリーランド州 エリコット シティ マナハン ドライブ 86
91

(72)発明者 アブターレブ、モハメド オサマ
アメリカ合衆国 20723 メリーランド州 ローレル ロック リップル レーン 9374

審査官 ▲高▼橋 徳浩

(56)参考文献 特開平04-247701 (JP, A)
特開平05-264697 (JP, A)
特開平11-211798 (JP, A)
特表2002-519918 (JP, A)
特開2004-071630 (JP, A)
特開2004-179729 (JP, A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)
H01L 27/18
H01L39/00-H01L39/24
H03H1/00-H03H3/00
H03H5/00-H03H7/21