

明 細 書

発明の名称：

フィルタ回路、量子デバイス、量子コンピュータ、フィルタ回路の製造方法、フィルタ回路の組み立て方法、読み出し周波数のフィルタリング方法および量子ビットの分散読み出し方法

技術分野

[0001] 本開示は、フィルタ回路、量子デバイス、量子コンピュータ、フィルタ回路の製造方法、フィルタ回路の組み立て方法、読み出し周波数のフィルタリング方法および量子ビットの分散読み出し方法に関する。

背景技術

[0002] 量子ビットの状態測定は、量子コンピュータにおける重要な要素技術の1つである。超伝導量子コンピュータデバイスにおける量子ビットの状態測定では、一般に「分散読み出し」と呼ばれる手法が用いられている。分散読み出しは、量子ビットの電磁界モードを、読み出し共振器の電磁界モードと周波数的に十分離れた状態(分散領域)で結合させ、読み出し共振器を観測用線路に結合させる。量子ビットの状態を読み出す際は、読み出し共振器に共鳴した周波数のマイクロ波を観測用線路から入射し、その反射位相を測定することで、間接的に量子ビットの状態を推定する。

[0003] 分散読み出しの課題の1つは、量子ビットのモードが、間接的に観測用線路にも結合してしまう点にある。これにより量子ビットのエネルギーが観測線路に漏れ出す結果、デコヒーレンスと呼ばれる、量子ビットの緩和を引き起こす現象が生じる(パーセル効果)。これに対処するための手法の1つに、パーセルフィルタと呼ばれるフィルタ回路を使うものがある。すなわち、パーセルフィルタを量子デバイスに追加することで、読み出し共振器と観測用線路との結合を保ちつつ、量子ビットの観測用線路への緩和を抑制することができる。

先行技術文献

非特許文献

[0004] 非特許文献1: "Fast Reset and Suppressing Spontaneous Emission of a Superconducting Qubit", M. D. Reed et al., Appl. Phys. Lett., 96(20), 203110 (2010)

非特許文献2: "Broadband Filters for Abatement of Spontaneous Emission in Circuit Quantum Electrodynamics", N. Bronn et al., Applied Physics Letters, 107(17), 172601. (2015)

非特許文献3: "Reducing spontaneous emission in circuit quantum electrodynamics by a combined readout/filter technique", N. T. Bronn et al., IEEE Trans. Appl. Supercond. 25(5), 1-10. (2015)

非特許文献4: "Fast Readout and Reset of a Superconducting Qubit Coupled to a Resonator with an Intrinsic Purcell Filter", Y. Sunada et al., Phys Rev. Appl. 17, 044016. (2022)

非特許文献5: "Rapid high-fidelity multiplexed readout of superconducting qubits", J. Heinsoo et al., Phys. Rev. Appl., 10(3), 034040. (2018)

非特許文献6: "All-microwave leakage reduction units for quantum error correction with superconducting transmon qubits", J. F. Marques, arXiv preprint arXiv:2302.09876 (2023)

非特許文献7: "Analysis of multiconductor transmission lines.", C. R. Paul (2007)

非特許文献8: "Solution of the transmission-line equations under the weak-coupling assumption." C. R. Paul, IEEE Trans. Elec. Comp., 44(3), 413-423. (2002)

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0005] パーセルフィルタの第1の実装例として、非特許文献1に開示された技術がある。この技術は、観測用線路に1/4波長共振器を結合させることによ

り、観測用線路が実効的にショートする仕組みとなっている。このデザインでは、フィルタの特性として、単一ノッチのストップバンドフィルタが実現できる。これにより、量子ビット周波数でエネルギー緩和の抑制ができるようになる。しかしこの方式は、回路に $1/4$ 波長共振器を追加的に実装する必要があるため、物理的な回路面積が余分に必要となる。大規模な超伝導量子コンピュータでは、回路面積が限られるため、少しの回路面積の増加も実装上の問題となり得る。

[0006] パーセルフィルタの第2の実装例として、非特許文献2に開示された技術がある。この技術は、マイクロ波フィルタで従来用いられている広帯域なストップバンドフィルタを、読み出し共振器と観測用線路の間に挿入することで、所望の機能を実現している。この方式では、フィルタ回路は、量子ビットチップと独立したチップの上に作製されている。この実装方法の問題点の1つは、観測用線路とフィルタとのインピーダンス不整合により、反射が発生する可能性がある点である。こうした反射に伴う信号の損失は、測定効率を低下させる原因となり得る。その他の課題として、独立したフィルタ素子を必要とすることで回路面積が大きく増加してしまう点も挙げられる。

[0007] パーセルフィルタの第3の実装例として、非特許文献3に開示された技術がある。この手法では、量子ビットと観測用線路との間に容量的な直接結合を導入する。これにより共振器を介した量子ビットから観測用線路への結合に破壊的な干渉を引き起こす、ストップバンドフィルタを実装する。この種類のフィルタは結合に「内在的な」フィルタと捉えることができ、追加の回路要素を必要としない。このため、回路面積が限られている大規模集積化用途で有利であると考えられる。

[0008] 内在的パーセルフィルタの別の例として、非特許文献4に開示された技術がある。ここでは、内在的フィルタは分布定数回路的に実現されている。観測用線路と共振器との結合位置を調整することで、量子ビット周波数での散逸の抑制が可能になる。この手法も、上記と同様に、追加の回路要素を必要としないところに利点がある。

- [0009] しかしながら、以上の手法に共通する課題として、読み出し共振器が観測用線路に直接結合しており、読み出し共振器自体に対しては何のフィルタリングも行われていないということがある。これは、読み出しを多重化し、複数の共振器を共通の観測用線路に結合させる際に問題となり得る。多重化読み出しにより、希釈冷凍機内の配線やマイクロ波部品を大幅に削減することが可能となるため、大規模化においては多重化読み出しを実装することは非常に重要である。一方で、多数の読み出し共振器が共通の観測用線路に結合することで、測定クロストークが引き起こされる可能性がある。特に、読み出し用の信号が対象とは異なる共振器に入り込むことで、量子ビットの位相コヒーレンスを悪化させることは大きな問題となる。
- [0010] 個別パーセルフィルタ共振器は、多重化時の読み出しクロストークの問題に対処するために導入された手法である（例えば、非特許文献5および6参照）。個別パーセルフィルタ共振器を用いた読み出しでは、複数の読み出し共振器が1つの観測用線路に多重化されている一方で、それぞれの読み出し共振器が個別のパーセルフィルタ共振器と組として実装される。この手法には、量子ビットの緩和と、読み出し共振器間のクロストークとを同時に抑制できるという利点がある。この手法は非特許文献5において初めて実証され、8量子ビットデバイスにおける読み出しの8多重化のために利用されている。
- [0011] 非特許文献5および6で使われる個別フィルタ共振器は、読み出し周波数付近を透過させるバンドパスフィルタとして実装される。その結果、量子ビットのエネルギー緩和も同時に抑える仕組みとなっているが、逆にこの点が問題を含んでいる。すなわち、読み出しの高速化のために、共振器を非常に強く観測用線路に結合させた場合には、バンドパスフィルタとしてのフィルタ性能が十分なものとならず、量子ビットのエネルギー緩和を抑制しきれない可能性がある。
- [0012] 本発明はこうした状況に鑑みてなされたものであり、その目的は、読み出し共振器の読み出し周波数付近のみを透過させるバンドパスフィルタ機能と

、量子ビットの観測用線路へのエネルギー緩和を抑制するノッチフィルタ機能と、を両立するフィルタ回路を実現することにある。

課題を解決するための手段

- [0013] 上記課題を解決するために、本発明のある態様のフィルタ回路は、データ量子ビットと結合する読み出し共振器と、観測用線路と結合するフィルタ共振器と、を備える。読み出し共振器とフィルタ共振器とは、キャパシティブ結合およびインダクティブ結合を並列に用いて、電気磁氣的に結合されている。
- [0014] ある実施の形態のフィルタ回路では、インダクティブ結合は、読み出し共振器と、フィルタ共振器との相互インダクタンスにより実現されてもよい。
- [0015] ある実施の形態のフィルタ回路では、読み出し共振器とフィルタ共振器との間に配置された多芯伝送線路を備えてもよい。この場合、キャパシティブ結合およびインダクティブ結合は、多芯伝送線路により実現される。
- [0016] ある実施の形態のフィルタ回路では、読み出し共振器は、第1端部がデータ量子ビットに接続された第1読み出し共振器部分と、第1端部が接地された第2読み出し共振器部分と、から構成され、フィルタ共振器は、第1端部が観測用線路に接続された第1フィルタ共振器部分と、第1端部が接地された第2フィルタ共振器部分と、から構成され、多芯伝送線路は、第1読み出し共振器部分の第2端部および第1フィルタ共振器部分の第2端部と、第2読み出し共振器部分の第2端部および第2フィルタ共振器部分の第2端部と、の間に設置されてもよい。
- [0017] ある実施の形態のフィルタ回路では、
多芯伝送線路の長さを l_c 、
多芯伝送線路を伝搬する波の伝搬速度を v_c 、
多芯伝送線路の第1芯線および第2芯線の、単位長さあたりのキャパシタンスを C_l 、
多芯伝送線路の第1芯線および第2芯線の、単位長さあたりのインダクタンスを L_l 、

多芯伝送線路の第1芯線と第2芯線との間の、単位長さあたりのキャパシタンスを C_m 、

多芯伝送線路の第1芯線と第2芯線との間の、単位長さあたりのインダクタンスを L_m 、

読み出し共振器11の第2読み出し共振器部分の長さを l_{r1-G} 、

フィルタ共振器の第2フィルタ共振器部分の長さを l_{r2-G} 、

多芯伝送線路の長さを l_c 、

とし、分布定数回路の変数を

[数4]

$$\tilde{\tau}_1 = \frac{l_{r1-G}}{v} + \frac{l_c}{2v_c}, \quad \tilde{\tau}_2 = \frac{l_{r2-G}}{v} + \frac{l_c}{2v_c}, \quad v_c = \frac{1}{\sqrt{L_l(C_l+C_m)}}, \quad Z_c = \sqrt{\frac{L_l}{C_l+C_m}}, \quad Z_m = \sqrt{\frac{L_m}{C_m}} \quad (3)$$

としたとき、ノッチ周波数 ω_f が次式

[数5]

$$\frac{1}{\sin c(\omega_f l_c / v_c)} \left[\frac{\cos(2\omega_f \tilde{\tau}_1) + \cos(2\omega_f \tilde{\tau}_2)}{1 + \cos(2\omega_f [\tilde{\tau}_1 + \tilde{\tau}_2])} \right] = \frac{Z_c^2 + Z_m^2}{Z_c^2 - Z_m^2} \quad (4)$$

を満たす。

[0018] ある実施の形態のフィルタ回路では、ノッチ周波数 ω_f が次式

[数10]

$$\omega_f = \frac{\pi}{2(\tilde{\tau}_1 + \tilde{\tau}_2)} \quad (9)$$

で表されてもよい。

[0019] ある実施の形態のフィルタ回路では、読み出し共振器と前記フィルタ共振器との結合定数 J が次式

[数11]

$$J = \bar{\omega}_{rp} \frac{\pi^2}{32} \frac{\left(\frac{\bar{\omega}_{rp}}{\omega_f} - \frac{\omega_f}{\bar{\omega}_{rp}} \right)}{\cos\left(\frac{\pi\omega_f}{2\bar{\omega}_{rp}}\right)} \left(\frac{C_m}{C_c + C_m} \right) \sin\left(\frac{\omega_f \ell_c}{v_c}\right) \quad (10)$$

で表されてもよい。

[0020] ある実施の形態のフィルタ回路では、多芯伝送線路に加えて結合用のキャパシタが配置されてもよい。

[0021] ある実施の形態のフィルタ回路では、多芯伝送線路に加えて結合用のキャパシタおよびインダクタが配置されてもよい。

[0022] ある実施の形態のフィルタ回路では、読み出し共振器とフィルタ共振器との間に配置されたキャパシタおよびインダクタを備えてもよい。この場合、キャパシティブ結合およびインダクティブ結合は、それぞれ、読み出し共振器とフィルタ共振器との間に配置されたキャパシタおよびインダクタにより実現される。

[0023] 本発明の別の態様は、量子デバイスである。この量子デバイスは、データ量子ビットと、観測用線路と、前述のいずれかのフィルタ回路と、を備えてもよい。フィルタ回路は、データ量子ビットと観測用線路との間に配置される。

[0024] 本発明のさらに別の態様は、量子コンピュータである。この量子コンピュータは、前述の量子デバイスを備える。

[0025] 本発明のさらに別の態様は、フィルタ回路である。このフィルタ回路は、1つまたは複数のデータ量子ビットと、これらの各データ量子ビットに対応する1つまたは複数の読み出し用共振器と、読み出し用共振器の共振周波数に対応した特性を有するフィルタ共振器と、読み出し共振器とフィルタ共振器との間に配置され、読み出し共振器と前記フィルタ共振器とを電気的および磁氣的に結合させるカプラ回路と、共通の観測用線路と、を備える。このフィルタ回路は、フィルタ共振器の共振を利用した読み出し周波数付近での

バンドパスフィルタ特性と、電気的および磁氣的なカプラ回路における干渉を利用した量子ビット周波数付近でのノッチフィルタ特性とを併せ持つ。

[0026] 本発明のさらに別の態様は、フィルタ回路の製造方法である。この方法は、読み出し共振器を形成するステップと、フィルタ共振器を形成するステップと、読み出し共振器を、データ量子ビットと結合させるステップと、フィルタ共振器を、観測用線路と結合させるステップと、読み出し共振器とフィルタ共振器とを、キャパシティブ結合およびインダクティブ結合を並列に用いて電気磁氣的に結合させるステップと、を含む。

[0027] 本発明のさらに別の態様は、フィルタ回路の組み立て方法である。この方法は、データ量子ビットと結合する読み出し共振器部品を与えるステップと、観測用線路と結合するフィルタ共振器部品を与えるステップと、読み出し共振器部品とフィルタ共振器部品とを、キャパシティブ結合およびインダクティブ結合を並列に用いて、電気磁氣的に結合するように組み立てるステップと、を含む。

[0028] 本発明のさらに別の態様は、量子ビットの観測用線路への分散読み出しにおける読み出し周波数のフィルタリング方法である。この方法は、前述のいずれかに記載のフィルタ回路を用いて、読み出し共振器の読み出し周波数付近のみを透過させるバンドパスフィルタリングを行うステップと、量子ビットの観測用線路へのエネルギー緩和を抑制するノッチフィルタリングを行うステップと、を含む。

[0029] 本発明のさらに別の態様は、量子ビットの観測用線路への分散読み出し方法である。この方法は、前述のいずれかに記載のフィルタ回路を用いて、量子ビットの電磁界モードを、読み出し共振器の電磁界モードと結合させるステップと、読み出し共振器を観測用線路に結合させるステップと、を含む。

[0030] なお、以上の構成要素の任意の組合せ、本開示の表現を方法、装置、システム、記録媒体、コンピュータプログラムなどの間で変換したものもまた、本開示の態様として有効である。

発明の効果

[0031] 本発明によれば、読み出し共振器の読み出し周波数付近のみを透過させるバンドパスフィルタ機能と、量子ビットの観測用線路へのエネルギー緩和を抑制するノッチフィルタ機能とを両立するフィルタ回路を実現することができる。

図面の簡単な説明

[0032] [図1]第1の実施の形態に係るフィルタ回路の模式図である。

[図2]図1の回路の具体的な構成例であるフィルタ回路の模式図である。

[図3]図1の回路の別の具体的な構成例であるフィルタ回路の模式図である。

[図4]第1の実施の形態に係るさらに別のフィルタ回路の模式図である。

[図5]図4のフィルタ回路の実装例を示す図である。

[図6]第1の実施の形態に係るさらに別のフィルタ回路の模式図である。

[図7]第2の実施の形態に係る量子デバイスの模式図である。

[図8]図2のフィルタ回路の透過信号の周波数特性を示す図である。

[図9]シミュレーションで求められた量子ビットの輻射緩和寿命を示す図である。

[図10]超伝導量子ビットの4多重読み出しに用いる、内在的ノッチを備えたフィルタ回路の実装例を示す図である。

[図11]図10の第1量子ビット付近の拡大図である。

[図12]第1量子ビットに関する輻射緩和時間の周波数依存性を示す図である。

[図13]第2量子ビットに関する輻射緩和時間の周波数依存性を示す図である。

[図14]第3量子ビットに関する輻射緩和時間の周波数依存性を示す図である。

[図15]第4量子ビットに関する輻射緩和時間の周波数依存性を示す図である。

[図16]多芯伝送線路の模式図である。

発明を実施するための形態

[0033] [第 1 の実施の形態]

図 1 に、第 1 の実施の形態に係るフィルタ回路 1 を模式的に示す。フィルタ回路 1 は、読み出し共振器 1 1 と、フィルタ共振器 1 2 と、を備える。読み出し共振器 1 1 は、外部のデータ量子ビットと結合する。フィルタ共振器 1 2 は、外部の観測用線路と結合する。読み出し共振器 1 1 およびフィルタ共振器 1 2 は、キャパシティブ結合およびインダクティブ結合を並列に用いて、電気磁氣的に結合されている。フィルタ共振器 1 2 は、読み出し共振器 1 1 の読み出し周波数付近を透過させるバンドパスフィルタであり、個別フィルタ共振器として機能する。

[0034] 読み出し共振器 1 1 とフィルタ共振器 1 2 とからなる共振器の組を、キャパシティブ結合およびインダクティブ結合を並列に用いて電気磁氣的に結合させることで、内在的なノッチフィルタを実現できる。以下、このような、共振器の組をキャパシティブ結合およびインダクティブ結合を並列に用いて電気磁氣的に結合させた回路モデルを、「集中定数回路モデル」と呼ぶ。

[0035] 本実施の形態の動作原理を説明する。上記の結合回路のキャパシティブ結合およびインダクティブ結合をそれぞれ C_f および L_f とすると、共振周波数 $\omega_f = 1 / \sqrt{C_f L_f}$ において、結合回路部分 1 3 のインピーダンスが無限大となる。従って、この周波数では、読み出し共振器 1 1 とフィルタ共振器 1 2 は、分離された回路として振る舞う。その結果、データ量子ビットから観測用線路への信号伝達が阻害され、回路全体としてストップバンドフィルタの機能を有する。読み出し共振器 1 1 の周波数では、結合回路のインピーダンスは有限であるため、読み出し共振器 1 1 と観測用線路との結合は残る。これにより、フィルタ共振器 1 2 (すなわち、個別パーセルフィルタ回路) で読み出し共振器周波数を弁別しつつ、同時に電気磁氣的結合回路によりストップバンドを有する回路を構成することができる。

[0036] この実施の形態の実現例として、量子ビット周波数でノッチフィルタの機能を果たすものを内在的に追加するものがある。この場合、結合回路部分 1 3 のインダクティブ結合は、読み出し共振器 1 1 と、フィルタ共振器 1 2 と

の相互インダクタンスにより実現する。この実現例によれば、読み出し共振器 1 1 およびフィルタ共振器 1 2 以外に特別なハードウェアを追加する必要がなく、元々の個別パーセルフィルタ（フィルタ共振器 1 2）によるバンドパス的な読み出し周波数フィルタリングをそのまま活用して、ノッチの機能をもたせることが可能となる。その結果、読み出し共振器をより強く観測用線路と結合させた際も、量子ビットの緩和の抑制が可能となり、高速な読み出しを実現することができる。本発明は、従来のバンドパス型の個別パーセルフィルタで不十分であった量子ビットの緩和抑制の機能を改善できる。

[0037] さらに、この実現例によれば、物理的な回路面積を増加させることなく所望のフィルタ特性を追加することができる。すなわち、従来の手法では、追加のフィルタ性能を得るためには、追加の回路面積が必要となる。しかし本実施の形態の内在的な実装手法はこの点を解決し、超伝導量子ビットチップの集積化を容易にする。

[0038] 図 2 に、図 1 の回路の具体的な構成例としてのフィルタ回路 2 を模式的に示す。フィルタ回路 2 は、読み出し共振器 1 1 と、フィルタ共振器 1 2 と、多芯伝送線路 2 0 と、を備える。図 2 の例では、読み出し共振器 1 1 およびフィルタ共振器 1 2 は、ともに $1/4$ 波長共振器で構成される。

[0039] フィルタ回路 2 の読み出し共振器 1 1 は、第 1 読み出し共振器部分 1 1 a と、第 2 読み出し共振器部分 1 1 b と、から構成される。第 1 読み出し共振器部分 1 1 a は、第 1 端部 1 1 a 1 と、第 2 端部 1 1 a 2 と、を備える。第 2 読み出し共振器部分 1 1 b は、第 1 端部 1 1 b 1 と、第 2 端部 1 1 b 2 と、を備える。読み出し共振器 1 1 の第 1 読み出し共振器部分 1 1 a の第 1 端部 1 1 a 1 は、データ量子ビットに接続される。読み出し共振器 1 1 の第 2 読み出し共振器部分 1 1 b の第 1 端部 1 1 b 1 は、接地される。

[0040] フィルタ回路 2 のフィルタ共振器 1 2 は、第 1 フィルタ共振器部分 1 2 a と、第 2 フィルタ共振器部分 1 2 b と、から構成される。第 1 フィルタ共振器部分 1 2 a は、第 1 端部 1 2 a 1 と、第 2 端部 1 2 a 2 と、を備える。第 2 フィルタ共振器部分 1 2 b は、第 1 端部 1 2 b 1 と、第 2 端部 1 2 b 2 と

、を備える。フィルタ共振器 1 2 の第 1 フィルタ共振器部分 1 2 a の第 1 端部 1 2 a 1 は、観測用線路に接続される。フィルタ共振器 1 2 の第 2 フィルタ共振器部分 1 2 b の第 1 端部 1 2 b 1 は、接地される。

[0041] 多芯伝送線路 2 0 は、第 1 芯線 2 1 と、第 2 芯線 2 2 と、を備える。多芯伝送線路 2 0 は、読み出し共振器 1 1 とフィルタ共振器 1 2 との間に配置される。より具体的には、多芯伝送線路 2 0 の第 1 芯線 2 1 は、読み出し共振器 1 1 の第 1 読み出し共振器部分 1 1 a の第 2 端部 1 1 a 2 と、第 2 読み出し共振器部分 1 1 b の第 2 端部 1 1 b 2 と、を接続する。多芯伝送線路 2 0 の第 2 芯線 2 2 は、フィルタ共振器 1 2 の第 1 フィルタ共振器部分 1 2 a の第 2 端部 1 2 a 2 と、第 2 フィルタ共振器部分 1 2 b の第 2 端部 1 2 b 2 と、を接続する。このようにして、多芯伝送線路 2 0 は、読み出し共振器 1 1 の第 1 読み出し共振器部分 1 1 a の第 2 端部 1 1 a 2 およびフィルタ共振器 1 2 の第 1 フィルタ共振器部分 1 2 a の第 2 端部 1 2 a 2 と、読み出し共振器 1 1 の第 2 読み出し共振器部分 1 1 b の第 2 端部 1 1 b 2 およびフィルタ共振器 1 2 の第 2 フィルタ共振器部分 1 2 b の第 2 端部 1 2 b 2 と、の間に設置される。この構成では、磁気的な結合を得るために、多芯伝送線路内の第 1 芯線 2 1 ・第 2 芯線 2 2 間の相互インダクタンスを利用する。

[0042] この実施例によれば、多芯伝送線路を用いて、内在的なノッチフィルタ回路を実現することができる。

[0043] 図 3 に、図 1 の回路の別の具体的な構成例としてのフィルタ回路 3 を模式的に示す。フィルタ回路 3 は、図 2 のフィルタ回路 2 の構成に追加して、多芯伝送線路 2 0 に隣接して芯線間にシャントキャパシタ 3 0 が配置される。この構成でも、磁気的な結合を得るために、多芯伝送線路 2 0 を利用する。電気的な結合を得るために、多芯伝送線路 2 0 およびシャントキャパシタ 3 0 のキャパシタンスを利用する。シャントキャパシタ 3 0 を追加することにより、多芯伝送線路部のキャパシタンスが十分でない場合や、電気的な結合を個別に調整したい場合の対応が可能となる。

[0044] 次に、図 2 に示した分布定数的な回路構成を用いることで、図 1 の集中定

数回路モデルを再現できることを説明する。多芯伝送線路解析（例えば、非特許文献 7 参照）を用いて、この分布回路のパラメータから図 1 の集中定数回路のパラメータへのマッピングを行う。これにより、両回路が、目的とする周波数範囲において、同じ電氣的応答を高い精度で持つことを示す。さらに、超伝導量子回路に適した物理的サイズの多芯伝送線路を使って、集中定数回路のパラメータに望ましい値を実現できることを示す。

[0045] まず、基本的な伝送線路の量を定義する。無損失伝送線路の振る舞いは、単位長さあたりのキャパシタンス C_l と、単位長さあたりのインダクタンス L_l によって記述することができる。等価的に、特性インピーダンス Z_0 と位相速度 v によって記述することもできる。

[数1]

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L_l}{C_l}} \text{ and } v = \frac{1}{\sqrt{L_l C_l}} \quad (0)$$

[0046] 一方の端が接地された全長 l の伝送線路は、基本共振周波数 $\omega_r = 2\pi/\lambda$ （ただし、 $\lambda/4 = l$ ）を持つ。この共振周波数付近では、伝送線路は、集中定数 LC 共振器としてモデル化できる。この場合、有効キャパシタンス C およびインダクタンスは、以下で与えられる。

[数2]

$$C = C_l l / 2, L = 8 L_l l / \pi^2 \quad (1)$$

[0047] 単芯伝送線路とは対照的に、多芯伝送線路には n 本の導体線路および 1 つのグラウンドリファレンス点を持つ。無損失の 2 芯伝送線路の場合、この線路は 6 つのパラメータ、すなわち、

導体線路 1 の、単位長さあたりのキャパシタンス $C_{l,1}$ 、

導体線路 2 の、単位長さあたりのキャパシタンス $C_{l,2}$ 、

導体線路 1 の、単位長さあたりのインダクタンス $L_{l,1}$ 、

導体線路 2 の、単位長さあたりのインダクタンス $L_{1,2}$ 、
 2 つの導体線路間の、単位長さあたりのキャパシタンス C_m 、
 2 つの導体線路間の、単位長さあたりのインダクタンス L_m 、
 によって記述される。

[0048] 図 2 では、単位長さあたりのキャパシタンスとグラウンドまでの単位長さあたりのインダクタンスは、すべての導体線路で同じとしている。また、 $C_1 \gg C_m$ としているが、これは多芯伝送線路の 2 本の導体線路が弱く結合している場合（弱結合仮定）に相当する（以下、「弱結合近似」ともいう）。この仮定は、多芯伝送線路部分においてそれぞれの芯線を伝わる信号に比べて他方の芯線へ漏れ出る信号が無視できるほど小さく、結合による摂動の影響が小さい場合に有効であり、超伝導量子回路のアプリケーションにおける典型的な結合強度の場合で成り立つ（例えば、非特許文献 8 参照）。この仮定の条件下でも、ノッチフィルタの共鳴周波数 ω_f は、解析的に求まる。

[0049] 上記の仮定が成り立つ場合、読み取り共振器 11 の第 1 読み出し共振器部分 11a、第 2 読み出し共振器部分 11b、および多芯伝送線路セクション 20 は、全体で、全長 $l_{r1-0} + l_c + l_{r1-G}$ の単一導体伝送線路として動作する。この線路は、その一端が接地されているため、 $\lambda/4 = l_{r1-0} + l_c + l_{r1-G}$ で $\lambda/4$ 共振する。

[0050] 同様に、フィルタ共振器 12 の第 1 フィルタ共振器部分 12a、第 2 フィルタ共振器部分 12b、および多芯伝送線路セクション 20 は、全体で、全長 $l_{r2-0} + l_c + l_{r2-G}$ の単一導体伝送線路として動作する。この線路は、 $\lambda/4 = l_{r2-0} + l_c + l_{r2-G}$ で $\lambda/4$ 共振する。すると、式 (1) は、図 2 の 2 つの接地 LC 共振器のキャパシタンスとインダクタンスへのマッピングを与える。

[0051] 以上から、式 (1) は、図 1 の 2 つの接地 LC 共振器のキャパシタンスとインダクタンスへのマッピングを与える。

[0052] 結合キャパシタンス C_f と結合インダクタンス L_f へのマッピングを求めるため、まず、図 2 の回路のデータ量子ビットノードと検出器ノードとの間の

伝達インピーダンス Z_{12} がゼロになる周波数を求める。この周波数は、図 1 の集中定数等価回路の伝達インピーダンス Z'_{12} もゼロになると仮定することと、最低周波数の解を周波数 $\omega_f = 1/\sqrt{C_f L_f}$ と関連付ける。

[0053] 次に、図 1 の結合回路素子のインピーダンス $Z_f = \sqrt{L_f/C_f}$ を求める。これは次式を満たす。

[数3]

$$Z_f = \frac{2iZ_{r1}(\omega_f)Z_{r2}(\omega_f)}{\omega_f} \left[\frac{dZ'_{12}}{d\omega} \Big|_{\omega=\omega_f} \right]^{-1} \quad (2)$$

ここで、 $Z_{r1}(\omega_f)$ および $Z_{r2}(\omega_f)$ は、周波数 ω_f で評価される集中定数共振器 $r1$ および $r2$ のインピーダンスである。図 2 の回路を使用して Z_f を求めるには、この式の右辺を図 2 の回路にマッピングする。集中定数共振器 $r1$ および $r2$ のキャパシタンスおよびインダクタンスは、式 (1) を用いて求められる。集中定数等価回路の伝達インピーダンス Z'_{12} は、共振周波数付近で図 2 の分布定数回路の伝達インピーダンス Z_{12} と同様に振る舞うと仮定し、 Z'_{12} に Z_{12} を代入する。これにより、右辺が図 2 の回路のパラメータのみで記述可能となる。

[0054] キャパシタンス C_m およびインダクタンス L_m は、周波数 ω_f およびインピーダンス Z_f によって完全に決定されるので、これで図 1 の回路と図 2 の回路との対応付けが完了する。

[0055] 多芯伝送線路が弱結合近似できる場合、ノッチ周波数 ω_f の解析式は以下のように求めることができる。例えば非特許文献 8 を参照すると、弱結合の仮定における伝達インピーダンス Z_{12} の解析式が求まる。ここで、各変数は、以下のように定義する。

[数4]

$$\tilde{t}_1 = \frac{\ell_{r1-G}}{v} + \frac{\ell_c}{2v_c}, \quad \tilde{t}_2 = \frac{\ell_{r2-G}}{v} + \frac{\ell_c}{2v_c}, \quad v_c = \frac{1}{\sqrt{L_l(C_l+C_m)}}, \quad Z_c = \sqrt{\frac{L_l}{C_l+C_m}}, \quad Z_m = \sqrt{\frac{L_m}{C_m}} \quad (3)$$

この伝達インピーダンスがゼロになる場合について解くと、ノッチ周波数 ω_f に関する以下の式が得られる。

[数5]

$$\frac{1}{\text{sinc}(\omega_f \ell_c / v_c)} \left[\frac{\cos(2\omega_f \tilde{t}_1) + \cos(2\omega_f \tilde{t}_2)}{1 + \cos(2\omega_f [\tilde{t}_1 + \tilde{t}_2])} \right] = \frac{Z_c^2 + Z_m^2}{Z_c^2 - Z_m^2} \quad (4)$$

[0056] すなわち、

多芯伝送線路20の長さを l_c 、

多芯伝送線路20を伝搬する波の伝搬速度を v_c 、

多芯伝送線路20の第1芯線21および第2芯線22の、単位長さあたりのキャパシタンスを C_l 、

多芯伝送線路20の第1芯線21および第2芯線22の、単位長さあたりのインダクタンスを L_l 、

多芯伝送線路20の第1芯線21と第2芯線22との間の、単位長さあたりのキャパシタンスを C_m 、

多芯伝送線路20の第1芯線21と第2芯線22との間の、単位長さあたりのインダクタンスを L_m 、

読み出し共振器11の第2読み出し共振器部分11bの長さを l_{r1-G} 、

フィルタ共振器12の第2フィルタ共振器部分12bの長さを l_{r2-G} 、

多芯伝送線路20の長さを l_c 、

とし、分布定数回路の変数を

[数4]

$$\tilde{t}_1 = \frac{\ell_{r1-G}}{v} + \frac{\ell_c}{2v_c}, \quad \tilde{t}_2 = \frac{\ell_{r2-G}}{v} + \frac{\ell_c}{2v_c}, \quad v_c = \frac{1}{\sqrt{L_l(C_l + C_m)}}, \quad Z_c = \sqrt{\frac{L_l}{C_l + C_m}}, \quad Z_m = \sqrt{\frac{L_m}{C_m}} \quad (3)$$

としたとき、

図2のフィルタ回路2のノッチ周波数 ω_f は、次式を満たすように定められる。

[数5]

$$\frac{1}{\text{sinc}(\omega_f \ell_c / v_c)} \left[\frac{\cos(2\omega_f \tilde{\tau}_1) + \cos(2\omega_f \tilde{\tau}_2)}{1 + \cos(2\omega_f [\tilde{\tau}_1 + \tilde{\tau}_2])} \right] = \frac{Z_c^2 + Z_m^2}{Z_c^2 - Z_m^2} \quad (4)$$

[0057] この実施の形態によれば、弱結合で近似した多芯伝送線路の系において、パラメータを具体的に定めて、フィルタ回路を実現できる。

[0058] 図4に、第1の実施の形態に係るさらに別のフィルタ回路4を模式的に示す。フィルタ回路4は、読み出し共振器11と、フィルタ共振器12と、キャパシタ30と、インダクタ31と、を備える。読み出し共振器11は、第1読み出し共振器部分11aと、第2読み出し共振器部分11bと、から構成される。フィルタ共振器12は、第1フィルタ共振器部分12aと、第2フィルタ共振器部分12bと、から構成される。キャパシタ30およびインダクタ31は、第1読み出し共振器部分11aおよび第1フィルタ共振器部分12aと、第2読み出し共振器部分11bおよび第2フィルタ共振器部分12bと、の間に設置される。すなわち、フィルタ回路4は、図2のフィルタ回路2の多芯伝送線路20に代えて、キャパシタ30およびインダクタ31を備えている。フィルタ回路4のその他の構成は、フィルタ回路2と同様である。読み出し共振器11とフィルタ共振器12との間のキャパシティブ結合およびインダクティブ結合は、それぞれ、キャパシタ30およびインダクタ31により実現される。

[0059] 図5に、図4のフィルタ回路4の実装例を示す。

[0060] この実施の形態によれば、回路素子としてのキャパシタとインダクタとを用いて、所望の機能を実現するフィルタ回路を作製することができる。

[0061] 図6に、第1の実施の形態に係るさらに別のフィルタ回路5を模式的に示す。フィルタ回路5は、読み出し共振器11と、フィルタ共振器12と、多芯伝送線路20と、キャパシタ30と、インダクタ31と、を備える。多芯伝送線路20は、読み出し共振器11とフィルタ共振器12との間に配置される。キャパシタ30およびインダクタ31は、多芯伝送線路20に隣接し

て配置される。

[0062] フィルタ回路5は、図2のフィルタ回路2と、図4のフィルタ回路4と、を組み合わせた構造を持つ。読み出し共振器11とフィルタ共振器12との間のキャパシティブ結合およびインダクティブ結合は、多芯伝送線路20と、キャパシタ30およびインダクタ31と、により実現される。

[0063] この実施例によれば、構成の自由度を上げることができる。

[0064] [追加的な実施例]

前述の実施例では、図2のフィルタ回路2のノッチ周波数 ω_f は、式(4)によって陰関数的に表されていた。しかし実用的には、ノッチ周波数は明示的に表されていた方が使いやすい場合も多い。以下では、そのような実施例について説明する。

[0065] 以下、図2の多芯伝送線路2に代えて、図16の多芯伝送線路200を使うものとする。多芯伝送線路200の単位長さあたりのキャパシタンスを C_c 、多芯伝送線路200の単位長さあたりのインダクタンスを L_c 、多芯伝送線路200の第1芯線201と第2芯線202との間の単位長さあたりのキャパシタンスを C_m 、多芯伝送線路200の第1芯線201と第2芯線202との間の単位長さあたりのインダクタンスを L_m とする。分布定数回路の変数を

[数6]

$$v_{0c} = \frac{1}{\sqrt{L_c(C_c + C_m)}}, \quad Z_{0c} = \sqrt{\frac{L_c}{C_c + C_m}}, \quad (5)$$

としたとき、

図16の多芯伝送線路200を用いたフィルタ回路のノッチ周波数 ω_f は、次式を満たすように定められる。

[数7]

$$\frac{1}{\text{sinc}(\omega_f \ell_c / v_{0c})} \left[\frac{\cos(2\omega_f \tilde{\tau}_1) + \cos(2\omega_f \tilde{\tau}_2)}{1 + \cos(2\omega_f [\tilde{\tau}_1 + \tilde{\tau}_2])} \right] = \frac{Z_{0c}^2 + Z_{0m}^2}{Z_{0c}^2 - Z_{0m}^2} \quad (6)$$

[0066] 一様媒質中の多芯伝送線路や、多芯コプラナ線路のように線路の上下の形

状が対称かつそれぞれが一様媒質で構成される多芯伝送線路においては、非常により精度で以下の近似式が成り立つ。

[数8]

$$Z_{0c}^2 = Z_{0m}^2 \quad (7)$$

これは、芯線同士が結合した多芯伝送線路は、幾何学形状が非対称であるような極端な場合を除けば、均質媒質中の多芯伝送線路のように振る舞うからである。

[0067] 式(6)および式(7)より、以下が成立する。

[数9]

$$1 + \cos(2\omega_f[\tilde{\tau}_1 + \tilde{\tau}_2]) = 0 \quad (8)$$

従って、ノッチ周波数 ω_f は、以下のように明示的に表すことができる。

[数10]

$$\omega_f = \frac{\pi}{2(\tilde{\tau}_1 + \tilde{\tau}_2)} \quad (9)$$

[0068] この実施例によれば、ノッチ周波数を明示的に表すことができるので、フィルタ回路の設計や実用上の自由度を上げることができる。

[0069] 式(7)はさらに、読み出し共振器とフィルタ共振器との結合定数 J に対しても、以下のような明示的な表示を与える。

[数11]

$$J = \bar{\omega}_{rp} \frac{\pi^2}{32} \frac{\left(\frac{\bar{\omega}_{rp}}{\omega_f} - \frac{\omega_f}{\bar{\omega}_{rp}} \right)}{\cos\left(\frac{\pi\omega_f}{2\bar{\omega}_{rp}} \right)} \left(\frac{C_m}{C_c + C_m} \right) \sin\left(\frac{\omega_f \ell_c}{v_c} \right) \quad (10)$$

ただし、結合定数 J は、以下の相互作用ハミルトニアン H_{int} によって定まる、結合の強さを表す定数である。

[数12]

$$H_{int} = \hbar J (\hat{a}_r^\dagger \hat{a}_p + \hat{a}_r \hat{a}_p^\dagger) \quad (11)$$

ここで、

[数13]

$$\hat{a}_r^\dagger$$

は読み出し共振器の生成演算子、

[数14]

$$\hat{a}_p^\dagger$$

はフィルタ共振器の生成演算子、

[数15]

$$\hat{a}_r$$

は読み出し共振器の消滅演算子、

[数16]

$$\hat{a}_p$$

はフィルタ共振器の消滅演算子である。

さらに、式（10）の各変数は以下のように定義される。

[数17]

$$\bar{\omega}_{rp} = \frac{\omega_r + \omega_p}{2}$$

[数18]

$$\omega_r = \frac{\pi \nu}{2 (\ell_{r1-o} + \ell_c + \ell_{r1-G})}$$

[数19]

$$\omega_p = \frac{\pi \nu}{2 (\ell_{r2-o} + \ell_c + \ell_{r2-G})}$$

[0070] この実施例によれば、結合自由度を明示的に表すことができるので、フィルタ回路の設計や実用上の自由度を上げることができる。

[0071] [第2の実施の形態]

図7に、第2の実施の形態に係る量子デバイス80を模式的に示す。量子デバイス80は、データ量子ビット81と、観測用線路82と、フィルタ回路1と、を備える。

[0072] フィルタ回路1は、読み出し共振器11と、フィルタ共振器12と、を備える。読み出し共振器11は、外部のデータ量子ビットと結合する。フィルタ共振器12は、外部の観測用線路と結合する。読み出し共振器11およびフィルタ共振器12は、キャパシティブ結合およびインダクティブ結合を並列に用いて、電気磁氣的に結合されている。フィルタ共振器12は、読み出し共振器11の読み出し周波数付近を透過させるバンドパスフィルタであり、個別フィルタ共振器として機能する。

[0073] 読み出し共振器11は、データ量子ビット81と結合し、データ量子ビット81の状態を読み出す。観測用線路82は、読み出し共振器11と結合し、読み出し共振器11によって読み出されたデータ量子ビット81の情報を観測機器に伝送する。

[0074] 前述のように、フィルタ回路1では、読み出し共振器11とフィルタ共振器12とが、キャパシティブ結合およびインダクティブ結合を並列に用いて電気磁氣的に結合させることで、ノッチフィルタが実現されている。その他のフィルタ回路1の詳細な動作および効果は、前述の通りである。

[0075] 本実施の形態によれば、読み出し共振器の読み出し周波数付近のみを透過させるバンドパスフィルタ機能と、量子ビットの観測用線路への緩和を抑制するノッチフィルタ機能とを両立するフィルタ回路を用いた量子デバイスを実現できる。

[0076] 図7の量子デバイス80は、以下のようにフィルタ回路としても捉えることができる。すなわちこのフィルタ回路80は、1つまたは複数のデータ量子ビット81と、これらの各データ量子ビットに対応する1つまたは複数の

読み出し用共振器 1 1 と、読み出し用共振器の共振周波数に対応した特性を有するフィルタ共振器 1 2 と、読み出し共振器とフィルタ共振器との間に配置され、読み出し共振器と前記フィルタ共振器とを電気的および磁氣的に結合させるカプラ回路 1 3 と、共通の観測用線路 8 2 と、を備える。このフィルタ回路 8 0 は、フィルタ共振器 1 2 の共振を利用した読み出し周波数付近でのバンドパスフィルタ特性と、電気的および磁氣的なカプラ回路における干渉を利用した量子ビット周波数付近でのノッチフィルタ特性とを併せ持つ。

[0077] [第 3 の実施の形態]

第 3 の実施の形態は、量子コンピュータである。この量子コンピュータは、第 2 の実施の形態の量子デバイスを備える。

[0078] この実施の形態によれば、読み出し共振器の読み出し周波数付近のみを透過させるバンドパスフィルタ機能と、量子ビットの観測用線路への緩和を抑制するノッチフィルタ機能とを両立するフィルタ回路を用いた量子コンピュータを実現できる。

[0079] [第 4 の実施の形態]

第 4 の実施の形態は、フィルタ回路の製造方法である。この方法は、読み出し共振器を形成するステップ S 1 と、フィルタ共振器を形成するステップ S 2 と、読み出し共振器を、データ量子ビットと結合させるステップ S 3 と、フィルタ共振器を、観測用線路と結合させるステップ S 4 と、読み出し共振器とフィルタ共振器とを、キャパシティブ結合およびインダクティブ結合を並列に用いて電気磁氣的に結合させるステップ S 5 と、を含む。

[0080] この実施の形態によれば、読み出し共振器の読み出し周波数付近のみを透過させるバンドパスフィルタ機能と、量子ビットの観測用線路へのエネルギー緩和を抑制するノッチフィルタ機能とを両立するフィルタ回路を製造することができる。

[0081] [第 5 の実施の形態]

第 5 の実施の形態は、フィルタ回路の組み立て方法である。この方法は、

データ量子ビットと結合する読み出し共振器部品を与えるステップS 1 1と、観測用線路と結合するフィルタ共振器部品を与えるステップS 1 2と、読み出し共振器部品とフィルタ共振器部品とを、キャパシティブ結合およびインダクティブ結合を並列に用いて、電気磁氣的に結合するように組み立てるステップS 1 3と、を含む。

[0082] この実施の形態によれば、読み出し共振器部品とフィルタ共振器部品とを組み合わせて、フィルタ回路を組み立てることができる。また、読み出し共振器部品やフィルタ共振器部品を、部品ごとに、点検、修理、交換等することができる。

[0083] [第6の実施の形態]

第5の実施の形態は、量子ビットの観測用線路への分散読み出しにおける読み出し周波数のフィルタリング方法である。この方法は、前述のいずれかに記載のフィルタ回路を用いて、読み出し共振器の読み出し周波数付近のみを透過させるバンドパスフィルタリングを行うステップS 2 2と、量子ビットの観測用線路へのエネルギー緩和を抑制するノッチフィルタリングを行うステップS 2 3と、を含む。

[0084] この実施の形態によれば、量子ビットを観測用線路に分散読み出しする際に、読み出し共振器と観測用線路との結合を保ちつつ、量子ビットの観測用線路への緩和を抑制することができる。

[0085] [第7の実施の形態]

第7の実施の形態は、量子ビットの分散読み出し方法である。この方法は、前述のいずれかに記載のフィルタ回路を用いて、量子ビットの電磁界モードを、読み出し共振器の電磁界モードと結合させるステップS 3 1と、読み出し共振器を観測用線路に結合させるステップS 3 2と、を含む。

[0086] この実施の形態によれば、パーセル効果を抑制して、量子ビットの分散読み出しを行うことができる。

[0087] 以上、本開示を実施の形態を基に説明した。この実施の形態は例示であり、それらの各構成要素や各処理プロセスの組合わせに、色々な変形例が可能

なこと、またそうした変形例も本開示の範囲にあることは当業者に理解されるところである。

[0088] [検証]

本発明者らは、以上説明した実施の形態の有効性を確認するために、以下の検証を行った。

[0089] 先ず、超伝導回路への応用に使われる周波数範囲にわたってこれらの回路の伝達インピーダンスを比較することにより、上記のマッピングの精度を検証した。シミュレーションに使用したパラメータ値を表1に示す。

[表1]

Z_0 (Ω)	65	v (m/s)	1.2×10^8	ℓ_c (μm)	800	ℓ_{r1-0} (μm)	1440	ℓ_{r1-G} (μm)	2720	ℓ_{r2-0} (μm)	2320	ℓ_{r2-G} (μm)	1840	L_m (nH/m)	3.96	C_m (fF/m)	40
-----------------------	----	--------------	-------------------	-------------------------------	-----	------------------------------------	------	------------------------------------	------	------------------------------------	------	------------------------------------	------	-----------------	------	-----------------	----

[0090] 図8に、図2の「データ量子ビットへ」と書かれたポートから「観測用線路へ」と書かれたポートへの透過信号の周波数特性を示す。図8には、図1

の集中定数回路モデルの厳密解（実線）と、図2の多芯伝送線路の弱結合近似解（一点鎖線）とを示す。両者の周波数特性はよく一致している。さらに、超伝導量子ビットの読み出しに典型的に用いられるパラメータ領域において、弱結合の仮定が十分妥当であることが分かる。縦破線は式（4）から求まるノッチ周波数を示す。ノッチ周波数が解析解の周波数とよく一致していることが分かる。

[0091] 図9に、シミュレーションで求められた量子ビットの輻射緩和寿命を示す。用いた回路のパラメータは、以下の通りである。すなわち、量子ビット周波数 $f_{qub} = 4.75 \text{ GHz}$ 、読み出し共振器周波数 $f_{res} = 6 \text{ GHz}$ 、読み出し共振器外部結合強度 $/2\pi = 50 \text{ MHz}$ 、量子ビット・読み出し共振器間結合 $g = 125 \text{ MHz}$ 、読み出し共振器・フィルタ共振器間結合 $J = 30 \text{ MHz}$ 。図9では内在的ノッチフィルタを含んだ回路（ノッチあり）と、個別パーセルフィルタのみの読み出し回路（ノッチなし）における量子ビット寿命を、同一の結合定数で比較している。

[0092] 図9に示される通り、本実施の形態の回路では、ノッチを利用することで、 4 GHz 以上の量子ビット周波数において、従来の個別パーセルフィルタを用いた回路よりも十分長い寿命が達成可能であることが分かる。

[0093] 本実施の形態のノッチフィルタリングの機能を最適に利用するためには、ノッチフィルタの周波数を量子ビット周波数の十分近くに合わせ込む必要がある。最適化のために十分な数のパラメータの自由度があるため、読み出し共振器周波数や読み出し共振器とフィルタ共振器間の結合強度を保ったまま、ノッチフィルタの周波数のみを調整することが可能である。

[0094] 次に、図2に示す分布定数回路の実験的な実現手法について述べる。以下に示すように、図2の構成のフィルタ回路を実験的に実現することにより、本発明のノッチフィルタが内在的な形で実装できることが分かる。

[0095] 図10に、超伝導量子ビットの4多重読み出しに用いる、内在的ノッチを備えたフィルタ回路6の実装例を示す。フィルタ回路6は、第1の読み出し共振器111と、第2の読み出し共振器112と、第3の読み出し共振器1

1 3 と、第 4 の読み出し共振器 1 1 4 と、第 1 のフィルタ共振器 1 2 1 と、第 2 のフィルタ共振器 1 2 2 と、第 3 のフィルタ共振器 1 2 3 と、第 4 のフィルタ共振器 1 2 4 と、を備える。第 1 の読み出し共振器 1 1 1 は、第 1 量子ビット 9 1 と結合する。第 2 の読み出し共振器 1 1 2 は、第 2 量子ビット 9 2 と結合する。第 3 の読み出し共振器 1 1 3 は、第 3 量子ビット 9 3 と結合する。第 4 の読み出し共振器 1 1 4 は、第 4 量子ビット 9 4 と結合する。第 1 のフィルタ共振器 1 2 1、第 2 のフィルタ共振器 1 2 2、第 3 のフィルタ共振器 1 2 3、第 4 のフィルタ共振器 1 2 4 は、共通の 1 本の観測用線路と結合する。

[0096] 図 1 1 は、図 1 0 の、第 1 量子ビット 9 1 付近の拡大図である。第 1 の読み出し共振器 1 1 1 は、第 1 読み出し共振器部分 1 1 1 a と、第 2 読み出し共振器部分 1 1 1 b と、を備える。第 1 のフィルタ共振器 1 1 1 は、第 1 フィルタ共振器部分 1 2 1 a と、第 2 フィルタ共振器部分 1 2 1 b と、を備える。多芯伝送線路 2 0 が、第 1 の読み出し共振器 1 1 1 と、第 1 のフィルタ共振器 1 1 2 との間に配置される。

[0097] 図 1 2 に、第 1 量子ビット 9 1 に関する輻射緩和時間 T_1 の周波数依存性を示す。図 1 3 に、第 2 量子ビット 9 2 に関する輻射緩和時間 T_1 の周波数依存性を示す。図 1 4 に、第 3 量子ビット 9 3 に関する輻射緩和時間 T_1 の周波数依存性を示す。図 1 5 に、第 4 量子ビット 9 4 に関する輻射緩和時間 T_1 の周波数依存性を示す。いずれの図でも、クロス印は実験結果を示し、丸印はシミュレーション結果を示す。実験結果とシミュレーションとは、よく一致している。図 1 2 ~ 1 5 に示されるように、いずれの量子ビットも、周波数 8.2 GHz ~ 9 GHz 付近で、輻射緩和時間にピークがあることが分かる。このように、フィルタ回路 6 により、各個別パーセルフィルタがノッチフィルタとしての機能も併せ持つことができ、所望のフィルタ機能が実現できることを実験的に検証できた。

[0098] 実施の形態及び変形例を抽象化した技術的思想を理解するにあたり、その技術的思想は実施の形態及び変形例の内容に限定的に解釈されるべきではな

い。前述した実施の形態及び変形例は、いずれも具体例を示したものにすぎず、構成要素の変更、追加、削除等の多くの設計変更が可能である。実施の形態では、このような設計変更が可能な内容に関して、「実施の形態」との表記を付して強調している。しかしながら、そのような表記のない内容でも設計変更が許容される。

産業上の利用可能性

[0099] 本開示は、フィルタ回路、量子デバイスおよび量子コンピュータに利用可能である。

符号の説明

[0100] 1・・・フィルタ回路、
2・・・フィルタ回路、
3・・・フィルタ回路、
4・・・フィルタ回路、
5・・・フィルタ回路、
6・・・フィルタ回路、
11・・・読み出し共振器、
11a・・・第1読み出し共振器部分、
11a1・・・第1端部、
11a2・・・第2端部、
11b・・・第2読み出し共振器部分、
11b1・・・第1端部、
11b2・・・第2端部、
12・・・フィルタ共振器、
12a・・・第1フィルタ共振器部分、
12a1・・・第1端部、
12a2・・・第2端部、
12b・・・第2フィルタ共振器部分、
12b1・・・第1端部、

- 1 2 b 2 . . 第 2 端部、
- 1 3 . . 結合回路部分、
- 1 4 . . キャパシタ、
- 1 5 . . インダクタ、
- 2 0 . . 多芯伝送線路、
- 2 1 . . 第 1 芯線、
- 2 2 . . 第 2 芯線、
- 3 0 . . キャパシタ、
- 3 1 . . インダクタ、
- 8 0 . . 量子デバイス、
- 8 1 . . データ量子ビット、
- 8 2 . . 観測用線路、
- 9 1 . . 第 1 量子ビット、
- 9 2 . . 第 2 量子ビット、
- 9 3 . . 第 3 量子ビット、
- 9 4 . . 第 4 量子ビット
- 1 1 1 . . 第 1 の読み出し共振器、
- 1 1 1 a . . 第 1 の読み出し共振器の第 1 読み出し共振器部分、
- 1 1 1 b . . 第 1 の読み出し共振器の第 2 読み出し共振器部分、
- 1 1 2 . . 第 2 の読み出し共振器、
- 1 1 3 . . 第 3 の読み出し共振器、
- 1 1 4 . . 第 4 の読み出し共振器、
- 1 2 1 . . 第 1 のフィルタ共振器、
- 1 2 1 a . . 第 1 のフィルタ共振器の第 1 フィルタ共振器部分、
- 1 3 1 b . . 第 1 のフィルタ共振器の第 2 フィルタ共振器部分、
- 1 2 2 . . 第 2 のフィルタ共振器、
- 1 2 3 . . 第 3 のフィルタ共振器、
- 1 2 4 . . 第 4 のフィルタ共振器

- 200・・・多芯伝送線路、
- S1・・・読み出し共振器を形成するステップ、
- S2・・・フィルタ共振器を形成するステップ、
- S3・・・読み出し共振器を、データ量子ビットと結合させるステップ、
- S4・・・フィルタ共振器を、観測用線路と結合させるステップ、
- S5・・・読み出し共振器とフィルタ共振器とを、キャパシティブ結合およびインダクティブ結合を並列に用いて電気磁氣的に結合させるステップ、
- S11・・・データ量子ビットと結合する読み出し共振器部品を与えるステップ、
- S12・・・観測用線路と結合するフィルタ共振器部品を与えるステップ、
- S13・・・読み出し共振器部品とフィルタ共振器部品とを、キャパシティブ結合およびインダクティブ結合を並列に用いて、電気磁氣的に結合するように組み立てるステップ、
- S21・・・読み出し共振器の読み出し周波数付近のみを透過させるバンドパスフィルタリングを行うステップ、
- S22・・・量子ビットの観測用線路へのエネルギー緩和を抑制するノッチフィルタリングを行うステップ、
- S31・・・量子ビットの電磁界モードを、読み出し共振器の電磁界モードと結合させるステップ、
- S32・・・読み出し共振器を観測用線路に結合させるステップ。

請求の範囲

- [請求項1] データ量子ビットと結合する読み出し共振器と、
観測用線路と結合するフィルタ共振器と、
を備え、
前記読み出し共振器と前記フィルタ共振器とは、キャパシティブ結合およびインダクティブ結合を並列に用いて、電気磁氣的に結合されていることを特徴とするフィルタ回路。
- [請求項2] 前記インダクティブ結合は、前記読み出し共振器と、前記フィルタ共振器との相互インダクタンスにより実現されることを特徴とする請求項1に記載のフィルタ回路。
- [請求項3] 前記読み出し共振器と前記フィルタ共振器との間に配置された多芯伝送線路を備え、
前記キャパシティブ結合およびインダクティブ結合は、前記多芯伝送線路により実現されることを特徴とする請求項1に記載のフィルタ回路。
- [請求項4] 前記読み出し共振器は、第1端部がデータ量子ビットに接続された第1読み出し共振器部分と、第1端部が接地された第2読み出し共振器部分と、から構成され、
前記フィルタ共振器は、第1端部が観測用線路に接続された第1フィルタ共振器部分と、第1端部が接地された第2フィルタ共振器部分と、から構成され、
前記多芯伝送線路は、前記第1読み出し共振器部分の第2端部および前記第1フィルタ共振器部分の第2端部と、前記第2読み出し共振器部分の第2端部および第2フィルタ共振器部分の第2端部と、の間に設置されることを特徴とする請求項3に記載のフィルタ回路。
- [請求項5] 前記多芯伝送線路の長さを l_c 、
前記多芯伝送線路を伝搬する波の伝搬速度を v_c 、
前記多芯伝送線路の第1芯線および第2芯線の、単位長さあたりの

キャパシタンスを C_l 、

前記多芯伝送線路の第1芯線および第2芯線の、単位長さあたりのインダクタンスを L_l 、

前記多芯伝送線路の第1芯線と第2芯線との間の、単位長さあたりのキャパシタンスを C_m 、

前記多芯伝送線路の第1芯線と第2芯線との間の、単位長さあたりのインダクタンスを L_m 、

前記読み出し共振器11の第2読み出し共振器部分の長さを l_{r1-G} 、

フィルタ共振器の第2フィルタ共振器部分の長さを l_{r2-G} 、

前記多芯伝送線路の長さを l_c 、

とし、分布定数回路の変数を

[数4]

$$\tilde{\tau}_1 = \frac{l_{r1-G}}{v} + \frac{l_c}{2v_c}, \quad \tilde{\tau}_2 = \frac{l_{r2-G}}{v} + \frac{l_c}{2v_c}, \quad v_c = \frac{1}{\sqrt{L_l(C_l+C_m)}}, \quad Z_c = \sqrt{\frac{L_l}{C_l+C_m}}, \quad Z_m = \sqrt{\frac{L_m}{C_m}} \quad (3)$$

としたとき、

ノッチ周波数 ω_f が次式

[数5]

$$\frac{1}{\text{sinc}(\omega_f l_c / v_c)} \left[\frac{\cos(2\omega_f \tilde{\tau}_1) + \cos(2\omega_f \tilde{\tau}_2)}{1 + \cos(2\omega_f [\tilde{\tau}_1 + \tilde{\tau}_2])} \right] = \frac{Z_c^2 + Z_m^2}{Z_c^2 - Z_m^2} \quad (4)$$

を満たすことを特徴とする請求項4に記載のフィルタ回路。

[請求項6]

前記ノッチ周波数 ω_f が次式

[数10]

$$\omega_f = \frac{\pi}{2(\tilde{\tau}_1 + \tilde{\tau}_2)} \quad (9)$$

で表されることを特徴とする請求項5に記載のフィルタ回路。

[請求項7] 前記読み出し共振器と前記フィルタ共振器との結合定数 J が次式

[数11]

$$J = \bar{\omega}_{rp} \frac{\pi^2}{32} \frac{\left(\frac{\bar{\omega}_{rp}}{\omega_f} - \frac{\omega_f}{\bar{\omega}_{rp}} \right)}{\cos\left(\frac{\pi\omega_f}{2\bar{\omega}_{rp}}\right)} \left(\frac{C_m}{C_c + C_m} \right) \sin\left(\frac{\omega_f \ell_c}{v_c}\right) \quad (10)$$

で表されることを特徴とする請求項6に記載のフィルタ回路。

[請求項8] 前記多芯伝送線路に加えて結合用のキャパシタが配置されることを特徴とする請求項3に記載のフィルタ回路。

[請求項9] 前記多芯伝送線路に加えて結合用のキャパシタおよびインダクタが配置されることを特徴とする請求項3に記載のフィルタ回路。

[請求項10] 前記読み出し共振器と前記フィルタ共振器との間に配置されたキャパシタおよびインダクタを備え、

前記キャパシティブ結合およびインダクティブ結合は、それぞれ、前記読み出し共振器と前記フィルタ共振器との間に配置されたキャパシタおよびインダクタにより実現されることを特徴とする請求項9に記載のフィルタ回路。

[請求項11] データ量子ビットと、

観測用線路と、

請求項1から10のいずれかに記載のフィルタ回路と、
を備え、

前記フィルタ回路は、前記データ量子ビットと前記観測用線路との間に配置されることを特徴とする量子デバイス。

[請求項12] 請求項11に記載の量子デバイスを備えた量子コンピュータ。

[請求項13] 1つまたは複数のデータ量子ビットと、

前記各データ量子ビットに対応する1つまたは複数の読み出し用共振器と、

前記読み出し用共振器の共振周波数に対応した特性を有するフィルタ共振器と、

前記読み出し共振器と前記フィルタ共振器との間に配置され、前記読み出し共振器と前記フィルタ共振器とを電気的および磁氣的に結合させるカプラ回路と、

共通の観測用線路と、
を備えたフィルタ回路であって、

前記フィルタ回路は、前記フィルタ共振器の共振を利用した読み出し周波数付近でのバンドパスフィルタ特性と、電気的および磁氣的なカプラ回路における干渉を利用した量子ビット周波数付近でのノッチフィルタ特性とを併せ持つことを特徴とするフィルタ回路。

[請求項14] 読み出し共振器とフィルタ共振器とを備えたフィルタ回路の製造方法であって、

読み出し共振器を形成するステップと、
フィルタ共振器を形成するステップと、
前記読み出し共振器を、データ量子ビットと結合させるステップと、
、

前記フィルタ共振器を、観測用線路と結合させるステップと、
前記読み出し共振器と前記フィルタ共振器とを、キャパシティブ結合およびインダクティブ結合を並列に用いて電気磁氣的に結合させるステップと、
を含むことを特徴とするフィルタ回路の製造方法。

[請求項15] データ量子ビットと結合する読み出し共振器部品を与えるステップと、

観測用線路と結合するフィルタ共振器部品を与えるステップと、
前記読み出し共振器部品と前記フィルタ共振器部品とを、キャパシティブ結合およびインダクティブ結合を並列に用いて、電気磁氣的に結合するように組み立てるステップと、を含むことを特徴とするフィルタ回路の組み立て方法。

[請求項16] 量子ビットの観測用線路への分散読み出しにおける読み出し周波数

のフィルタリング方法であって、

請求項 1 から 7 のいずれかに記載のフィルタ回路を用いて、

読み出し共振器の読み出し周波数付近のみを透過させるバンドパス
フィルタリングを行うステップと、

量子ビットの観測用線路へのエネルギー緩和を抑制するノッチフィ
ルタリングを行うステップと、

を含むことを特徴とする読み出し周波数のフィルタリング方法。

[請求項17]

量子ビットの観測用線路への分散読み出し方法であって、

請求項 1 から 7 のいずれかに記載のフィルタ回路を用いて、

量子ビットの電磁界モードを、読み出し共振器の電磁界モードと結
合させるステップと、

読み出し共振器を観測用線路に結合させるステップと、

を含むことを特徴とする量子ビットの分散読み出し方法。