(12) 特許協力条約に基づいて公開された国際出願

(19) 世界知的所有権機関
国際事務局

(43) 国際公開日
2025年2月27日(27.02.2025)

WIPO | PCT

(10) 国際公開番号
WO 2025/041713 A1

(51) 国際特許分類:
H10N 60/12 (2023.01)

(21) 国際出願番号： PCT/JP2024/029139

(22) 国際出願日： 2024年8月16日(16.08.2024)

(25) 国際出願の言語： 日本語

(26) 国際公開の言語： 日本語

(30) 優先権データ：
特願 2023-133316 2023年8月18日(18.08.2023) JP

(71) 出願人: 国立研究開発法人科学技術振興機構(**JAPAN SCIENCE AND TECHNOLOGY AGENCY**) [JP/JP]; 〒3320012 埼玉県川口市本町四丁目１番８号 Saitama (JP).

(72) 発明者: 砂田 佳希 (**SUNADA Yoshiki**); 〒1538904 東京都目黒区駒場４－６－１ 国立大学法人東京大学内 Tokyo (JP). 中村 泰信 (**NAKAMURA Yasunobu**); 〒1538904 東京都目黒区駒場４－６－１ 国立大学法人東京大学内 Tokyo (JP).

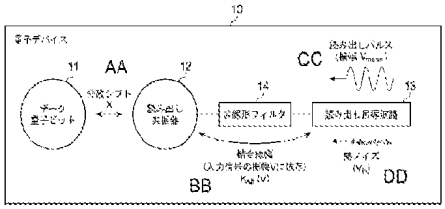
(74) 代理人: 森下 賢樹 (**MORISHITA Sakaki**); 〒1530061 東京都目黒区中目黒１－８－１ ＶＯＲＴ中目黒Ｉ ３階 Tokyo (JP).

(81) 指定国(表示のない限り、全ての種類の国内保護が可能): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CV, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IQ, IR, IS, IT, JM, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, MG, MK, MN, MU, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, WS, ZA, ZM, ZW.

(84) 指定国(表示のない限り、全ての種類の広域保護が可能): ARIPO (BW, CV, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SC, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーラシア (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), ヨーロッパ (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, ME, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF,

(54) **Title:** QUANTUM DEVICE AND QUANTUM COMPUTER

(54) 発明の名称： 量子デバイスおよび量子コンピュータ



10 Quantum device
11 Data quantum bit
12 Readout resonator
13 Readout waveguide
14 Nonlinear filter
AA Dispersion shift
BB Coupled line width (dependent on input signal amplitude)
CC Readout pulse (amplitude)
DD Thermal noise

(57) **Abstract:** A quantum device 10 includes: a data quantum bit 11; a readout resonator 12 coupled to the data quantum bit 11; a readout waveguide 13 coupled to the readout resonator 12; and a nonlinear filter 14 interposed between the readout resonator 12 and the readout waveguide 13. The nonlinear filter 14 has different transmission characteristics depending on the amplitude of a readout pulse input to the readout waveguide 13.

(57) 要約：量子デバイス１０は、データ量子ビット１１と、データ量子ビット１１と結合した読み出し共振器１２と、読み出し共振器１２と結合した読み出し用導波路１３と、読み出し共振器１２と読み出し用導波路１３との間に挿入された非線型フィルタ１４と、を備える。非線型フィルタ１４は、読み出し用導波路１３に入力される読み出しパルスの振幅に応じて、透過特性が異なる。

WO 2025/041713 A1

[続葉有]

CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE,
SN, TD, TG).

添付公開書類：

— 国際調査報告（条約第21条(3)）

明　細　書

発明の名称 ： 量子デバイスおよび量子コンピュータ

技術分野

[0001] 本発明は、量子デバイスおよび量子コンピュータに関する。

背景技術

[0002] 量子コンピュータは、量子ビットと呼ばれる素子を用いて情報処理を行うことで、既存のコンピュータを超える計算能力を発揮する。しかし、既存のコンピュータが用いる古典ビットに比べて量子ビットはノイズに弱いため、汎用的な量子コンピュータを実現するには誤り耐性量子計算と呼ばれる手法を用いる必要がある。誤り耐性量子計算では、ノイズによって生じた計算の誤りを検出するために、計算の各ステップの合間に一部の量子ビットの状態を読み出す。図１に、誤り耐性量子計算を模式的に示す。この図の例では、量子ビット１～６の６つの量子ビットが実装されており、計算ステップ１と２との間で、量子ビット２、４、６の状態が読み出されている。このような誤り耐性量子計算を実用化するためには、量子ビットの状態を高速かつ高精度に読み出すことが必要となる。

[0003] 量子ビットの有力な実装形態の一つである超伝導量子ビット（以下、断りのない限り、超伝導量子ビットを単に「量子ビット」と略称する）において、高速かつ高精度な読み出しは、分散読み出しと呼ばれる方式によって実現されている（例えば、非特許文献１参照）。分散読み出しでは、量子ビットに「読み出し共振器」と呼ばれるマイクロ波共振器を結合し、その共鳴周波数が量子ビットの状態に応じて変化することを利用する。量子ビットと、読み出し共振器との結合を強くすれば、共鳴周波数の変化が大きくなる。これにより、読み出しを高速・高精度化できる。しかしそうすると、量子ビットが、読み出し共振器中の熱ノイズに対して敏感になってしまい、量子ビットが情報を保持できる時間が短くなることが問題となる。

[0004] 従来、量子ビットの読み出しの高速・高精度化を目指す上での課題は、読

み出し共振器を通じて量子ビットのエネルギーが流出することによるエネルギー緩和時間の低下が主流であった。この課題を解決するため、パーセルフィルタと呼ばれる線型なフィルタが開発された（例えば、非特許文献２～８参照）。さらに、ジョセフソン量子フィルタと呼ばれる非線型なフィルタを用いることで量子ビット制御用導波路へのエネルギーの流出も抑制できることが実証されている（例えば非特許文献９～１１参照）。

先行技術文献

非特許文献

[0005] 非特許文献1：T. Walter et al., "Rapid high-fidelity single-shot dispersive readout of superconducting qubits" Physical Review Applied 7 (May 26, 2017), p. 054020.

非特許文献2：M. D. Reed et al., "Fast reset and suppressing spontaneous emission of a superconducting qubit", Applied Physics Letters 96, 203110 (2010).

非特許文献3：E. Jeffrey et al., "Fast accurate state measurement with superconducting qubits", Physical Review Letters 112, 190504 (2014).

非特許文献4：E. A. Sete et al., "Quantum theory of a bandpass Purcell filter for qubit readout", Physical Review A 92, 012325 (2015).

非特許文献5：N. T. Bronn et al., "Broadband filters for abatement of spontaneous emission in circuit quantum electrodynamics", Applied Physics Letters 107, 172601 (2015).

非特許文献6：N. T. Bronn et al., "Reducing spontaneous emission in circuit quantum electrodynamics by a combined readout/filter technique", IEEE Transactions on Applied Superconductivity 25, 1700410 (2015).

非特許文献7：L. C. G. Govia et al., "Enhanced qubit readout using locally generated squeezing and inbuilt Purcell-decay suppression", Ne

w Journal of Physics 19, 023044 (2017).

非特許文献8：Y. Sunada et al., “Fast readout and reset of a superconducting qubit coupled to a resonator with an intrinsic Purcell filter”, Physical Review Applied 17, 044016 (2022).

非特許文献9：K. Koshino et al., “Protection of a Qubit via Subradiance: A Josephson Quantum Filter”, Physical Review Applied 13, 014051 (2020).

非特許文献10：S. Kono et al., “Breaking the trade-off between fast control and long lifetime of a superconducting qubit”, Nature Communications 11, 3683 (2020).

非特許文献11：I. Iakoupov et al., “Saturable Purcell filter for circuit quantum electrodynamics”, Physical Review Research 5, 013148 (2023).

非特許文献12：J.-H. Yeh et al., “Microwave attenuators for use with quantum devices below 100 mK”, Journal of Applied Physics 121, 224501 (2017).

非特許文献13：F. Yan et al., “Distinguishing Coherent and Thermal Photon Noise in a Circuit Quantum Electrodynamical System”, Physical Review Letters 120, 260504 (2018).

非特許文献14：Z. Wang et al., “Cavity attenuators for superconducting qubits”, Physical Review Applied 11, 014031 (2019).

非特許文献15：A. Blais et al., “Circuit quantum electrodynamics”, Reviews of Modern Physics 93, 025005 (2021).

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0006] 量子ビットの保持する情報は、エネルギー緩和および位相緩和の２つの過程によって失われる。このうちエネルギー緩和は、量子ビットがエネルギーを持つ状態｜ｅ＞から持たない状態｜ｇ＞に遷移する過程である。一方、位

相緩和は、｜ｅ＞と｜ｇ＞との量子力学的重ね合わせの位相の情報が失われる過程である。エネルギー緩和および位相緩和が起こる典型的な時間は、それぞれエネルギー緩和時間（以下、「Ｔ１」という）および位相緩和時間（以下、「Ｔ２」という）と呼ばれる。

[0007] 上記の先行技術が開発されたことにより、量子ビットの読み出しにかかる時間に対して、エネルギー緩和時間Ｔ１を十分に長くできるようになった。これに伴い、量子ビットが情報を保持できる時間は、Ｔ１より位相緩和時間Ｔ２によって強く制限されるようになった。こうしたことから、近年、Ｔ２を向上することが課題となっている。

[0008] 本発明はこうした課題に鑑みてなされたものであり、その目的は、量子ビットの読み出し時間を短縮しつつ、位相緩和時間を長くすることのできる技術を提供することにある。

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、本発明のある態様の量子デバイスは、データ量子ビットと、データ量子ビットと結合した読み出し共振器と、読み出し共振器と読み出し用導波路との間に挿入された非線型フィルタと、を備える。非線型フィルタは、読み出し用導波路に入力される読み出しパルスの振幅に応じて、透過特性が異なる。

[0010] ある実施の形態の量子デバイスでは、非線型フィルタは、振幅の小さい入力信号に対して透過性が高く、振幅の大きい信号に対して透過性が低い。

[0011] ある実施の形態の量子デバイスでは、読み出し共振器と読み出し用導波路との非線型フィルタを介した結合の線幅をκ_{eff}、データ量子ビットによる読み出し共振器の分散シフトをχとしたとき、非線型フィルタは、データ量子ビットの読み出しがないときは$\kappa_{eff} >> \chi$、読み出し中は$\kappa_{eff} = \chi$となるような透過特性を持つ。

[0012] ある実施の形態の量子デバイスでは、非線型フィルタは、超伝導量子ビットを用いて構成される。

[0013] ある実施の形態の量子デバイスでは、非線型フィルタの中心周波数をω_f、

読み出し共振器の共振周波数をω_r、非線型フィルタの非調和度をα_f、読み出し共振器と非線型フィルタとの結合強度をg、非線型フィルタと読み出し用導波路との結合の線幅をκとしたとき、非線型フィルタは、以下の条件

[数8]

$$|\omega_f - \omega_r| \ll \kappa, \qquad (4)$$

[数9]

$$\alpha_f \gtrsim \kappa, \qquad (5)$$

[数10]

$$\kappa \approx 4g, \qquad (6)$$

[数11]

$$\kappa \gg \chi \qquad (7)$$

を満たす。

[0014] ある実施の形態の量子デバイスでは、超伝導量子ビットは、ジョセフソン素子とキャパシタとを並列に結合したトランズモンで構成される。

[0015] ある実施の形態の量子デバイスでは、非線型フィルタと読み出し用導波路とは、キャパシティブ結合される。

[0016] ある実施の形態の量子デバイスでは、非線型フィルタと読み出し用導波路とは、インダクティブ結合される。

[0017] 本発明の別の態様は、量子コンピュータである。この量子コンピュータは、前述のいずれかの量子デバイスを備える。

[0018] なお、以上の構成要素の任意の組合せ、本発明の表現を装置、方法、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、本発明の態様として有効である。

発明の効果

[0019] 本発明によれば、量子ビットの読み出し時間を短縮しつつ、位相緩和時間を長くすることができる。

図面の簡単な説明

[0020] [図1]誤り耐性量子計算を示す模式図である。

[図2]分散読み出しのための系を示す模式図である。

[図3]従来の線型フィルタを備えた量子デバイスの模式図である。

[図4]第１の実施の形態に係る量子デバイスの模式図である。

[図5]読み出し共振器の線幅と、位相緩和レートとの関係を示すグラフである。

[図6]周波数と、実施の形態のフィルタの透過率との関係を示すグラフである。

[図7]フィルタ量子ビットの設計に関わるパラメータを示す模式図である。

[図8]第２の実施の形態に係る量子デバイスの非線型フィルタを示す模式図である。

[図9]第３の実施の形態に係る量子デバイスを示す模式図である。

[図10]第４の実施の形態に係る量子デバイスを示す模式図である。

[図11]本開示の非線型フィルタの波長特性の実験結果を示す図である。

[図12]本開示の非線型フィルタの波長特性の数値シミュレーション結果を示す図である。

[図13]図１１の実験結果から得られた、読み出し信号の振幅と、信号の分離との関係を示すグラフである。

[図14]励起状態および基底状態における読み出し信号の時間変化を示すグラフである。（ａ）は読み出しパルス周期が２００ｎ秒、（ｂ）は読み出しパルス周期が４０ｎ秒のものに相当する。

[図15]入力信号の周波数と振幅に対する非線形フィルタの定常状態反射係数

の位相を示すグラフである。

[図16]観測された測定レートを、読み出しパルスの振幅の関数として示すグラフである。

[図17]２マイクロ秒の矩形パルスを用いて測定された、励起状態および基底状態における読み出し信号の複素振幅を示すグラフである。

発明を実施するための形態

[0021] 以下、本発明を好適な実施の形態をもとに図面を参照しながら説明する。実施の形態は、発明を限定するものではなく例示である。実施の形態に記述されるすべての特徴やその組み合わせは、必ずしも発明の本質的なものであるとは限らない。各図面に示される同一または同等の構成要素、部材、処理には、同一の符号を付するものとし、適宜重複した説明は省略する。また、各図に示す各部の縮尺や形状は、説明を容易にするために便宜的に設定されており、特に言及がない限り限定的に解釈されるものではない。また、本明細書または請求項の中で「第１」、「第２」等の用語が用いられる場合、特に言及がない限りこの用語はいかなる順序や重要度を表すものでもなく、ある構成と他の構成とを区別するだけのためのものである。また、各図面において実施の形態を説明する上で重要ではない部材の一部は省略して表示する。

[0022] 具体的な実施の形態を説明する前に、先ず基本となる知見を説明する。前述したように、量子ビットの分散読み出しを高速・高精度化すると、量子ビットが読み出し共振器中の熱ノイズに対して敏感になることから、位相緩和時間Ｔ２が短くなってしまう、という課題がある。この課題は、従来、読み出し共振器に結合した読み出し用導波路から流入する熱ノイズを抑制することによって解決されてきた。

[0023] ここで、量子ビットの分散読み出しについて説明する。分散読み出しには、量子ビットに読み出し共振器が結合し、読み出し共振器に読み出し用導波路が結合した系が用いられる。図２に、このような分散読み出しに使われる系１００を模式的に示す。系１００は、データ量子ビット１０１と、読み出

し共振器１０２と、読み出し用導波路１０３と、を備える。データ量子ビット１０１と読み出し共振器１０２とは結合し、読み出し共振器１０２と読み出し用導波路１０３とは結合している。

[0024] 読み出しを行うには、読み出し共振器１０２と共鳴な周波数を持つマイクロ波パルス（以下、「読み出しパルス」と呼ぶ）を読み出し用導波路１０３から入射する。ここで、読み出し共振器１０２はデータ量子ビット１０１と結合しているため、データ量子ビット１０１の状態に依存して共鳴周波数が変化する。従って、読み出しパルスの反射係数も変化する。こうして、読み出し共振器１０２に読み出しパルスを入射した後の反射波（以下、「読み出し信号」と呼ぶ）の位相や振幅を測定することにより、データ量子ビット１０１の状態を判別することができる。

[0025] 読み出し信号は、室温環境に置かれた波形測定器で測定する必要がある。一方、データ量子ビット１０１および読み出し共振器１０２は、希釈冷凍機を用いて数十ｍＫ（ミリケルビン）まで冷却し、低温環境に保つ必要がある。従って、読み出し共振器１０２と波形測定器とをそのまま読み出し用導波路１０３で結ぶと、室温環境の熱輻射が読み出し用導波路１０３を逆流し、読み出し共振器１０２に流入してしまう。これは、熱ノイズの原因となる。これを防ぐために、従来、順方向には通過するが逆方向には減衰する、アイソレータと呼ばれるマイクロ波素子が用いられてきた。しかし、現状の技術では、アイソレータを小型化するのは難しい。このため、実用規模の量子コンピュータ希釈冷凍機内に、必要な数のアイソレータを収容することは難しい。また、多数のアイソレータを連結して用いた実験でも、読み出し共振器１０２の平均熱光子数は、現状、10^{-3}～10^{-4}程度にまでしか抑制できていない（例えば、非特許文献１２～１４参照）。

[0026] この値は、希釈冷凍機の温度である約２０ｍＫから期待される平均熱光子数である10^{-8}に対して、１万倍以上大きい。これは、極低温下では、読み出し用導波路１０３に接続された様々なマイクロ波素子を十分に放熱することが難しいことに起因すると考えられている（例えば、非特許文献１４参照

）。これらの理由から、データ量子ビット１０１の位相緩和時間Ｔ２を将来にわたって向上していくためには、読み出し用導波路１０３から流入する熱ノイズの抑制以外のアプローチも併用する必要があると考えられる。

[0027] 本発明者らは、量子ビットの位相緩和時間Ｔ２を向上するための新たなアプローチとして、読み出し回路自体に熱ノイズ耐性を持たせる方法を考案した。これにより、読み出し共振器への熱ノイズの流入を抑制せずとも、量子ビットの位相緩和を抑制できるようになる。本開示では、これを実現するために非線型なフィルタを用いる。以下、本開示の非線型フィルタが、従来の線型フィルタに対して持つ独自の特徴を説明する。

[0028] 「従来の線型フィルタ」

図３に、従来の線型フィルタを備えた量子デバイス１１０を模式的に示す。量子デバイス１１０は、データ量子ビット１０１と、読み出し共振器１０２と、読み出し用導波路１０３と、線型フィルタ１０４と、を備える。読み出し共振器１０２と、読み出し用導波路１０３とは、線型フィルタ１０４を介して結合されている。

[0029] データ量子ビット１０１が位相緩和を起こす速さは、位相緩和時間Ｔ２の逆数である位相緩和レートΓで表される。特に、読み出し共振器１０２中の熱ノイズによる量子ビットの位相緩和レートΓ^{th}_{ϕ}は、以下の式で表される。

[数1]

$$\Gamma_{\phi}^{\mathrm{th}} = \frac{\kappa_{\mathrm{eff}}\chi^2}{\kappa_{\mathrm{eff}}^2 + \chi^2}\bar{n}_{\mathrm{th}} \qquad (1)$$

ここで、

[数2]

$$\bar{n}_{\mathrm{th}}$$

は、平常時の読み出し共振器１０２の平均熱光子数である。χは、データ量

子ビット１０１の状態に応じた読み出し共振器１０２の共鳴周波数の変化量（以下、「分散シフト」と呼ぶ）である。κ_{eff}は、線型フィルタ１０４を介した読み出し共振器１０２と、読み出し用導波路１０３との間の結合の線幅である。この系で分散読み出しを行うには、読み出し共振器１０２の分散シフトχと、線幅κ_{eff}とが同程度である必要がある（例えば、非特許文献１５参照）。このとき式（１）は、以下のように近似できる。

[数3]

$$\Gamma_{\phi}^{\mathrm{th}} \approx \frac{\chi}{2}\bar{n}_{\mathrm{th}} \qquad (2)$$

つまり、読み出しを高速・高精度化するために分散シフトχを大きくすると、熱ノイズによる位相緩和レートΓ^{th}_{ϕ}も比例して大きくなってしまう。

[0030] このトレードオフが根本的なものであることを理解するには、量子ビットの状態を読み出すことは量子ビットを意図的に位相緩和させることである、という視点に立つ必要がある。｜ｇ＞と｜ｅ＞の重ね合わせ状態にある量子ビットを読み出すと、情報は古典ビットに変換されるため、重ね合わせの位相の情報は失われる。分散読み出しにおいて、この過程は徐々に起こるため、位相緩和とみなすことができる。これは、測定誘起位相緩和と呼ばれる。測定誘起位相緩和レートは量子ビットの情報が古典ビットに変換されるレートであるため、このレートが大きいことは、読み出しが高速かつ高精度であるための必要条件である。

[0031] 読み出しパルスによって生じる読み出し共振器１０２の平均光子数を

[数4]

$$\bar{n}_{\mathrm{meas}}$$

とすると、分散読み出しにおける測定誘起位相緩和レートは、

[数5]

$$\Gamma_{\phi}^{\mathrm{meas}} = \frac{2\kappa_{\mathrm{eff}}\chi^2}{\kappa_{\mathrm{eff}}^2 + \chi^2}\bar{n}_{\mathrm{meas}} \qquad (3)$$

と表される。ただし、読み出しパルスの周波数は、データ量子ビットが｜ｇ＞、｜ｅ＞状態である場合の読み出し共振器の共鳴周波数の平均とした。式（１）は、２倍の係数を除いて、式（３）まったく同じ形をしている。これは、熱ノイズによる位相緩和は、広帯域な読み出しパルスによる測定誘起位相緩和とみなせることに由来する。つまり、データ量子ビットの分散読み出しと、熱ノイズによる位相緩和とは同じメカニズムによって起こっていると考えられる。

[0032] 以上の考察から、高速かつ高精度な読み出しと、長い位相緩和時間Ｔ２とを両立させるためには、読み出し中の位相緩和レート$\Gamma^{\mathrm{meas}}{}_{\phi}$と、平常時の熱ノイズによる位相緩和レート$\Gamma^{\mathrm{th}}{}_{\phi}$との比を大きくする必要があることが分かる。式（１）および式（３）によると、これを実現するには、読み出しパルスによる読み出し共振器の平均光子数

[数4]

$$\bar{n}_{\mathrm{meas}}$$

と、平常時の平均光子数

[数2]

$$\bar{n}_{\mathrm{th}}$$

との比を大きくする必要がある。

[0033] しかしながら、分散読み出しには、強さが最大でも

[数4]

$$\bar{n}_{\mathrm{meas}}$$

が１０^{1}程度の読み出しパルスしか用いることができない。一方で、平均熱光子数はアイソレータを用いても、

[数2]

$$\bar{n}_{\mathrm{th}}$$

は１０$^{-4}$程度までしか抑制できない。そのため、現状ではこの比

[数6]

$$\bar{n}_{\mathrm{meas}}/\bar{n}_{\mathrm{th}}$$

を約１０^{5}よりも大きくすることは困難である。従って、読み出し中および平常時の位相緩和レートの比$\Gamma_{\phi}^{meas}/\Gamma_{\phi}^{th}$を将来にわたって大きくしていくには、読み出し共振器１０２の平均光子数

[数7]

$$\bar{n}$$

と、位相緩和レートΓ_{ϕ}との間の比例関係を破る必要がある。

[0034] ［第１の実施の形態］

図４に、第１の実施の形態に係る非線型フィルタを備えた量子デバイス１０を模式的に示す。量子デバイス１０は、データ量子ビット１１と、読み出し共振器１２と、読み出し用導波路１３と、非線型フィルタ１４と、を備える。読み出し共振器１２と、読み出し用導波路１３とは、非線型フィルタ１４を介して結合されている。

[0035] 本実施の形態では、読み出し共振器１２の平均光子数

[数7]

$$\bar{n}$$

と、位相緩和レートΓ_{ϕ}^{meas}との間の比例関係を破るために、読み出し共振器１２と、読み出し用導波路１３の間に非線型な帯域通過フィルタ１４を挿入している。従来の線型な帯域通過フィルタを挿入する場合は、パーセルフィルタと呼ばれる。これと区別するため、本実施の形態の非線型フィルタ１４を「非線型パーセルフィルタ」と呼ぶこともある。

[0036] 既存の線型なパーセルフィルタは、読み出し共振器と読み出し用導波路の結合に周波数依存性を持たせることで、量子ビットのエネルギー緩和だけを選択的に抑制している。これが可能なのは、分散読み出しにおいては、量子ビットの遷移周波数と、読み出しパルスの周波数とが異なるからである。しかし、本実施の形態で問題とする熱ノイズは、広帯域なスペクトルを持ち、その中でも読み出しパルスと同じ周波数を持つ成分が位相緩和を引き起こす。このため、周波数では、熱ノイズと読み出しパルスとを区別できない。そこで、本実施の形態では、熱ノイズと読み出しパルスとの振幅の違いに着目する。すなわち、透過率が入力信号の振幅に依存する非線型なフィルタを用いることで、熱ノイズの影響を選択的に抑制する、というのが本発明の新規なアイデアである。

[0037] 単純に考えれば、振幅の小さい入力信号は遮断し、振幅の大きい入力信号は透過するフィルタを用いれば、熱ノイズだけを遮断できるように思われるかもしれない。しかし、本実施の形態では、逆に、振幅の小さい入力信号はよく透過し、振幅の大きい入力信号は透過しにくいフィルタを用いる。以下、このようなフィルタを用いることで熱ノイズの影響を抑制できることを説明する。

[0038] 分散読み出しを行うには、読み出し共振器１２と、読み出し用導波路１３

との非線型フィルタ１４を介した結合の線幅κ_{eff}は、読み出し共振器の分散シフトχと同程度である必要がある。このことは、式（３）より、読み出し中の測定誘起位相緩和レートΓ^{meas}_{ϕ}（以下、「読み出しレート」と呼ぶ）が、$\kappa_{eff}=\chi$で最大になることに起因する。これは、読み出し共振器の線幅と、位相緩和レートとの関係を示す図５からも分かる。

[0039] また、$\kappa_{eff}\rightarrow\infty$のとき、$\Gamma^{meas}_{\phi}\rightarrow 0$となることから、読み出し共振器１２の線幅$\kappa_{eff}$が大きすぎると、読み出しレートは０に近づくことが分かる。このようになる理由は、読み出し共振器１２の線幅κ_{eff}が大きすぎると、読み出し共振器１２に侵入した読み出しパルスがすぐに読み出し信号として出力されてしまうため、データ量子ビットと相互作用できる時間が短いからである。同様に、式（１）より、熱ノイズによる位相緩和レートΓ^{th}_{ϕ}も$\kappa_{eff}=\chi$で最大となり、$\kappa_{eff}\rightarrow\infty$のとき０に近づく。つまり、読み出し共振器１２の線幅κ_{eff}を、平常時（読み出しをしないとき）は$\kappa_{eff}>>\chi$、読み出し中は$\kappa_{eff}=\chi$となるように変化させれば、読み出しレートを損なわずに熱ノイズによる位相緩和の影響を抑制できる。これを実現するために、本実施の形態では、振幅の小さい入力信号に対して透過性が高く、振幅の大きい入力信号に対して透過性が低い非線型フィルタ１４を、読み出し共振器１２と読み出し用導波路１３との間に挿入する。これにより、平常時（読み出しをしないとき）は、読み出し共振器１２と読み出し用導波路１３との結合が強く、$\kappa_{eff}>>\chi$が満たされる。一方、読み出しパルスの入射中は、結合が弱くなって、$\kappa_{eff}=\chi$が満たされるような読み出し回路を実現できる。

[0040] 発明者らは、本発明において、超伝導量子ビットを用いることで、振幅の小さい入力信号に対して透過性が高く、振幅の大きい入力信号に対して透過性が低い非線型フィルタ１４を実現できることを見いだした。超伝導量子ビットに入力ポートおよび出力ポートを結合したものは、非線型な帯域通過フィルタとして動作する。入力信号の振幅が十分小さいと、このフィルタは量子ビットの遷移周波数付近の信号だけを透過させる。一方、入力信号の振幅を大きくしていくと、量子ビットの非調和度に応じて通過周波数がシフトす

る。非調和度について説明する。ジョセフソン接合などによる非線形ＬＣ回路はコサイン型のポテンシャルをもち、その違いは準位構造に現れる。調和ポテンシャルからのずれは非調和度$\alpha = E_{12} - E_{01}$というパラメータによって表され、どの程度理想的な２準位系に近いかを表す指標となる。ここで、E_{01}は基底状態と第一励起状態の準位差であり、E_{12}は第二励起状態と第一励起状態の準位差である。図６に、周波数と、本実施の形態の非線型フィルタの透過率との関係を示す。このようなフィルタは、遷移周波数が読み出しパルスの周波数と等しく、非調和度が十分に大きい量子ビットを用いることにより実現できる。以下、このように量子ビットを用いて実現した非線型パーセルフィルタをデータ量子ビットと区別するために、「フィルタ量子ビット」と呼ぶ。

[0041] フィルタ量子ビットは、以下の４つのパラメータ、すなわち、遷移周波数ω_f、非調和度α_f、読み出し共振器１２との結合強度ｇ、読み出し用導波路１３との結合の線幅κによって特徴づけられる。図７に、フィルタ量子ビット１５の設計に関わるこれらのパラメータを模式的に示す。

[0042] このフィルタが非線型パーセルフィルタとして動作するための条件は、以下の４つの式で与えられる。

[数8]

$$|\omega_f - \omega_r| \ll \kappa, \qquad (4)$$

[数9]

$$\alpha_f \gtrsim \kappa, \qquad (5)$$

[数10]

$$\kappa \approx 4g, \qquad (6)$$

[数11]

$$\kappa \gg \chi \qquad (7)$$

式（４）は、フィルタの平常時の透過帯域が読み出し共振器の共鳴周波数ω_rを含む、という条件である。式（５）は、フィルタの通過周波数のシフトが透過帯域幅よりも大きい、という条件である。これら２つの条件により、振幅の小さい入力信号に対して透過性が高く、振幅の大きい入力信号に対して透過性が低い非線型フィルタが実現する。これらに加えて、平常時における熱ノイズの影響を小さくするには、式（６）、（７）が満たされる必要がある。式（６）が満たされるとき、読み出し共振器とフィルタ量子ビットが結合して生じる２つの共振モードは、いずれも共鳴周波数$\fallingdotseq\omega_r$、線幅$\kappa_{eff}\fallingdotseq\kappa/2$を持つ。このとき、さらに式（７）が満たされれば、２つの共振モードの線幅がいずれも$\kappa_{eff}>>\chi$を満たすため、熱ノイズによる位相緩和が抑制される。

[0043] 本実施の形態によれば、量子ビットの読み出し時間を短縮しつつ、位相緩和時間を長くすることができる。

[0044] ［非線型パーセルフィルタの実装上の利点］

本実施の形態の原理的な利点については、上で説明した通りである。この他に、非線型パーセルフィルタには実装上の利点もある。すなわち、多数の超伝導量子ビットからなる大規模な量子コンピュータを実現する上で、各量子ビットの読み出し回路はできるだけ実装が単純であることが望ましい。この点において、非線型パーセルフィルタは以下の３つの利点がある。

[0045] １つ目に、フィルタが超伝導量子ビットによって実装されるため、チップの作製レシピが複雑化しないことがある。通常、異なる役割を果たす非線型素子を同一チップ上に実装するには、異なる特性を持つジョセフソン接合が必要になるため、複数回の電子線リソグラフィが必要になる。このことは、リソグラフィを行うたびにチップ上の不純物が増加することや、ジョセフソ

ン接合の作製における歩留まりが１００％ではないことなどから、チップ全体の歩留まりや性能を悪化させてしまう。一方で、非線型パーセルフィルタを実装するために必要なフィルタ量子ビットの特性は、量子計算を担う量子ビット（以下、「データ量子ビット」と呼ぶ）とほぼ同じであるため、フィルタ量子ビットとデータ量子ビットとは同時に作製できる。そのため、データ量子ビットの歩留まりや性能について最適化したレシピをそのまま用いて、非線型パーセルフィルタを追加したチップを作製できる。このことは、チップの作製レシピが高度に最適化されている近年では、ますます重要になっている。

[0046] ２つ目に、非線型パーセルフィルタは、既存の線型なパーセルフィルタの役割も果たせることがある。既存の帯域透過パーセルフィルタは、読み出し共振器と、読み出し用導波路との間にフィルタを挿入して結合に周波数依存性を持たせることで、量子ビットの読み出し用導波路へのエネルギー緩和を抑制するものである。非線型パーセルフィルタは、入力信号の振幅に依存した透過率の違いを利用して量子ビットの熱ノイズによる位相緩和を抑制するものであるが、既存の帯域透過パーセルフィルタと同様の周波数依存性も持つ。よって、エネルギー緩和を抑制するフィルタを別に用意せずとも、非線型パーセルフィルタだけでエネルギー緩和時間Ｔ１および位相緩和時間Ｔ２を両方向上できる。近年のチップは既に帯域透過パーセルフィルタが実装されていることが多いため、それを非線型パーセルフィルタに置き換えるだけで、追加で熱ノイズ耐性も得られる、ということになる。このことは、超伝導量子コンピュータを大規模化する上で、チップ面積の節約という意味で重要である。

[0047] ３つ目に、読み出しパルスを入射すること以外に追加の制御を必要としないことがある。熱ノイズによる量子ビットの位相緩和レートを与える式（１）を見ると、読み出し共振器の分散シフトまたは線幅κ_{eff}が制御できれば熱ノイズの影響を抑制できることが分かる。例えば、超伝導量子干渉素子（Ｓｕｐｅｒｃｏｎｄｕｃｔｉｎｇ　Ｑｕａｎｔｕｍ　Ｉｎｔｅｒｆｅｒｅｎｃ

ｅ　Ｄｅｖｉｃｅ：ＳＱＵＩＤ）および磁束バイアス線を用いて平常時と読み出し中とでχやκ_{eff}の値を変化させれば、高速かつ高精度な読み出しと熱ノイズ耐性を両立できる。しかし、量子ビット１個あたり磁束バイアス線を１本追加することは、チップ面積を消費する上に、冷凍機の配線密度や熱流入を増大させることになり、量子コンピュータの大規模化への障壁となる。これに対し、非線型パーセルフィルタは、読み出しパルスの有無に応じて自動的にκ_{eff}を変化させる素子であるため、追加の制御線が不要である。つまり、超伝導量子ビットの分散読み出しを前提として設計された配線および実験装置をそのまま用いて、チップの設計を変更するだけで、非線型パーセルフィルタを導入することができる。近年、超伝導量子ビットの制御と分散読み出しに特化した実験装置の開発が急速に進められているため、それをそのまま利用できることは大きなメリットである。

[0048] ［第２の実施の形態］

図８に、第２の実施の形態の量子デバイスの非線型フィルタ２０を模式的に示す。この非線型フィルタは、キャパシタ２１とジョセフソン結合２２とを並列に結合したトランズモンで構成される。

[0049] この実施の形態によれば、超伝導量子ビットとして非線型フィルタを簡易に作製することができる。

[0050] ［第３の実施の形態］

図９に、第３の実施の形態に係る量子デバイス３０を模式的に示す。量子デバイス３０は、データ量子ビット３１と、読み出し共振器３２と、読み出し用導波路３３と、非線型フィルタ３４と、を備える。

[0051] データ量子ビット３１と読み出し共振器３２とは、キャパシタ３５を介して、キャパシティブ結合される。読み出し共振器３２と非線型フィルタ３４とは、キャパシタ３６を介して、キャパシティブ結合される。読み出し用導波路３３と、非線型フィルタ３４とは、キャパシタ３７を介して、キャパシティブ結合される。

[0052] ［第４の実施の形態］

図１０に、第４の実施の形態の量子デバイス４０を模式的に示す。量子デバイス４０は、データ量子ビット４１と、読み出し共振器４２と、読み出し用導波路４３と、非線型フィルタ４４と、を備える。

[0053] データ量子ビット４１と読み出し共振器４２とは、キャパシタ４５を介して、キャパシティブ結合される。読み出し共振器４２と非線型フィルタ４４とは、キャパシタ４６を介して、キャパシティブ結合される。読み出し用導波路４３と、非線型フィルタ４４とは、インダクタ４７を介して、インダクティブ結合される。

[0054] ［検証］

本発明者らは、実施の形態の量子デバイスの効果を確認するための検証実験を行った。

（実験１）

図１１に、本開示の非線型フィルタの波長特性の実験結果を示す。図１２に、本開示の非線型フィルタの波長特性の数値シミュレーション結果を示す。図１３に、図１１の実験結果から得られた、読み出し信号の振幅と、信号の分離との関係を示す。

[0055] （実験２）

以下、実験に用いた量子デバイスのパラメータを挙げる。

データ量子ビットの遷移周波数：$\omega_q/2\pi$＝８．４９６９ＧＨｚ。

エネルギー緩和時間：Ｔ１＝１７±１μ秒。

読み出し共振器は、非特許文献８に記載の内蔵型パーセルフィルタを備えた$\lambda/2$共振器であり、Ｄｒｅｓｓｅｄ　Ｑｕｂｉｔ共振周波数$\omega_c/2\pi$＝９．７９２７ＧＨｚを持つ。

分散シフト：χ＝－１１．８ＭＨｚ。

非線形フィルタの非調和度：$\alpha_f/2\pi$=－０．１２ＧＨｚ。

読み出し共振器と非線型フィルタとの結合係数：ｇ／２π＝８８ＭＨｚ。

非線型フィルタの線幅：κ_f＝０．３１ＧＨｚ。

以下、周期が２００ｎ秒および４０ｎ秒の２つの読み出しパルスを用いて実

験を行った。

[0056] 図１４に、励起状態（｜ｅ＞）および基底状態（｜ｇ＞）における読み出し信号b_{out}（$|b_{out}|^2$が光子束と等しくなるように規格化した）の時間変化を示す。図１４（ａ）は読み出しパルスの長さが２００ｎ秒、図１４（ｂ）は読み出しパルスの長さが４０ｎ秒のものに相当する。

[0057] 図１５に、入力信号の周波数と振幅に対する非線形フィルタの定常状態反射係数S_{11}の位相を示す。具体的には、これは、様々な周波数と振幅を持つ２マイクロ秒の矩形パルスを使用して測定された非線形フィルタの反射スペクトルである。理論曲線は、読み出し共振器の平均場のダイナミクスを近似する古典的運動方程式の定常解を用いて計算した。読み出しパルスの周波数ω_{r_0}および振幅Ω_{r_0}で測定された反射係数を星印で示している。

[0058] 入力信号の振幅が小さいときは、測定されたスペクトルは古典モデルとよく一致する。これは、フィルタの非調和度を決定するために使用できる。しかし、読み出しパルスの周波数および振幅の付近で、古典モデルは分岐する。基底状態｜ｇ＞の読み出し信号は、低励起のブランチ上にある。これに対し励起状態｜ｅ＞の読み出し信号は、古典モデルに厳密には従わないが、高励起のブランチ上にあると考えられる。

[0059] 図１６に、観測された測定レートΓ_{meas}を、読み出しパルスの振幅の関数として示す。測定レートΓ_{meas}は、以下のように計算される。

$$\Gamma_{meas} = |b^{e}_{out} - b^{g}_{out}| / 2$$

ここで、b^{e}_{out}およびb^{g}_{out}は、それぞれ、励起状態｜ｅ＞および基底状態｜ｇ＞における読み出し信号の複素振幅である（ただし、$|b_{out}|^2$が光子束と等しくなるように規格化した）。これらの複素振幅は、２マイクロ秒の矩形パルスを用いて測定された。その結果を図１７に示す。

[0060] 図１６に示されるように、読み出しパルスの周辺で、Γ_{meas}の大きさ（すなわち、励起状態｜ｅ＞および基底状態｜ｇ＞との間における、読み出し信号の振幅の差$|b^{e}_{out} - b^{g}_{out}|$）が大きくなる。これは、両者が異なるブランチに乗ることに起因するものと考えられる。これにより、測定レートは

、同等のノイズ耐性を持つ線型フィルタを用いたデバイスと比較して約９倍向上する。

[0061] 以上、本発明を実施の形態に基づいて説明した。これら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せにいろいろな変形例が可能なこと、またそうした変形例も本発明の範囲にあることは当業者に理解されるところである。

[0062] 上述した各実施の形態と変形例の任意の組み合わせもまた本発明の実施の形態として有用である。組み合わせによって生じる新たな実施の形態は、組み合わされる各実施の形態および変形例それぞれの効果をあわせもつ。

産業上の利用可能性

[0063] 本発明は、量子デバイスおよび量子コンピュータに利用できる。

符号の説明

[0064] １０・・量子デバイス、
１１・・量子ビット、
１２・・読み出し共振器、
１３・・読み出し用導波路、
１４・・非線型フィルタ、
１５・・フィルタ量子ビット、
２０・・トランズモンによる非線型フィルタ、
２１・・キャパシタ、
２２・・ジョセフソン接合、
３０・・量子デバイス、
３１・・データ量子ビット、
３２・・読み出し共振器、
３３・・読み出し用導波路、
３４・・非線型フィルタ、
３５・・キャパシタ、
３６・・キャパシタ、

３７・・キャパシタ、

４０・・量子デバイス、

４１・・データ量子ビット、

４２・・読み出し共振器、

４３・・読み出し用導波路、

４４・・非線型フィルタ、

４５・・キャパシタ、

４６・・キャパシタ、

４７・・インダクタ、

１００・・分散読み出しのための系、

１１０・・量子デバイス、

１０１・・量子ビット、

１０２・・読み出し共振器、

１０３・・読み出し用導波路、

１０４・・線型フィルタ。

請求の範囲

[請求項1] データ量子ビットと、

前記データ量子ビットと結合した読み出し共振器と、

前記読み出し共振器と、読み出し用導波路との間に挿入された非線型フィルタと、

を備え、

前記非線型フィルタは、前記読み出し用導波路に入力される読み出しパルスの振幅に応じて、透過特性が異なることを特徴とする量子デバイス。

[請求項2] 前記非線型フィルタは、振幅の小さい入力信号に対して透過性が高く、振幅の大きい信号に対して透過性が低いことを特徴とする請求項１に記載の量子デバイス。

[請求項3] 前記読み出し共振器と前記読み出し用導波路との非線型フィルタを介した結合の線幅をκ_{eff}、前記データ量子ビットによる前記読み出し共振器の分散シフトをχとしたとき、

前記非線型フィルタは、前記データ量子ビットの読み出しがないときは$\kappa_{eff} >> \chi$、読み出し中は$\kappa_{eff} = \chi$となるような透過特性を持つことを特徴とする請求項２に記載の量子デバイス。

[請求項4] 前記非線型フィルタは、超伝導量子ビットを用いて構成されることを特徴とする請求項３に記載の量子デバイス。

[請求項5] 前記非線型フィルタの中心周波数をω_f、前記非線型フィルタの非調和度をα_f、前記読み出し共振器の共振周波数をω_r、前記読み出し共振器と前記非線型フィルタとの結合強度をｇ、前記非線型フィルタと前記読み出し用導波路との結合の線幅をκとしたとき、

前記非線型フィルタは、以下の条件

[数8]

$$|\omega_f - \omega_r| \ll \kappa, \qquad (4)$$

[数9]

$$\alpha_f \gtrsim \kappa, \qquad (5)$$

[数10]

$$\kappa \approx 4g, \qquad (6)$$

[数11]

$$\kappa \gg \chi \qquad (7)$$

を満たすことを特徴とする請求項４に記載の量子デバイス。

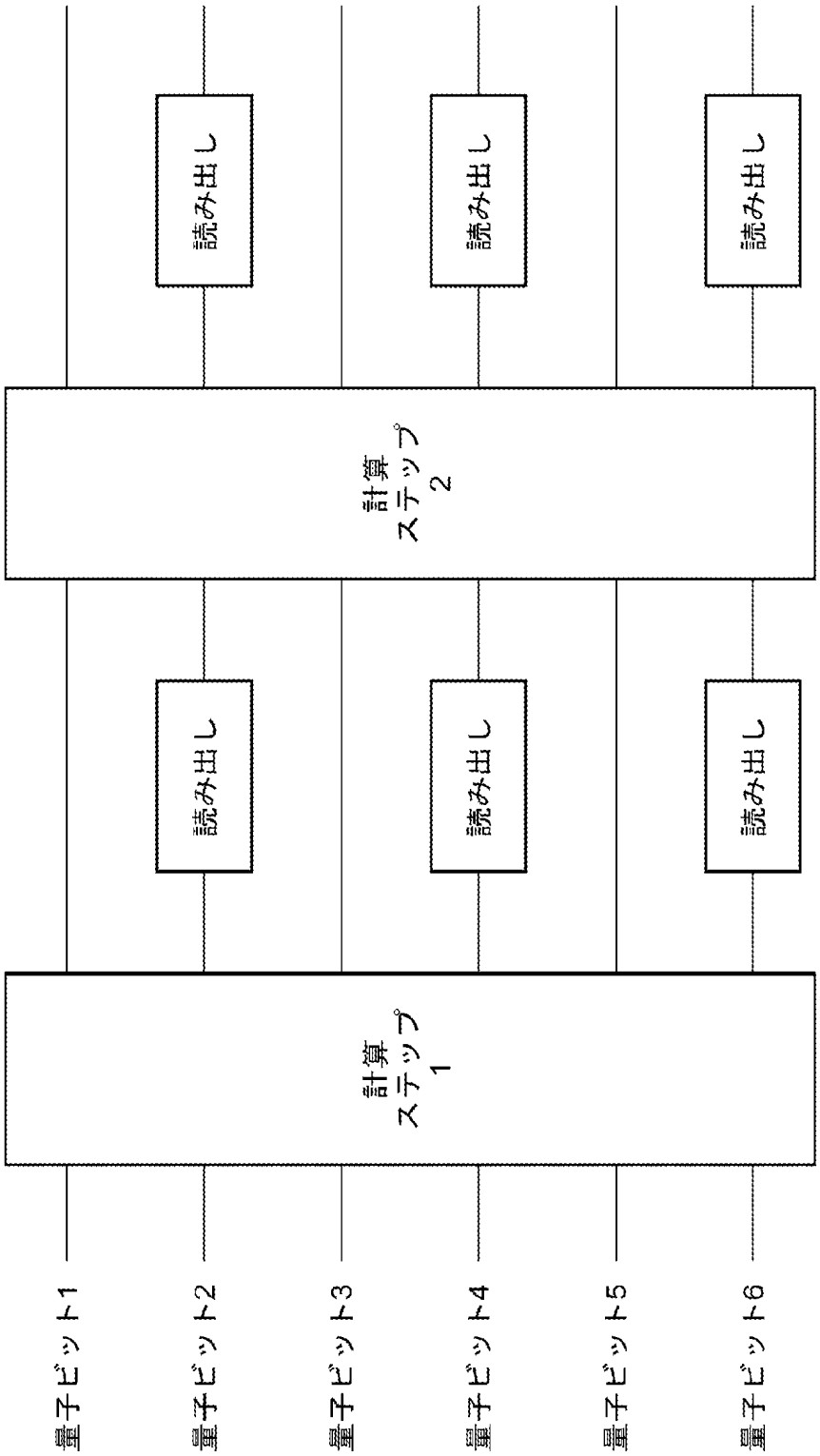
[請求項6] 前記超伝導量子ビットは、ジョセフソン接合とキャパシタとを並列に結合したトランズモンで構成されることを特徴とする請求項５に記載の量子デバイス。

[請求項7] 前記非線型フィルタと前記読み出し用導波路とは、キャパシティブ結合されることを特徴とする請求項６に記載の量子デバイス。

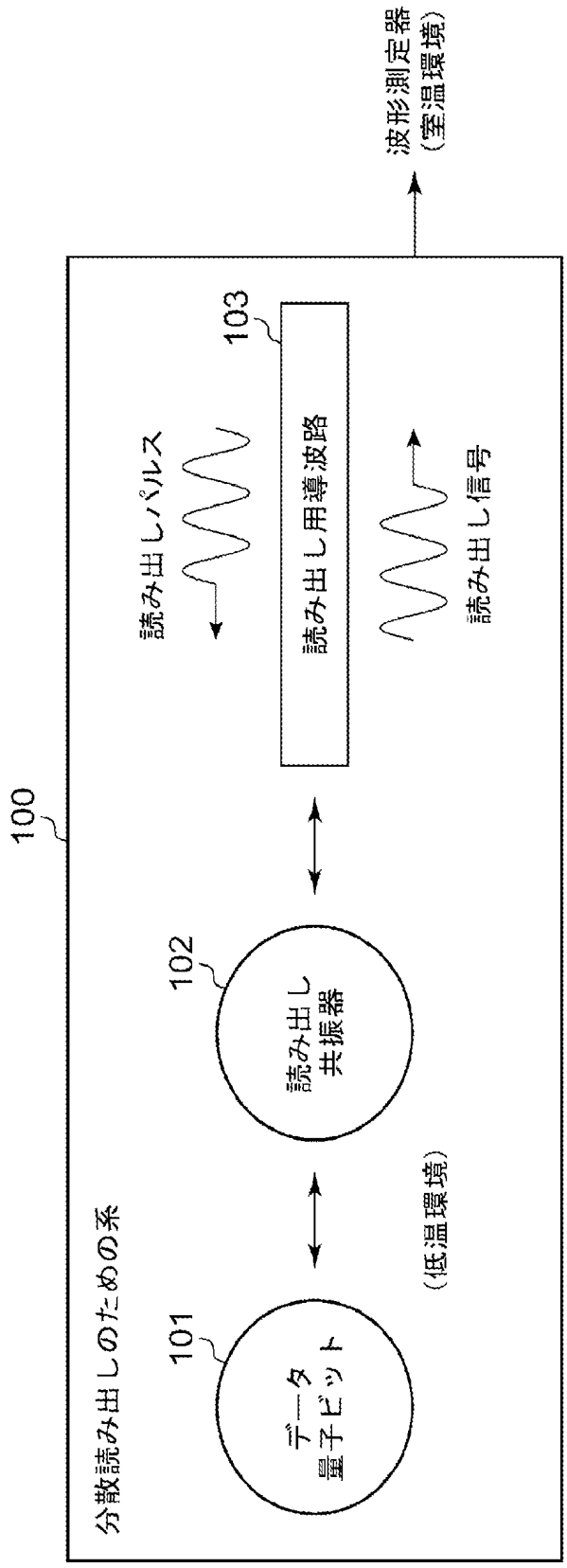
[請求項8] 前記非線型フィルタと前記読み出し用導波路とは、インダクティブ結合されることを特徴とする請求項６に記載の量子デバイス。

[請求項9] 請求項１から８のいずれかに記載の量子デバイスを備えることを特徴とする量子コンピュータ。

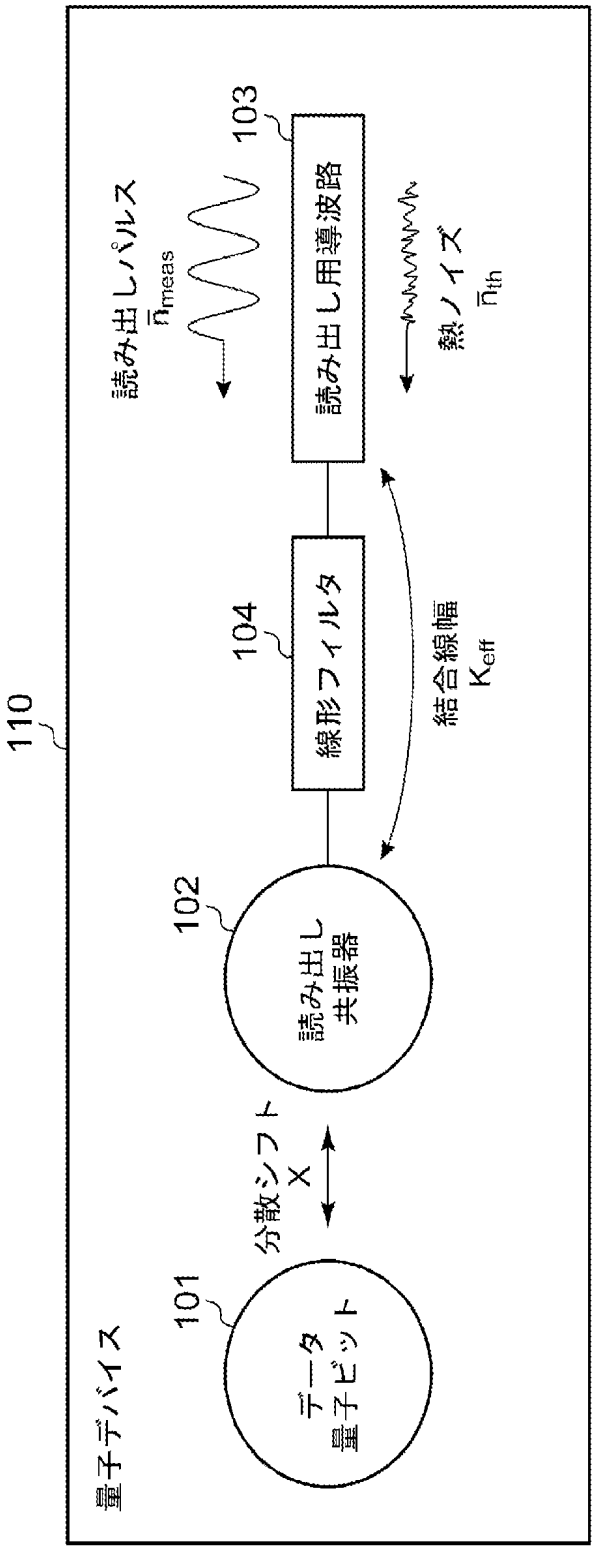
[図1]


量子ビット1
量子ビット2
量子ビット3
量子ビット4
量子ビット5
量子ビット6
計算ステップ1
計算ステップ2
読み出し
読み出し
読み出し
読み出し
読み出し
読み出し

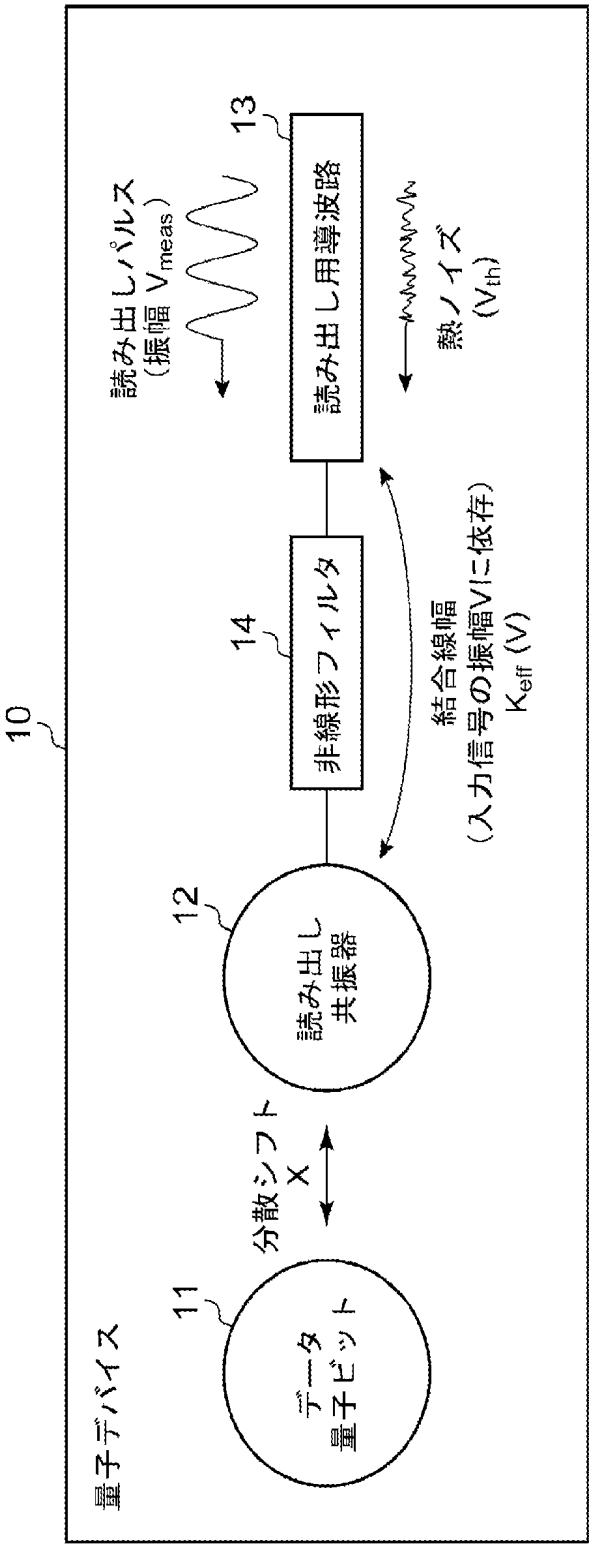
[図2]


波形測定器
(室温環境)
100
分散読み出しのための系
101
データ
量子ビット
102
読み出し
共振器
(低温環境)
103
読み出し用導波路
読み出しパルス
読み出し信号

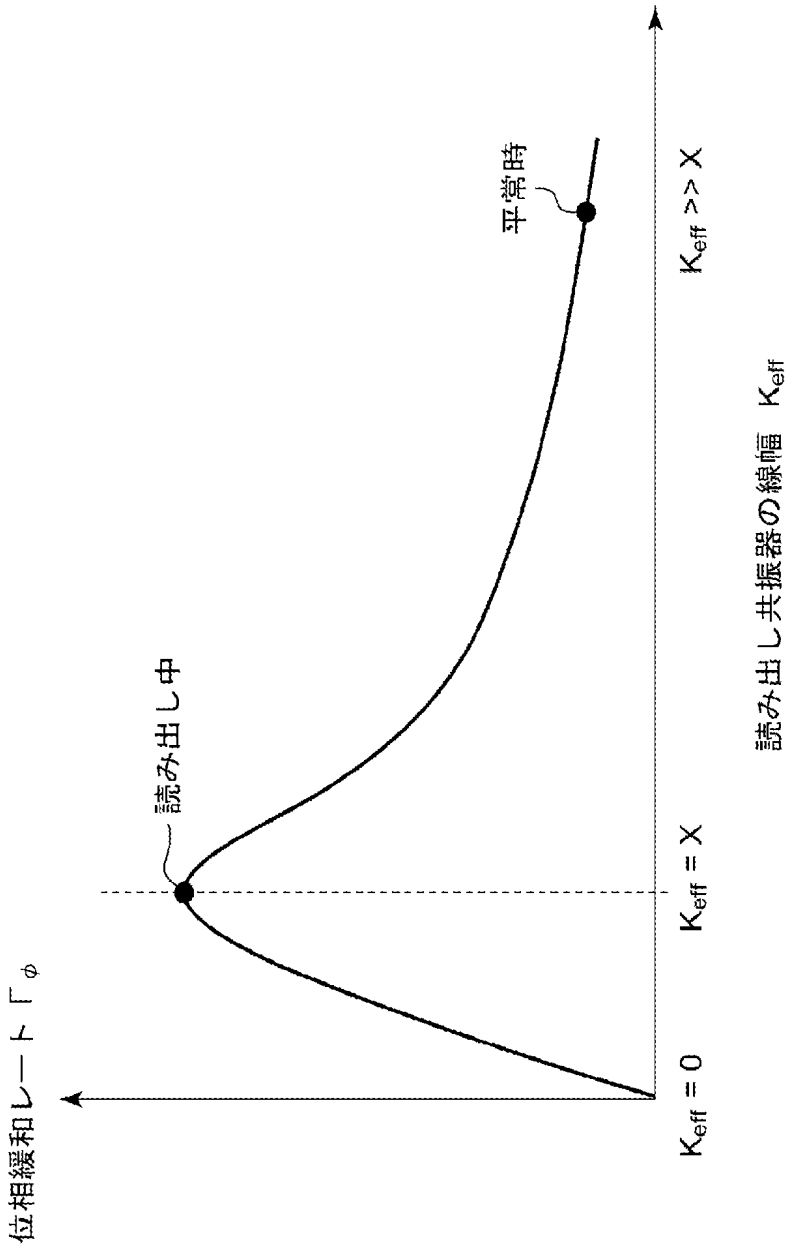
[図3]


110
量子デバイス
101
データ
量子ビット
分散シフト
χ
102
読み出し
共振器
104
線形フィルタ
103
読み出し用導波路
読み出しパルス
$\bar{n}_{meas}$
熱ノイズ
$\bar{n}_{th}$
結合線幅
K_{eff}

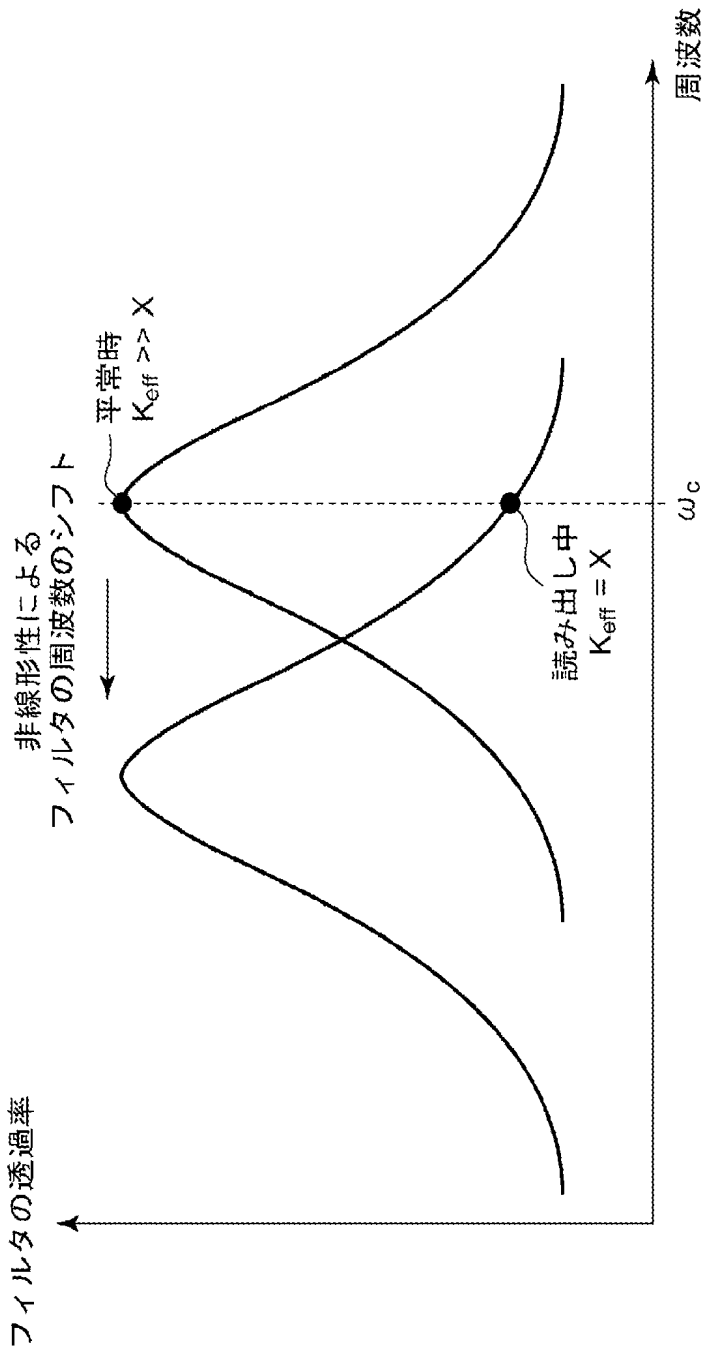
[図4]


10
量子デバイス
11
データ
量子ビット
分散シフト
χ
12
読み出し
共振器
結合線幅
（入力信号の振幅Vに依存）
K_{eff} (V)
14
非線形フィルタ
13
読み出し用導波路
熱ノイズ
(V_{th})
読み出しパルス
（振幅 V_{meas}）

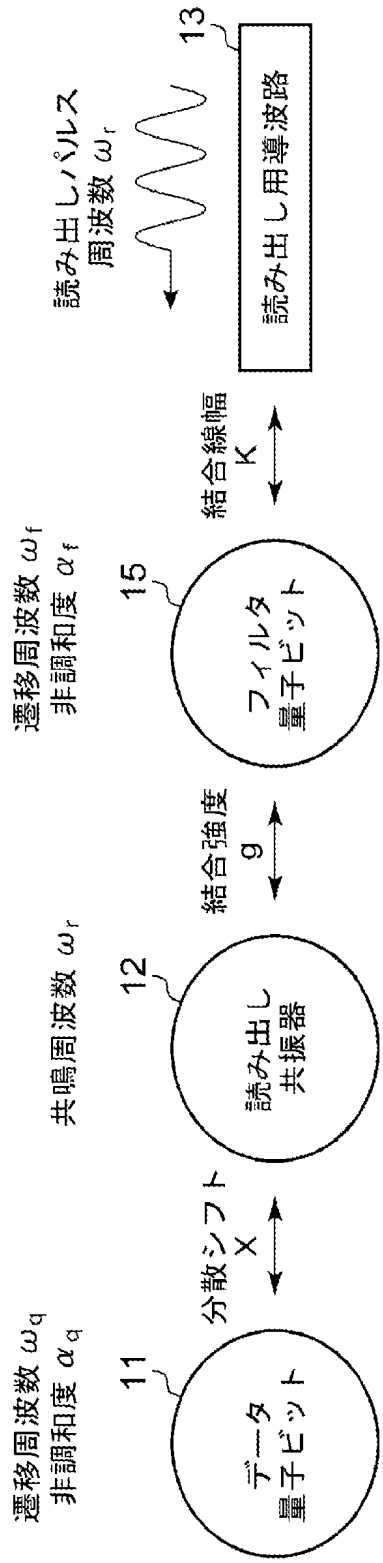
[図5]



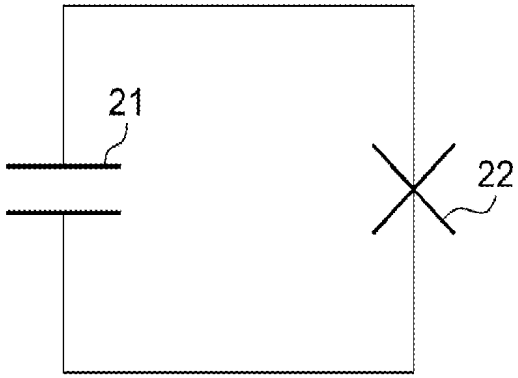
[図6]


フィルタの透過率
非線形性による
フィルタの周波数のシフト
平常時
K_{eff} >> X
読み出し中
K_{eff} = X
ω_c
周波数

[図7]

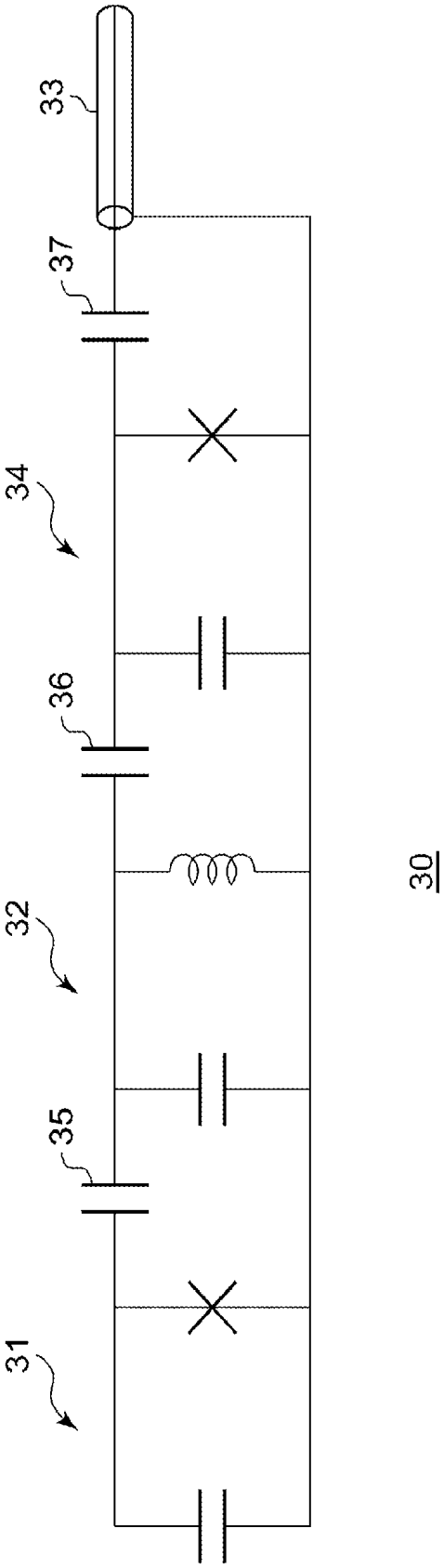

遷移周波数 ω_q
非調和度 α_q
11
データ
量子ビット
分散シフト
χ
共鳴周波数 ω_r
12
読み出し
共振器
結合強度
g
遷移周波数 ω_f
非調和度 α_f
15
フィルタ
量子ビット
結合線幅
K
読み出しパルス
周波数 ω_r
13
読み出し用導波路

[図8]

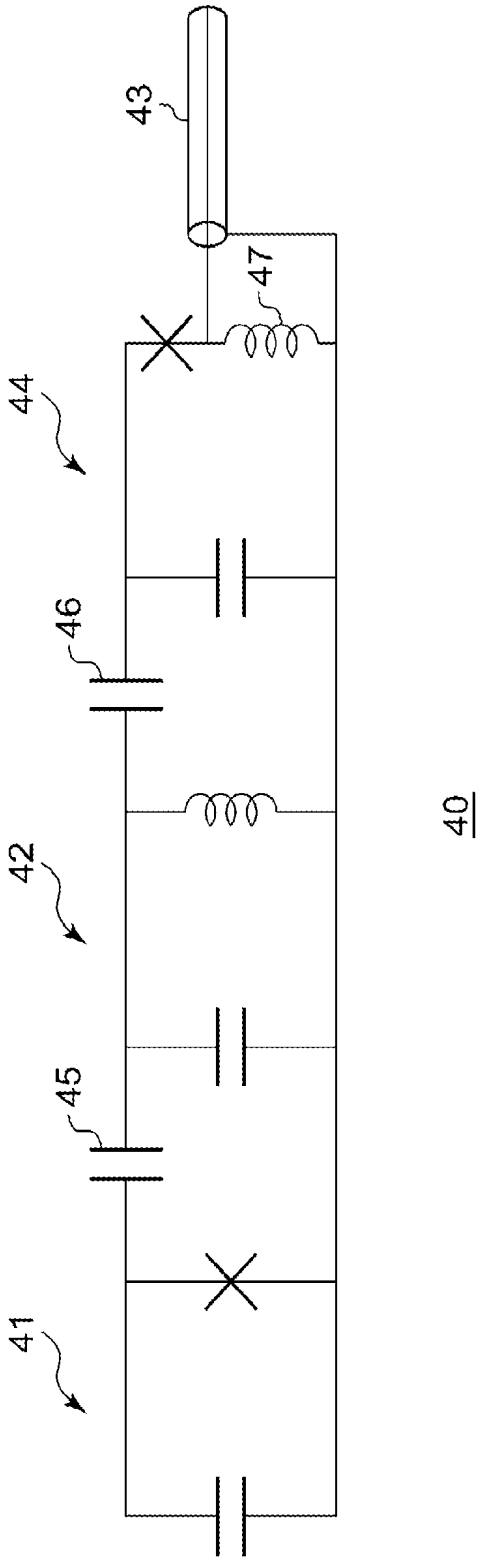


20

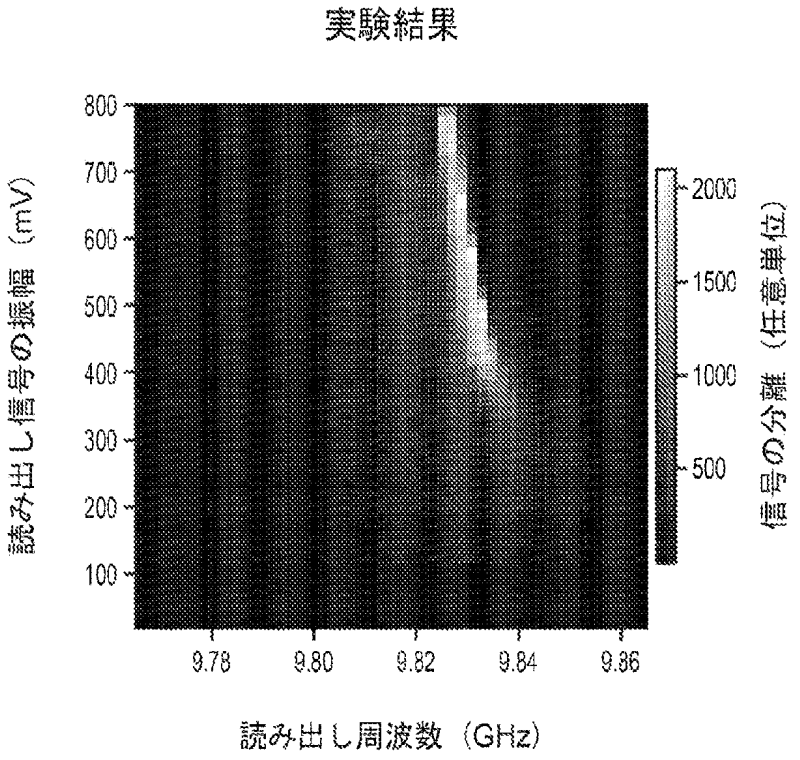
[図9]



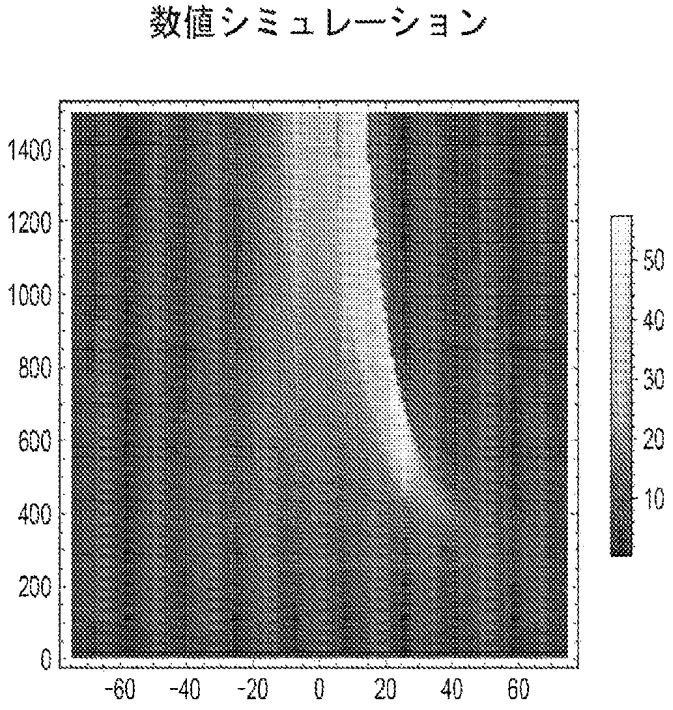
[図10]



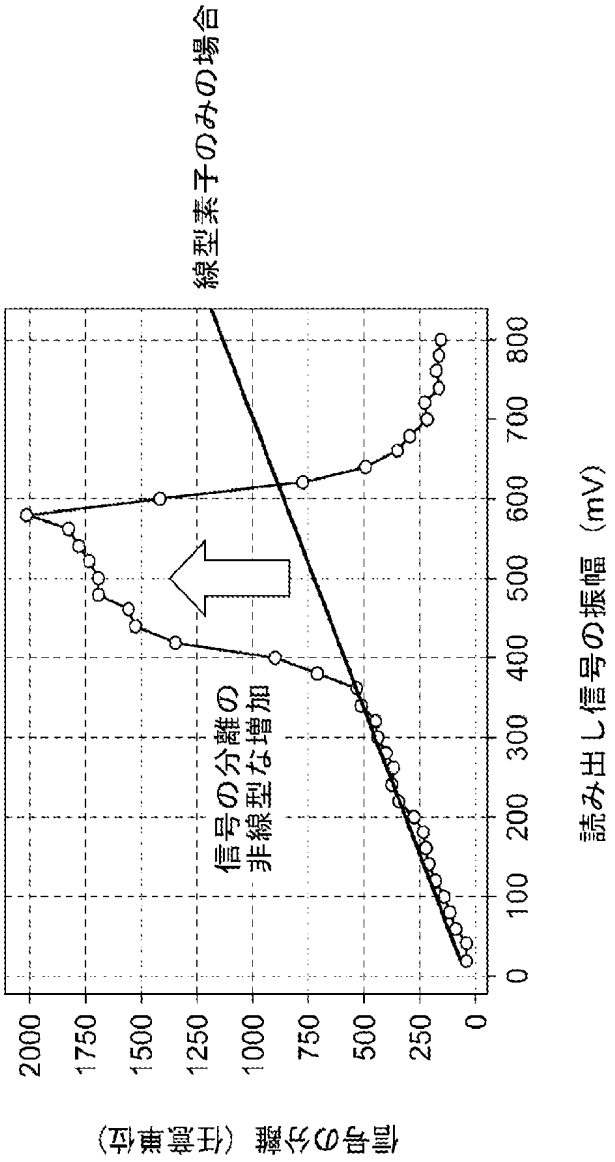
[図11]


実験結果
読み出し信号の振幅（mV）
800
700
600
500
400
300
200
100
9.78
9.80
9.82
9.84
9.86
読み出し周波数（GHz）
2000
1500
1000
500
信号の分離（任意単位）

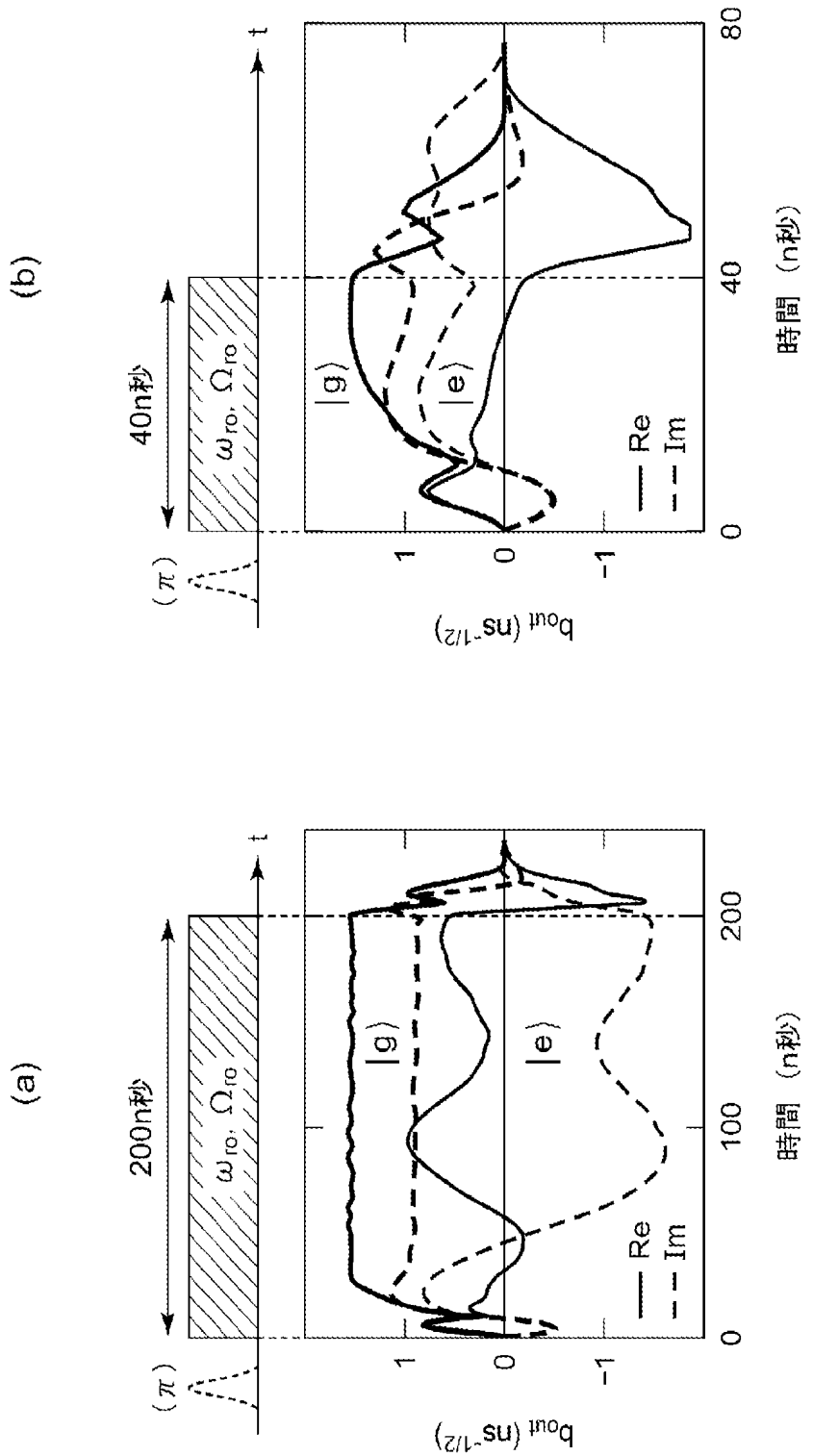
[図12]


数値シミュレーション
1400
1200
1000
800
600
400
200
0
-60
-40
-20
0
20
40
60
50
40
30
20
10

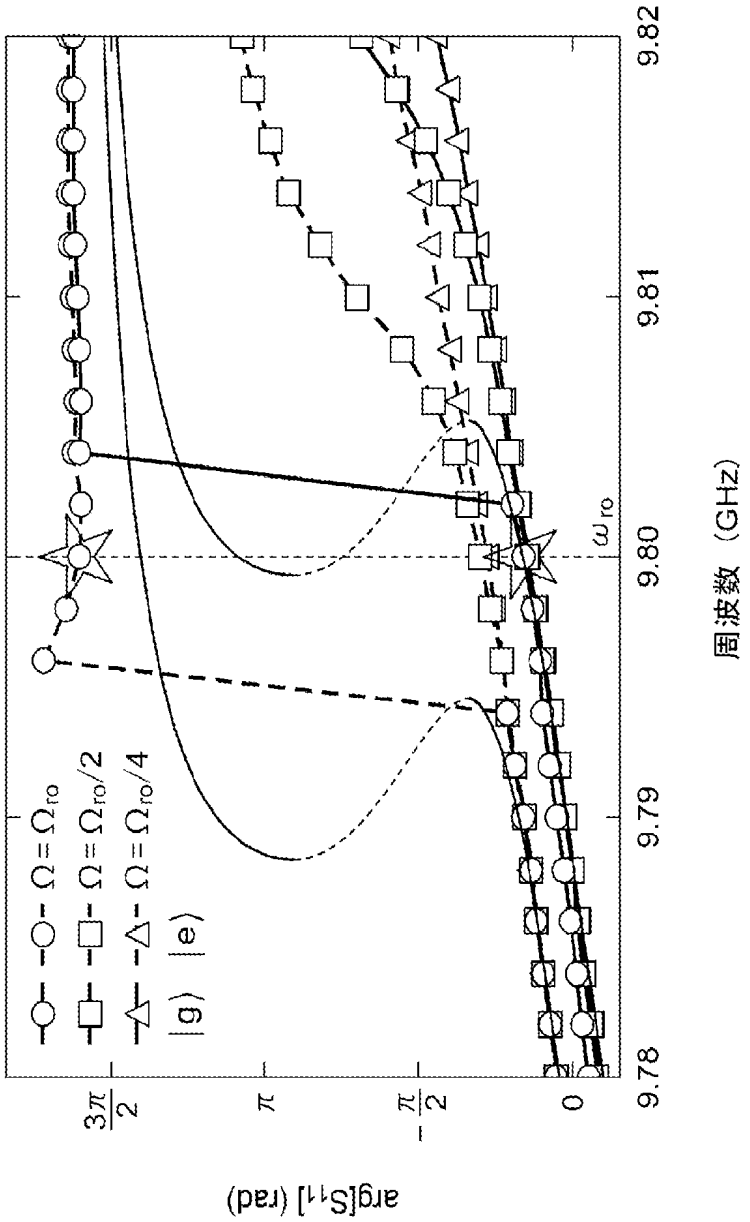
[図13]


線型素子のみの場合
信号の分離の
非線型な増加
信号の分離（任意単位）
読み出し信号の振幅（mV）
0
250
500
750
1000
1250
1500
1750
2000
0
100
200
300
400
500
600
700
800

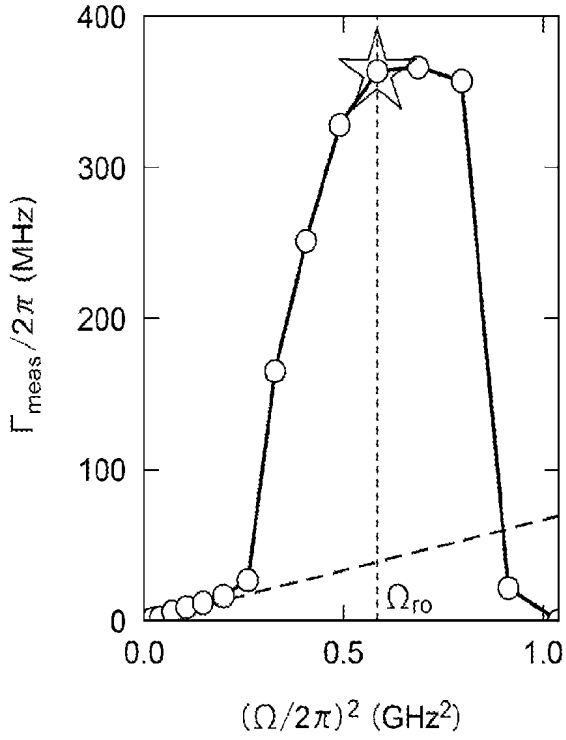
[図14]


(b)
40n秒
ω_{ro}, Ω_{ro}
(π)
t
|g⟩
|e⟩
Re
Im
b_{out} ($ns^{-1/2}$)
1
0
-1
0
40
80
時間（n秒）
(a)
200n秒
ω_{ro}, Ω_{ro}
(π)
t
|g⟩
|e⟩
Re
Im
b_{out} ($ns^{-1/2}$)
1
0
-1
0
100
200
時間（n秒）

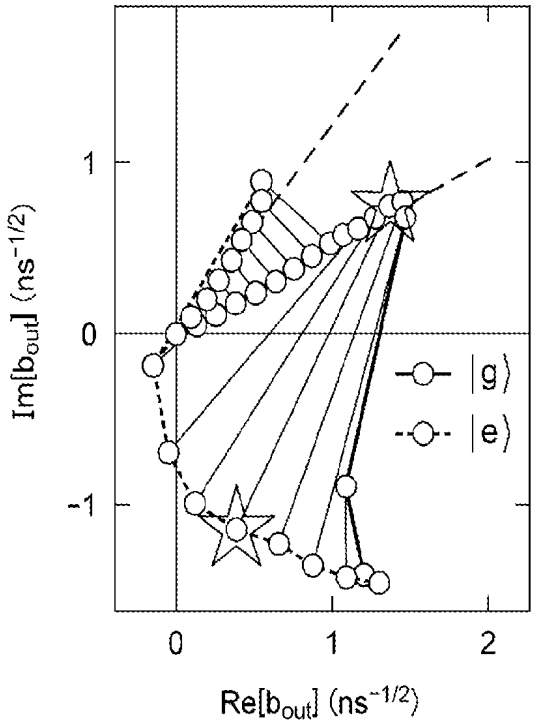
[図15]


arg[S11] (rad)
3π/2
π
π/2
0
9.78
9.79
9.80
9.81
9.82
周波数（GHz）
ω ro
Ω = Ω ro
Ω = Ω ro/2
Ω = Ω ro/4
|g⟩ |e⟩

[図16]


400
300
200
100
0
0.0
0.5
1.0
$\Gamma_{meas}/2\pi$ (MHz)
Ω_{ro}
$(\Omega/2\pi)^2$ (GHz^2)

[図17]


1
0
-1
0
1
2
Im[b_{out}] (ns$^{-1/2}$)
Re[b_{out}] (ns$^{-1/2}$)
|g⟩
|e⟩

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/JP2024/029139

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

H10N 60/12(2023.01)i
FI: H10N60/12 Z ZAA

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

H10N60/12

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Published examined utility model applications of Japan 1922-1996
Published unexamined utility model applications of Japan 1971-2024
Registered utility model specifications of Japan 1996-2024
Published registered utility model applications of Japan 1994-2024

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	JEFFREY, E et al., Fast Accurate State Measurement with Superconducting Qubits, PHYSICAL REVIEW LETTERS, 2014. 05, vol. 112, no. 190504 particularly, page 1, left column, line 28 to page 2, left column, line 43, fig. 1	1-9
A	REED, M. D et al., Fast Reset and Suppressing Spontaneous Emission of a Superconducting Qubit, Applied Physics Letter, 2010. 05, vol. 96, no. 203110 particularly, page 1, left column, line 23 to page 2, left column, line 28, fig. 1	1-9

☐ Further documents are listed in the continuation of Box C. ☐ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:
"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance
"D" document cited by the applicant in the international application
"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date
"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)
"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means
"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed
"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art
"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search	Date of mailing of the international search report
10 October 2024	**22 October 2024**
Name and mailing address of the ISA/JP **Japan Patent Office (ISA/JP)** **3-4-3 Kasumigaseki, Chiyoda-ku, Tokyo 100-8915** **Japan**	Authorized officer Telephone No.

国際調査報告

国際出願番号
PCT/JP2024/029139

A. 発明の属する分野の分類（国際特許分類（ＩＰＣ））

H10N 60/12(2023.01)i
FI: H10N60/12 Z ZAA

B. 調査を行った分野

調査を行った最小限資料（国際特許分類（ＩＰＣ））

H10N60/12

最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの

日本国実用新案公報	１９２２－１９９６年
日本国公開実用新案公報	１９７１－２０２４年
日本国実用新案登録公報	１９９６－２０２４年
日本国登録実用新案公報	１９９４－２０２４年

国際調査で使用した電子データベース（データベースの名称、調査に使用した用語）

C. 関連すると認められる文献

引用文献のカテゴリー*	引用文献名　及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する請求項の番号
A	JEFFREY, Evan et al., Fast Accurate State Measurement with Superconducting Qubits, PHYSICAL REVIEW LETTERS, 2014.05, vol. 112, no.190504 特に、第１頁左欄第28行目－第2頁左欄第43行目、図１	1-9
A	REED, M. D. et al., Fast Reset and Suppressing Spontaneous Emission of a Superconducting Qubit, Applied Physics Letter, 2010.05, vol. 96, no. 203110 特に、第1頁左欄第23行目－第2頁左欄28行目、図１	1-9

☐ C欄の続きにも文献が列挙されている。

☐ パテントファミリーに関する別紙を参照。

* 引用文献のカテゴリー
"A" 特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの
"D" 国際出願で出願人が先行技術文献として記載した文献
"E" 国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの
"L" 優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献（理由を付す）
"O" 口頭による開示、使用、展示等に言及する文献
"P" 国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願の日の後に公表された文献
"T" 国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と抵触するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの
"X" 特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの
"Y" 特に関連のある文献であって、当該文献と他の１以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの
"&" 同一パテントファミリー文献

国際調査を完了した日	国際調査報告の発送日
10.10.2024	22.10.2024

名称及びあて先
日本国特許庁(ISA/JP)
〒100-8915
日本国
東京都千代田区霞が関三丁目４番３号

権限のある職員（特許庁審査官）
石川　雄太郎 5F 5090
電話番号 03-3581-1101 内線 3514