(19)日本国特許庁(JP)　(12)公表特許公報(A)　(11)公表番号
特表2024-543344
(P2024-543344A)
(43)公表日　令和6年11月21日(2024.11.21)

(51)国際特許分類			FI			テーマコード（参考）
H10N 60/00	*(2023.01)*		H10N	60/00	G	4M113
H10N 60/12	*(2023.01)*		H10N	60/12	A	

審査請求　未請求　予備審査請求　未請求　（全40頁）

(21)出願番号　特願2024-526670(P2024-526670)
(86)(22)出願日　令和4年11月11日(2022.11.11)
(85)翻訳文提出日　令和6年6月3日(2024.6.3)
(86)国際出願番号　PCT/CA2022/051671
(87)国際公開番号　WO2023/082014
(87)国際公開日　令和5年5月19日(2023.5.19)
(31)優先権主張番号　63/279,333
(32)優先日　令和3年11月15日(2021.11.15)
(33)優先権主張国・地域又は機関
米国(US)
(31)優先権主張番号　63/279,347
(32)優先日　令和3年11月15日(2021.11.15)
(33)優先権主張国・地域又は機関
米国(US)
(31)優先権主張番号　18/054,704
最終頁に続く

(71)出願人　523326827
ノール クアンティキ インコーポレイテッド
カナダ ジェイ１ケイ ０エイ５ ケベック、シェルブルック、ブルヴァール ドゥルニヴェルスィテ ３０００、シーピーピー１－アセット
(74)代理人　110000855
弁理士法人浅村特許事務所
(72)発明者　カミランド レミール、ジュリアン
カナダ ジェイ１ケイ ０エイ５ ケベック、シェルブルック、ブルヴァール ドゥルニヴェルスィテ ３０００、シーピーピー１－アセット、ノール クアンティキ インコーポレイテッド 気付
最終頁に続く

(54)【発明の名称】　量子デバイス及び量子デバイスを動作させる方法

(57)【要約】
量子デバイス及び量子デバイスを動作させる方法の、様々な実施例について説明している。量子デバイスは、一実施例では、基板と、該基板の基板表面上に支持され、量子デバイスの動作中に超伝導性を示す、超伝導回路素子と、受動的磁気素子とを備え、受動的磁気素子は、磁場を発生させ、超伝導回路素子は、量子デバイスの動作中に、磁場の少なくとも一部に直接的又は間接的に曝される。いくつかの実施例では、超伝導回路素子は、磁場の一部に間接的に曝され、磁場の一部が、１つ又は複数の磁場誘導部によって、少なくとも部分的に、受動的磁気素子に近接する第１の場所から、超伝導回路素子に近接する第２の場所へ誘導される。

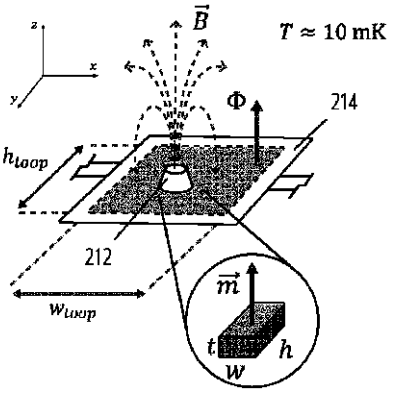


FIG. 2B

【特許請求の範囲】
【請求項１】
量子デバイスであって、
基板と、
前記基板の基板表面上に支持され、前記量子デバイスの動作中に超伝導性を示す、超伝導回路素子と、
受動的磁気素子と
を備え、前記受動的磁気素子が、磁場を発生させ、前記超伝導回路素子が、前記量子デバイスの動作中に、前記磁場の少なくとも一部に直接的又は間接的に曝される、量子デバイス。
【請求項２】
前記超伝導回路素子が、対応する点で分配及び再結合する２本の岐路を備える超伝導ループを具備し、各岐路が、少なくとも１つのジョセフソン接合を備え、前記磁場の前記一部が、前記超伝導ループを横切る磁気誘導束に寄与する、請求項１に記載の量子デバイス。
【請求項３】
前記受動的磁気素子及び前記超伝導回路素子が、両方とも、前記基板の前記基板表面で支持される、請求項２に記載の量子デバイス。
【請求項４】
前記受動的磁気素子が、前記超伝導回路素子に隣り合って配置される、請求項３に記載の量子デバイス。
【請求項５】
前記超伝導ループが、少なくとも１本の低感度軸を有し、前記受動的磁気素子が、前記低感度軸上に位置する、請求項４に記載の量子デバイス。
【請求項６】
前記低感度軸が、前記超伝導ループの前記２本の岐路を横切って横方向に延びる、請求項５に記載の量子デバイス。
【請求項７】
前記受動的磁気素子が、前記基板表面に対して垂直な磁化方向を有する、請求項４に記載の量子デバイス。
【請求項８】
前記受動的磁気素子が、第１の受動的磁気素子であり、前記量子デバイスが、前記基板表面によって支持される第２の受動的磁気素子をさらに備え、前記第２の受動的磁気素子が、前記超伝導ループに対して中央に位置する、請求項７に記載の量子デバイス。
【請求項９】
前記基板表面によって支持される第３の受動的磁気素子をさらに備え、前記第３の受動的磁気素子が、前記超伝導ループに隣り合って、前記第１の受動的磁気素子とは反対側に位置する、請求項８に記載の量子デバイス。
【請求項１０】
前記受動的磁気素子が、前記基板表面に平行な磁化方向を有し、前記磁化方向が、前記超伝導ループの前記低感度軸に沿って向きを合わせられる、請求項５に記載の量子デバイス。
【請求項１１】
前記受動的磁気素子が、前記超伝導ループによって画定される平面の上方又は下方に配置される、請求項２に記載の量子デバイス。
【請求項１２】
前記基板が、第１の基板であり、前記量子デバイスが、前記第１の基板から離間して保持される第２の基板をさらに備え、前記受動的磁気素子が、前記第２の基板によって支持される、請求項１１に記載の量子デバイス。
【請求項１３】

前記受動的磁気素子が、前記基板表面に形成された窪み内に配置される、請求項１１に記載の量子デバイス。

【請求項１４】

前記超伝導回路素子が、磁束量子ビット、超伝導量子干渉デバイス（ＳＱＵＩＤ）、超伝導非線形非対称誘導素子（ＳＮＡＩＬ）、及び容量分路型ＳＮＡＩＬ（ＳＮＡＩＬＭＯＮ）からなる群から選択される、請求項２に記載の量子デバイス。

【請求項１５】

前記超伝導素子が、複数の超伝導素子のうちの１つであり、前記複数の超伝導素子が、前記基板表面上に配列構成で配置される、請求項１に記載の量子デバイス。

【請求項１６】

前記磁気誘導束が、磁気誘導束量子Φ_0の規模である、請求項２に記載の量子デバイス。

【請求項１７】

前記超伝導回路素子が、前記磁場の前記一部に間接的に曝され、前記磁場の前記一部が、１つ又は複数の磁場誘導部によって、少なくとも部分的に、前記受動的磁気素子に近接する第１の場所から、前記超伝導回路素子に近接する第２の場所へ誘導され、

前記１つ又は複数の磁場誘導部のそれぞれが、前記磁場の前記一部を少なくとも部分的に誘導するよう動作可能であり、

前記基板の少なくとも１つの基板層を横切って延在し、第１の端部及び第２の端部を有し、前記少なくとも１つの基板層の内側に内面を画定する、管状通路と、

前記量子デバイスの動作中に、超伝導性を示す材料の誘導層と、を備え、前記誘導層が、前記管状通路の前記内面を少なくとも部分的に覆い、前記第１の端部から前記第２の端部まで広がる、請求項１に記載の量子デバイス。

【請求項１８】

１つの磁場誘導部を備え、前記基板表面が、第１の基板表面であり、前記基板が、前記第１の基板表面と反対側の第２の基板表面をさらに備え、前記受動的磁気素子が、前記第２の基板表面によって支持され、前記管状通路の前記第１の端部が、前記第１の基板表面上で、前記超伝導回路素子に近接して配置され、前記管状通路の前記第２の端部が、前記第２の基板表面上で、前記受動的磁気素子に近接して配置される、請求項１７に記載の量子デバイス。

【請求項１９】

前記基板が、第１の基板層及び第２の基板層を備え、前記第１の基板層が、前記基板表面を備え、前記基板が、内部磁場誘導部をさらに具備し、前記内部磁場誘導部が、

前記第１の基板層と前記第２の基板層との間に形成される空洞であって、内部空洞表面を画定する、空洞と、

前記量子デバイスの前記動作中に超伝導性を示す、前記材料の空洞誘導層と

を備え、前記空洞誘導層が、少なくとも部分的に前記内部空洞表面を覆い、

前記量子デバイスが、２つの磁場誘導部を備え、

前記２つの磁場誘導部のうちの第１の磁場誘導部が、その第１の端部が、前記内部磁場誘導部に結合され、その第２の端部が、前記基板表面上で、前記超伝導回路素子に近接して配置される、吸込み誘導部として作用し、

前記２つの磁場誘導部のうちの第２の磁場誘導部が、その第１の端部が、前記基板表面上で、前記受動的磁気素子に近接して配置され、その第２の端部が、前記内部磁場誘導部に結合される、発生源誘導部として作用し、

前記磁場の前記一部が、少なくとも部分的に、前記発生源誘導部の前記第１の端部から、前記内部磁場誘導部を通って、前記吸込み誘導部の前記第２の端部まで誘導される、請求項１７に記載の量子デバイス。

【請求項２０】

前記超伝導回路素子が、量子コンピュータの量子サブシステムとして動作するよう構成され、前記超伝導回路素子が、前記量子コンピュータの動作中に、前記量子サブシステム

内に少なくとも１つの量子ビットを提供するよう動作可能である、請求項１に記載の量子デバイス。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【０００１】

本開示は、量子コンピュータ処理に関し、詳細には、量子デバイス及び量子デバイスを動作させる方法に関する。

【背景技術】

【０００２】

科学者及び技術者は、何十年も前の発見以来、量子物理学の特性を様々なやり方で利用する、デバイス及びシステムを開発してきた。つい最近では、量子コンピュータ処理の分野は、具体的には、現代の計算、通信、及び暗号化を崩壊させる可能性があるので、特に活発な研究分野となっている。量子特性を利用するために、実際上又は理論的に、様々なアーキテクチャが検討されおり、具体的には、超伝導回路は、特に有望視されて出現した、アーキテクチャのフレームワークの一形態である。

【０００３】

情報が物理的にメモリに記憶され、バイナリ形式（ビット）で読み出され、送信され、処理される、古典コンピュータとは対照的に、量子コンピュータでは、この文脈では量子情報と呼ばれる情報は、量子サブシステム（量子ビット）の状態で量子情報を符号化することにより、物理的にメモリに記憶され、量子アルゴリズムで処理され、フォン・ノイマン・エントロピに基づいて測定される（読み出される）。

【０００４】

実際の物理デバイスにおいて、量子情報を符号化する際に直面する主な課題の１つは、２つの相反する要件のバランスを取ることである。第１に、量子情報は、本来壊れやすく、デコヒーレンスの要因による損失の影響を受ける。残念ながら、所望の（「制御」）相互作用を含む、環境との事実上すべての相互作用が、デコヒーレンスの潜在的な要因となる。したがって、量子情報を記憶し、処理するよう設計されたシステムは、環境との相互作用から可能な限り隔離されるべきである。第２に、量子情報が有用であるためには、量子情報を処理して最終的にアクセスできる必要があり、これは、外部制御システムとの相互作用を通じて制御可能である必要があり、忠実度高く制御するために、こうした相互作用の制御は、通常、高速で実行されることを意味する。

【０００５】

したがって、超伝導回路、及び回路量子電気力学フレームワーク（ＣＱＥＤ：ｃｉｒｃｕｉｔ ｑｕａｎｔｕｍ ｅｌｅｃｔｒｏｄｙｎａｍｉｃ ｆｒａｍｅｗｏｒｋ）で設計された回路は、例えば量子コンピュータなどの、様々な量子デバイスの有望なアーキテクチャとして出現してきたが、かなりの改善の余地が残っていることを理解されよう。具体的には、トランスモンと呼ばれる一部の超伝導回路素子は、ある一定レベルのノイズ耐性を維持しながら、所望の非線形性を実現できるので、有用である。超伝導量子干渉デバイス（ＳＱＵＩＤ：ｓｕｐｅｒｃｏｎｄｕｃｔｉｎｇ ｑｕａｎｔｕｍ ｉｎｔｅｒｆｅｒｅｎｃｅ ｄｅｖｉｃｅ）、超伝導磁束量子ビット、超伝導非線形非対称誘導素子（ＳＮＡＩＬ：ｓｕｐｅｒｃｏｎｄｕｃｔｉｎｇ ｎｏｎｌｉｎｅａｒ ａｓｙｍｍｅｔｒｉｃ ｉｎｄｕｃｔｉｖｅ ｅｌｅｍｅｎｔ）、又は容量分路型ＳＮＡＩＬ（ＳＮＡＩＬＭＯＮ）などの他の超伝導回路素子は、動作中に一定の磁気誘導束（ｍａｇｎｅｔｉｃ ｆｌｕｘ）から恩恵を受けることができるか、又は一定の磁束を必要とすることさえあるという意味で、「磁束調節可能」である。ＳＱＵＩＤ及びＳＮＡＩＬは、例えば、複数のジョセフソン接合を備える超伝導ループを具備し、ループを横切る磁気誘導束に依存する周波数応答を提供する。いくつかの実例を挙げると、３次及び４次の非線形性、又は量子ビット間の相互作用などの他のパラメータは、磁束によって調節することができる。磁束調節可能な超伝導回路素子は、磁場の存在下で動作するよう設計されており、好適な磁場を発生させると、実際には、様々な課題が生じることが判明した。

【０００６】
この背景情報は、関連する可能性があると出願人が考える情報を、明らかにするために提示されている。前述の情報のいずれかが、従来技術を構成すること、又は関連技術における一般常識の一部を形成することを、必ずしも認めることを意図したものではなく、また、そのように解釈されるべきではない。
【先行技術文献】
【非特許文献】
【０００７】
【非特許文献１】Ｇｒｉｍｍ，Ａ．等、「Ｓｔａｂｉｌｉｚａｔｉｏｎ ａｎｄ ｏｐｅｒａｔｉｏｎ ｏｆ ａ Ｋｅｒｒ－ｃａｔ ｑｕｂｉｔ」、Ｎａｔｕｒｅ５８４、２０２０年
【発明の概要】
【課題を解決するための手段】
【０００８】
超伝導回路ループに好適な動作環境を設けるように、磁場を発生させる１つの手法は、磁場を能動的に、すなわち超伝導回路ループとは別個の導体に沿って電流を循環させることによって、発生させることである。電流を、サンプル・チップの近くに配置された磁場コイル内を循環させるか、又は同じチップ上に配置され、例えば超伝導回路ループの近くを通っている、磁束バイアス線に沿って循環させることができる。かかる手法は、特定の問題を引き起こす可能性がある。実際、超伝導回路ループは、通常、典型的には希釈冷凍機で実現される、非常に低い（例えば、ｍＫの範囲の）温度で動作する。磁場放射導体は、したがって、希釈冷凍機の内部で、超伝導回路ループに近接して配置されるが、駆動素子は、希釈冷凍機の外側に配置されるため、実際には課題を伴う。量子コンピュータ処理アーキテクチャでは、能動的にバイアスされた導電体が、望ましからざる相互作用及びクロストークの起こり得る原因となる。さらに、かかるバイアスされた導電体は通常、かなり占有面積が広く、超伝導ループと同じ基板に統合される追加のポートを必要とし、拡張性に、潜在的な制限を課す可能性がある。さらに、３Ｄ量子ビットなどの３Ｄアーキテクチャの超伝導回路ループの近傍での、チップ上の磁束バイアス線の使用を検討する場合、通常、リード線を基板上の超伝導素子に接続するガルバニック接続が、利用できない可能性があるという、特有の課題が生じる。最後に、希釈冷凍機に流れ込むＤＣ電流によって生じる可能性のある放散に対処するために、追加のハードウェアを必要とし、コストがより増大する一因となり得る。少なくともいくつかの実施例では、永久磁石を使用して、超伝導回路環境で固定磁場成分を発生させる代替手法が、直観に反しているにも係わらず、電流循環によって磁束バイアスするよりも、利点を有する可能性のあることが判明した。
【０００９】
様々なパラメータが、超伝導回路ループ上の磁場の有効性に影響を与える可能性がある。例えばＳＱＵＩＤでは、超伝導体磁束ループ内の磁気誘導束（Φ）の、細かく調整された一定値を実現させることが望まれる場合があり、この一定値は、例えばΦ／Φ_0が０から１の間のいずれかの特定の値となることを目標とするような、磁気誘導束量子（Φ_0＝２．０６８×１０$^{-15}$Ｗｂ）の規模であり得る。多くの実際的な実施例では、超伝導ループと同じ平面（例えば、同じウェハ表面）内に磁場発生源を組み込むことが、現実的ではない場合がある。これは、例えば、超伝導ループの近傍に永久磁石を形成する材料が存在することによって生じる、例えば損失によってもたらされる場合がある。したがって、超伝導ループを支持する基板の反対側に磁場発生源を配置することが好ましい場合があり、その場合、具体的には、磁場の幾何学的影響により、Φの所望の値を得ることが困難となる可能性がある。実際、多くの磁場の形状は、超伝導ループに値Φ／Φ_0を与えることになり、この値は、約１／r^nのΦ／Φ_0など、発生源との距離ｒの累乗の関数として減少するであろう。ここで、ｎは、例えば幾何形状の詳細に応じて３から５の間で変わり得る。少なくともいくつかの実施例では、超伝導シリコン貫通ビアを用いて、基板を横切る磁場を誘導することにより、ｎが１により近づく関係を実現できる可能性があり、これは

、少なくともいくつかの実施例では好適であり得ることが判明した。

【００１０】

一態様によれば、量子デバイスが提供され、量子デバイスは、少なくとも１枚のウェハと、該少なくとも１枚のウェハによって支持された回路素子を備える超伝導回路であって、量子デバイスの動作中に超伝導性を示す、超伝導回路と、量子デバイスの動作中に、超伝導回路に対して所与の位置で、回路素子を横切る磁気誘導束を発生させるような、少なくとも１枚のウェハによって支持された受動的磁気素子とを備える。

【００１１】

別の態様によれば、量子デバイスの回路素子を横切る永久磁気誘導束を発生させる受動的磁気素子を備え、回路素子がウェハによって支持される、量子デバイスを動作させる方法が提供される。

【００１２】

別の態様によれば、量子デバイスが提供され、量子デバイスは、基板と、該基板の基板表面上に支持された超伝導回路素子であって、量子デバイスの動作中に超伝導性を示す、超伝導回路素子と、受動的磁気素子とを備え、受動的磁気素子は、磁場を発生させ、超伝導回路素子は、量子デバイスの動作中に、磁場の少なくとも一部に直接的又は間接的に曝される。

【００１３】

一実施例によれば、超伝導回路素子は、対応する点で分配及び再結合する２本の岐路を備える超伝導ループを具備し、各岐路が、少なくとも１つのジョセフソン接合を備え、磁場の該一部が、超伝導ループを横切る磁気誘導束を提供する。

【００１４】

一実施例では、受動的磁気素子及び超伝導回路素子は、両方とも、該基板の該基板表面で支持される。

【００１５】

一実施例では、受動的磁気素子は、超伝導回路素子に隣り合って配置される。

【００１６】

一実施例では、超伝導ループは、少なくとも１本の低感度軸を有し、受動的磁気素子は、該低感度軸上に配置される。

【００１７】

一実施例では、低感度軸は、該超伝導ループの２本の岐路を横切って横方向に延びている。

【００１８】

一実施例では、受動的磁気素子は、該基板表面に対して垂直な磁化方向を有する。

【００１９】

一実施例では、受動的磁気素子は、第１の受動的磁気素子であり、基板表面によって支持される第２の受動的磁気素子をさらに備え、第２の受動的磁気素子は、超伝導ループに対して中央に配置される。

【００２０】

一実施例では、このデバイスは、基板表面によって支持される第３の受動的磁気素子をさらに備え、第３の受動的磁気素子は、超伝導ループに隣り合って、第１の受動的磁気素子とは反対側に配置される。

【００２１】

一実施例では、受動的磁気素子は、該基板表面に平行な磁化方向を有し、磁化方向が、超伝導ループの該低感度軸に沿って向きを合わせられる。

【００２２】

一実施例では、受動的磁気素子は、該超伝導ループによって画定される平面の上方又は下方に配置される。

【００２３】

一実施例では、基板は、第１の基板であり、第１の基板から離間して保持される第２の

基板をさらに備え、受動的磁気素子は、第２の基板によって支持される。
【００２４】
一実施例では、受動的磁気素子は、該基板表面に形成された窪み内に配置される。
【００２５】
一実施例では、超伝導回路素子は、磁束量子ビット、超伝導量子干渉デバイス（ＳＱＵＩＤ）、超伝導非線形非対称誘導素子（ＳＮＡＩＬ）、及び容量分路型ＳＮＡＩＬ（ＳＮＡＩＬＭＯＮ）からなる群から選択される。
【００２６】
一実施例では、超伝導素子は、複数の超伝導素子のうちの１つであり、複数の超伝導素子が、基板表面上に配列構成で配置される。
【００２７】
一実施例では、磁気誘導束は、磁気誘導束量子Φ_0の規模である。
【００２８】
一実施例では、受動的磁気素子は、ドット・マイクロ磁石又は棒マイクロ磁石である。
【００２９】
一実施例では、動作中の該受動的磁気素子の、磁束ループ上での最大磁場振幅
【数１】

$$\max\left(\left|\vec{B}\right|_{flux\ loop}\right)$$

は、該超伝導回路素子の超伝導材料の臨界磁場ＨＣの１／１０より小さい。
【００３０】
一実施例では、受動的磁気素子は、磁気トンネル接合である。
【００３１】
一実施例では、超伝導回路素子は、磁場の一部に間接的に曝され、磁場の一部が、１つ又は複数の磁場誘導部によって、少なくとも部分的に、受動的磁気素子に近接する第１の場所から、超伝導回路素子に近接する第２の場所へ誘導され、１つ又は複数の磁場誘導部のそれぞれが、磁場の一部を少なくとも部分的に誘導するよう動作可能であり、基板の少なくとも１つの基板層を横切って延在する管状通路であって、第１の端部及び第２の端部を有し、少なくとも１つの基板層の内側に内面を画定する、管状通路と、量子デバイスの動作中に、超伝導性を示す材料の誘導層であって、管状通路の内面を少なくとも部分的に覆い、第１の端部から第２の端部まで広がる、誘導層とを備える。
【００３２】
一実施例では、このデバイスは、１つの磁場誘導部を備え、基板表面は、第１の基板表面であり、基板は、第１の基板表面と反対側の第２の基板表面をさらに備え、受動的磁気素子は、第２の基板表面によって支持され、管状通路の第１の端部は、第１の基板表面上で、超伝導回路素子に近接して配置され、管状通路の前記第２の端部は、第２の基板表面上で、受動的磁気素子に近接して配置される。
【００３３】
一実施例では、基板は、第１の基板層及び第２の基板層を備え、第１の基板層は、基板表面を備え、基板が、内部磁場誘導部をさらに具備し、内部磁場誘導部が、第１の基板層と第２の基板層との間に形成される空洞であって、内部空洞表面を画定する、内部空洞と、量子デバイスの動作中に超伝導性を示す、該材料の空洞誘導層とを備え、空洞誘導層が、少なくとも部分的に該内部空洞表面を覆い、量子デバイスは、２つの磁場誘導部を備え、２つの磁場誘導部のうちの第１の磁場誘導部は、その第１の端部が、内部磁場誘導部に結合され、その第２の端部が、基板表面上で、超伝導回路素子に近接して配置される、吸込み誘導部として作用し、２つの磁場誘導部のうちの第２の磁場誘導部は、その第１の端部が、基板表面上で、受動的磁気素子に近接して配置され、その第２の端部が、内部磁場誘導部に結合される、発生源誘導部として作用し、磁場の一部は、少なくとも部分的に、発生源誘導部の第１の端部から、該内部磁場誘導部を通って、吸込み誘導部の第２の端部

まで誘導される。
【００３４】
一実施例では、超伝導回路素子は、量子コンピュータの量子サブシステムとして動作するよう構成され、超伝導回路素子は、量子コンピュータの動作中に、量子サブシステム内に少なくとも１つの量子ビットを提供するよう動作可能である。
【００３５】
別の態様によれば、量子デバイスが提供され、量子デバイスは、基板と、磁場誘導部とを備え、磁場誘導部が、基板の少なくとも１つの基板層を横切って延在する、管状通路であって、第１の端部及び第２の端部を有し、少なくとも１つの基板層の内側に内面を画定する、管状通路と、量子デバイスの動作中に、超伝導性を示す材料の誘導層であって、管状通路の内面を少なくとも部分的に覆い、第１の端部から第２の端部まで広がり、磁場誘導部に沿って磁場の一部を誘導するよう動作可能である、誘導層とを備える。
【００３６】
一実施例では、このデバイスは、磁場を少なくとも部分的に発生させるよう構成された、少なくとも１つの磁場発生源をさらに備える。
【００３７】
一実施例では、このデバイスは、少なくとも１つの超伝導回路素子をさらに備え、超伝導素子は、該磁場誘導部によって誘導される磁場の該一部に曝される。
【００３８】
一実施例では、少なくとも１つの超伝導回路素子のそれぞれは、複数のジョセフソン接合を備える超伝導ループを具備し、磁場誘導部によって誘導される磁場の一部が、量子デバイスの動作中に、超伝導ループを横切る磁気誘導束を与える。
【００３９】
一実施例では、管状通路の第１の端部及び少なくとも１つの超伝導回路素子は、基板の同じ外面上に位置し、超伝導回路素子は、第１の端部に近接している。
【００４０】
一実施例では、管状通路の第１の端部は、超伝導ループに対して中央に位置する。
【００４１】
一実施例では、管状通路の第１の端部は、超伝導ループに隣り合って配置される。
【００４２】
一実施例では、このデバイスは、その両方ともが外面上に支持される、第１の超伝導回路素子及び第２の超伝導回路素子をさらに備え、両方を同時に磁場の一部に曝すために、管状通路の第１の端部が、第１の超伝導回路素子の超伝導ループと、第２の超伝導回路素子の超伝導ループとの間に配置される。
【００４３】
一実施例では、外面は、第１の外面であり、基板は、第１の外面と反対側の第２の外面をさらに備え、管状通路の第２の端部は、第２の外面上に位置し、磁場発生源は、第２の端部に近接して配置される。
【００４４】
一実施例では、受動的磁場発生源は、第２の外面によって支持され、管状通路の第２の端部に隣り合う。
【００４５】
一実施例では、基板は、第１の基板であり、このデバイスは、第１の基板の第２の外面から離間して保持された第２の基板をさらに備え、第２の基板は、第１の基板の第２の外面に隣り合う第３の外面を備え、磁場発生源は、第３の外面によって支持される。
【００４６】
一実施例では、基板は、第１の基板層及び第２の基板層を備え、第１の基板層は、外面を備え、管状通路は、第１の層だけを横切って延在し、管状通路の第２の端部は、第１の層と第２の層との間に位置し、磁場発生源は、該基板内の管状通路の第２の端部に近接して配置される。

【００４７】
一実施例では、少なくとも１つの磁場発生源は、受動的磁気素子を含む。
【００４８】
一実施例では、少なくとも１つの磁場発生源は、電気駆動部に接続された導電体素子を備える、能動的磁気素子を含む。
【００４９】
一実施例では、管状通路によって画定される内部容積は、少なくとも部分的に、非伝導性材料で充填される。
【００５０】
一実施例では、受動的磁気素子は、該基板の表面に支持され、磁場誘導部は、磁場誘導部の第１が、該表面上で、該受動的磁気素子に隣り合って配置される、第１の磁場誘導部であり、量子デバイスは、第２の磁場誘導部を備え、第２の磁場誘導部は、表面上で、受動的磁気発生源に隣り合って、第１の磁場誘導部の第１の端部とは反対側に配置される、第２の磁場誘導部の第１の端部を有し、受動的磁気素子は、該第１の磁場誘導部及び該第２の磁場誘導部によって誘導される磁場の一部がそれぞれ、逆の磁束極性を有するように、横方向に向けられた磁場発生源として作用するよう配置される。
【００５１】
本開示を読めば、本改善に関する、多くのさらなる特徴及び特徴の組合せが、当業者には明らかとなろう。
【図面の簡単な説明】
【００５２】
【図１Ａ】古典的調和発振器の概略回路図である。
【図１Ｂ】トランスモンの基本バージョンの概略回路図である。
【図１Ｃ】磁束を調節可能な超伝導回路素子の概略回路図である。
【図１Ｄ】磁束を調節可能な超伝導回路素子の概略回路図である。
【図１Ｅ】ジョセフソン接合を示す図である。
【図１Ｆ】ジョセフソン接合の、外部平行磁場に対する周波数応答を示す図である。
【図１Ｇ】スピン量子ビットにおける、量子ドットに印加される磁場を、概略的に示す図である。
【図２Ａ】超伝導回路上に、能動的に駆動される磁場の一実例である、磁場を印加するための、可能性のある例示的構成の概略図である。
【図２Ｂ】永久磁石の対応する構成、より具体的には、中央のドット磁石構成から放射される磁場の実例である、磁場を印加するための、可能性のある例示的構成の概略図である。
【図２Ｃ】永久磁石の対応する構成、より具体的には、横の棒磁石構成から放射される磁場の実例である、磁場を印加するための、可能性のある例示的構成の概略図である。
【図２Ｄ】永久磁石の対応する構成、より具体的には、横のドット磁石構成から放射される磁場の実例である、磁場を印加するための、可能性のある例示的構成の概略図である。
【図３】ドット磁石の場合の、超伝導ループに対する永久磁石の位置の関数である、デバイス・パラメータのばらつきに対する磁気誘導束の感度のシミュレーション結果の図である。
【図４】横の棒磁石構成の場合の、磁場シミュレーションの数値結果の図である。
【図５】中央のドット磁石構成の場合の、磁場シミュレーションの数値結果の図である。
【図６】横のドット磁石構成の場合の、磁場シミュレーションの数値結果の図である。
【図７Ａ】永久磁石の対応する構成、より具体的には、補償される中央のドット構成から放射される、磁場の実例を示す図である。
【図７Ｂ】永久磁石の対応する構成、より具体的には、２重に補償される中央のドット構成から放射される、磁場の実例を示す図である。
【図８】様々な永久磁石の構成での、磁気誘導束のばらつきを示す図である。
【図９Ａ】損失に関するシミュレーション結果を示す図である。

【図９Ｂ】損失に関するシミュレーション結果を示す図である。
【図１０】シミュレーションした、損失とＳＮＡＩＬＭＯＮループのスケール係数との関係を示すグラフである。
【図１１Ａ】複数の超伝導ループ間で永久磁石を共有する、１次元配列構成の実例の図である。
【図１１Ｂ】複数の超伝導ループ間で永久磁石を共有する、１次元配列構成の実例の図である。
【図１１Ｃ】複数の超伝導ループ間で永久磁石を共有する、１次元配列構成の実例の図である。
【図１２】平面から外れた幾何配置の一実例を示す断面図である。
【図１３Ａ】追加の、平面から外れた幾何配置の概略図である。
【図１３Ｂ】追加の、平面から外れた幾何配置の概略図である。
【図１４】基板を横切り、ビアをわたる超伝導回路素子への磁場の誘導を示す、シミュレーション結果の図である。
【図１５】図１４で提示したようなシミュレーションでの、磁気誘導束と基板の厚さ／ビアの長さとの関係のグラフである。
【図１６】追加の、平面から外れた幾何配置の概略図である。
【図１７】図１６に提示したような構成から生じる、磁場を示すシミュレーション結果の図である。
【図１８】磁気誘導束とフリップ・チップの間隙との関係、さらには磁石体積スケーリング係数のグラフである。
【図１９】磁場誘導部の、別の可能な実施例の概略図である。
【図２０】超伝導磁気誘導部及び超伝導空洞を備える量子デバイス構成について実行した、シミュレーション結果を提示する図である。
【図２１】超伝導磁場誘導部の管状要素の、例示的な代替構成の概略図である。
【図２２Ａ】ウェハ表面に沿った、磁場誘導部の分布の概略図である。
【図２２Ｂ】磁場誘導部の分布及び関連する磁場発生源を用いて実現できる、磁気紋様プロファイルの概略図である。
【図２２Ｃ】単一の磁石を、２つの磁気誘導部と共に使用して、ウェハの反対側に逆極性の磁場を発生させる、例示的な一実施例の図である。
【図２３】量子ビットを提供できる量子サブシステムを形成する複数の量子デバイスを備える、量子プロセッサとして実現できる、量子システムの概略図である。
【発明を実施するための形態】
【００５３】
いくつかの図における要素は、話を単純且つ明快にするために例示されており、必ずしも原寸に比例して描かれていない。例えば、図の要素の一部の寸法は、ここで開示されている様々な実施例の理解が容易になるように、他の要素と比べて誇張されている場合がある。さらに、商業的に実現可能な実施例において有用又は必要な、一般的ではあるがよく理解されている要素は、本開示のこうした様々な実施例をより見やすくするために、図示されていないことが多い。
【００５４】
本明細書の様々な実施態様及び態様について、下記で論じる詳細を参照しながら説明することにする。以下の説明及び図面は、本明細書を例示するものであり、本明細書を限定するものと解釈されるべきではない。本明細書の様々な実施態様の完全な理解が得られるように、多数の特定の詳細を説明している。しかし、場合によっては、本明細書の実施態様を簡潔に論じるために、よく知られた又は従来の詳細については説明していない。
【００５５】
さらに、本明細書で説明する実施態様の完全な理解を得るために、多数の特定の詳細を記載している。しかし当業者は、本明細書で説明する実施態様が、こうした特定の詳細なしに実施され得ることを理解されよう。他の実例では、本明細書で説明している実施態様

を曖昧にしないように、よく知られた方法、手順、及び部品を詳細には説明していない。

【００５６】

要素は、この明細書では、１つ又は複数の機能を「実行するよう構成される」か、又はかかる機能「向けに構成される」と説明されている場合がある。一般に、機能を実行するよう構成された、又は機能の実行に向けて構成された要素は、その機能を実行するよう対応しているか、その機能を実行するのに好適であるか、その機能を実行するよう適合されているか、その機能を実行するよう動作可能であるか、さもなければ、その機能を実行可能である。

【００５７】

本開示の態様又は本開示の実例の要素を導入するときの、冠詞「ａ」、「ａｎ」、「ｔｈｅ」、及び「ｓａｉｄ」は、１つ又は複数の要素が存在することを意味することを意図している。「備える」、「含む」、及び「有する」という用語は、包括的であることを意図し、列挙された要素以外のさらなる要素が存在し得ることを意味する。「例示的な」という用語は、「～の一実例」を意味することを意図している。「Ａ、Ｂ、及びＣのうちの１つ又は複数」という句は、「Ａのうちの少なくとも１つ、Ｂのうちの少なくとも１つ、及び／又はＣのうちの少なくとも１つ」を意味する。

【００５８】

図１Ａ～図１Ｄは、回路素子の概略図である。より具体的には、図１Ａは、当技術分野でよく知られている、インダクタンスＬ及びキャパシタンスＣを備える調和振動子の古典的電気回路を示している。調和振動子は、$\omega_0 = 1/\sqrt{(LC)}$と定義される線形共振周波数応答を有する。

【００５９】

回路素子が動作中に（通常、非常に低温を必要とする）超伝導性を示す、超伝導回路１０２では、インダクタンスの代わりにジョセフソン接合を導入することにより、トランスモンと呼ばれる、僅かに非調和の振動子を実現することができる。かかる構成におけるジョセフソン接合１０４は、例えば、量子情報を符号化し、操作するために使用できる、非線形性をもたらすことができる。トランスモンは、半導体及び絶縁体などの基板を覆う、低温で超伝導性を示す材料のトレースの形で形成することができる。

【００６０】

図１Ｂに示している超伝導回路の基本的な実施例では、周波数ω_qは調整不可能である。ジョセフソン接合を備える他の超伝導回路素子も開発されており、回路内に超伝導ループが導入されている。超伝導ループは、より具体的には、超伝導ループの両側の対応する点で分配及び再結合する、２本の岐路を備えることができる。超伝導ループの各岐路に１つ（又は複数）のジョセフソン接合を導入でき、これにより、周波数ω_qが超伝導ループを貫く磁気誘導束Φに依存する構成を作り出すことができる。他のパラメータ及び相互作用は、磁束を設定して、超伝導デバイスを磁束不感点に調整する（例えば、磁束量子ビットにおいて$\Phi/\Phi_0 = 0.5$にする）ような磁気誘導束Φによって、又はこれらに限定されるものではないが、３次キュービック相互作用又は４次カー相互作用などの混合機能によって、調整することができる。

【００６１】

ループを備える超伝導回路の実例を、図１Ｃ及び図１Ｄに提示している。図１Ｃは、より具体的には、当技術分野で通常ＳＱＵＩＤ（超伝導量子干渉デバイス）と呼ばれ、超伝導ループ１０６の２本の岐路のそれぞれに１つのジョセフソン接合を備える、トランスモン・デバイスの一実例を提示している。図１Ｄは、通常ＳＮＡＩＬ（超伝導非線形非対称誘導素子）と呼ばれ、超伝導ループの２本の岐路のうちの第１の岐路に、１つの小さなジョセフソン接合を備え、超伝導ループ１０６の２本の岐路のうちの第２の岐路に、１つ又は複数の大きいジョセフソン接合を直列に備える、トランスモン・デバイスの一実例を提示している。容量分路型ＳＮＡＩＬであるＳＮＡＩＬＭＯＮの詳細な例示的実施例は、Ｇｒｉｍｍ，Ａ．等、「Ｓｔａｂｉｌｉｚａｔｉｏｎ ａｎｄ ｏｐｅｒａｔｉｏｎ ｏｆ ａ Ｋｅｒｒ－ｃａｔ ｑｕｂｉｔ」、Ｎａｔｕｒｅ ５８４、２０２０年で説明されて

いる。ＳＮＡＩＬＭＯＮの本文献の例示的実施例は、この明細書において、概念実証を論証するための参考として使用し、特に、参照を容易にするために、「ＧｒｉｍｍのＳＮＡＩＬＭＯＮ」と呼ぶことにする。

【００６２】

しかし、他のタイプの超伝導回路素子は、他のバージョンの超伝導回路などの、超伝導ループを備える超伝導回路素子を具備する、他のいくつかの実施例において、磁場の印加による恩恵を受けるか、又は磁場の印加を必要とする場合さえあり、また下記で提示される教示は、かかる他の実施例にも同様に適用可能であり得ることを理解されよう。図１Ｅは、例えば、トンネル接合１１６（絶縁体層１１２及び超伝導層１１４と共に図示している）を有し、トンネル接合１１６の幅に沿って整列した磁場に対して、図１Ｆに示すような周波数応答を示すことができる、ジョセフソン接合１２２特有の一実例を提示している。ここに必要となる磁場は、図に示しているトンネル接合の断面１１８で画定される磁束の活性領域が小さく、通常の磁束ループよりも数桁小さい可能性があるために、ＳＱＵＩＤ又はＳＮＡＩＬの超伝導ループで使用される磁場よりもかなり大きくなる可能性があるが、かかるジョセフソン接合は、永久磁場の存在の恩恵を受けることもできる。この意味で、この明細書は、実証する目的で使用する特定の実例の、限られたサブセットに限定されるものと解釈されるべきではない。

【００６３】

他のいくつかの実施例では、超伝導回路素子以外の回路素子を備える量子デバイスもまた、磁場の印加の恩恵を受けるか、又は磁場の印加を必要とする場合さえあることを理解されよう。例えば、図１Ｇは、量子ビットの一実例を提示している。磁場発生源１２４を使用して、スピン量子ビット内の量子ドット１１０に対して、図示されているような横方向磁場１２０を発生させることができる。制御ゲート１０８も、図１Ｇに示している。磁場勾配は、例えばスピン量子ビットの制御に寄与することができる。

【００６４】

量子デバイスの超伝導又は非超伝導回路素子は、従来の電子回路で使用される製造技法のうちの１つをある程度想起させることができるやり方で、ウェハと呼ばれる受動部品で支持でき、ウェハは、電気絶縁体又は半導体材料で作ることができ、最も一般的なウェハは、シリコン及びサファイアであり得る。超伝導回路素子の製造にはマイクロ及びナノ製造技法が必要であり得、したがって、いくつかの実施例では、ウェハが、かかるマイクロ及びナノ製造技法に適合することが要求される可能性がある。

【００６５】

図２Ａは、超伝導回路の回路素子を貫く磁気誘導束Φを加えるように、磁場Ｂを発生させることができる、第１の技法を提示している。この技法では、例えば電流源などの電気駆動部が、希釈冷凍機の冷却される容積の外側に配置される。リード線は、希釈冷凍機の壁を横切って延在する。超伝導回路（典型的には、動作中に超伝導性を示す材料の、トラック又はラインのパターンの形で実現される）は、１枚又は複数のウェハで画定でき、それぞれが、１つ又は複数のウェハ層を備えることができ（簡略化するために、ウェハは図示せず）、電気駆動部の入力に基づいて磁場を発生させる役割を担う導体も、同じウェハに統合され、典型的には、両端でガルバニック接続部を介してリード線に接続することができる。以後、デバイスの動作中、周囲温度（例えば、３００Ｋ程度）の場所にあり得る電気バイアス源２０２が、磁場を発生させる電気回路に電流を発生させる。この回路は、希釈冷凍機の壁２０６及びガルバニック接続部を横切って延在するリード線２０８、並びにウェハ上の導体バイアス線２１０を備える。導体バイアス線２１０に沿って循環する電流は、磁場Ｂを発生させる。導体線２１０は、磁場Ｂが、超伝導ループ２０４を貫く、磁場の振幅がバイアス電流Ｉに依存する磁気誘導束Φを発生させるように、超伝導ループ２０４に対して慎重に設計された場所に配置される。この磁場生成技法は、磁場を発生させるために能動的に生成される電流循環を必要とするので、「受動的」に対比して「能動的」と見なすことができる。

【００６６】

図２Ｂ、図２Ｃ、及び図２Ｄは、超伝導回路の回路素子（例えば、超伝導ループ２１４を備える）を貫く磁気誘導束Φを加えるように、磁場Ｂを発生させることができる、別の技法の例示的実施例を提示している。図２Ｂ及び図２Ｄでは、磁石の磁化方向は、超伝導ループを支持する表面に対して垂直であるのに対して、図２Ｃでは、磁場の向きは、超伝導ループを支持する表面に対して平行である。磁石は、いずれの場合も、好適な磁気誘導束を加えるように、サイズ及び位置が定められている。図２Ｂでは、磁石２１２はループ２１４に対して中央に位置しているのに対して、図２Ｃ及び図２Ｄでは、それぞれ磁石２１６及び２１８は、ループ２１４に隣り合って（例えば、図２Ｃに示しているように、距離ｌだけ離れて）位置している。図２Ｂ、図２Ｃ、及び図２Ｄの実例では、磁場Ｂを発生させるために、電流の代わりに永久磁石（例えば、それぞれ磁石２１２、２１６、又は２１８）が使用される。この技法は、磁場を維持するために、古典的回路での電流の循環を能動的に必要としないという意味で、「受動的」と見なすことができる。当業者にとって、磁気誘導束を発生させるかかる技法が、量子デバイスの超伝導回路における好適な解決策となる可能性があると推察することは、極めて直観に反するものであった。これは、実現可能性、ばらつき、及び損失、さらにおそらく、この分野に存在したパラダイムを含む一連の理由から、直感に反している可能性がある。

【００６７】

まず、実現可能性の観点から、量子デバイスが磁束でバイアスされる多くの実際的な実施例、具体的には、磁束ループを備える実施例では、目標とする磁気誘導束が、Φ/Φ_0が［０，１］の範囲にあり得る、磁束量子Φ_0程度であり得ることに留意されたい。より小さな磁気誘導束を実現させると、一方では、より体積の小さい磁石を使用できるようになるが、他方では、より小さい磁石は、生産が困難／生産コストがかかる可能性があり、寸法が小さい場合、生産工程のばらつきにより、磁石間の寸法のばらつきが一層大きくなる可能性がある。例えば幅、高さ、長さ、又は直径に関して、例えば１００ｎｍ未満の寸法の磁石を生産することは、かなり困難な可能性がある。寸法のばらつきは、最終組立てにおける動作中の磁気誘導束の精度及び値に、直接的な影響を与える可能性がある。もう１つの重要な要因は、超伝導回路に沿った磁場の振幅Ｂであり、超伝導ループ上の磁場の振幅が、超伝導体の臨界磁場H_cを超える場合（$B > \mu_0 H_c$）、超伝導性を破損する可能性がある。最後に、超伝導回路の電磁環境に磁石自体が存在することにより、損失の形で、デバイスの動作が妨害される可能性がある。

【００６８】

事例研究に移る前に、図２Ｂ、図２Ｃ、及び図２Ｄに提示した例示的な実施例では、永久磁石が、バイアスをかける対象とされる超伝導回路素子がその上に支持されている表面と、同じウェハ表面上に位置することに留意されたい。この構成は、ここでは、特にウェハ表面が平面である状況において、「面内」と呼ぶことができる。下記で例示するような他の実施例では、このウェハ表面に対する磁石要素の位置は、ウェハ内の凹所に配置されるか、又は別のウェハ表面若しくは平面に揃えて配置されるなど、変えることができる。ウェハ表面は、他のいくつかの実施例では、湾曲しているなど、平面でなくてもよい。

【００６９】

事例研究　－　序論

超伝導ループを貫く磁気誘導束Φの発生源として永久磁石を使用することが、ある特定の実施例にとって好適な手段となり得るかどうかを判断するために、事例研究を実行した。この特定の実施例では、上記で参照したＧｒｉｍｍのＳＮＡＩＬＭＯＮの周波数ω_q及びキュービック相互作用を課す（当技術分野では一般に「調節する」と呼ばれる）ために使用される磁気誘導束発生源である、永久磁石の様々な外形を考慮した。この特定の実施例では、図４及び図５に示す結果を取得するために、例えば、$b = w_{loop} = 7.94\ \mu m$及び$a = h_{loop} = 8.20\ \mu m$を使用した。磁気誘導束量子$\Phi_0$は、約$2.068 \times 10^{-15}$Ｗｂであり、磁気誘導束Φは、超伝導ループで画定される範囲内の、磁場Ｂの法線成分の表面積分と定義される。電磁シミュレーションは、M_R　１．９８Ｔの残留磁化を有するＦｅＣｏでできた磁石をベースとしており、これは、より小さい磁石の寸

法を試験するのに好都合であると考えた。実際、同じ周囲磁場を実現させるために残留磁化が減少する場合、磁石の寸法を大きくする必要があり、この観点から、残留磁化がより大きい材料が好都合であり得る。事例研究では、著者にとって、この特定の実施例に好適な、主観的感覚に結び付くと思われる目標を、やや恣意的に設定した。事例研究では、この観点から、目標磁気誘導束を磁束量子程度、例えばΦ∈［０，１］Φ_0、磁束ループ導体上での最大磁場振幅を超伝導体の臨界磁場Ｈｃよりも１桁小さい、例えば
【数２】

$$\max\left(\left|\vec{B}\right|_{flux\ loop}\right) < 0.1\,H_c$$

、最小寸法を１００ｎｍ（例えば、ｔ、ｗ、ｈ［磁石の厚さ、幅、及び高さ］＞１００ｎｍであり、かかる寸法未満の磁石を生産する場合、困難が予想されるか、又はコストが増加する）の、磁石製造工程のばらつきによって生じる磁気誘導束のばらつきを
【数３】

$$2\sqrt{\mathrm{Var}(\Phi)} = 2\sigma < 0.05\,\Phi_0$$

、並びに磁石の存在に起因する電磁損失を
【数４】

$$\kappa_m^{tot}/2\pi < 20\ \mathrm{kHz}$$

という目標に設定することができる。
【００７０】
実現可能性
磁石の意図する機能に関して磁石の設計及び外形を最適化するためには、最終的な状況での、最後の製造工程のばらつきの影響を考慮することが、好ましい可能性がある。超伝導ループに対する磁石の形状、向き、及び位置の選択は、製造工程のばらつきに対する感度に影響を与える可能性があり、製造工程のばらつきに対する感度が最小限に抑えられるシナリオが、好ましい場合がある。事例研究では、かかる要因を評価するために、主要パラメータである、ｔ、ｗ、ｈ、ｘ、ｙ、ｚ（ｘ、ｙ、ｚは、磁束ループの中心に対する磁石の位置座標である）、h_{loop}、及びw_{loop}ごとに、磁気誘導束の偏導関数を評価する。
【００７１】
図２Ｃは、事例研究の対象となる磁石の形状、位置、及び向き２０の第１の実施例を示している。磁石は、この場合、超伝導ループを支持するウェハ表面と同じウェハ表面上で、超伝導ループに対して横方向に位置する棒磁石である。事例研究では、Δ Ｖ＝０．０５×V_0（磁石体積Ｖの５％）、Δｘ、Δｙ、Δw_{loop}、Δh_{loop}＝５０ｎｍ、及びΔｚ＝１０ｎｍ、
【数５】

$$\Delta\Phi = \frac{\partial\Phi}{\partial Q}\Delta Q$$

並びにQ∈｛Ｖ，ｘ，ｙ，ｚ，h_{loop}，w_{loop}｝の、予防的製造ばらつき（ｃｏｎｓｅｒｖａｔｉｖｅ ｆａｂｒｉｃａｔｉｏｎ ｖａｒｉａｂｉｌｉｔｙ）を設定しており、ここでデルタは、パラメータの分散であり、便宜上ガウス分布と仮定した。この実施例の事例研究分析の結果を、図３に提示しており、最終的な動作モードでの、製造上のばらつきの影響を軽減するために、超伝導ループを交差して横方向に、より具体的には超伝導ループの岐路を交差して横方向に延在する、低感度軸３０２を中心とするゾーンが、好ましい可能性があることを示している。ここでは追加の破線３０４及び３０６で図式化し

ているように、他の低感度軸又はゾーンも存在する可能性がある。したがって、棒磁石の構成の際には、棒磁石の長さが低感度軸に沿って延在するように、棒磁石を超伝導ループに隣り合って配置することが、好ましい可能性がある。対称的な回路素子は、低感度軸を有している可能性があるが、非対称な素子でも、やはり低感度ゾーンが存在する可能性がある。対称的な回路素子では、軸に沿って中心にない低感度ゾーンも存在する可能性がある。

【００７２】

図４を参照して、最適な棒磁石の構成は、導関数解析から、磁石の厚さ０．３μｍ（目標＞０．１μｍ）、幅０．６５μｍ（目標＞０．２μｍ）、長さ１．９４μｍ（目標＞０．２μｍ）、及びウェハ表面からのＺオフセット０．５μｍと判断した。この構成は、実現可能な寸法である、磁石の構成から、

【数６】

$$\frac{\Phi}{\Phi_0} = 0.260$$

及び

【数７】

$$\frac{\max\left(|\vec{B}|_{flux\ loop}\right)}{H_c} \approx 0.027 < 0.1$$

の値が得られ、したがって事例研究で設定したすべての目標が満たされた。

【００７３】

同様のシミュレーションを、図２Ｂで図式化されたような中央ドット磁石の構成で実行し、その結果を、図５に提示しており、また別のシミュレーションを、図２Ｄで図式化されたような横ドット磁石の構成で実行し、その結果を、図６に提示している。これら２つの追加シミュレーションも、事例研究で設定されたすべての要件を満たし、実現可能性の観点から、超伝導ループと連携する、磁気誘導束を発生させる永久磁石の可能性が確認された。

【００７４】

ばらつき

事例研究は、上記で明らかにしたように、２σ＜０．０５Φ_0を目標としており、５種類の相異なる永久磁石の構成で実行した。第１の永久磁石は、中央ドットと呼ばれる、図２Ｂに提示したもの（例えば、中央ドット２１２）であり、ここでｗ（及びｈ）は１３０ｎｍである。第２の永久磁石は、補償される中央ドットと呼ばれる、図７Ａに示しているものであり、横ドット磁石７０４から４．６２μｍの間隔ｌだけ離れた中央ドット磁石７０２を含む。中央ドット７０２のw_1は２１６ｎｍであり、横ドット７０４のw_2は１３２ｎｍである。第３の永久磁石は、２重に補償されるドットと呼ばれ、図７Ｂに示しているように、第１の横ドット７０４と反対側の第２の横ドット７０６をさらに含む。この第３の場合、中央ドット７０２のw_1は３０８ｎｍであり、横ドット７０４及び７０６のw_2、w_3は２４７ｎｍであり、間隔ｌは５．４３μｍである。第４の永久磁石は、図２Ｄに提示した横ドット２１８であり、ｗは６２５ｎｍである。第５の永久磁石は、図２Ｃに提示した横棒２１６であり、ｗ＝３．７３μｍ、ｈ＝１１．２μｍ、及びｌ＝２１．９μｍである。２００ｎｍの同じ厚さｔを、設計全体に使用した。モンテ・カルロ・シミュレーションは、１０００００ユニットのサンプル規模で、ばらつきは、全磁石を配置する位置、±５ｎｍのΔｔ、及び±１０ｎｍのΔｌを考慮して、均一な分布で、±２０ｎｍのΔｗ、Δｈ、Δw_{loop}、±３０ｎｍのΔｘ及びΔｙで実行した。５つの相異なる設計に関するモンテ・カルロ・シミュレーションの結果を、図８にプロットした（例えば、プロット８０２、８０４、８０６、８０８、及び８１０）。磁束のばらつきの目標は、後ろ４つの設計（例えば８０４、８０６、８０８、及び８１０）で達成された。M_Rを減少させ

るとばらつきが減るため、第１の設計（例えば８０２）であっても、事例研究の目標を達成できる可能性がある。

【００７５】

損失

損失のシミュレーションは、Ａｎｓｙｓ高周波構造シミュレータ（ＨＦＳＳ：Ｈｉｇｈ Ｆｒｅｑｕｅｎｃｙ Ｓｔｒｕｃｔｕｒｅ Ｓｉｍｕｌａｔｏｒ）を使用し、上記で喚起したＧｒｉｍｍのＳＮＡＩＬＭＯＮ設計を使用して実行した。

【００７６】

全損失

【数８】

$\kappa_{\mathrm{m}}^{\mathrm{tot}}$

は、

【数９】

$$\kappa_{\mathrm{m}}^{\mathrm{tot}} = \sum_l \left(\kappa_{ml}^{cap,surf} + \kappa_{ml}^{ind,surf}\right)$$

としてモデル化され、ここでｍは対象の固有モードであり、表面の汚れ及び欠陥に起因する表面容量性損失は、

【数１０】

$$\kappa_{ml}^{cap,surf} = \frac{\omega_m}{Q_l^{cap,surf}} \frac{t_l \epsilon_l}{4\mathrm{E}_{elec}} \mathrm{Re} \int_{surf_l} \left|\vec{E}_{\mathrm{max}}\right|^2 ds$$

としてモデル化され、表面伝導性損失は、

【数１１】

$$\kappa_{ml}^{ind,surf} = \frac{\omega_m}{Q_l^{ind,surf}} \frac{t_l \mu_l}{4\mathrm{E}_{mag}} \mathrm{Re} \int_{surf_l} \left|\vec{H}_{\mathrm{max},\parallel}\right|^2 ds$$

としてモデル化され、ここでωｍ＝モードの角周波数、ｔｌ＝損失要素の散逸層の厚さ、εｌ、μｌ、σｌ＝損失要素の誘電率、透磁率、及び導電率、λ０＝金属表面ｌの表皮深さ、Ｑｌ＝損失要素の損失メカニズムの固有品質係数、Ｅｅｌｅｃ（ｍａｇ）＝モードの全電（磁）場エネルギー、

【数１２】

$\vec{E}_{\mathrm{max}}$

＝固有モード電気位相ベクトル（ｐｈａｓｏｒ）、及び

【数１３】

$\vec{H}_{\mathrm{max},\parallel}$

＝表面と平行な固有モード磁気位相ベクトルである。

【００７７】

結果を図９Ａ及び図９Ｂに示し、以下の表に数値的に提示している。

【表１】

	$\kappa_{substrat}^{cap,V}/2\pi$ (Hz)	$\kappa_{circuit,MA}^{cap,S}/2\pi$ (Hz)	$\kappa_{circuit,MS}^{cap,S}/2\pi$ (Hz)	$\kappa_{magnet}^{cap,S}/2\pi$ (Hz)	$\kappa_{magnet}^{ind,S}/2\pi$ (Hz)	$\kappa_{tot}/2\pi$ (Hz)
$Q_{0,magnet}^{ind,S}=1$	766	1 831	25.6	8.11	19 488	22 118.71

表１　事例研究の損失計算結果

ここで、Ｖは体積、Ｓは表面、ｃａｐは容量性損失（電場損失）、ｉｎｄは誘導性損失（磁場損失）、ＭＡは金属－空気界面、ＭＳは金属－ウェハ界面、ｍは

【数１４】

$$\frac{\omega}{2\pi} \approx 6\ \mathrm{GHz}$$

における対象の固有モードであると仮定した。

【００７８】

損失は、事例研究のために選択した目標を満たしていないことが判明した。しかし、図１０に示すように、

【数１５】

$$\kappa_{magnet}^{ind,S}$$

は、ＳＮＡＩＬＭＯＮループのスケール係数の関数として指数関数的に減少するので、磁石の存在に起因する損失は、単に磁束ループのサイズを大きくするだけで許容可能な値まで減らすことができ、少なくともいくつかの実施例では、許容可能なトレードオフと考えることができる。損失の問題に対処する別のやり方は、超伝導回路を支持するウェハの反対側に磁石を配置し、超伝導磁気誘導部を使用して、磁石から放射される磁場を、超伝導ループの範囲に誘導することであることにも留意されたい。この方法は、下記でさらに詳細に提示することとし、永久磁石の技法を、様々な実施例及び用途に適用する可能性を、さらに広げることに留意されたい。

【００７９】

事例研究　－　結論

事例研究では、少なくともいくつかの実施例では、超伝導ループを横切る磁気誘導束の印加に、１つ又は複数の永久磁石を使用することは、好適な手法であるという結論に至った。

【００８０】

事例研究は、ある程度特定の状況における、磁気誘導束Φの好適な発生源としての永久磁石の使用に取り組んでいるが、事例研究の結果を、他の多くの類似する状況に外挿することができ、したがって事例研究は、より一般的に、多くの超伝導ループの実施例において、磁気誘導束Φの発生源としての永久磁石の使用が好適であることを実証していることを理解されよう。さらに、上記で提示した事例研究で使用した特定の実例において、課した目標、限界、及び／又は制限の一部は、いくつかの代替実施例では存在しないか、又は緩和される場合があることに特に留意されたい。

【００８１】

磁場のタイプ

磁気誘導束を発生させるために受動的な磁石要素が使用される、量子デバイスの詳細及びタイプに応じて、様々な可能性のあるシナリオが可能である。磁場発生源は、いくつか

の実施例では、所与の動作段階の全期間にわたり、固定磁場成分だけを与えるよう意図され得る。この目的のために、超伝導回路素子に対して好適な場所に位置する１つ又は複数の永久磁石が、ＤＣ電源、リード線、導体トレース、及びガルバニック接続部を備える能動的磁場要素を、完全に置き換えることを可能にし得る。これは、いくつかの実施例では、極めて有益であり得る。他の実施例では、所期の磁場には、固定成分、及びＡＣ成分などの可変成分、又は例えばＤＣバイアスに重畳された他の可変成分が含まれ得る。かかる可変成分が含まれる実施例では、能動的磁場要素を使用し、磁場の可変成分を与えることが、引き続き適切な場合がある。しかし、受動的磁石要素を使用することは、能動的磁場デバイスにＤＣ部品を組み込む必要性を軽減するか又はなくするなど、依然として有益であり得る。したがって、ＤＣバイアス等価物の一部又は全体など、任意の永久磁場成分は、１つ又は複数の受動的磁石要素を使用して印加されてもよく、一方、可変磁場成分は、能動的磁場デバイスを使用して印加し続けることができる。このようにして、能動的磁場デバイスは、例えば、簡素化又は軽減され得る。したがって、様々な実施態様の方式が可能であり、その詳細は、この明細書の教示に基づいて、特定の実施例を設計する担当者に委ねられる。

【００８２】

さらに、強磁性体などの永久磁石は、受動的磁石要素として使用するための優れた候補と見なすことができるが、強磁性体が可能性のある唯一の候補ではないことを理解されよう。例えば、一実施例では、磁気トンネル接合を受動的磁石要素として使用することが、興味深いか、又は好適であると考えることができる。実際、磁気トンネル接合の磁場は、電流を流すことにより切り替えることができるが、一度切り替えられると、電流の能動的な循環なしに磁場を生成し続けるようになる。例えば、永久磁石又は同等の磁場強度が点在する磁気トンネル接合の積層体を使用し、磁気トンネル接合の磁場の向きを選択的に切り替え、隣り合う永久磁石の磁場を打ち消すか、又は増幅できる場合、磁気トンネル接合の磁場の向きを制御することにより、磁場強度をデジタル的に調節できるシステムを実現できる可能性がある。

【００８３】

可能性のあるアーキテクチャ

図１１Ａ～図１１Ｃを参照すると、いくつかの実施例では、磁石の静磁場が、同じ超伝導デバイス（例えば、ＦｌｕｘＱｕｂｉｔ、ＳＱＵＩＤ、ＳＮＡＩＬ、又はＳＮＡＩＬＭＯＮ）の一部であり得るかどうかにかかわらず、複数の超伝導ループに好適に影響を与えるように配置され、構成される、１つ又は複数の磁石を使用することが好ましい可能性があり、かかる手法は、場合によっては、デバイスの占有面積の縮小につながる可能性があり、これはいくつかの実施例では、望ましい場合があることを理解されよう。例えば、図１１Ｃでは、複数の超伝導ループ１１０２が互いに隣り合って位置し、「横ドット」タイプの磁石（例えば、ドット磁石１１０４）が、隣り合う超伝導ループ間に位置し、隣り合う超伝導ループ１１０２の両方を貫く磁気誘導束に同時に寄与する。ループは、かかる実施例では、例えば相異なる量子ビットの一部を形成するか、又は同じ量子ビットの一部を形成することができる。図１１Ｂでは、隣り合う超伝導ループの対に磁気誘導束を加えるために、横方向に向けられた棒磁石１１０６が使用される。図１１Ａでは、２重に補償される中央ドットの幾何配置（例えば、中央ドット磁石１１１２を使用して）が、横ドット１１１４を共有することによって、複数の隣り合う超伝導ループ１１１０に拡張されている。

【００８４】

他の多くの代替アーキテクチャが可能である。実際、図１１Ａ～図１１Ｃに提示した３つの実例は、比較的単純な１次元配列を提示しているが、この概念は、２次元配列、さらには３次元配列、及び平面の仮想表面ではなく湾曲した仮想表面にも拡張することができる。

【００８５】

さらに、上記で提示し、説明した実施例では、１つ又は複数の磁石は、通常、比較的「

面内」に位置し、「面内」は、超伝導ループを支持するウェハ表面にほぼ揃っていることを意味し、「チップ上」は、同じウェハ上を意味する。面内の幾何配置では、おそらく、超伝導回路素子を形成する超伝導トレースが支持されているウェハと同じウェハ上に、永久磁石をパターン化することが、最も推察しやすい幾何配置である。しかし、他の実施例では、共通の平面の平坦な表面上に永久磁石をパターン化するのではなく、かかるウェハに永久磁石を埋め込むことが、ある程度好ましい可能性がある。これは、例えば、ウェハ内に形成された凹所又は他の窪みの中に、永久磁石を配置することにより実現することができる。具体的には平面から外れた実施例など、さらに他の多くの実施例が可能である。具体的には、図１２Ａが、かかる他の可能な一実施例を提示している。図１２Ａに提示している実施例では、２枚のウェハ（１２０４及び１２０６）が使用され、はんだボール１２０８又は他の間隔をあける要素によって離間されている。各ウェハは、他方のウェハに面する表面を備える。さらに別の可能性のある実施例を挙げると、超伝導ループなどの超伝導回路素子１２１０を、これらの表面のうちの第１の表面上に付着させることができ、磁石１２０２を、これらの表面のうちの他方の表面に貼り付けることができる。

【００８６】

図１２Ｂは、ＳＮＡＩＬＭＯＮも支持するウェハの同じ表面によって、マイクロ磁石１２１６が支持され、電気的に浮かせて絶縁されたチップ１２１２として、長方形の３Ｄの空洞１２２２内に収容される、さらに別の例示的な実施例を提示している。同軸ケーブル１２１４、コネクタチップ／ＲＦアンテナ１２１８も図１２Ｂに示しており、矢印１２２０は、空洞を閉じることを示すものである。かかる実施例は、例えば３Ｄ幾何配置した量子ビットを具現化するために使用でき、受動的磁気素子は、例えば静磁束制御のプロセスで使用することができる。

【００８７】

磁場誘導部

上記で喚起したように、受動的（例えば、磁石、磁気トンネル接合）であるか能動的（例えば、電流循環により駆動される導体）であるかにかかわらず、１つ又は複数の磁場発生源と、１つ又は複数の回路素子（例えば、超伝導ループ、ジョセフソン接合、スピン量子ビット）との相対位置の正確な選択は、特定の実施例又は用途特有の状況に鑑みて、設計者に好適に委ねることができ、多くの可能性のある構成があり得る。

【００８８】

いくつかの実施例では、それを貫いて磁気誘導束が印加されるべき回路素子を支持する、ウェハの表面とは反対側のウェハの面（例えば、第２の面）上に、磁場発生源を配置し、磁場誘導部を使用して、ウェハの１つ又は複数の層にわたって、磁場を伝達することが好ましい可能性がある。この第１の例示的な実施例を、図１３Ａに提示している。

【００８９】

量子デバイスは、上記で提示された実施例と同様に、ウェハによって支持される回路素子を備えることができる。回路素子は、この特定の実施例では、デバイスの動作中に超伝導性を示し、ウェハの第１の表面上で支持される、材料のトレースの形態で設けられる超伝導ループである。ウェハは、より具体的には、回路素子を支持する第１の表面と、第１の表面の反対側の第２の表面とを備えることができ、回路素子は、「チップ上」にある。

【００９０】

図１３Ａに提示している実施例では、磁場誘導部１３０２が設けられている。より具体的には、管状通路１３１０が、第１の表面１３１４を貫いて開口する、第１の面の第１の端部１３１２から、第２の表面１３１６を貫いて開口する、第２の面の第２の端部１３０８まで、ウェハ１３０４を横切って延在する。磁場誘導部１３０２は、量子デバイスの動作中に（例えば、希釈冷凍機内部の非常に低い温度で）、超伝導性を示す材料の層を備え、この実施例では、ウェハ１３０４内部の管状通路１３１０の内面１３１８を、完全にコーティングしている。磁場誘導部１３０２は、ここで、誘導層が超伝導である場合、量子デバイスの動作中に、ウェハ１３０４を横切って、すなわち第２の面から第１の面まで、磁場を誘導するために使用される。

【００９１】
この第１の実例では、磁場発生源は、棒磁石１３０６（場の向きが長手方向に整列された、細長い方形の平行６面体）であり、棒磁石は、ビア１３１０の第２の端部１３０８に隣り合って、第２の表面１３１６上、すなわちウェハの、回路素子１３２０と反対側の面に、棒磁石の磁場の向きが磁場誘導部の方に向けられる状態で配置され、ここでは磁場誘導部の第２の端部と一致する、ウェハ表面から僅かにずれて置かれている。ＨＦＳＳシミュレーションは、図１４の左側に提示しているモデルを使用して行った。図１４の中央及び右側は、結果を提示している。磁束は、例えば、ビア１４０４の各端部１４０２及び１４０６でループしている。図１４の左側には、マイクロ磁石１４０８の場所も示している。ウェハは、磁束線がウェハの周囲で、磁束線自体を閉じて戻すことを可能にする、有限の寸法を有していた。磁場は、興味深いことに、磁場誘導部の内部に閉じ込められ、磁場誘導部によって、磁場誘導部の他端までずっと誘導され、一方、磁場誘導部と隣り合う磁場の強度は、逆多項式的に低下することが確認できた。ビアによって誘導される磁場の一部は、例えば、超伝導ループ又は他の超伝導回路素子を横切る、好適な磁気誘導束を与えるように広がることができる。

【００９２】
ｔ＝０．５μｍ、ｗ＝１μｍ、ｌ＝１０μｍの棒磁石、及び半径２μｍのビアの実現可能性分析から、

【数１６】

$$\frac{\Phi}{\Phi_0} = 0.295$$

及び

【数１７】

$$\frac{\max\left(|\vec{B}|_{flux\ loop}\right)}{H_c} \approx 0.0003 < 0.1$$

が得られ、これは、上記で提示した事例研究の実現可能性の目標を満たしている。図１３Ｂに提示しているように、ビアの開口部１３１２が、超伝導ループ１３２０に隣り合って位置している同様の事例研究では、

【数１８】

$$\frac{\Phi}{\Phi_0} = 0.238$$

及び

【数１９】

$$\frac{\max\left(|\vec{B}|_{flux\ loop}\right)}{H_c} \approx 0.0003 < 0.1$$

が得られ、やはり上記で提示した事例研究の実現可能性の目標を満たしている。

【００９３】
図１５に見られるように、相対磁気誘導束は、概ねｒの複数の累乗で減少する（例えば、外形及び磁気双極子方程式から予想されるように、１／ｒ^4）が、ビアを使用することで、この関係を変えることが可能になり、その場合、相対磁気誘導束は、ｒに反比例して変化する（例えば１／ｒ）か、さもなければ２未満、さらには１．５未満の累乗で、ｒに反比例して変化する。超伝導回路ループの外側に位置する開口部を備える磁場誘導部についての関係も、同様である。

【００９４】

磁場発生源は、図１６に図式化している第２の実例では、ドット磁石１６０８（場の向きが、軸方向に整列された、円筒／円錐台の幾何形状）である。超伝導ループ１６１６は、第１の基板又はウェハ１６０２（ここではシリコンウェハ）の第１の面１６２０で支持され、（超伝導）磁気誘導場誘導部１６１４は、超伝導ループ１６１６に近接する第１の端部１６１８から、第１のウェハ１６０２の反対側の表面１６２２にある第２の端部１６１２まで、第１のウェハ１６０２を横切って画定されている。別のシリコンウェハなどの第２のウェハ１６０４は、第１のウェハ１６０２と隣り合って位置しているが、はんだボール・バンプ１６０６などのスペーサ要素によって、第１のウェハから所与の間隙だけ離間して保持されている。ドット磁石１６０８は、「フリップ・チップ」と呼ばれ得る構成で、第２のウェハ１６０４の表面１６１０に、磁場誘導部１６１４の長手方向に一直線になるよう、磁場誘導部の第２の端部１６１２に隣り合って配置される。さらに、表面１６１０と１６２２との間隙又は距離１６２４は、「フリップ・チップ間隙」とも呼ばれる。図１７は、ＨＦＳＳモデル（左）の詳細を提示し、ＨＦＳＳシミュレーションの結果を、中央及び右側に提示している（フリップ・チップ間隙０．０１ｍｍ、並びに磁石体積の乗数それぞれ１及び２）。磁束ループ１７０２、マイクロ磁石１７０４、ビア（又は磁場誘導部）１７０６を、図１７の左側に示している。

【００９５】

相対磁気誘導束と、フリップ・チップ間隙と、磁石体積スケーリング係数（初期磁石体積４．６９μm^3）との関係を、ビア有りのシナリオとビア無しのシナリオとで比較するように、図１８に提示している。

【００９６】

様々な代替実施例が可能である。例えば、図１９は、ウェハが複数のウェハ層、より具体的にはここでは２つのウェハ層（例えば、層１９０２及び１９１２）を備える、さらに別の可能な実施例を提示している。磁場誘導部１９０６の管状通路は、第１のウェハ層１９０２だけを横切って延在するという意味で、行き止まりである。さらに、ここではマイクロ磁石１９０４の形で設けられる磁場発生源は、２つのウェハ層間に、磁場誘導部１９０６の第２の端部１９１４に隣り合って位置し、回路素子１９０８は、第１の端部１９１６に隣り合って位置することができ、磁場誘導部１９０６を使用して、超伝導性である間、磁場を量子デバイス回路素子１９０８に誘導することができる。図１９は、他の回路素子１９１０も示している。

【００９７】

いくつかの実施例では、磁場誘導部が十分に効果的であるために、磁気誘導束線が、磁場誘導部を貫通した後に、磁束線自体を閉じて戻す能力が備えられていなければならない。実際、磁場誘導部の端部が、閉じた超伝導空洞に対して開いている場合、磁場は、戻る通り道がなく、磁場誘導部にわたる閉じた超伝導空洞を貫通することができない。いくつかの実施例では、有限の寸法のウェハを横切る磁場誘導部を設けることは、磁場が、ウェハの縁部の周囲で閉じて戻ることを可能にするのに十分であり得る。他の実施例では、１つ又は複数の「戻り」磁気誘導部が、ウェハを横切って導入され、磁場が、戻り磁気誘導部にわたって閉じて戻るのを促すことができる。１つの特有の実施例を、図２０に提示している。図２０に提示している実施例では、空洞２００２が２つのウェハ層２００４と２００６との間に形成され、空洞２００２の表面は、超伝導材料の層で完全にコーティングされている。ここで、磁場発生源（マイクロ磁石２０１０）の磁場を空洞内に誘導するために、発生源誘導部２００８と呼ばれ得る１つの磁気誘導部が設けられ、またここで、吸込み誘導部２０１２及び２０１４と呼ばれ得る、２つの戻り磁気誘導部が、超伝導空洞２００２からの戻り通路を設けるために使用される。興味深いことに、かかる構成では、図示のシミュレーション結果で示しているように、磁場を、超伝導空洞２００２によって、検出できるほどの又は著しい磁気損失なしに、発生源誘導部２００８から様々な距離に位置する多くの吸込み磁気誘導部（例えば、吸込み誘導部２０１２及び２０１４）へ誘導することができる。代替構成では、例えば、１つ若しくは３つ以上の吸込み磁気誘導部、又は複数の発生源磁気誘導部を使用することができる。発生源誘導部との距離が同じでなく

ても、吸込み誘導部間で磁場を均等に分けることができる。各吸込み誘導部は、同じ磁場の最大振幅を受け取ることができ、磁束は、管状通路の面積によって異なる可能性がある。この結合はおそらく、発生源誘導部が、電流源であり、電流が、発生源誘導部内部の磁気誘導束であり、吸込み誘導部が、管状通路の超伝導コーティングの内側の面積に比例するインピーダンスを有する、抵抗負荷であるように視覚化でき、この場合、オームの法則が、電気回路で考慮されるやり方と同様に考慮されることを、確認することができる。

【００９８】

いくつかの実施例では、磁場誘導部の誘導層が、管状通路の内面を完全に覆うことが好ましい可能性がある。図２１に概略的に提示しているような他の実施例では、磁気誘導部の誘導層２１０２が、管状通路の内面の、すべてではないが大部分を覆うことが好ましい可能性がある。図示の実例では、具体的には、管状通路の直径の１５％未満などの、比較的細長い間隙２１０４を、誘導層の全長に沿って残していたが、理解を容易にするために、ここだけを示している。実際、いくつかの実施例では、かかる間隙の存在は、磁場誘導部の機能を補助し、具体的には、誘導層の非超伝導状態と誘導層の超伝導状態とが遷移する際の、磁場の貫通を容易にすることができる。これは、磁場を受ける回路素子が、超伝導ループであり、超伝導ループが、非超伝導状態から超伝導状態へ移行する間に、超伝導ループを横切る磁束の変化に抵抗する可能性があり、間隙の存在が、移行に適応するのに役立つ可能性があるいくつかの実施例において、特に有用となり得る。この構造は、いくつかの実施例では、非限定的な実例では、堆積が方向性を有する斜め蒸着（ａｎｇｌｅ　ｅｖａｐｏｒａｔｉｏｎ）技法、例えば電子ビーム蒸着を用いて実現することができる。サンプルを、ある角度を付けて蒸着しながら、ゆっくり３６０°未満回転させることにより、ビアの長手方向にわたって所望の間隙を残したまま、ビアの内側部分を超伝導材料で覆うことができる。いくつかの実施例では、同じ技法の変形形態として、シャドウイング蒸着（ｓｈａｄｏｗ　ｅｖａｐｏｒａｔｉｏｎ）（ドーラン技法又は斜め蒸着としても知られる）によって、吊されたマスクを使用してもよい。

【００９９】

様々な構成が可能である。例えば、図１１Ｃに提示したような実施例において、支持しているウェハの反対側に、関連する能動的又は受動的磁場発生源を備える磁場誘導部を、マイクロ磁石の代わりに使用して、磁場を、量子デバイスの２つ以上の回路で共有することができる。さらに、図２２Ａに提示しているように、複数の磁場誘導部２２０２が配列され、複数の磁場誘導部を使用して、図２２Ｂに提示しているように、所与のウェハ表面に沿って磁気紋様プロファイル２２０４を生成することができる。ここで、

【数２０】

$$|\vec{B}_{\perp}|$$

は、上部基板に垂直な磁場である。かかる磁気紋様プロファイルは、図２２Ｃに提示しているように、２つの磁気誘導部２２１２及び２２１４のそれぞれの向かい合う端部２２０８と２２１０との間に、横向きの磁場発生源２２０６を使用することにより、１つの磁束極性だけでなく、２つの逆の磁束極性を含むことができることを理解されよう。かかる実施例では、所与のウェハ表面から出る場の強度は、関連する磁場発生源の強度だけでなく、磁場誘導部の反対側の端部と、関連する磁場発生源との距離によっても、測定することができる。

【０１００】

図１３Ａ及び図１６に提示した実施例では、磁石を磁場発生源として使用したが、永久磁石を、適切な幾何形状を有する同等の磁束バイアス線に置き換えることが、同様の結果をもたらすことが期待され、いくつかの実施例では、能動的な磁場発生源が、受動的磁場発生源の好適な代替手段となり得ることを理解されよう。

【０１０１】

図１３Ａと図１６との両方の実施例において、超伝導回路は、第１の端部に近接して位

置し、磁場発生源は、第２の端部に近接して位置する。
【０１０２】
興味深いことに、図１３Ａ及び図１６に提示した実例の場合のように、磁石が、超伝導ループのウェハ表面（例えば平面）の完全に外部に配置され、磁石の磁場を、磁場誘導部を通して伝達する場合、磁石は、伝導による損失をまったく引き起こさないか、又は伝導による損失が著しく少なくなる可能性がある。損失は、したがって、上記で提示した、「前面」の磁石を使ってシミュレーションした場合よりも、著しく小さいことが予想され得る。
【０１０３】
磁場誘導部及び磁場誘導部に関連する磁場発生源が、図１Ｅに提示したようなジョセフソン接合、又は図１Ｇに提示したようなスピン量子ビットなど、超伝導ループ以外の量子デバイス回路素子のための磁場発生源として使用できる、実施例があり得る。
【０１０４】
一実施例では、誘導層内の容積は空のままにすることができるが、別の実施例では、例えば、その容積を非伝導性材料で充填することができる。
【０１０５】
上記で提示し、図示したいくつかの実例は、永久磁石から放射される磁場を誘導するために使用される、磁場誘導部を提示しているが、磁束バイアス線などから放射される同等の磁場が、同様に、ビアによって誘導されることが期待でき、これにより、磁場誘導部を使用して、受動的又は能動的磁場発生源の磁場を誘導し、したがって、様々な実施例において、受動的又は能動的磁場を誘導できることを理解されよう。磁束バイアス線は、電気駆動部に接続された、所与の構成／形状の超伝導素子の形で、設けることができる。電磁石を遠隔に配置し、電磁石の磁場をビアで誘導することにより、磁束バイアス線が、超伝導ループと隣り合って、超伝導ループの実際の表面内に、又は他のやり方で超伝導ループのより近くに配置するシナリオと比較して、量子デバイスの磁場生成回路と超伝導回路（例えば、量子ビットを提供する）との間のクロストークを低減できる可能性がある。具体的には、例えば、ビアの端部を超伝導ループの外側に配置することにより、超伝導回路が受けるあらゆる損失を低減すること、及び／又は磁気誘導束線によって伝達される磁場を、例えば複数の超伝導ループで共有することができる可能性がある。
【０１０６】
可能性のある用途
磁場を利用し、１つ若しくは複数の永久磁石、ウェハを横切って磁場を伝達する１つ若しくは複数の磁場誘導部、又はその両方を使用することにより恩恵を受ける可能性のある量子デバイスは、多種多様な用途で使用することができる。かかる用途の一実例は、量子コンピュータであり、量子コンピュータにおいて、超伝導回路は、量子ビット又は結合器を実現するのに有用であり得る。典型的な量子コンピュータ・アーキテクチャを、図２３に提示している。
【０１０７】
実際に、量子ビットに関して実行されるべき動作は、完全なプロセッサのアーキテクチャの選択にある程度依存する。複数の、競合するアーキテクチャがある。そのうちの２つ、すなわち量子アニーラ及びゲートベースの量子プロセッサに関する例示的な実施例を、下記で提示することにする。
【０１０８】
アーキテクチャのタイプに応じて、また論理状態の基底として使用される量子サブシステムのタイプにも応じて、量子プロセッサの実施態様の詳細は、実施例ごとに大きく異なる可能性がある。しかし、多くのアーキテクチャ及びタイプは、量子計算を進めるために、概して、２つ以上の量子サブシステムを使用する必要があろう。実際、典型的な、例示的量子プロセッサには、図２３に示しているように、量子サブシステムの量子状態が、典型的には量子縺れを伴う相互作用の際に、互いに相互作用するよう相互接続される、少なくとも２つの量子サブシステム（例えば、２３０２ａ、２３０２ｂ、～２３０２Ｎ）が必

要であろう。量子サブシステムのタイプは、アーキテクチャに応じて異なるであろう。ボソンベースの量子プロセッサとして具現化されるほとんどの量子システムは、量子状態を提供する何らかの形態の共振器を必要とし、量子状態は、量子サブシステムのいくつかのボソンを制御できる、何らかの形の駆動ハードウェア（例えば、２３０４ａ、２３０４ｂ、～２３０４Ｎ）を使用して、量子サブシステム内で駆動されることになる。駆動ハードウェアは、本明細書ではコントローラ２３０６と呼ばれ、典型的には、古典コンピュータの形態で設けられる部品によって制御される。量子サブシステムは通常、非常に低い温度に冷却され、環境から隔離される。量子アニーリング・タイプのアーキテクチャ又は測定ベースの量子コンピュータ処理アーキテクチャなどの、一部のアーキテクチャでは、量子サブシステムを、動作可能に、直接相互接続することができる。ゲートベースの量子コンピュータ処理などの一部のアーキテクチャでは、量子サブシステムは通常、量子サブシステム間の相互作用を選択的に制御するために使用される、結合器（例えば、２３０８ａ～２３０８Ｎ）を介して相互接続される。結合器２３０８ａ～２３０８Ｎもまた、接続されている２つ以上の量子サブシステムの量子状態が、相互作用すべき状態を提供するよう動作可能な、量子サブシステムであり、利便性のために、やはり同じコントローラ２３０６が制御できる駆動ハードウェア（例えば、結合器駆動部２３１０ａ～２３１０Ｎ）によって駆動される。例えば該古典コンピュータ（図示せず）の不揮発性メモリに記憶された、制御命令２３１６に動作可能に結合されているコントローラ２３０６も、図２３に示している。コントローラ２３０６は、いくつかの実施例では、量子サブシステム２３０２ａ～２３０２Ｎで生成されるべき論理状態の定義２３１４と、駆動ハードウェア２３０４ａ、２３０４ｂ、～２３０４Ｎ及び結合器駆動部２３１０ａ～２３１０Ｎを、論理状態を生成するよう動作させる、１つ又は複数の機能１３１６とを含む、制御命令２３１６を実行するよう構成される。

【０１０９】

当業者は、例えば上記で論じた誘導層に使用される、超伝導性を示す材料には、これらに限定されるものではないが、ニオブ（Ｎｂ）、窒化ニオブ（ＮｂＮ）、窒化ニオブチタン（ＮｂＴｉＮ）、タンタル（Ｔａ）、窒化タンタル（ＴａＮ）、及びアルミニウム（Ａｌ）などの材料が含まれ得ることを理解されよう。同様に、ジョセフソン接合の製造に使用される超伝導材料は、典型的にはＡｌである。しかし本開示は、ジョセフソン接合で他の超伝導材料を使用することを、排除するものではないことが、当業者には容易に理解されよう。

【０１１０】

磁場誘導部は、いくつかの実施例では、１つ又は複数の基板表面に対して、ある角度に向きを合わせられてもよく、且つ／又は湾曲部分を有してもよい。いくつかの実施例では、磁場の一部を誘導するために、２つ以上の磁場誘導部又はビアが、互いに直接結合されていてもよい。

【０１１１】

本開示は、例示を目的として、様々な実施例を説明しているが、かかる説明は、かかる実施例に限定されることを意図するものではない。それどころか、本明細書で説明され、図示されている出願人の教示は、実施例から逸脱することなく、様々な代替形態、修正形態、及び均等物を包含し、出願人の教示の全体的な範囲は、添付の特許請求の範囲で規定される。本明細書に示し、詳細に説明している情報は、本開示の上記で説明した目的、本開示の現時点で好ましい実施例を、完全に達成することができ、したがって、本開示によって広義に意図される主題を代表するものである。

【図面】

【図１Ａ－１Ｄ】

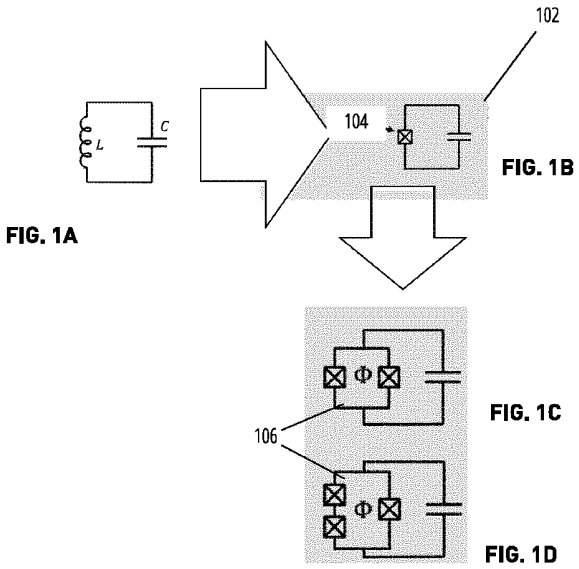


FIG. 1A

FIG. 1B

FIG. 1C

FIG. 1D

【図１Ｅ】

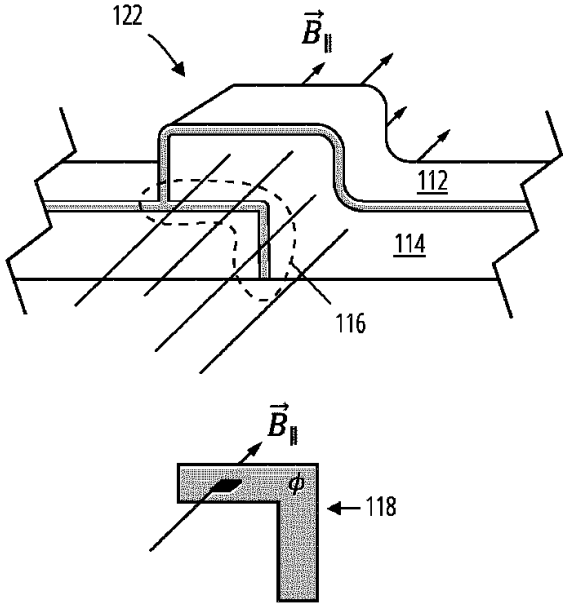


FIG. 1E

【図１Ｆ】

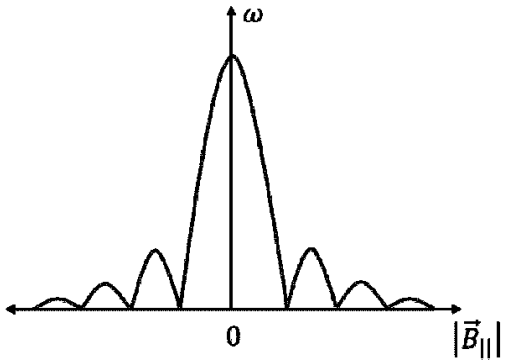


FIG. 1F

【図１Ｇ】

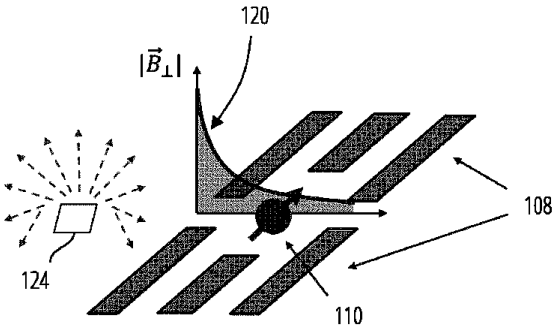
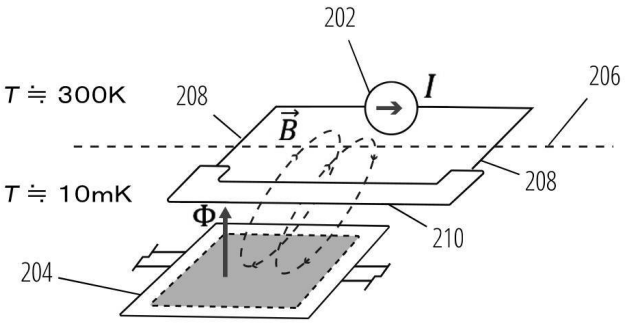
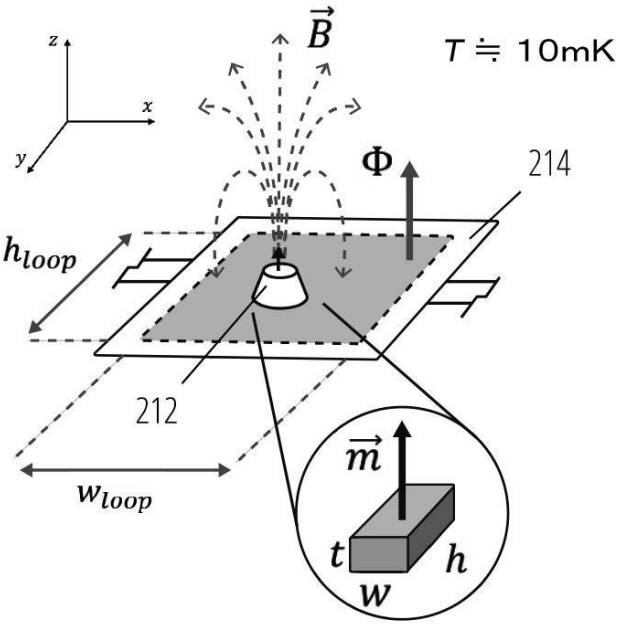


FIG. 1G

【図２Ａ】



【図２Ｂ】



【図２Ｃ】

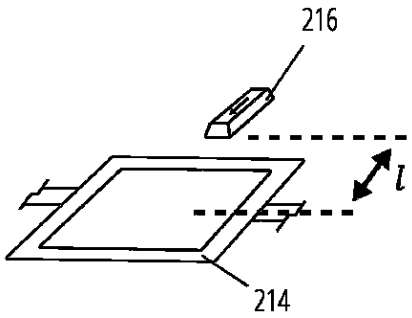


FIG. 2C

【図２Ｄ】

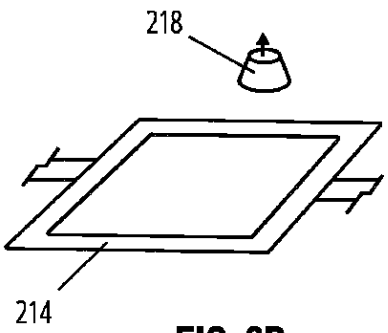


FIG. 2D

【図３】

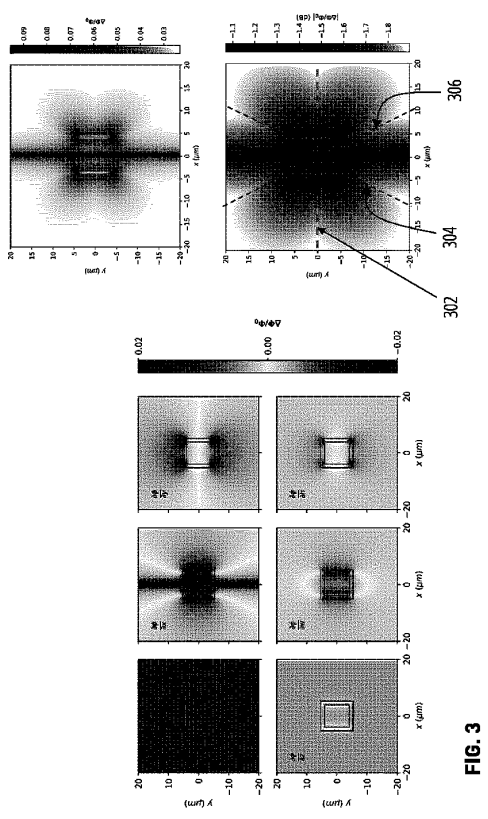
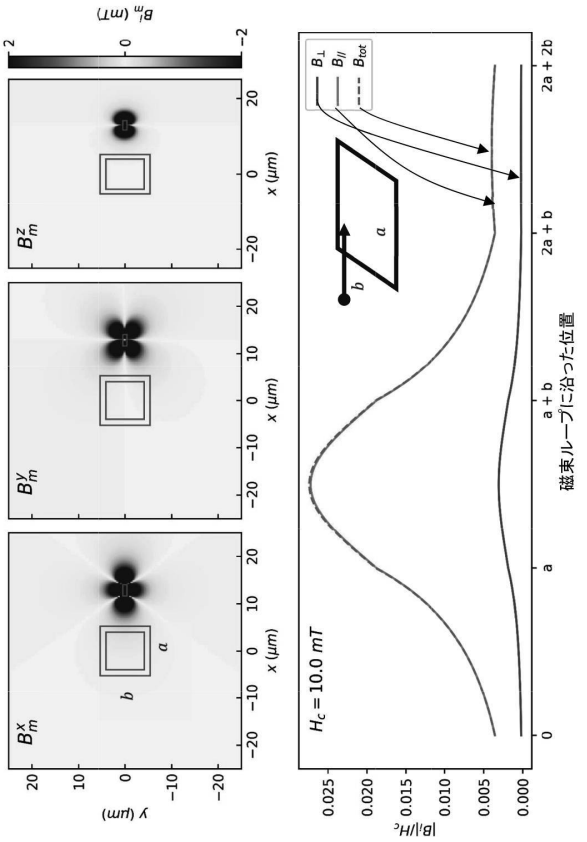
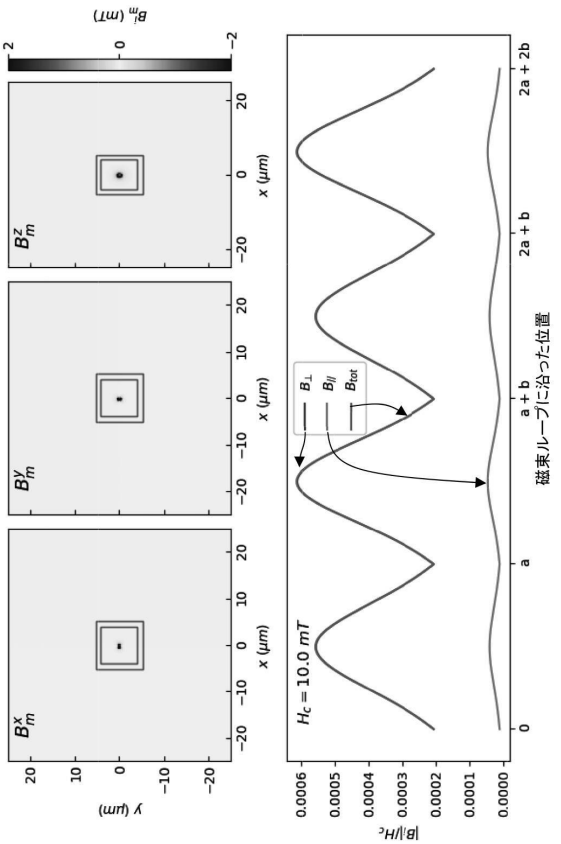


FIG. 3

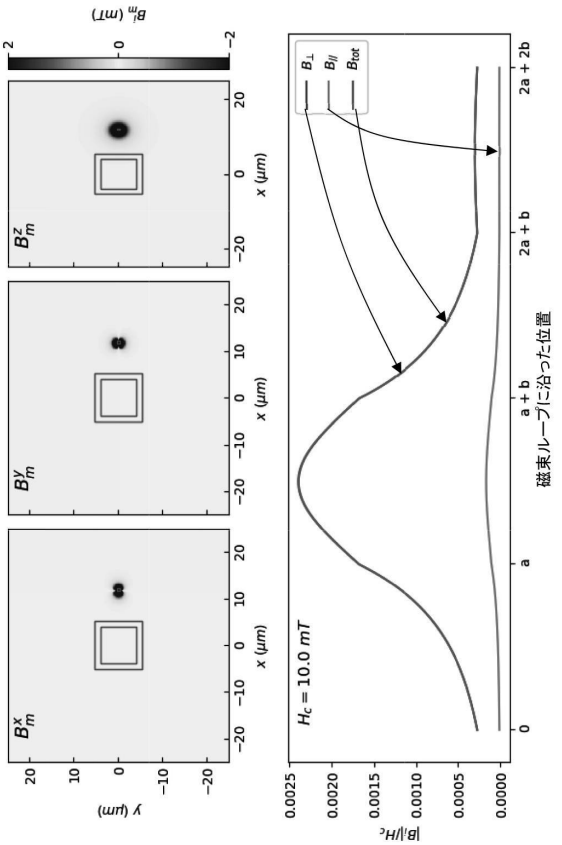
【図４】



【図５】



【図６】



【図７Ａ】

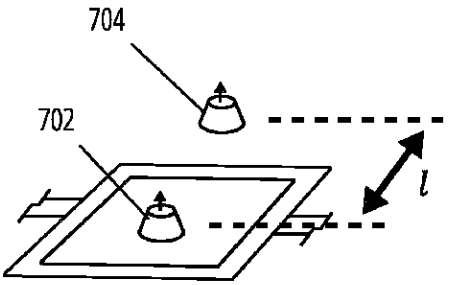


FIG. 7A

【図７Ｂ】

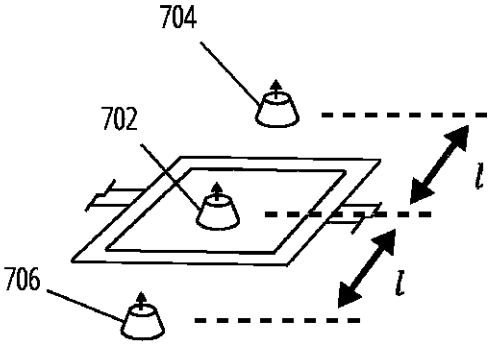
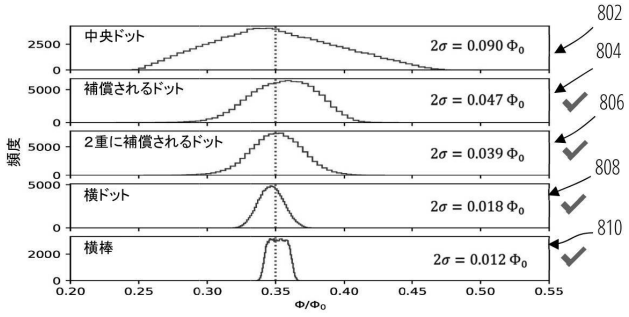
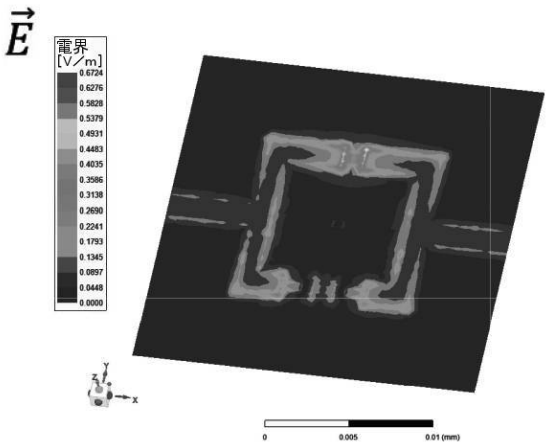


FIG. 7B

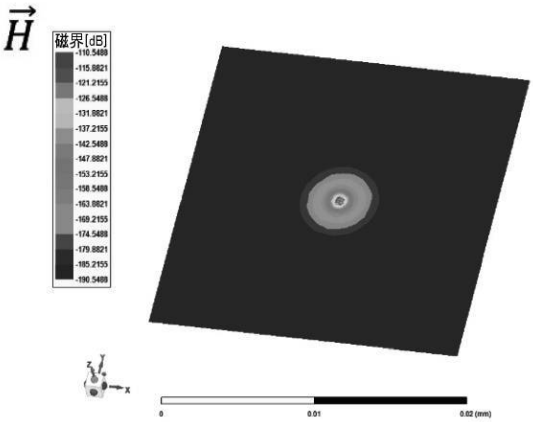
【図８】



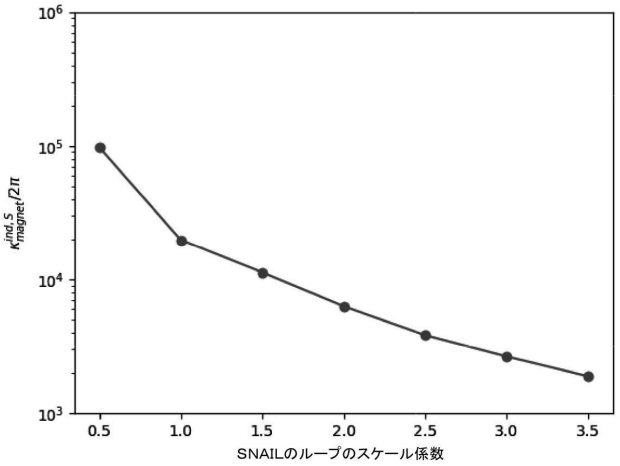
【図９Ａ】



【図９Ｂ】



【図１０】



【図１１Ａ－１１Ｃ】

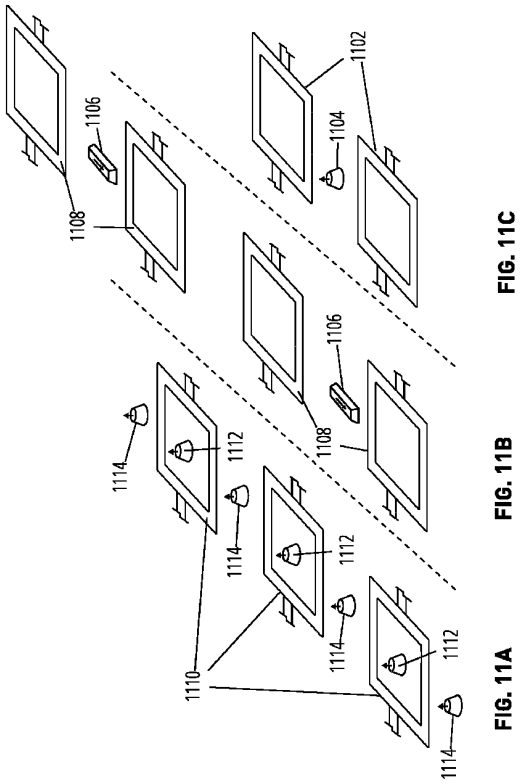


FIG. 11C

FIG. 11B

FIG. 11A

【図１２Ａ】

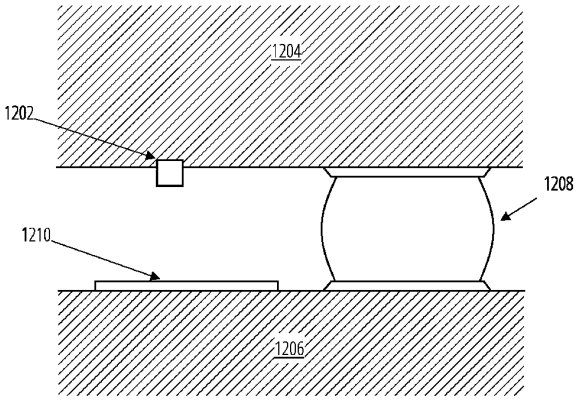


FIG. 12A

【図１２Ｂ】

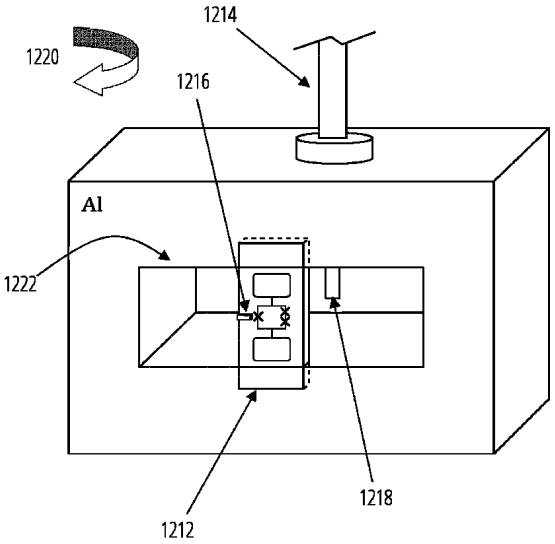


FIG. 12B

【図１３Ａ】

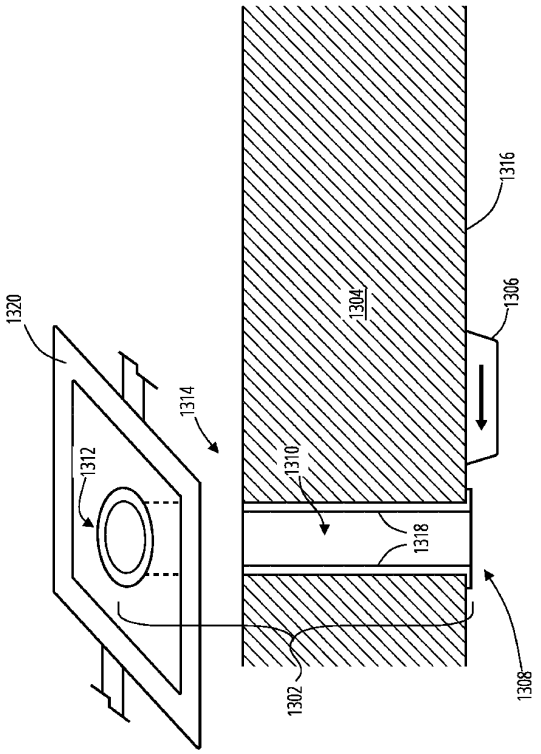


FIG. 13A

【図１３Ｂ】

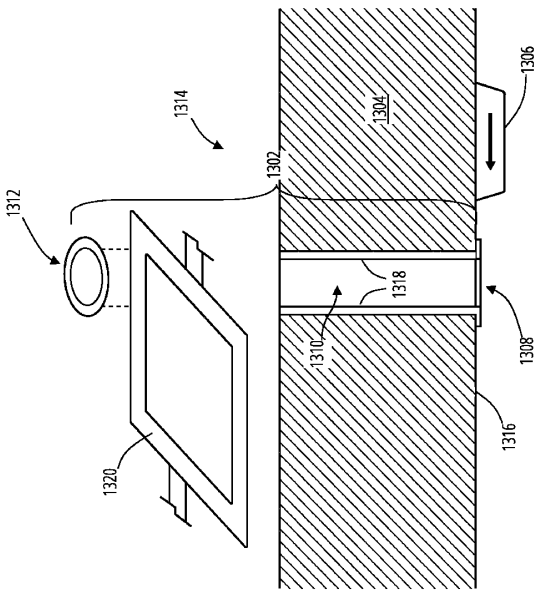
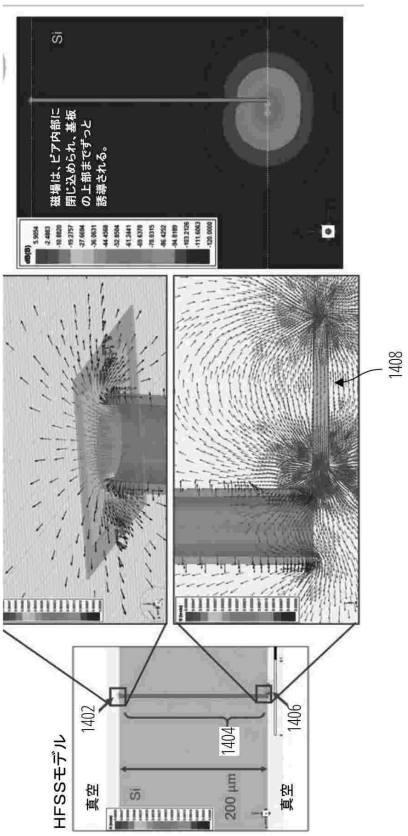
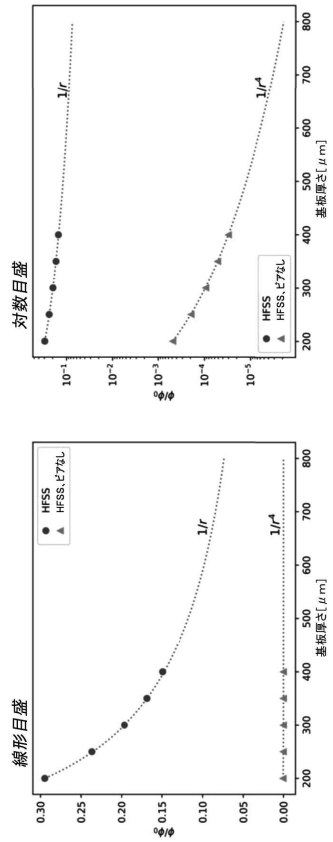


FIG. 13B

【図１４】



【図１５】



【図１６】

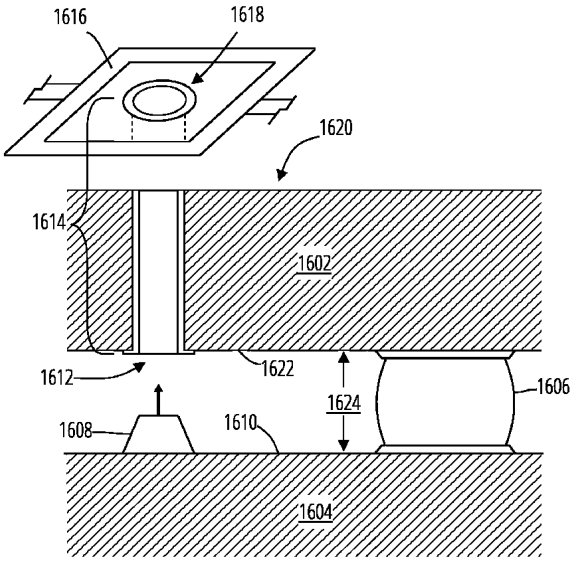
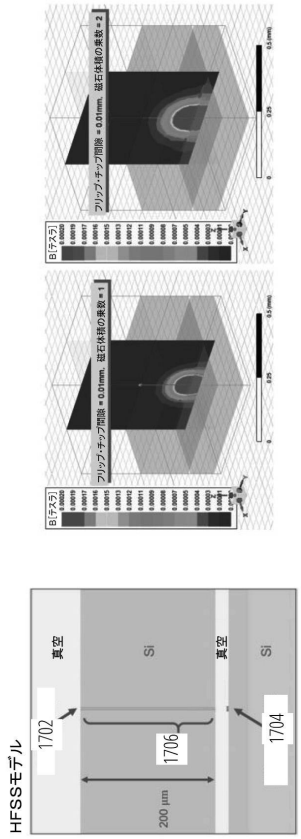
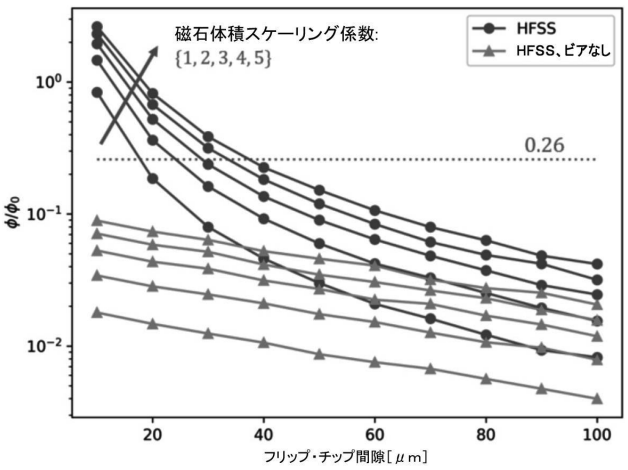


FIG. 16

【図１７】



【図１８】



【図１９】

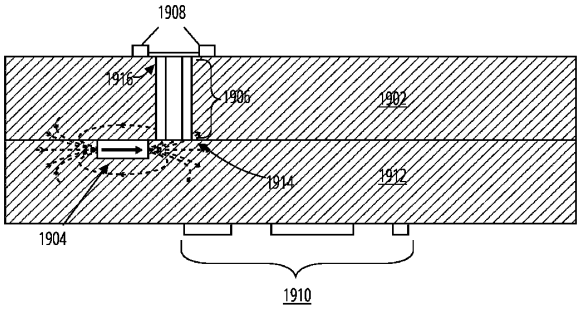


FIG. 19

【図２０】

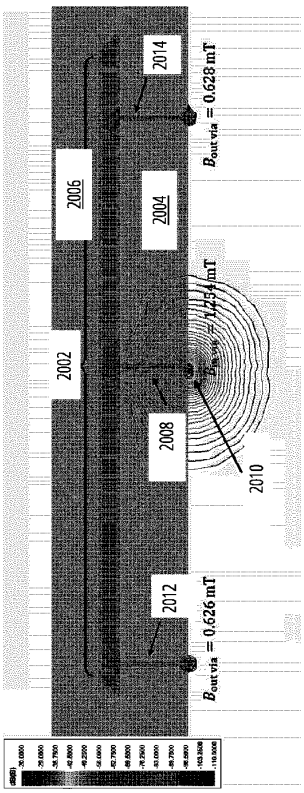


FIG. 20

【図２１】

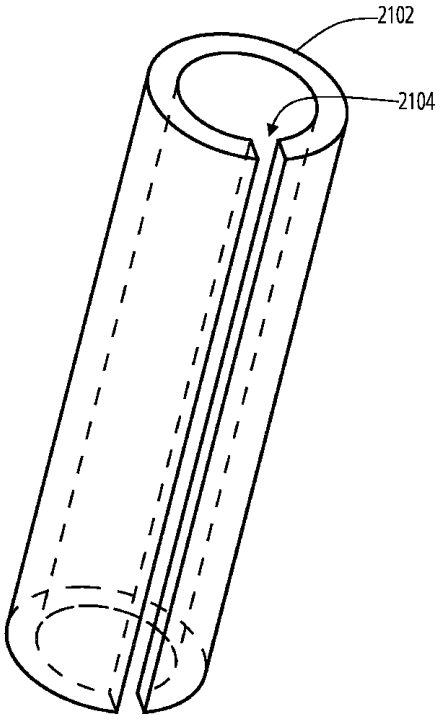


FIG. 21

【図２２Ａ】

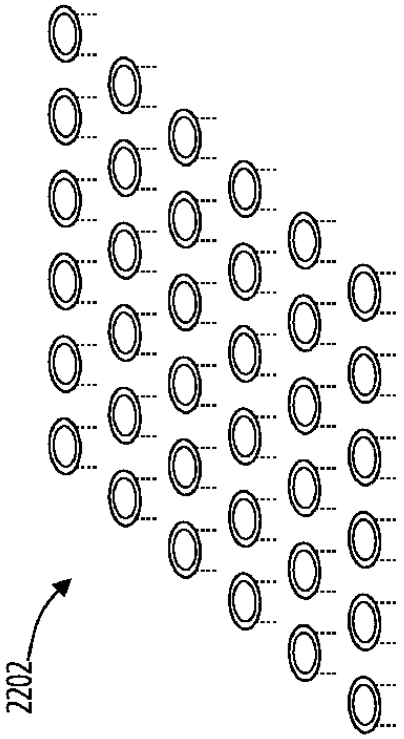


FIG. 22A

【図２２Ｂ】

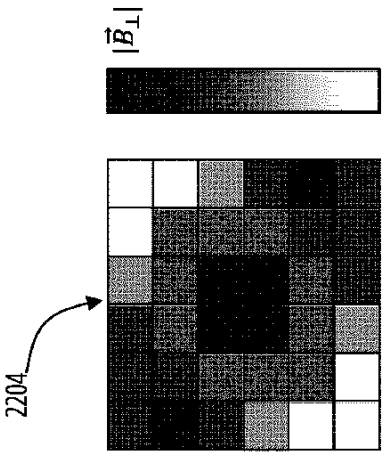


FIG. 22B

【図２２Ｃ】

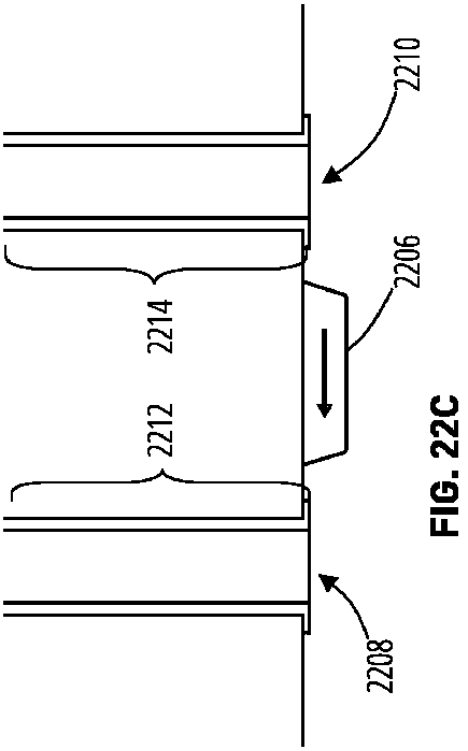
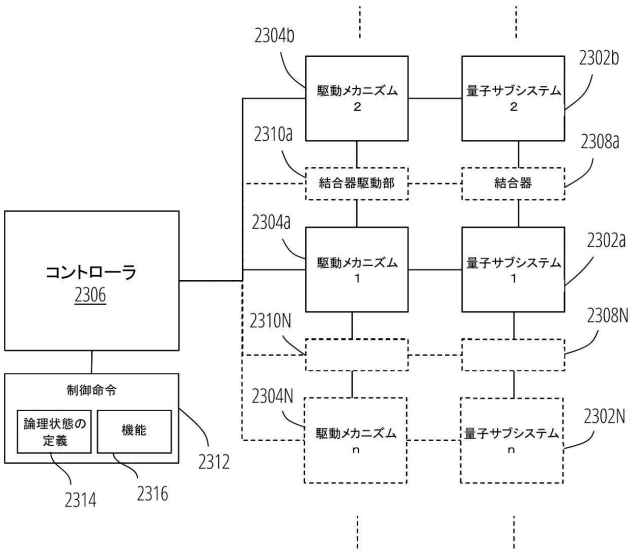


FIG. 22C

【図２３】



【手続補正書】
【提出日】令和5年4月19日(2023.4.19)
【手続補正１】
【補正対象書類名】特許請求の範囲
【補正対象項目名】全文
【補正方法】変更
【補正の内容】
【特許請求の範囲】
【請求項１】
量子デバイスであって、
基板と、
前記基板の基板表面上に支持され、前記量子デバイスの動作中に超伝導性を示す、超伝導回路素子と、
受動的磁気素子と
を備え、前記受動的磁気素子が、前記量子デバイスの動作段階の全期間において、固定磁場を発生させ、前記超伝導回路素子が、前記量子デバイスの前記動作段階において、前記固定磁場の少なくとも一部に直接的又は間接的に曝されることにより、前記超伝導回路素子における一定の周波数応答を提供する、量子デバイス。
【請求項２】
前記超伝導回路素子が、対応する点で分配及び再結合する２本の岐路を備える超伝導ループを具備し、各岐路が、少なくとも１つのジョセフソン接合を備え、前記固定磁場の前記一部が、前記超伝導ループを横切る一定の磁気誘導束に寄与する、請求項１に記載の量子デバイス。
【請求項３】
前記受動的磁気素子及び前記超伝導回路素子が、両方とも、前記基板の前記基板表面で支持される、請求項２に記載の量子デバイス。
【請求項４】
前記受動的磁気素子が、前記超伝導回路素子に隣り合って配置される、請求項３に記載の量子デバイス。
【請求項５】
前記超伝導ループが、少なくとも１本の低感度軸を有し、前記受動的磁気素子が、前記低感度軸上に位置する、請求項４に記載の量子デバイス。
【請求項６】
前記低感度軸が、前記超伝導ループの前記２本の岐路を横切って横方向に延びる、請求項５に記載の量子デバイス。
【請求項７】
前記受動的磁気素子が、前記基板表面に対して垂直な磁化方向を有する、請求項４に記載の量子デバイス。
【請求項８】
前記受動的磁気素子が、第１の受動的磁気素子であり、前記量子デバイスが、前記基板表面によって支持される第２の受動的磁気素子をさらに備え、前記第２の受動的磁気素子が、前記超伝導ループに対して中央に位置する、請求項７に記載の量子デバイス。
【請求項９】
前記基板表面によって支持される第３の受動的磁気素子をさらに備え、前記第３の受動的磁気素子が、前記超伝導ループに隣り合って、前記第１の受動的磁気素子とは反対側に位置する、請求項８に記載の量子デバイス。
【請求項１０】
前記受動的磁気素子が、前記基板表面に平行な磁化方向を有し、前記磁化方向が、前記超伝導ループの前記低感度軸に沿って向きを合わせられる、請求項５に記載の量子デバイス。

【請求項１１】
前記受動的磁気素子が、前記超伝導ループによって画定される平面の上方又は下方に配置される、請求項２に記載の量子デバイス。
【請求項１２】
前記基板が、第１の基板であり、前記量子デバイスが、前記第１の基板から離間して保持される第２の基板をさらに備え、前記受動的磁気素子が、前記第２の基板によって支持される、請求項１１に記載の量子デバイス。
【請求項１３】
前記受動的磁気素子が、前記基板表面に形成された窪み内に配置される、請求項１１に記載の量子デバイス。
【請求項１４】
前記超伝導回路素子が、磁束量子ビット、超伝導量子干渉デバイス（ＳＱＵＩＤ）、超伝導非線形非対称誘導素子（ＳＮＡＩＬ）、及び容量分路型ＳＮＡＩＬ（ＳＮＡＩＬＭＯＮ）からなる群から選択される、請求項２に記載の量子デバイス。
【請求項１５】
前記超伝導素子が、複数の超伝導素子のうちの１つであり、前記複数の超伝導素子が、前記基板表面上に配列構成で配置される、請求項１に記載の量子デバイス。
【請求項１６】
前記一定の磁気誘導束が、磁気誘導束量子Φ_0の規模である、請求項２に記載の量子デバイス。
【請求項１７】
前記超伝導回路素子が、前記固定磁場の前記一部に間接的に曝され、前記固定磁場の前記一部が、１つ又は複数の磁場誘導部によって、少なくとも部分的に、前記受動的磁気素子に近接する第１の場所から、前記超伝導回路素子に近接する第２の場所へ誘導され、
前記１つ又は複数の磁場誘導部のそれぞれが、前記固定磁場の前記一部を少なくとも部分的に誘導するよう動作可能であり、
前記基板の少なくとも１つの基板層を横切って延在し、第１の端部及び第２の端部を有し、前記少なくとも１つの基板層の内側に内面を画定する、管状通路と、
前記量子デバイスの動作中に、超伝導性を示す材料の誘導層と、を備え、前記誘導層が、前記管状通路の前記内面を少なくとも部分的に覆い、前記第１の端部から前記第２の端部まで広がる、請求項１に記載の量子デバイス。
【請求項１８】
１つの磁場誘導部を備え、前記基板表面が、第１の基板表面であり、前記基板が、前記第１の基板表面と反対側の第２の基板表面をさらに備え、前記受動的磁気素子が、前記第２の基板表面によって支持され、前記管状通路の前記第１の端部が、前記第１の基板表面上で、前記超伝導回路素子に近接して配置され、前記管状通路の前記第２の端部が、前記第２の基板表面上で、前記受動的磁気素子に近接して配置される、請求項１７に記載の量子デバイス。
【請求項１９】
前記基板が、第１の基板層及び第２の基板層を備え、前記第１の基板層が、前記基板表面を備え、前記基板が、内部磁場誘導部をさらに具備し、前記内部磁場誘導部が、
前記第１の基板層と前記第２の基板層との間に形成される空洞であって、内部空洞表面を画定する、空洞と、
前記量子デバイスの前記動作中に超伝導性を示す、前記材料の空洞誘導層と
を備え、前記空洞誘導層が、少なくとも部分的に前記内部空洞表面を覆い、
前記量子デバイスが、２つの磁場誘導部を備え、
前記２つの磁場誘導部のうちの第１の磁場誘導部が、その第１の端部が、前記内部磁場誘導部に結合され、その第２の端部が、前記基板表面上で、前記超伝導回路素子に近接して配置される、吸込み誘導部として作用し、
前記２つの磁場誘導部のうちの第２の磁場誘導部が、その第１の端部が、前記基板表面

上で、前記受動的磁気素子に近接して配置され、その第２の端部が、前記内部磁場誘導部に結合される、発生源誘導部として作用し、

前記固定磁場の前記一部が、少なくとも部分的に、前記発生源誘導部の前記第１の端部から、前記内部磁場誘導部を通って、前記吸込み誘導部の前記第２の端部まで誘導される、請求項１７に記載の量子デバイス。

【請求項２０】

前記超伝導回路素子が、量子コンピュータの量子サブシステムとして動作するよう構成され、前記超伝導回路素子が、前記量子コンピュータの動作中に、前記量子サブシステム内に少なくとも１つの量子ビットを提供するよう動作可能である、請求項１に記載の量子デバイス。

【国際調査報告】

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/CA2022/051671

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

IPC: ***G06N 10/40*** (2022.01)

CPC: **G06N 10/40** (2022.01), H01L 39/00 (2020.01), H01L 39/223 (2020.01)

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)
IPC: G06N 10/40 (2022.01)
CPC: G06N 10/40 (2022.01), H01L 39/00 (2020.01), H01L 39/223 (2020.01)

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

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

Databases: Questel-Orbit (FamPat); Search Engine: Google
Keywords: quantum device, qubit, substrate, Josephson Junction, loop, permanent magnet, micromagnet, magnetic field guide, waveguide, tubular passage.

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X Y	US 2021/0305480 A1 (HOLMES, S.J. et al.) 30 Sep 2021 (30-07-2021) *whole document, in particular: - paragraphs [0008], [0011]-[0012], [0016], [0048], [0060]-[0063], [0075], [0097]*	1-4, 14-15, 20 5-13, 16
X Y	KHA, A. et al. "Do micromagnets expose spin qubits to charge and Johnson noise?", arXiv.org, v1, pages 1-7, 17 November 2015 (17-11-2015), retrieved from https://arxiv.org/abs/1511.05247 on 17 February 2023 (17-02-2023) *whole document, in particular: - Abstract; - fig. 1; and - page 1, col 1, 2nd paragraph*	1 2-16, 20

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

*	Special categories of cited documents:	"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
"A"	document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance	"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
"D"	document cited by the applicant in the international application	"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
"E"	earlier application or patent but published on or after the international filing date	"&"	document member of the same patent family
"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		

Date of the actual completion of the international search	Date of mailing of the international search report
17 February 2023 (17-02-2023)	20 February 2023 (20-02-2023)
Name and mailing address of the ISA/CA Canadian Intellectual Property Office Place du Portage I, C114 - 1st Floor, Box PCT 50 Victoria Street Gatineau, Quebec K1A 0C9 Facsimile No.: 819-953-2476	Authorized officer Ayube Ali (873) 353-0486

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/CA2022/051671

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	DAMBROT, Stuart M. "Quantum meets classical: Qubit fabricated with integrated micromagnet increases speed of quantum manipulation in silicon", Phys.org, featured article, pages 1-7, 25 August 2014 (25-08-2014), retrieved from https://phys.org/news/2014-08-quantum-classical-qubit-fabricated-micromagnet.html on 17 February 2023 (17-02-2023) *whole document*	1-20
A	US 2020/0167683 A1 (FRISCH, A. et al.) 28 May 2020 (28-05-2020) *whole document*	1-20
A	US 2016/0292587 A1 (RIGETTI, C.T. et al.) 06 October 2016 (06-10-2016) *whole document*	1-20
A	US 2003/0207766 A1 (ESTEVE, D. et al.) 06 November 2003 (06-11-2003) *whole document*	1-20
A	US 2020/0144690 A1 (GUMANN, P. et al.) 07 May 2020 (07-05-2020) *whole document*	1-20

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.
PCT/CA2022/051671

Patent Document Cited in Search Report	Publication Date	Patent Family Member(s)	Publication Date
US2021305480A1	30 September 2021 (30-09-2021)	CN115298673A	04 November 2022 (04-11-2022)
		EP4128078A1	08 February 2023 (08-02-2023)
		WO2021190938A1	30 September 2021 (30-09-2021)
US2020167683A1	28 May 2020 (28-05-2020)	US11501196B2	15 November 2022 (15-11-2022)
		CN113056752A	29 June 2021 (29-06-2021)
		EP3888018A1	06 October 2021 (06-10-2021)
		JP2022509003A	20 January 2022 (20-01-2022)
		WO2020109107A1	04 June 2020 (04-06-2020)
US2016292587A1	06 October 2016 (06-10-2016)	US10496934B2	03 December 2019 (03-12-2019)
		EP3111379A2	04 January 2017 (04-01-2017)
		EP3111379A4	15 November 2017 (15-11-2017)
		EP3111379B1	24 June 2020 (24-06-2020)
		EP3111380A2	04 January 2017 (04-01-2017)
		EP3111380A4	29 November 2017 (29-11-2017)
		EP3111380B1	04 September 2019 (04-09-2019)
		EP3111381A2	04 January 2017 (04-01-2017)
		EP3111381A4	29 November 2017 (29-11-2017)
		EP3111381B1	06 January 2021 (06-01-2021)
		EP3828782A1	02 June 2021 (02-06-2021)
		US2016292586A1	06 October 2016 (06-10-2016)
		US9892365B2	13 February 2018 (13-02-2018)
		US2016267032A1	15 September 2016 (15-09-2016)
		US10192168B2	29 January 2019 (29-01-2019)
		US2018330267A1	15 November 2018 (15-11-2018)
		US10748082B2	18 August 2020 (18-08-2020)
		US2020258003A1	13 August 2020 (13-08-2020)
		US2021142215A1	13 May 2021 (13-05-2021)
		WO2015178990A2	26 November 2015 (26-11-2015)
		WO2015178990A3	04 February 2016 (04-02-2016)
		WO2015178991A2	26 November 2015 (26-11-2015)
		WO2015178991A3	28 January 2016 (28-01-2016)
		WO2015178992A2	26 November 2015 (26-11-2015)
		WO2015178992A3	28 January 2016 (28-01-2016)
US2003207766A1	06 November 2003 (06-11-2003)	US6838694B2	04 January 2005 (04-01-2005)
		AT422713T	15 February 2009 (15-02-2009)
		AU2003249395A1	17 November 2003 (17-11-2003)
		CA2403522A1	03 November 2003 (03-11-2003)
		DE60326138D1	26 March 2009 (26-03-2009)
		EP1506581A2	16 February 2005 (16-02-2005)
		EP1506581B1	11 February 2009 (11-02-2009)
		FR2839389A1	07 November 2003 (07-11-2003)
		FR2839389B1	05 August 2005 (05-08-2005)
		JP2005524980A	18 August 2005 (18-08-2005)
		WO03094250A2	13 November 2003 (13-11-2003)
		WO03094250A3	08 April 2004 (08-04-2004)
US2020144690A1	07 May 2020 (07-05-2020)	US10790566B2	29 September 2020 (29-09-2020)

フロントページの続き

(32)優先日　令和4年11月11日(2022.11.11)
(33)優先権主張国・地域又は機関
米国(US)
(81)指定国・地域　AP(BW,GH,GM,KE,LR,LS,MW,MZ,NA,RW,SD,SL,ST,SZ,TZ,UG,ZM,ZW),EA(AM,AZ,BY,KG,KZ,RU,TJ,TM),EP(AL,AT,BE,BG,CH,CY,CZ,DE,DK,EE,ES,FI,FR,GB,GR,HR,HU,IE,IS,IT,LT,LU,LV,MC,MK,MT,NL,NO,PL,PT,RO,RS,SE,SI,SK,SM,TR),OA(BF,BJ,CF,CG,CI,CM,GA,GN,GQ,GW,KM,ML,MR,NE,SN,TD,TG),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,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,ME,MG,MK,MN,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
(72)発明者　レミュー、パスカル
カナダ ジェイ１ケイ ０エイ５ ケベック、シェルブルック、ブルヴァール ドゥ ルニヴェルスィテ ３０００、シーピー ピー１－アセット、ノール クアンティキ インコーポレイテッド 気付
Ｆターム（参考）　4M113 AC45 AC48 AC50