

(19)日本国特許庁(JP)

(12)特許公報(B2)

(11)特許番号
特許第7223711号
(P7223711)

(45)発行日 令和5年2月16日(2023.2.16)

(24)登録日 令和5年2月8日(2023.2.8)

(51)国際特許分類	F I		
H 1 0 N 60/01 (2023.01)	H 0 1 L	39/24	W Z A A
H 0 1 L 21/768(2006.01)	H 0 1 L	21/90	B
H 0 1 L 23/522(2006.01)	H 0 1 L	21/88	S
H 0 1 L 21/3205(2006.01)	H 0 1 L	27/18	
H 1 0 N 69/00 (2023.01)			

請求項の数 28 (全64頁)

(21)出願番号	特願2019-562235(P2019-562235)	(73)特許権者	507209207 ディー・ウェイブ システムズ インコーポレイテッド カナダ国, プリティッシュ コロンビア州 ブイ5ジー 4エム9, パーナビー, ベータ アベニュー 3033
(86)(22)出願日	平成30年1月31日(2018.1.31)	(74)代理人	100079108 弁理士 稲葉 良幸
(65)公表番号	特表2020-509608(P2020-509608 A)	(74)代理人	100109346 弁理士 大貫 敏史
(43)公表日	令和2年3月26日(2020.3.26)	(74)代理人	100117189 弁理士 江口 昭彦
(86)国際出願番号	PCT/US2018/016237	(74)代理人	100134120 弁理士 内藤 和彦
(87)国際公開番号	WO2018/144601	(72)発明者	ファン, シュイユアン
(87)国際公開日	平成30年8月9日(2018.8.9)		
審査請求日	令和3年1月25日(2021.1.25)		
(31)優先権主張番号	62/453,358		
(32)優先日	平成29年2月1日(2017.2.1)		
(33)優先権主張国・地域又は機関	米国(US)		

最終頁に続く

(54)【発明の名称】 超伝導集積回路の製造のためのシステム及び方法

(57)【特許請求の範囲】

【請求項1】

超伝導集積回路を製造するための方法であって、前記方法が、
 基板上に第1の超伝導金属層を堆積させることであって、前記第1の超伝導金属層が、それぞれの温度範囲内で超伝導性である、堆積させることと、
 前記第1の超伝導金属層をパターニングして第1の配線層を形成することであって、前記第1の配線層が、1つ以上の超伝導トレースの第1の組を含む、形成することと、
 前記第1の配線層の少なくとも一部分の上に重なるように第2の超伝導金属層を堆積させることであって、前記第2の超伝導金属層が、それぞれの温度範囲内で超伝導性である、堆積させることと、
 前記第2の超伝導金属層をパターニングして前記第2の超伝導金属層内に第1の複数の超伝導スタッドピアを形成することであって、前記第1の複数の超伝導スタッドピアの各超伝導スタッドピアが、前記1つ以上の超伝導トレースの第1の組内の少なくとも1つの超伝導トレースに電気的に結合される、形成することと、
 前記複数の超伝導スタッドピアのうちの少なくとも1つの上に重なるように力学インダクタンス層を堆積させることであって、前記力学インダクタンス層が、それぞれの温度範囲内で超伝導性である材料であって、前記力学インダクタンス層内に貯蔵されたエネルギーのより大きな割合を磁気インダクタンスよりも力学インダクタンスとして貯蔵させる材料を含む、堆積させることと、を含む、方法。

【請求項2】

基板上に第 1 の超伝導金属層を堆積させることが、ケイ素を含む基板上に第 1 の超伝導金属層を堆積させることを含む、請求項 1 に記載の方法。

【請求項 3】

第 1 の超伝導金属層を堆積させることが、ニオブ及びアルミニウムのうちの少なくとも 1 つを含む第 1 の超伝導金属層を堆積させることを含む、請求項 1 又は 2 に記載の方法。

【請求項 4】

第 1 の超伝導金属層を堆積させることが、ニオブからなる第 1 の超伝導金属層を堆積させることを含む、請求項 1 又は 2 に記載の方法。

【請求項 5】

第 2 の超伝導金属層を堆積させることが、アルミニウム及びニオブのうちの少なくとも 1 つを含む第 2 の超伝導金属層を堆積させることを含む、請求項 1 又は 2 に記載の方法。

10

【請求項 6】

力学インダクタンス層を堆積させることが、窒化チタン (TiN)、窒化ニオブ (NbN)、窒化ニオブチタン (NbTiN)、窒化モリブデン (MoN)、及びタングステンシリサイド (WSi) のうちの少なくとも 1 つを含む力学インダクタンス層を堆積させることを含む、請求項 1 又は 2 に記載の方法。

【請求項 7】

窒化チタン (TiN)、窒化ニオブ (NbN)、窒化ニオブチタン (NbTiN)、窒化モリブデン (MoN)、及びタングステンシリサイド (WSi) のうちの少なくとも 1 つを含む力学インダクタンス層を堆積させることが、25 nm ~ 100 nm の範囲の厚さを有する力学インダクタンス層を堆積させることを含む、請求項 6 に記載の方法。

20

【請求項 8】

力学インダクタンス層を堆積させることが、窒化チタン (TiN) からなる力学インダクタンス層を堆積させることを含む、請求項 1 又は 2 に記載の方法。

【請求項 9】

前記複数の超伝導スタッドピアのうちの少なくとも 1 つの超伝導スタッドピアの上に重なるように力学インダクタンス層を堆積させることが、前記第 1 の複数の超伝導スタッドピアのうちの少なくとも 2 つの超伝導スタッドピアの上に重なるように力学インダクタンス層を堆積させることを含み、前記方法が、前記力学インダクタンス層をパターンニングして 2 つの電極を備える力学インダクタを形成することであって、各電極が、前記第 1 の複数の超伝導スタッドピアの各超伝導スタッドピアによって形成され、各電極が、前記 1 つ以上の超伝導トレースの第 1 の組内の少なくとも 1 つの超伝導トレースに電氣的に結合される、形成することを更に含む、請求項 1 又は 2 に記載の方法。

30

【請求項 10】

前記力学インダクタの少なくとも一部分の上に重なるように第 1 の保護層を堆積させることを更に含む、請求項 9 に記載の方法。

【請求項 11】

第 1 の保護層を堆積させることが、窒化ケイ素 (SiN) を含む第 1 の保護層を堆積させることを含む、請求項 10 に記載の方法。

【請求項 12】

前記第 1 の保護層の少なくとも一部分の上に重なるように第 3 の超伝導金属層を堆積させることであって、前記第 3 の超伝導金属層が、それぞれの温度範囲内で超伝導性である、堆積させることと、

40

前記第 3 の超伝導金属層をパターンニングして第 2 の配線層を形成することであって、前記第 2 の配線層が、1 つ以上の超伝導トレースの第 2 の組を含む、形成することと、を更に含む、請求項 10 に記載の方法。

【請求項 13】

第 3 の超伝導金属層を堆積させることが、ニオブを含む第 3 の超伝導金属層を堆積させることを含む、請求項 12 に記載の方法。

【請求項 14】

50

前記第 3 の超伝導金属層をパターンニングすることが、前記第 3 の超伝導金属層をパターンニングして、前記 1 つ以上の超伝導トレースの第 2 の組内の少なくとも 1 つの超伝導トレースを、前記第 1 の複数の超伝導スタッドビアの各超伝導スタッドビアによって、前記 1 つ以上の超伝導トレースの第 1 の組内の少なくとも 1 つの超伝導トレースに電氣的に結合することを含み、請求項 1 2 に記載の方法。

【請求項 1 5】

前記第 3 の超伝導金属層をパターンニングすることが、前記第 3 の超伝導金属層をパターンニングしてコンデンサを形成することを含み、前記コンデンサが、

前記第 1 の複数の超伝導スタッドビアのうちの超伝導スタッドビアにより形成された第 1 の電極と、

前記 1 つ以上の超伝導トレースの第 2 の組内の超伝導トレースの少なくとも一部分によって形成された第 2 の電極と、を備え、前記第 1 及び前記第 2 の電極が、前記第 1 の保護層の少なくとも一部分によって、かつ前記力学インダクタンス層の少なくとも一部分によって分離されている、請求項 1 2 に記載の方法。

【請求項 1 6】

前記第 2 の配線層の少なくとも一部分の上に重なるように第 4 の超伝導金属層を堆積させることであって、前記第 4 の超伝導金属層が、それぞれの温度範囲内で超伝導性である、堆積させることと、

前記第 4 の超伝導金属層をパターンニングして第 2 の複数の超伝導スタッドビアを形成することであって、前記第 2 の複数の超伝導スタッドビアの各超伝導スタッドビアが、前記 1 つ以上の超伝導トレースの第 2 の組内の少なくとも 1 つの超伝導トレースに電氣的に結合される、形成することと、を更に含む、請求項 1 2 に記載の方法。

【請求項 1 7】

中間層を伴うか又は伴わないかのいずれかで、前記第 4 の超伝導金属層の少なくとも一部分の上に重なるように第 2 の保護層を堆積させることと、

前記第 2 の保護層の少なくとも一部分の上に重なるように第 5 の超伝導金属層を堆積させることであって、前記第 5 の超伝導金属層が、それぞれの温度範囲内で超伝導性である、堆積させることと、

前記第 5 の超伝導金属層をパターンニングして第 3 の配線層を形成することであって、前記第 3 の配線層が、1 つ以上の超伝導トレースの第 3 の組を含む、形成することと、を更に含む、請求項 1 6 に記載の方法。

【請求項 1 8】

第 5 の超伝導金属層を堆積させることが、ニオブ及びアルミニウムのうちの少なくとも 1 つを含む第 5 の超伝導金属層を堆積させることを含み、請求項 1 7 に記載の方法。

【請求項 1 9】

前記第 5 の超伝導金属層をパターンニングすることが、前記第 5 の超伝導金属層をパターンニングして、前記 1 つ以上の超伝導トレースの第 3 の組内の少なくとも 1 つの超伝導トレースを、前記第 2 の複数の超伝導スタッドビアの各超伝導スタッドビアによって、前記 1 つ以上の超伝導トレースの第 2 の組内の少なくとも 1 つの超伝導トレースに電氣的に結合することを含み、請求項 1 8 に記載の方法。

【請求項 2 0】

前記第 5 の超伝導金属層をパターンニングすることが、前記第 5 の超伝導金属層をパターンニングしてコンデンサを形成することを含み、前記コンデンサが、

前記 1 つ以上の超伝導トレースの第 3 の組内の超伝導トレースの少なくとも一部分によって形成された第 1 の電極と、

前記第 2 の複数の超伝導スタッドビアのうちの超伝導スタッドビアによって形成された第 2 の電極と、を備え、前記第 1 及び前記第 2 の電極が、前記第 2 の保護層の少なくとも一部分によって分離されている、請求項 1 8 に記載の方法。

【請求項 2 1】

超伝導集積回路であって、

10

20

30

40

50

基板に重なった1つ以上の超伝導トレースの第1の組を含む第1の配線層であって、前記第1の配線層が、それぞれの温度範囲内で超伝導性である、第1の配線層と、

第1の複数の超伝導スタッドビアであって、前記超伝導スタッドビアが、それぞれの温度範囲内で超伝導性であり、前記第1の複数の超伝導スタッドビアの各超伝導スタッドビアが、前記1つ以上の超伝導トレースの第1の組内の1つ以上の超伝導トレースに電氣的に結合されている、第1の複数の超伝導スタッドビアと、

前記複数の超伝導スタッドビアのうちの少なくとも1つの上に重なった力学インダクタンス層であって、前記力学インダクタンス層が、それぞれの温度範囲内で超伝導性である材料であって、前記力学インダクタンス層内に貯蔵されたエネルギーのより大きな割合を磁気インダクタンスよりも力学インダクタンスとして貯蔵させる材料を含む、力学インダクタンス層と、を備える、超伝導集積回路。

10

【請求項22】

前記力学インダクタンス層が、窒化チタン(TiN)を含む、請求項21に記載の超伝導集積回路。

【請求項23】

前記力学インダクタンス層が、前記複数の超伝導スタッドビアのうちの少なくとも2つの上に重なり、前記超伝導集積回路が、力学インダクタを形成するために、前記力学インダクタンス層の少なくとも一部分の上に重なった保護層を更に備え、前記力学インダクタが、少なくとも2つの電極を備え、各電極が、前記第1の複数の超伝導スタッドビアの各超伝導スタッドビアによって、前記1つ以上の超伝導トレースの第1の組内の少なくとも1つの超伝導トレースに電氣的に結合されている、請求項21に記載の超伝導集積回路。

20

【請求項24】

前記保護層が、窒化ケイ素(SiN)を含む、請求項23に記載の超伝導集積回路。

【請求項25】

第2の配線層を更に備え、前記第2の配線層が、1つ以上の超伝導トレースの第2の組を備え、前記第2の配線層の前記1つ以上の超伝導トレースが、それぞれの温度範囲内で超伝導性である、請求項23に記載の超伝導集積回路。

【請求項26】

前記1つ以上の超伝導トレースの第2の組内の少なくとも1つの超伝導トレースが、前記第1の複数の超伝導スタッドビアの少なくとも1つの超伝導スタッドビアによって、前記1つ以上の超伝導トレースの第1の組内の少なくとも1つの超伝導トレースに電氣的に結合されている、請求項25に記載の超伝導集積回路。

30

【請求項27】

コンデンサを更に備え、前記コンデンサが、

前記1つ以上の超伝導トレースの第1の組内の超伝導トレースの少なくとも一部分によって形成された第1の電極と、

前記1つ以上の超伝導トレースの第2の組内の超伝導トレースの少なくとも一部分によって形成された第2の電極と、を含み、前記第1及び前記第2の電極が、前記保護層の少なくとも一部分によって分離されている、請求項25に記載の超伝導集積回路。

【請求項28】

40

前記第2の配線層の少なくとも一部分の上に重なる第2の複数の超伝導スタッドビアを更に備え、前記第2の複数の超伝導スタッドビアの各超伝導スタッドビアが、前記1つ以上の超伝導トレースの第2の組内の少なくとも1つの超伝導トレースに電氣的に結合されている、請求項25に記載の超伝導集積回路。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明のシステム及び方法は、超伝導用途のための集積回路の製造に関する。

【背景技術】

【0002】

50

量子計算に対するアプローチ

量子コンピュータの設計及び動作には、いくつかの一般的なアプローチがある。そのようなアプローチの1つは、量子計算の「回路」又は「ゲート」モデルである。このアプローチでは、量子ビットは、アルゴリズムのコンパイルされた表現である論理ゲートのシーケンスによって作用される。多くの研究は、回路モデル量子コンピュータの基本要素を形成するために十分なコヒーレンスを有する量子ビットを開発することに焦点が当てられてきた。

【0003】

量子計算に対する別のアプローチは、計算システムとして、結合された量子デバイスのシステムの自然な物理的発生を使用することを伴う。このアプローチは、量子ゲート及び回路を使用しない場合がある。代わりに、計算システムは、容易にアクセス可能な基底状態を有する既知の初期ハミルトンから開始することができ、その基底状態が問題に対する答えを表す最終ハミルトンに制御可能に誘導されてもよい。このアプローチは、通常、長い量子ビットコヒーレンス時間を必要とせず、回路モデルよりも堅牢とすることができる。この種のアプローチの例としては、断熱量子計算及び量子アニールが挙げられる。

10

【0004】

量子プロセッサ

量子計算は、超伝導量子プロセッサなどの量子プロセッサを使用して実行することができる。超伝導量子プロセッサは、いくつかの量子ビットと、例えば2以上の超伝導量子ビットからなる結合された局部バイアスデバイスを含む超伝導量集積回路を含むことができる。本発明のシステム及び方法に従って製造され得る例示的な超伝導量子プロセッサのシステム及び方法に関する更なる詳細は、米国特許第7,135,701号、米国特許第7,418,283号、米国特許第7,533,068号、米国特許第7,619,437号、米国特許第7,639,035号、米国特許第7,898,282号、米国特許第8,008,942号、米国特許第8,190,548号、米国特許第8,195,596号、米国特許第8,283,943号、及び米国特許出願公開第2011/0022820号に記載されており、これらはそれぞれ参照によりその全体が本明細書に組み込まれる。

20

【0005】

超伝導量子ビット

超伝導量子ビットは、超伝導集積回路に含めることができる超伝導デバイスの一種である。情報を符号化するために使用される物理的特性に応じて、超伝導量子ビットをいくつかのカテゴリーに分離することができる。例えば、それらは、電荷、流束、及び位相デバイスに分離されてもよい。電荷デバイスは、デバイスの電荷状態に情報を記憶及び操作する。流束デバイスは、デバイスの一部を通して磁束に関連する変数の情報を記憶及び操作する。位相デバイスは、デバイスの2つの領域の間の超伝導位相差に関連する変数に情報を記憶及び操作する。近年、電荷の自由度、磁束の自由度及び位相の自由度のうちの2つ以上を用いるハイブリッドデバイスが開発された。

30

【0006】

超伝導集積回路は、単一流束量子(single flux quantum、SFQ)デバイスを含んでもよい。SFQデバイスの超伝導量子ビットとの統合は、例えば、米国特許第7,876,248号、米国特許第8,035,540号、米国特許第8,098,179号、及び米国特許出願公開第2011/0065586号に記載されており、これらはそれぞれ参照によりその全体が本明細書に組み込まれる。

40

【0007】

超伝導プロセッサ

コンピュータプロセッサは、超伝導プロセッサの形態をとることができ、この場合、超伝導プロセッサは、従来の意味での量子プロセッサでなくてもよい。例えば、超伝導プロセッサのいくつかの実施形態は、量子トンネリング、重ね合わせ、及びエンタングルメントなどの量子効果に焦点を当てない場合があるが、むしろ、例えば古典的なコンピュータ

50

プロセッサの動作を管理する原理などの、異なる原理を強調することによって動作することができる。しかしながら、このような超伝導「古典的」プロセッサの実施態様には、依然として特定の利点が存在し得る。それらの自然な物理的特性により、超伝導古典的プロセッサは、非超伝導プロセッサよりも高速スイッチング速度及びより短い計算時間が可能であり得、したがって、超伝導古典的プロセッサ上の特定の問題を解決することがより実用的とすることができる。本発明のシステム及び方法は、超伝導量子プロセッサ及び超伝導古典的プロセッサの両方の製造における使用に特に適している。

【0008】

集積回路の製造

従来、超伝導集積回路の製造は、最新の半導体製造設備では実施されていない。これは、超伝導集積回路で使用される材料の一部が半導体設備を汚染する可能性があるという事実起因し得る。例えば、金は、超伝導回路の抵抗器として使用することができるが、金は、半導体設備内でCMOSウェハを製造するために使用される製造ツールを汚染する可能性がある。したがって、金を含む超伝導集積回路は、通常、CMOSウェハも処理するツールによっては処理されない。

10

【0009】

超伝導体の製造は、通常、標準的な産業慣行が超伝導回路の製造のために最適化され得る研究環境で行われてきた。超伝導集積回路は、多くの場合、半導体チップ又は集積回路を製造するために従来使用されているものと同様のツールで製造される。超伝導回路に特有の課題起因して、全ての半導体プロセス及び技術は、必ずしも、超伝導体チップの生産に移転可能であるわけではない。超伝導体チップ及び回路の製造で使用するための半導体プロセス及び技術を変換することは、多くの場合、変更及び微調整を必要とする。このような変更及び調整は、通常明白ではなく、多くの実験を必要とする場合がある。半導体産業は、必ずしも超伝導産業に関連しない問題及び課題に直面している。同様に、超伝導産業にとって懸念される問題及び課題は、標準的な半導体製造における懸念がほとんど又は全くないことが多い。

20

【0010】

超伝導チップ内の任意の不純物は、超伝導量子ビットなどの個々のデバイスや超伝導チップ全体の機能性を損なう又は劣化させる恐れがあるノイズをもたらす場合がある。ノイズは、量子コンピュータの動作に関する深刻な懸念事項であるため、測定は、可能な限り、誘電ノイズを低減するためになされるべきである。

30

【0011】

集積回路製造の技術は、通常、所望の効果をもたらすために順序付けられ及び/又は組み合わせられ得る複数のプロセスを伴う。本発明のシステム及び方法の少なくともいくつかの実施形態と組み合わせられ得る、超伝導集積回路製造のための例示的なシステム及び方法は、米国特許出願公開第2011/0089405号及び米国特許出願公開第2015/0119252号に記載されており、それらの全体が参照により本明細書に組み込まれる。

【0012】

エッチング

エッチングは、フォトレジスト又は他のマスクング技術によって描かれた所望のパターンに従って、例えば、基板、誘電体層、酸化物層、電氣的絶縁層、及び/又は金属層の層を除去する。2つの例示的なエッチング技術は、湿式化学エッチング及び乾式化学エッチングである。

40

【0013】

湿式化学エッチング又は「ウェットエッチング」は、通常、酸浴などの腐食性浴にウェハを浸漬することによって実現される。一般に、エッチング溶液は、ポリプロピレン、温度制御槽内に収容される。浴槽は、通常、エッチングステーションの後方に、リング型プレナム排気換気又はスロット付き排気のいずれかを装備している。垂直方向の層流フードは、通常、エッチング浴の上面に均一に濾過された、粒子を含まない空気を供給するため

50

に使用される。

【0014】

乾式化学エッチング又は「ドライエッチング」は、エッチングプロセスをより良好に制御し、汚染レベルを低減する能力のために一般的に用いられる。ドライエッチングは、化学反応性ガスを使用するなどの化学反応によって、又は例えばアルゴン原子を使用するプラズマエッチングなどの物理的衝撃によるガスの使用を通じて所望の層を効果的にエッチングする。

【0015】

プラズマエッチングシステムは、例えば、ケイ素、二酸化ケイ素、窒化ケイ素、アルミニウム、タンタル、タンタル化合物、クロム、タングステン、金、及び多くの他の材料を効果的にエッチングすることができるプラズマエッチングシステムが開発されている。2種類のプラズマエッチング反応器システムは、一般的な使用であり、パレル反応器システム及び平行プレート反応器システムである。両方の反応器の種類は、同じ原理で動作し、主に構成のみで変化する。典型的な反応器は、通常、アルミニウム、ガラス、又は石英で作製された真空反応器チャンバからなる。高周波又はマイクロ波エネルギー源（RFエネルギー源と総称される）は、エッチング剤として作用するフッ素系又は塩素系ガスを活性化するために使用される。ウェハはチャンバ内に装填され、ポンプはチャンバを排気し、試薬ガスが導入される。RFエネルギーは、ガスをイオン化し、エッチングプラズマを形成し、これはウェハと反応して、ポンピングされる揮発性製品を形成する。

【0016】

物理的エッチングプロセスは、物理的衝撃を用いる。例えば、アルゴンガス原子を使用して、エッチングされる層に物理的に衝突させることができ、真空ポンプシステムを使用して、変位した材料を除去する。スパッタエッチングは、イオン衝撃及びエネルギー移動を伴う1つの物理的技法である。エッチングされるウェハは、低放電回路内の負極又は「ターゲット」に取り付けられる。正のアルゴンイオンがウェハ表面に衝突し、表面原子の転位をもたらす。電力は、RFエネルギー源によって提供される。イオンビームエッチング及びミリングは、材料を除去するために低エネルギーイオンのビームを使用する物理的エッチングプロセスである。イオンビームは、電気放電によって生成されたイオン化ガス（例えば、アルゴン又はアルゴン/酸素）又はプラズマから抽出される。

【0017】

反応性イオンエッチング（reactive ion etching、RIE）は、化学的及び物理的エッチングの組み合わせである。RIE中、ウェハは、化学反応性ガス（例えば、 CF_4 、 Cl_4 、 CHF_3 、及び多くの他のガス）の雰囲気を有するチャンバ内に低圧で配置される。放電は、数百エレクトロンボルトのエネルギーを有するイオンプラズマを生成する。イオンは、ウェハ表面に垂直に衝突し、反応して、低圧インライン真空システムによって除去される揮発性種を形成する。

【発明の概要】

【0018】

超伝導集積回路を製造するための方法であって、方法は、基板上に第1の超伝導金属層を堆積させることであって、第1の超伝導金属層が、それぞれの温度範囲内で超伝導性である、堆積させることと、第1の超伝導金属層をパターンニングして第1の配線層を形成することであって、第1の配線層が、1つ以上の超伝導トレースの第1の組を含む、形成することと、第1の配線層の少なくとも一部分の上に重なるように第2の超伝導金属層を堆積させることであって、第2の超伝導金属層が、それぞれの温度範囲内で超伝導性である、堆積させることと、第2の超伝導金属層をパターンニングして第2の超伝導金属層内に第1の複数の超伝導スタッドピアを形成することであって、第1の複数の超伝導スタッドピアの各超伝導スタッドピアが、1つ以上の超伝導トレースの第1の組内のトレースのうちの少なくとも1つに電氣的に結合される、形成することと、複数の超伝導スタッドピアのうちの少なくとも1つの上に重なるように力学インダクタンス層を堆積させることであって、力学インダクタンス層は、それぞれの温度範囲内で超伝導性である材料を含み、材料

10

20

30

40

50

は、力学インダクタンス層内に貯蔵されたエネルギーのより大きな割合を磁気インダクタンスよりも力学インダクタンスとして貯蔵させる、堆積させることと、を含むものとして要約されてもよい。基板上に第1の超伝導金属層を堆積させることは、ケイ素を含む基板上に第1の超伝導金属層を堆積させることを含むことができる。第1の超伝導金属層を堆積させることは、ニオブ及びアルミニウムのうちの少なくとも1つを含む第1の超伝導金属層を堆積させることを含むことができる。第1の超伝導金属層を堆積させることは、ニオブからなる第1の超伝導金属層を堆積させることを含むことができる。第2の超伝導金属層を堆積させることは、アルミニウム及びニオブのうちの少なくとも1つを含む第2の超伝導金属層を堆積させることを含むことができる。力学インダクタンス層を堆積させることは、窒化チタン(TiN)、窒化ニオブ(NbN)、窒化ニオブチタン(NbTiN)、窒化モリブデン(MoN)、及びタングステンシリサイド(WSi)のうちの少なくとも1つを含む力学インダクタンス層を堆積させることを含むことができる。窒化チタン(TiN)、窒化ニオブ(NbN)、窒化ニオブチタン(NbTiN)、窒化モリブデン(MoN)、及びタングステンシリサイド(WSi)のうちの少なくとも1つを含む力学インダクタンス層を堆積させることは、25nm~100nmの範囲の厚さを有する力学インダクタンス層を堆積させることを含むことができる。力学インダクタンス層を堆積させることは、窒化チタン(TiN)からなる力学インダクタンス層を堆積させることを含むことができる。

10

【0019】

複数の超伝導スタッドビアのうちの少なくとも1つの超伝導スタッドビアの上に重なるように力学インダクタンス層を堆積させることは、複数の超伝導ビアのうちの少なくとも2つの上に重なるように力学インダクタンス層を堆積させることを含み、方法は、力学インダクタンス層をパターンニングして2つの電極を備える力学インダクタンス層を形成することであって、各電極が、第1の複数の超伝導スタッドビアの各超伝導スタッドビアによって形成され、各電極が、1つ以上の超伝導トレースの第1の組内のトレースのうちの少なくとも1つに電気的に結合される、形成することを更に含むことができる。

20

【0020】

方法は、力学インダクタンス層の少なくとも一部分の上に重なるように第1の保護層を堆積させることを更に含むことができる。第1の保護層を堆積させることは、SiNを含む絶縁層を堆積させることを含むことができる。第1の保護層を堆積させることは、窒化ケイ素(SiN)を含む第1の保護層を堆積させることを含むことができる。

30

【0021】

方法は、第1の保護層の少なくとも一部分の上に重なるように第3の超伝導金属層を堆積させることであって、第2の超伝導金属層を堆積させることと、第3の超伝導金属層をパターンニングして第2の配線層を形成することであって、第2の配線層が、1つ以上の超伝導トレースの第2の組を含む、形成することと、を更に含むことができる。第3の超伝導金属層を堆積させることは、ニオブを含む第3の超伝導金属層を堆積させることを含むことができる。第3の超伝導金属層をパターンニングすることは、第3の超伝導金属層をパターンニングして、1つ以上の超伝導トレースの第2の組内のトレースのうちの少なくとも1つを、第1の複数のスタッドビアの各超伝導スタッドビアによって、1つ以上の超伝導トレースの第1の組内のトレースのうちの少なくとも1つに電気的に結合することを含むことができる。第3の超伝導金属層をパターンニングすることは、第3の超伝導金属層をパターンニングしてコンデンサを形成することを含み、コンデンサが、第1の複数の超伝導スタッドビアのうちの超伝導スタッドビアにより形成された第1の電極と、1つ以上の超伝導トレースの第2の組内のトレースのうちの少なくとも1つの少なくとも一部分によって形成された第2の電極と、を備え、第1及び第2の電極が、第1の保護層の少なくとも一部分によって、かつ力学インダクタンス層の少なくとも一部分によって分離されていてもよい。

40

【0022】

方法は、第2の配線層の少なくとも一部分の上に重なるように第4の超伝導金属層を堆積させることであって、第4の超伝導金属層が、それぞれの温度範囲内で超伝導性である

50

、堆積させることと、第4の超伝導金属層をパターンングして第2の複数の超伝導スタッドビアを形成することと、第2の複数の超伝導スタッドビアの各超伝導スタッドビアが、1つ以上の超伝導トレースの第2の組内のトレースのうちの少なくとも1つに電気的に結合される、形成すること、を更に含むことができる。

【0023】

方法は、中間層を伴うか又は伴わないかのいずれかで、第4の超伝導金属層の少なくとも一部分の上に重なるように第2の保護層を堆積させることと、第2の保護層の少なくとも一部分の上に重なるように第5の超伝導金属層を堆積させることと、第5の超伝導金属層が、それぞれの温度範囲内で超伝導性である、堆積させることと、第5の超伝導金属層をパターンングして第3の配線層を形成することと、第3の配線層が、1つ以上の超伝導トレースの第3の組を含む、形成することと、を更に含むことができる。第5の超伝導金属層を堆積させることは、ニオブ及びアルミニウムのうちの少なくとも1つを含む第5の超伝導金属層を堆積させることを含むことができる。第5の超伝導金属層をパターンングすることは、第5の超伝導金属層をパターンングして、1つ以上の超伝導トレースの第3の組内のトレースのうちの少なくとも1つを、第2の複数のスタッドビアの各超伝導スタッドビアによって、1つ以上の超伝導トレースの第2の組内のトレースのうちの少なくとも1つに電気的に結合することを含むことができる。

10

【0024】

第5の超伝導金属層をパターンングすることは、第5の超伝導金属層をパターンングしてコンデンサを形成することを含み、コンデンサが、1つ以上の超伝導トレースの第3の組内のトレースのうちの1つの少なくとも一部分によって形成された第1の電極と、第2の複数の超伝導ビアの超伝導スタッドビアによって形成された第2の電極と、を備え、第1及び第2の電極が、第2の保護層の少なくとも一部分によって分離されてもよい。

20

【0025】

超伝導集積回路は、基板に重なった1つ以上の超伝導トレースの第1の組を含む第1の配線層であって、第1の配線層が、それぞれの温度範囲内で超伝導性である、第1の配線層と、第1の複数の超伝導スタッドビアであって、超伝導スタッドビアが、それぞれの温度範囲内で超伝導性であり、第1の複数の超伝導スタッドビアの各超伝導スタッドビアが、1つ以上の超伝導トレースの第1の組内の1つ以上の超伝導トレースに電気的に結合されている、第1の複数の超伝導スタッドビアと、複数の超伝導スタッドビアのうちの少なくとも1つの上に重なった力学インダクタンス層であって、力学インダクタンス層が、それぞれの温度範囲内で超伝導性である材料を含み、材料が、力学インダクタンス層内に貯蔵されたエネルギーのより大きな割合を磁気インダクタンスよりも力学インダクタンスとして貯蔵させる、力学インダクタンス層と、を備えるものとして要約されてもよい。基板は、ケイ素を含むことができる。第1の配線層は、ニオブを含むことができる。第1の配線層は、ニオブからなることができる。超伝導スタッドビアは、ニオブ及びアルミニウムのうちの少なくとも1つを含むことができる。力学インダクタンス層は、窒化チタン(TiN)を含むことができる。力学インダクタンス層は、25nm~100nmの範囲の厚さを有することができる。

30

【0026】

力学インダクタンス層は、複数の超伝導スタッドビアのうちの少なくとも2つの上に重なり、超伝導集積回路が、力学インダクタンス層を形成するために、力学インダクタンス層の少なくとも一部分の上に重なった保護層を更に備え、力学インダクタンス層が、少なくとも2つの電極を備え、各電極が、第1の複数の超伝導スタッドビアの各超伝導スタッドビアによって、1つ以上の超伝導トレースの第1の組内のトレースのうちの少なくとも1つに電気的に結合されることができる。保護層は、窒化ケイ素(SiN)を含むことができる。

40

【0027】

超伝導集積回路は、第2の配線層を更に備え、第2の配線層が、1つ以上の超伝導トレースの第2の組を備え、第2の配線層の1つ以上の超伝導トレースが、それぞれの温度範囲内で超伝導性であることができる。第2の配線層は、ニオブを含むことができる。1つ

50

以上の超伝導トレースの第2の組内の超伝導トレースのうちの少なくとも1つは、第1の複数の超伝導スタッドビアの超伝導スタッドビアのうちの少なくとも1つによって、1つ以上の超伝導トレースの第1の組内の超伝導トレースのうちの少なくとも1つに電氣的に結合されることができる。

【0028】

超伝導集積回路は、コンデンサを更に備え、コンデンサが、1つ以上の超伝導トレースの第1の組内のトレースのうちの1つの少なくとも一部分によって形成された第1の電極と、1つ以上の超伝導トレースの第2の組内のトレースのうちの1つの少なくとも一部分によって形成された第2の電極と、を含み、第1及び第2の電極が、保護層の少なくとも一部分によって分離されることができる。保護層は、絶縁層を含むことができる。絶縁層は、SiNを含むことができる。

10

【0029】

超伝導集積回路は、第2の配線層の少なくとも一部分の上に重なる第2の複数の超伝導スタッドビアを更に備えることができ、第2の複数の超伝導スタッドビアの各超伝導スタッドビアは、1つ以上の超伝導トレースの第2の組内のトレースのうちの少なくとも1つに電氣的に結合されている。

【0030】

超伝導集積回路を製造するための方法であって、方法は、基板上に第1の超伝導金属層を堆積させることであって、第1の超伝導金属層が、それぞれの温度範囲内で超伝導性である、堆積させることと、第1の超伝導金属層をパターニングして配線層を形成することであって、配線層が、1組の1つ以上の超伝導トレースを含む、形成することと、配線層の少なくとも一部分の上に重なるようにエッチングストップ層を堆積させることであって、エッチングストップ層が、それぞれの温度範囲内で超伝導性である、堆積させることと、エッチングストップ層の少なくとも一部分の上に重なるように第2の超伝導金属層を堆積させることであって、第2の超伝導金属層が、それぞれの温度範囲内で超伝導性である、堆積させることと、第2の超伝導金属層の少なくとも第1の部分の上に重なるようにハードマスクを堆積させることと、第2の超伝導金属層の第1の部分及び第2の超伝導金属層の少なくとも第2の部分の上に重なるようにソフトマスクを堆積させることであって、第2の部分が、第1の部分とは異なり、ソフトマスクが、ハードマスクの上面及び少なくとも1つの側面を取り囲む、堆積させることと、第2の超伝導金属層の少なくとも第3の部分のエッチングすることであって、第3の部分が、第1の部分及び第2の部分とは異なり、第1及び第2の部分が、ソフトマスクによって保護されている、エッチングすることと、第2の超伝導金属層から少なくとも1つの超伝導スタッドビアを形成することであって、超伝導スタッドビアが、1組の1つ以上の超伝導トレースのうちの少なくとも1つのトレースに電氣的に結合される、形成することと、を含むものとして要約されてもよい。第2の超伝導金属層から少なくとも1つの超伝導スタッドビアを形成することは、ソフトマスクを剥離することと、第2の超伝導金属層及びエッチングストップ層をエッチングすることと、を含むことができる。

20

30

【0031】

基板上に第1の超伝導金属層を堆積させることは、ケイ素を含む基板上に第1の超伝導金属層を堆積させることを含むことができる。第1の超伝導金属層を堆積させることは、ニオブからなる第1の超伝導金属層を堆積させることを含むことができる。第1の超伝導金属層を堆積させることは、ニオブを含む第1の超伝導金属層を堆積させることを含むことができる。エッチングストップ層を堆積させることは、アルミニウムの薄層を堆積させることを含むことができる。第2の超伝導金属層を堆積させることは、アルミニウム又はニオブのうちの少なくとも1つを含む第2の超伝導金属層を堆積させることを含むことができる。ハードマスクを堆積させることは、二酸化ケイ素のマスクを堆積させることを含むことができる。ソフトマスクを堆積させることは、フォトレジストのマスクを堆積させることを含むことができる。

40

【0032】

50

超伝導集積回路は、基板に重なった1つ以上の超伝導トレースの第1の組を含む第1の金属層であって、第1の金属層が、それぞれの温度範囲内で超伝導性である、第1の金属層と、1つ以上の超伝導トレースの第1の組内の1つ以上の超伝導トレースに電氣的に結合された第1の複数の超伝導スタッドビアであって、超伝導スタッドビアのそれぞれが、エッチングストップ層及び第2の金属層を含み、エッチングストップ層が、配線層の上に重なり、それぞれの温度範囲内で超伝導性であり、第2の金属層が、エッチングストップ層の上に重なり、それぞれの温度範囲内で超伝導性である、第1の複数の超伝導スタッドビアと、を備えるものとして要約されてもよい。基板は、ケイ素を含むことができる。第1の金属層は、ニオブを含むことができる。第1の金属層は、ニオブからなることができる。超伝導スタッドビアのエッチングストップ層は、アルミニウムを含むことができる。超伝導スタッドビアのエッチングストップ層は、アルミニウムを含み、超伝導スタッドビアの第2の金属層が、ニオブ及びアルミニウムのうちの少なくとも1つを含むことができる。

10

【0033】

超伝導集積回路は、超伝導スタッドビアの第2の金属層の上に重なる窒化ケイ素(SiN)の保護層を更に含むことができる。

【0034】

超伝導集積回路は、製造中に第2の金属層の少なくとも第1の部分の上に一時的に重なるハードマスクと、製造中に第2の金属層の第1の部分及び第2の金属層の少なくとも第2の部分の上に一時的に重なるソフトマスクと、を更に備え、第2の部分が、第1の部分とは異なり、ソフトマスクが、超伝導集積回路の製造中に、ハードマスクの上面及びハードマスクの少なくとも1つの側面を一時的に取り囲むことができる。

20

【0035】

超伝導集積回路を製造するための方法であって、方法は、基板上に第1の超伝導金属層を堆積させることであって、第1の超伝導金属層が、それぞれの温度範囲内で超伝導性である、堆積させることと、第1の超伝導金属層をパターニングして1つ以上の超伝導トレースの第1の組を含む配線層を形成することと、パターニングされた第1の超伝導金属層の少なくとも一部分の上に重なるように第1の誘電体層を堆積させることと、第1の誘電体層を研磨してパターニングされた第1の超伝導金属層に戻すことと、第1の誘電体層を研磨してパターニングされた第1の超伝導金属層に戻すことに起因する構造の少なくとも一部分の上に重なるように第2の誘電体層を堆積させることと、第2の誘電体層をマスクングすることと、マスクングされた第2の誘電体層をエッチングすることと、第2の誘電体層のマスクング及びエッチングに起因する構造の少なくとも一部分の上に重なるように第2の超伝導金属層を堆積させることであって、第2の超伝導金属層が、それぞれの温度範囲にわたって超伝導性である、堆積させることと、第2の超伝導金属層をパターニングして第1の複数の超伝導スタッドビアを形成することであって、第1の複数の超伝導スタッドビアの各超伝導スタッドビアが、配線層内の1つ以上の超伝導トレースの第1の組内のトレースのうちの少なくとも1つに電氣的に結合される、形成することと、配線層の少なくとも一部分の上に重なるように第3の誘電体層を堆積させることと、第1の複数の超伝導スタッドビア内で、第3の誘電体層を研磨して少なくとも1つの超伝導ビアに戻すことと、を含むものとして要約されてもよい。

30

40

【0036】

基板上に第1の超伝導金属層を堆積させることは、ケイ素を含む基板上に第1の超伝導金属層を堆積させることを含むことができる。第1の超伝導金属層を堆積させることは、ニオブ及びアルミニウムのうちの少なくとも1つを含む第1の超伝導金属層を堆積させることを含むことができる。第1の超伝導金属層を堆積させることは、ニオブからなる第1の超伝導金属層を堆積させることを含むことができる。第1の誘電体層を堆積させることは、二酸化ケイ素を含む第1の誘電体層を堆積させることを含み、かつ第1の誘電体層を研磨してパターニングされた第1の超伝導金属層に戻すことは、第1の誘電体層を第1の超伝導金属層の上面に戻す化学機械的平坦化を含むことができる。第2の誘電体層を堆積

50

させることは、二酸化ケイ素の層を堆積させることを含むことができる。第2の超伝導金属層を堆積させることは、アルミニウム又はニオブのうちの少なくとも1つを含む第2の超伝導金属層を堆積させることを含むことができる。第3の誘電体層を堆積させることは、二酸化ケイ素の層を堆積させることを含む、かつ第3の誘電体層を研磨してパターンニングされた超伝導性スタッドに戻すことが、第3の誘電体層をパターンニングされた第2の超伝導金属層の上面に戻す化学機械的平坦化を含むことができる。

【0037】

方法は、研磨された第3の誘電体層に起因する構造の少なくとも一部分の上に重なるように第4の誘電体層を堆積させることと、第4の誘電体層をマスクングすることと、マスクングされた第4の誘電体層をエッチングすることと、を更に含むことができる。

10

【0038】

方法は、マスクングかつエッチングされた第4の誘電体層の少なくとも一部分の上に重なるように第3の超伝導金属層を堆積させることと、第3の超伝導金属層をパターンニングして1つ以上の超伝導トレースの第2の組を形成することと、第3の超伝導金属層が、第1の複数の超伝導ビアのうちの少なくとも1つの超伝導ビアによって、第1の超伝導金属層に電気的に結合される、形成することと、を更に含むことができる。第3の超伝導金属層を堆積させることは、ニオブを含む第3の超伝導金属層を堆積させることを含むことができる。第3の超伝導金属層をパターンニングすることは、第3の超伝導金属層をパターンニングして、1つ以上の超伝導トレースの第2の組内のトレースのうちの少なくとも1つを、第1の複数の超伝導ビアのうちの少なくとも1つの超伝導ビアによって、1つ以上の超伝導トレースの第1の組内のトレースのうちの少なくとも1つに電気的に結合することを含むことができる。

20

【0039】

基板上に第1の超伝導金属層を堆積させることは、第1の一次超伝導金属層を堆積させることと、第1の一次超伝導金属層の少なくとも一部分の上に重なるように第1の研磨停止層を堆積させることと、を含むことができる。第1の一次超伝導金属層を堆積させることは、アルミニウムの層を堆積させることを含むことができる。第1の研磨停止層を堆積させることは、ニオブの層を堆積させることを含むことができる。第1の誘電体層を研磨してパターンニングされた第1の超伝導金属層に戻すことは、第1の誘電体層を研磨して第1の研磨停止層に戻すことを含む、ことができる。第1の超伝導金属層をパターンニングして1つ以上の超伝導トレースの第1の組を含む配線層を形成することは、第1の研磨停止層及び第1の超伝導金属層をパターンニングすることを含む、ことができる。

30

【0040】

基板上に第2の超伝導金属層を堆積させることは、第2の一次超伝導金属層を堆積させることと、第2の一次超伝導金属層の少なくとも一部分の上に重なるように第2の研磨停止層を堆積させることと、を含むことができる。第2の一次超伝導金属層を堆積させることは、アルミニウムの層を堆積させることを含むことができる。第2の研磨停止層を堆積させることは、ニオブの層を堆積させることを含むことができる。第3の誘電体層をパターンニングされた第2の超伝導金属層に戻すことは、第3の誘電体層を第2の研磨停止層に戻すことを含むことができる。第2の超伝導金属層をパターンニングして第1の複数の超伝導スタッドビアを形成することは、第1の研磨停止層、第2の超伝導金属層、及び第2の研磨停止層をパターンニングすることを含むことができる。

40

【0041】

超伝導集積回路は、基板と、基板によって担持された1つ以上の超伝導トレースの第1の組と、1つ以上の超伝導トレースを有する平面内に存在する第1の誘電体と、1つ以上の超伝導トレースの第1の組の超伝導トレース及び第1の誘電体を含む構造の少なくとも一部分の上に重なる第2の誘電体と、第2の超伝導金属層内の第1の複数の超伝導スタッドビアであって、第1の複数の超伝導スタッドビアの各超伝導スタッドビアが、1つ以上の超伝導トレースの第1の組内のトレースのうちの少なくとも1つに電気的に結合されている、第1の複数の超伝導スタッドビアと、第1の複数の超伝導スタッドビアを有する平

50

面内に存在する第3の誘電体と、を備えるものとして要約されてもよい。基板は、ケイ素であることができる。1つ以上の超伝導トレースの第1の組の超伝導トレースは、ニオブを含むことができる。1つ以上の超伝導トレースの第1の組の超伝導トレースは、ニオブからなることができる。第1の誘電体は、二酸化ケイ素を含むことができる。第2の誘電体は、二酸化ケイ素を含むことができる。第1の複数の超伝導スタッドビアは、アルミニウム又はニオブのうちの少なくとも1つを含むことができる。第3の誘電体は、二酸化ケイ素を含むことができる。

【0042】

超伝導集積回路は、第3の誘電体の少なくとも一部分の上に重なる第4の誘電体を更に備えることができる。

10

【0043】

超伝導集積回路は、1つ以上の超伝導トレースの第2の組であって、第1の複数の超伝導スタッドビアのうちの少なくとも1つの超伝導スタッドビアによって、第1の超伝導金属層に電氣的に結合された1つ以上の超伝導トレースの第2の組を更に備えることができる。1つ以上の超伝導トレースの第2の組の1つ以上の超伝導トレースは、ニオブを含むことができる。

【0044】

集積回路構造は、導電性材料を含み、かつ第1の平面内に存在する第1の配線層であって、第1の配線層が、第1のマークを含み、第1のマークが、第1の組の公称寸法及び第1の組の公称寸法によって少なくとも部分的に指定された第1の抵抗を有する、第1の配線層と、導電性材料を含み、かつ第1の平面の上に少なくとも部分的に重なる第2の平面内に存在する第2の配線層であって、第2の配線層が、第2のマークを含み、第2のマークが、第2の組の公称寸法及び第2の組の公称寸法によって少なくとも部分的に指定された第2の抵抗を有し、第2のマークが、第1のマークに対して少なくとも1つの座標軸に沿った公称位置を有する、第2の配線層と、導電性材料を含み、かつ第1の平面と第2の平面との間に存在する第1のスタッドビアであって、第1のスタッドビアが、第3の組の公称寸法及び第3の組の公称寸法によって少なくとも部分的に指定された第3の抵抗を有し、第1のスタッドビアが、第1のマークと第2のマークとの間の信号経路を提供し、第2のマークが、スタッドビア上の第2のマークの直交投影によって画定される第1の抵抗オーバーラップ領域においてスタッドビアとオーバーラップし、第1の抵抗オーバーラップ領域が、少なくとも臨界温度を超える温度で、第1のマーク、第2のマーク、及びスタッドビアの累積抵抗よりも大きい抵抗を有する、第1のスタッドビアと、を備えるものとして要約されてもよい。

20

30

【0045】

第1の抵抗オーバーラップ領域は、少なくとも臨界温度を超える温度で、第1のマーク、第2のマーク、及びスタッドビアの累積抵抗よりも少なくとも1桁大きい抵抗を有することができる。スタッドビアは、少なくとも臨界温度未満で超伝導性である材料を含み、スタッドビアが、第1のマークと第2のマークとの間に超伝導性信号経路を提供することができる。スタッドビアは、ニオブを含むことができる。第1の配線層は、ニオブ及びアルミニウムのうちの少なくとも1つを含むことができる。第2の配線層は、ニオブ及びアルミニウムのうちの少なくとも1つを含むことができる。

40

【0046】

集積回路構造は、第1のマークに電氣的に結合された第1の対のリード線と、第2のマークに電氣的に結合された第2の対のリード線と、を更に備え、第1及び第2の対のリード線が、ホイートストンブリッジ回路が第1及び第2のマークに電氣的に結合されて、もしあれば、第1のマークに対する少なくとも1つの座標軸に沿って公称位置からの第2のマークのオフセットの量を決定することを可能にすることができる。第1のマークは、第1の幅 W_1 と、スタッドビアと重ならない部分 L_1 とスタッドビア及び第1の厚さ t_{wire1} と重なる部分 L_2 とを含む第1の長さ L_1 と、を含み、第2のマークが、第2の幅 W_2 と、スタッドビアと重ならない部分 L_2 とスタッドビア及び第2の厚さ t_{wire2} と重なる部

50

分 d とを含む第 2 の長さ L_2 と、を含み、スタッドピアが、第 3 の幅 W_3 及び第 3 の長さ L_3 を有し、第 2 のマークが、少なくとも 1 つの座標軸に沿った距離 d だけ第 1 のマークから横方向にオフセットされることができる。第 1 のマーク、第 2 のマーク、及びスタッドピアは、第 1 のバーニヤを形成することができる。

【 0 0 4 7 】

第 1 の配線層は、複数の追加マークを備え、第 1 の配線層の追加マークが、第 1 の組の公称寸法及び第 1 のマークの第 1 の組の公称寸法によって少なくとも部分的に指定された第 1 の抵抗を有し、第 2 の配線層が、複数の追加マークを備え、第 2 の配線層の追加マークが、第 2 の組の公称寸法及び第 2 のマークの第 1 の組の公称寸法によって少なくとも部分的に指定された第 2 の抵抗を有し、集積回路構造が、1 組の対応する追加バーニヤを形成するために、第 2 の配線層の追加マークのうちの対応するものを第 1 の配線層の追加マークのうちの対応するものと電氣的に結合する複数の追加スタッドピアを更に備えることができる。第 1 のバーニヤ及び 1 組の追加バーニヤは、バーニヤのチェーンとして電氣的に結合されていることができる。バーニヤのチェーンは、直列に電氣的に結合された 1、0 0 0 ~ 3、2 0 0 個のバーニヤを含むことができる。

10

【 0 0 4 8 】

超伝導集積回路を製造するための方法であって、方法は、超伝導集積回路の部分の抵抗の測定を介して超伝導集積回路内で電氣的に検出可能な層間ずれの目標解像度を決定することと、超伝導集積回路の部分の抵抗の測定を介して決定された超伝導集積回路内で電氣的に検出可能な層間ずれの目標解像度に少なくとも部分的に基づいて、超伝導集積回路内に形成されるいくつかのバーニヤのそれぞれに対して 1 組の寸法を決定することと、超伝導集積回路を製造することと、製造された超伝導集積回路の部分の抵抗を測定することと、を含むものとして要約されてもよい。超伝導集積回路の部分の抵抗の測定を介して決定された超伝導集積回路内で電氣的に検出可能な層間ずれの目標解像度に少なくとも部分的に基づいて、超伝導集積回路内に形成されるいくつかのバーニヤのそれぞれに対して 1 組の寸法を決定することは、第 1 の配線層内の第 1 のマークの長さ、幅、及び厚さを決定することと、第 2 の配線層内の第 2 のマークの長さ、幅、及び厚さを決定することと、第 1 及び第 2 のマークを電氣的に結合するスタッドピアの長さ、幅、及び厚さを決定することと、第 1 の抵抗オーバーラップ領域が、少なくとも臨界温度を超える温度で、第 1 のマーク、第 2 のマーク、及びスタッドピアの累積抵抗よりも大きい抵抗を有するように、スタッドピア上の第 2 のマークの直交投影によって画定される第 1 の抵抗オーバーラップ領域の長さ及び幅を決定することと、を含むことができる。

20

30

【 0 0 4 9 】

方法は、超伝導集積回路を製造する前に、超伝導集積回路の部分の抵抗の測定を介して決定された超伝導集積回路内で電氣的に検出可能な層間ずれの目標解像度に少なくとも部分的に基づいて、超伝導集積回路内に形成されるバーニヤの総数を決定することを更に含むことができる。

【 0 0 5 0 】

方法は、超伝導集積回路を製造する前に、超伝導集積回路の部分の抵抗の測定を介して決定された超伝導集積回路内で電氣的に検出可能な層間ずれの目標解像度に少なくとも部分的に基づいて、超伝導集積回路内に形成されるバーニヤの複数のチェーンのそれぞれにおけるバーニヤの総数を決定することを更に含むことができる。

40

【 0 0 5 1 】

方法は、製造された超伝導集積回路の部分の測定された抵抗に少なくとも部分的に基づいて、少なくとも 1 つの座標軸に沿った層間オフセットの量を決定することを更に含むことができる。

【 0 0 5 2 】

方法は、少なくとも 1 つの座標軸に沿って決定された層間オフセット量が閾値許容差内であるかどうかを決定することと、少なくとも 1 つの座標軸に沿って決定された層間オフセット量が閾値許容差内でないと決定することに応答して、製造された超伝導集積回路を

50

破壊することと、を更に含むことができる。製造された超伝導集積回路の部分の抵抗を測定することは、製造された超伝導集積回路のパーニヤのチェーンの抵抗を測定することを含むことができる。製造された超伝導集積回路の部分の抵抗を測定することは、プローブカード及び少なくとも1つのホイートストンブリッジ回路を介して、製造された超伝導集積回路のパーニヤのチェーンの抵抗を測定することを含むことができる。

【0053】

超伝導集積回路を製造するための方法であって、方法は、基板の少なくとも一部分の上に重なるように第1の超伝導金属層を堆積させることと、第1の超伝導金属層の少なくとも一部分の上に重なるように第1の誘電体層を堆積させることと、第1の誘電体層の少なくとも一部分の上に重なるように力学インダクタンス層を堆積させることと、力学インダクタンス層が、オンチップ伝送線路用の中心導体を形成する、堆積させることと、を含むものとして要約されてもよい。

10

【0054】

方法は、力学インダクタンス層の少なくとも一部分の上に重なるように保護層を堆積させることを更に含むことができる。第1の超伝導金属層を堆積させることは、ニオブを含む第1の超伝導金属層を堆積させることを含むことができる。

【0055】

方法は、第1の超伝導金属層をパターニングして少なくとも1つの超伝導トレースを形成することを更に含むことができる。

【0056】

方法は、力学インダクタンス層をパターニングして少なくとも1つの力学インダクタを形成することを更に含むことができる。力学インダクタンス層を堆積させることは、窒化チタン(TiN)、窒化ニオブ(NbN)、窒化ニオブチタン(NbTiN)、窒化モリブデン(MoN)、又はタングステンシリサイド(WSi)のうちの少なくとも1つの層を堆積させることを含むことができる。高力学インダクタンス層の少なくとも一部分の上に重なるように保護層を堆積させることは、窒化ケイ素(SiN)の層を堆積させることを含むことができる。TiN、NbN、NbTiN、MoN、又はWSiのうちの少なくとも1つの層を堆積させることは、25nm~100nmの範囲の厚さを有するTiN、NbN、NbTiN、MoN、又はWSiのうちの少なくとも1つの層を堆積させることを含み、SiNの層を堆積させることが、25nm~100nmの範囲の厚さを有するSiNの層を堆積させることを含むことができる。

20

【0057】

方法は、保護層の少なくとも一部分の上に重なるように第2の超伝導金属層を堆積させることと、第2の超伝導金属層の少なくとも一部分の上に重なるように第2の誘電体層を堆積させることと、第2の誘電体層の少なくとも一部分の上に重なるように第3の超伝導金属層を堆積させることと、第1及び第3の超伝導金属層が、オンチップ伝送線路用の外側導体を形成する、堆積させることと、を更に含むことができる。

【0058】

方法は、保護層の少なくとも一部分の上に重なるように第2の誘電体層を堆積させることと、第2の誘電体層の少なくとも一部分の上に重なるように第2の超伝導金属層を堆積させることと、第1及び第2の超伝導金属層が、オンチップ伝送線路用の外側導体を形成する、堆積させることと、を更に含むことができる。

40

【0059】

超伝導集積回路は、基板と、基板の少なくとも一部分の上に重なる第1の超伝導金属層と、第1の超伝導金属層の少なくとも一部分の上に重なる第1の誘電体層と、第1の誘電体層の少なくとも一部分の上に重なり、オンチップ伝送線路用の中心導体を形成する、力学インダクタンス層と、を備えるものとして要約されてもよい。

【0060】

超伝導集積回路は、力学インダクタンス層の少なくとも一部分の上に重なる保護層を更に含むことができる。力学インダクタンス層は、それぞれの温度範囲内で超伝導性である

50

材料を含み、材料が、力学インダクタンス層に貯蔵されたエネルギーのより大きな割合を磁気インダクタンスよりも力学インダクタンスとして貯蔵させるように選択されることができる。第1の超伝導金属層は、ニオブを含むことができる。力学インダクタンス層は、TiN、NbN、NbTiN、MoN、又はWSiのうちの少なくとも1つを含むことができる。保護層は、窒化ケイ素(SiN)を含むことができる。力学インダクタンス層は、25nm~100nmの範囲の厚さを有するTiN、NbN、NbTiN、MoN、又はWSiのうちの少なくとも1つの層を備え、保護層が、25nm~100nmの範囲の厚さを有するSiNの層を含むことができる。

【0061】

超伝導集積回路は、力学インダクタンス層の少なくとも一部分の上に重なる第2の超伝導金属層と、第2の超伝導金属層の少なくとも一部分の上に重なる第2の誘電体層と、第2の誘電体層の少なくとも一部分の上に重なる第3の超伝導金属層であって、第1及び第3の超伝導金属層が、オンチップ伝送線路用の外側導体を形成する、第3の超伝導金属層と、を更に含むことができる。

10

【0062】

超伝導集積回路は、力学インダクタンス層の少なくとも一部分の上に重なる第2の誘電体層と、第2の誘電体層の少なくとも一部分の上に重なる第2の超伝導金属層であって、第1及び第2の超伝導金属層が、オンチップ伝送線路用の外側導体を形成する、第2の超伝導金属層と、を更に備えることができる。

【0063】

封止配線層を含む超伝導集積回路の製造方法であって、方法は、基板の少なくとも一部分の上に重なるように第1の封止層を堆積させることと、第1の封止層の少なくとも一部分の上に重なるように第1の超伝導金属配線層を堆積させることと、第1の超伝導金属配線層の少なくとも一部分の上に重なるように第2の封止層を堆積させることと、第2の封止層の少なくとも一部分の上に重なるように第1の誘電体層を堆積させることと、第1の封止層、第1の超伝導金属配線層、第2の封止層、及び第1の誘電体層をマスクング及びエッチングすることによってピラーを形成することと、ピラーの上に重なり、かつ取り囲むように第3の封止層を堆積させることと、第3の封止層の少なくとも一部分の上に重なり、かつピラーを取り囲むように第2の誘電体層を堆積させることと、第2の誘電体層のブランク異方性エッチングを実行することと、第2の封止層のエッチングを実行することと、を含むものとして要約されてもよい。基板の少なくとも一部分の上に重なるように第1の封止層を堆積させることは、第3の誘電体層の少なくとも一部分の上に重なるように第1の封止層を堆積させることを含むことができる。第3の誘電体層の少なくとも一部分の上に重なるように第1の封止層を堆積させることは、二酸化ケイ素層の少なくとも一部分の上に重なるように第1の封止層を堆積させることを含むことができる。第1の封止層又は第2の封止層を堆積させることのうちの少なくとも1つは、窒化チタン(TiN)を堆積させることを含むことができる。第1の封止層又は第2の封止層を堆積させることの少なくとも1つは、アルミニウムを堆積させることを含むことができる。第1の超伝導金属配線層を堆積させることは、ニオブを堆積させることを含むことができる。第2の誘電体層のブランク異方性エッチングを実行することは、第2の誘電体層のブランク異方性エッチングを実行して第3の封止層の少なくとも一部分を露出させることを含むことができる。第2の封止層のエッチングを実行することは、第2の封止層のエッチングを実行して第1の誘電体層を露出させることを含むことができる。

20

30

40

【0064】

超伝導集積回路は、基板と、基板から垂直に延在する少なくとも第1のピラーであって、第1のピラーが、中央スタック及び中央スタックの周辺部を取り囲む周囲構造を有し、中央スタックが、基板から垂直に上方に延在する順に、第1の封止層、第1の封止層の上に重なる第1の超伝導金属配線層、第1の超伝導金属配線層の上に重なる第2の封止層、及び第2の封止層の上に重なる第1の誘電体層を含み、周囲構造が、内部から半径方向外向きに延在する順に、第3の封止層及び第2の誘電体層を含み、第2の誘電体層が、周囲

50

構造を越えて露出している、少なくとも第1のピラーと、を備えるものとして要約されてもよい。第1の封止層は、第3の誘電体層を含むことができる。第3の誘電体層は、二酸化ケイ素層を含むことができる。第1又は第2の封止層のうちの少なくとも1つは、窒化チタン(TiN)を含むことができる。第1又は第2の封止層のうちの少なくとも1つは、アルミニウムを含むことができる。第1の超伝導金属配線層は、ニオブを含むことができる。第3の封止層及び第2の誘電体層がそれぞれ、中央スタックの周りに円周方向に配置され、それぞれは、第1のピラーがその内部からその外側に向かって横断するにつれて下方に先細りする露出した上縁部を有することができる。第1の誘電体層は、基板の平面に平行な上面を有することができる。

【図面の簡単な説明】

10

【0065】

図面において、同一の参照番号は同様の要素又は行為を特定する。図面中の要素の大きさ及び相対位置は必ずしも一定の比率で描かれていない。例えば、種々の要素の形状及び角度は必ずしも一定の比率で描かれておらず、図面の見やすさを向上させるために、これらの要素の一部が任意に拡大されて配置されている。また、描かれた要素の特定の形状は、必ずしも特定の要素の実際の形状に関する情報を伝達することを意図せず、図面における認識の容易さのために単独で選択されていてもよい。

【図1】本発明のシステム及び方法による、超伝導集積回路の一部分を製造するための方法を示すフローチャートである。

【図2A】本発明のシステム及び方法による、その製造の様々な段階における、力学インダクタ及びコンデンサを含む例示的な超伝導集積回路の一部分の断面図である。

20

【図2B】本発明のシステム及び方法による、その製造の様々な段階における、力学インダクタ及びコンデンサを含む例示的な超伝導集積回路の一部分の断面図である。

【図2C】本発明のシステム及び方法による、その製造の様々な段階における、力学インダクタ及びコンデンサを含む例示的な超伝導集積回路の一部分の断面図である。

【図2D】本発明のシステム及び方法による、その製造の様々な段階における、力学インダクタ及びコンデンサを含む例示的な超伝導集積回路の一部分の断面図である。

【図2E】本発明のシステム及び方法による、その製造の様々な段階における、力学インダクタ及びコンデンサを含む例示的な超伝導集積回路の一部分の断面図である。

【図2F】本発明のシステム及び方法による、その製造の様々な段階における、力学インダクタ及びコンデンサを含む例示的な超伝導集積回路の一部分の断面図である。

30

【図2G】本発明のシステム及び方法による、その製造の様々な段階における、力学インダクタ及びコンデンサを含む例示的な超伝導集積回路の一部分の断面図である。

【図2H】本発明のシステム及び方法による、その製造の様々な段階における、力学インダクタ及びコンデンサを含む例示的な超伝導集積回路の一部分の断面図である。

【図2I】本発明のシステム及び方法による、その製造の様々な段階における、力学インダクタ及びコンデンサを含む例示的な超伝導集積回路の一部分の断面図である。

【図2J】本発明のシステム及び方法による、その製造の様々な段階における、力学インダクタ及びコンデンサを含む例示的な超伝導集積回路の一部分の断面図である。

【図3】本開示の例示される一実施形態による、超伝導集積回路の一部分を製造するための方法を示すフローチャートである。

40

【図4A】本発明のシステム及び方法による、その製造の様々な段階における、スタッドビアを含む例示的な超伝導集積回路の一部分の断面図である。

【図4B】本発明のシステム及び方法による、その製造の様々な段階における、スタッドビアを含む例示的な超伝導集積回路の一部分の断面図である。

【図4C】本発明のシステム及び方法による、その製造の様々な段階における、スタッドビアを含む例示的な超伝導集積回路の一部分の断面図である。

【図4D】本発明のシステム及び方法による、その製造の様々な段階における、スタッドビアを含む例示的な超伝導集積回路の一部分の断面図である。

【図4E】本発明のシステム及び方法による、その製造の様々な段階における、スタッド

50

ビアを含む例示的な超伝導集積回路の一部分の断面図である。

【図 4 F】本発明のシステム及び方法による、その製造の様々な段階における、スタッドビアを含む例示的な超伝導集積回路の一部分の断面図である。

【図 5 A】本発明のシステム及び方法による、スタッドビア、上部配線層、及び下部配線層を含む、例示的な超伝導集積回路の一部分の平面図である。

【図 5 B】本発明のシステム及び方法による、スタッドビア、上部配線層、及び下部配線層を含む、例示的な超伝導集積回路の一部分の平面図である。

【図 5 C】本発明のシステム及び方法による、スタッドビア、上部配線層、及び下部配線層を含む、例示的な超伝導集積回路の一部分の平面図である。

【図 5 D】本発明のシステム及び方法による、スタッドビア、上部配線層、及び下部配線層を含む、例示的な超伝導集積回路の一部分の平面図である。

10

【図 5 E】本発明のシステム及び方法による、スタッドビア、上部配線層、及び下部配線層を含む、例示的な超伝導集積回路の一部分の平面図である。

【図 6】本発明のシステム及び方法による、スタッドビアを含む超伝導集積回路の一部分を製造するための方法を示すフローチャートである。

【図 7 A】本発明のシステム及び方法による、その製造の様々な段階における、スタッドビアを含む別の例示的な超伝導集積回路の一部分の断面図である。

【図 7 B】本発明のシステム及び方法による、その製造の様々な段階における、スタッドビアを含む別の例示的な超伝導集積回路の一部分の断面図である。

【図 7 C】本発明のシステム及び方法による、その製造の様々な段階における、スタッドビアを含む別の例示的な超伝導集積回路の一部分の断面図である。

20

【図 7 D】本発明のシステム及び方法による、その製造の様々な段階における、スタッドビアを含む別の例示的な超伝導集積回路の一部分の断面図である。

【図 7 E】本発明のシステム及び方法による、その製造の様々な段階における、スタッドビアを含む別の例示的な超伝導集積回路の一部分の断面図である。

【図 7 F】本発明のシステム及び方法による、その製造の様々な段階における、スタッドビアを含む別の例示的な超伝導集積回路の一部分の断面図である。

【図 7 G】本発明のシステム及び方法による、その製造の様々な段階における、スタッドビアを含む別の例示的な超伝導集積回路の一部分の断面図である。

【図 7 H】本発明のシステム及び方法による、その製造の様々な段階における、スタッドビアを含む別の例示的な超伝導集積回路の一部分の断面図である。

30

【図 8 A】本発明のシステム及び方法による、電気バーニヤを含む例示的な超伝導集積回路の一部分の断面図である。

【図 8 B】本発明のシステム及び方法による、図 8 A の例示的な超伝導集積回路の一部分の平面図である。

【図 8 C】本発明のシステム及び方法による、4線測定にリードが取り付けられた、図 8 A の例示的な超伝導集積回路の一部分を示す概略図である。

【図 9】本発明のシステム及び方法による、図 8 A ~ 8 C の例示的な超伝導集積回路におけるスタッドビアの縁部からの最上部配線層の縁部の横方向オフセット (nm 単位) の関数としての抵抗の変動 (オーム単位) を示す例示的なプロットである。

40

【図 10 A】本発明のシステム及び方法による、電気バーニヤを含む例示的な超伝導集積回路の一部分の平面図である。

【図 10 B】本発明のシステム及び方法による、電気バーニヤのチェーンの例示的な実施態様を含む例示的な超伝導集積回路の一部分の平面図である。

【図 10 C】本発明のシステム及び方法による、電気バーニヤのチェーンの別の例示的な実施態様を含む例示的な超伝導集積回路の一部分の平面図である。

【図 11】本発明のシステム及び方法による、ホイートストンブリッジの例示的な実施態様の概略図である。

【図 12】本発明のシステム及び方法による、位置ずれ (nm 単位) の関数としての測定電圧 (mV 単位) の変動を示す例示的なプロットである。

50

【図 1 3 A】本発明のシステム及び方法による、オンチップ伝送線路を含む例示的な超伝導集積回路の一部分の断面図である。

【図 1 3 B】本発明のシステム及び方法による、オンチップ伝送線路を含む別の例示的な超伝導集積回路の一部分の断面図である。

【図 1 3 C】本発明のシステム及び方法による、オンチップ伝送線路及び接続された接地面を含む例示的な超伝導集積回路の一部分の断面図である。

【図 1 3 D】本発明のシステム及び方法による、オンチップ伝送線路及び接続された接地面を含む別の例示的な超伝導集積回路の一部分の断面図である。

【図 1 4 A】本発明のシステム及び方法による、製造の様々な段階における、配線層を含む例示的な超伝導集積回路の断面図である。

10

【図 1 4 B】本発明のシステム及び方法による、製造の様々な段階における、配線層を含む例示的な超伝導集積回路の断面図である。

【図 1 4 C】本発明のシステム及び方法による、製造の様々な段階における、配線層を含む例示的な超伝導集積回路の断面図である。

【図 1 5 A】本発明のシステム及び方法による、スタッドピア層のオーバーエッチングを含む例示的な超伝導集積回路の図である。

【図 1 5 B】本発明のシステム及び方法による、スタッドピア層のオーバーエッチングを含む例示的な超伝導集積回路の図である。

【図 1 6】本発明のシステム及び方法による、配線層を含む超伝導集積回路の一部分を製造するための方法を示すフローチャートである。

20

【図 1 7 A】本発明のシステム及び方法による、スタッドピア及び超伝導金属研磨停止層を含む例示的な超伝導集積回路の一部分の断面図である。

【図 1 7 B】本発明のシステム及び方法による、スタッドピア及び超伝導金属研磨停止層を含む例示的な超伝導集積回路の一部分の断面図である。

【図 1 7 C】本発明のシステム及び方法による、スタッドピア及び超伝導金属研磨停止層を含む例示的な超伝導集積回路の一部分の断面図である。

【図 1 7 D】本発明のシステム及び方法による、スタッドピア及び超伝導金属研磨停止層を含む例示的な超伝導集積回路の一部分の断面図である。

【図 1 7 E】本発明のシステム及び方法による、スタッドピア及び超伝導金属研磨停止層を含む例示的な超伝導集積回路の一部分の断面図である。

30

【図 1 7 F】本発明のシステム及び方法による、スタッドピア及び超伝導金属研磨停止層を含む例示的な超伝導集積回路の一部分の断面図である。

【図 1 7 G】本発明のシステム及び方法による、スタッドピア及び超伝導金属研磨停止層を含む例示的な超伝導集積回路の一部分の断面図である。

【図 1 8 A】本発明のシステム及び方法による、別個の層で製造された力学インダクタ及びコンデンサを含む、超伝導回路の一部分の断面図である。

【図 1 8 B】本発明のシステム及び方法による、別個の層で製造された力学インダクタ及びコンデンサを含む、超伝導回路の一部分の断面図である。

【図 1 8 C】本発明のシステム及び方法による、別個の層で製造された力学インダクタ及びコンデンサを含む、超伝導回路の一部分の断面図である。

40

【図 1 8 D】本発明のシステム及び方法による、別個の層で製造された力学インダクタ及びコンデンサを含む、超伝導回路の一部分の断面図である。

【図 1 8 E】本発明のシステム及び方法による、別個の層で製造された力学インダクタ及びコンデンサを含む、超伝導回路の一部分の断面図である。

【図 1 8 F】本発明のシステム及び方法による、別個の層で製造された力学インダクタ及びコンデンサを含む、超伝導回路の一部分の断面図である。

【図 1 8 G】本発明のシステム及び方法による、別個の層で製造された力学インダクタ及びコンデンサを含む、超伝導回路の一部分の断面図である。

【図 1 8 H】本発明のシステム及び方法による、別個の層で製造された力学インダクタ及びコンデンサを含む、超伝導回路の一部分の断面図である。

50

【図18I】本発明のシステム及び方法による、別個の層で製造された力学インダクタ及びコンデンサを含む、超伝導回路の一部分の断面図である。

【図18J】本発明のシステム及び方法による、別個の層で製造された力学インダクタ及びコンデンサを含む、超伝導回路の一部分の断面図である。

【発明を実施するための形態】

【0066】

以下の説明では、開示される様々な実施形態に対する十分な理解が得られるようにするために、特定の詳細について説明する。しかしながら、関連する技術分野の当業者であれば、これらの特定の詳細のうちの一つ以上を用いず、又は、他の方法、構成要素、材料などを使用して実施形態が実施され得ることがわかるであろう。他の例では、超伝導回路又は構造に関連する周知の構造、量子コンピュータ回路又は構造、並びに/又は希釈冷凍機などの極低温冷却システムは、実施形態の説明を不必要に曖昧にすることを避けるために詳細に示し又は説明しない。

10

【0067】

文脈上別段の解釈が要求されない限り、本明細書及び添付特許請求の範囲の全体を通して、「含む(comprise)」及びその変形例、例えば「含む(comprises)」及び「含む(comprising)」は、開放的かつ包括的な意味で、つまり「含むが、それに限定されない」として、解釈されるべきである。

【0068】

本明細書全体を通して「一実施形態」又は「実施形態」への言及は、実施形態に関連して説明される特定の特徴、構造、又は特性が、少なくとも一つの実施形態に含まれることを意味する。それ故、本明細書を通じた様々な箇所における語句「一実施形態において」又は「実施形態において」の出現は、必ずしも全てが同じ実施形態を指さない。更に、一つ以上の実施形態において、特定の特徴、構造、又は特性を任意の好適な様式で組み合わせることができる。

20

【0069】

本明細書及び添付の特許請求の範囲において用いられるとき、「一つの(a)」、「一つの(an)」、及び「その(the)」という単数形は、文脈上で明示的に断らない限り、複数の参照対象を含む。なお、「又は」という用語は、一般に、文脈上別段の解釈が要求されない限り、「及び/又は」を含む意味で用いられる。

30

【0070】

本明細書及び添付の特許請求の範囲で使用されるとき、用語「担持される(carried by)」、「担持される(carried on)」、又はその変異形、並びに同様に用語「上(over)」及び「上(above)」は、一つの構造が、別の構造によって少なくともいくつかの実例において直接的又は間接的に支持されていることを意味し、例えば、その表面上に、一つ以上の介在する層若しくは構造によってその表面の上方又は下方に、又はその中に配置されている。

【0071】

本明細書で提供される本開示の見出し及び要約書は、便宜的なものでしかなく、実施形態の範囲又は意味を説明しない。

40

【0072】

特定の文脈が別途必要とされない限り、本明細書全体を通じて、用語「堆積物」、「堆積される」、「堆積」などは、一般に、物理蒸着(physical vapor deposition、PVD)、化学蒸着(chemical vapor deposition、CVD)、プラズマ強化PVD、プラズマ強化CVD、及び原子層堆積(atomic layer deposition、ALD)が挙げられるが、これらに限定されない、任意の材料堆積法を包含するために使用される。

【0073】

特定の文脈が別途必要とされない限り、本明細書全体を通じて、用語「上に重なる(overlie)」又は「上に重なる(overlies)」という用語は、一般に、一つ以上の中間層をそれらの間に伴うか又は伴わないかのいずれかで、別の層の少なくとも一部分と少なくとも

50

部分的に位置合わせする 1 つの層の少なくとも一部分を説明するために使用される。

【 0 0 7 4 】

本明細書に記載される様々な実施形態は、超伝導集積回路を製造するためのシステム及び方法を提供する。前述したように、超伝導集積回路が通常、半導体製造産業で従来使用されている同じ種類のツール及び技術の多くを使用して製造されているにもかかわらず、超伝導集積回路は、最新技術の半導体製造設備から離れた研究環境において製造される傾向がある。超伝導回路に特有の課題に起因して、半導体プロセス及び技術は、一般に、超伝導チップ及び回路製造に使用するために修正される必要がある。このような修正は、通常明白ではなく、いくつかの実験を必要とし得る。

【 0 0 7 5 】

力学インダクタ及びコンデンサを製造するための統合プロセス

図 1 及び図 2 A ~ 図 2 J には、高力学インダクタンス層（本明細書において力学インダクタとも称される）及びコンデンサを製造するための統合プロセスが示される。超伝導集積回路のいくつかの実施態様では、高力学インダクタンス層は、DAC (digital to analog converter : デジタル・アナログ変換器) ストレージに使用される。超伝導集積回路における DAC に関するシステム及び方法は、米国特許第 8, 098, 179 号、米国特許第 8, 786, 476 号、米国特許第 7, 876, 248 号、米国特許第 8, 035, 540 号、米国特許第 8, 604, 944 号、及び米国特許出願第 62 / 405027 号「Quantum Flux Parametron Based Structures (e . g . , Muxes , Demuxes , Shift Registers) , Addressing Lines And Related Methods」に記載されており、これらはそれぞれ参照によりその全体が本明細書に組み込まれる。

【 0 0 7 6 】

超伝導集積回路のいくつかの実施態様では、コンデンサは、FMRR (frequency multiplexed resonant readout : 周波数多重化共振読み出し) に使用される。FMRR に関するシステム及び方法は、2016 年 5 月 11 日に出願された国際出願 PCT / US 2016 / 31885 号「Frequency Multiplexed Resonator Input And / or Output For A Superconducting Device」に記載されており、その全体が参照により本明細書に組み込まれる。

【 0 0 7 7 】

いくつかの実施態様では、超伝導集積回路は、力学インダクタ及びコンデンサを含むことができる。

【 0 0 7 8 】

図 1 は、本開示の例示される一実施形態による、超伝導集積回路の一部分を製造するための方法 100 を示すフローチャートである。方法 100 は、行為 102 ~ 128 を含むが、当業者であれば、代替的な実施形態では、特定の行為が省略されてもよく、及び / 又は追加の行為が追加されてもよいことを理解するであろう。当業者であれば、図示された行為の順序が例示の目的のみで示され、代替の実施形態で変化し得ることを理解するであろう。

【 0 0 7 9 】

方法 100 は、例えば、製造プロセスの開始にตอบสนองして、102 で開始する。104 では、第 1 の超伝導金属層 (WIRA) は、基板の上に重なるように堆積される。第 1 の超伝導金属層は、ある温度範囲内で超伝導性である。一実施態様では、第 1 の超伝導金属層は、ニオブを含む。106 では、WIRA は、WIRA の少なくとも一部分をマスクング及びエッチングすることによってパターンングされ、1 つ以上のトレースを含む第 1 の配線層を形成する。108 では、第 1 の誘電体 (HILD) が、WIRA の少なくとも一部分の上に重なるように堆積され、誘電体は、研磨されて WIRA に戻す。いくつかの実施態様では、第 1 の誘電体は、二酸化ケイ素などの高損失誘電体である。いくつかの実施態様では、第 1 の誘電体を研磨することは、化学的機械的平面化 (Chemical Mechanical Planarization、CMP) を含む。

10

20

30

40

50

【 0 0 8 0 】

任意選択の行為において、110では、第2の誘電体層が堆積され、次いでマスクング及びエッチングによってパターンングされる。一実施態様では、第2の誘電体層は、WIRAを保護することを意図した二酸化ケイ素の薄層である。

【 0 0 8 1 】

112では、第2の層の超伝導金属(STV1)が、WIRA及びHILDの少なくとも一部分の上に重なるように堆積される。一実施態様では、STV1はアルミニウムを含む。別の実施態様では、STV1は、ニオブを含む。114では、STV1は、マスクング及びエッチングによってパターンングされて、第1の組の超伝導スタッドピアを形成する。第1の組の超伝導ピア内の超伝導ピアは、ある温度範囲内で超伝導性である。

10

【 0 0 8 2 】

116では、第3の誘電体(HILDSV1)が、a)第1の組の超伝導ピアを形成する超伝導金属の層、及びb)前に堆積された誘電体、の上に重なるように堆積され、かつHILDSV1が、第1の組の超伝導スタッドピアの少なくとも一部の上面に研磨して戻される。いくつかの実施態様では、HILDSV1は、高損失誘電体である。いくつかの実施態様では、研磨は、CMPを含む。

【 0 0 8 3 】

118では、高力学インダクタンス層が堆積され、マスクング及びエッチングによってパターンングされる。本明細書では、高力学インダクタンス層は、流束貯蔵層とも称される。

20

【 0 0 8 4 】

力学インダクタンスは、交流電界における移動電荷キャリアの等価直列インダクタンスを指し、通常、超伝導体などの高キャリア移動度導体において観察される。高力学インダクタンス層は、その高いキャリア移動度のために選択された超伝導材料を含むことができる。高力学インダクタンス層は、例えば、図2Jの回路200jの動作に好適な等価直列インダクタンスを提供するように選択することができる。

【 0 0 8 5 】

超伝導配線の力学インダクタンスは、その長さに比例し、その断面積に反比例し、クーパー対の密度に反比例する。ロンドン侵入深さは、超伝導体の固有の特性であり、磁界が超伝導体に侵入する距離を特徴付ける。通常、より大きなロンドン侵入深さを有する超伝導体は、同じ物理的寸法においてより大きな力学インダクタンスを有する。いくつかの実施態様では、高力学インダクタンス層118は、第1の超伝導金属層104又は第2の超伝導金属112を形成する超伝導金属の侵入深さの少なくとも3倍の侵入深さを有する材料を含む。

30

【 0 0 8 6 】

侵入深さは、クーパー対の密度に関連する。同じ電流において、より低い密度のクーパー対を有する超伝導体におけるクーパー対は、より速く移動し、したがって、より大きな運動エネルギーを有する、すなわち、より高い密度のクーパー対を有する超伝導体の場合よりも、磁界(磁気インダクタンス)よりも運動エネルギー(力学インダクタンス)に大きなエネルギーの割合が貯蔵される。

40

【 0 0 8 7 】

いくつかの実施態様では、流束貯蔵層は、窒化チタン(TiN)の層である。他の実施態様では、流束貯蔵層は、窒化ニオブ(NbN)の層である。他の実施態様では、流束貯蔵層は、窒化ニオブチタン(NbTiN)、窒化モリブデン(MoN)、又はタングステンシリサイド(WSi)のうちの1つの層である。120では、マスクング及びエッチングによって、第4の誘電体層が堆積され、パターンングされる。いくつかの実施態様では、第4の誘電体層は、SiNなどの高品質誘電体である。

【 0 0 8 8 】

122では、第3の超伝導金属層(WIRB)は、第4の誘電体層の少なくとも一部分の上に重なるように堆積され、マスクング及びエッチングによってパターンングされて、

50

1つ以上のトレースを含む第2の配線層を形成する。第2の超伝導金属層は、ある温度範囲内で超伝導性である。一実施態様では、第2の超伝導金属層は、ニオブを含む。124では、第5の誘電体(HILD3)が、WIRBの少なくとも一部分の上に重なるように堆積され、WIRBに研磨して戻される。いくつかの実施態様では、HILD3は、二酸化ケイ素などの高損失誘電体である。いくつかの実施態様では、第5の誘電体を研磨することは、化学的機械的平面化(CMP)を含む。

【0089】

126では、第2の組の超伝導ビアが形成され、第2の組の超伝導ビアのうちの少なくともいくつかは、WIRBに超伝導電氣的結合を提供する。第2の組の超伝導ビアは、例えば、HILD3内の孔をWIRBの上面に穿設することによって形成することができ、ある温度範囲内で超伝導性である第4の超伝導金属層で孔を充填することによって形成することができる。いくつかの実施態様では、第4の超伝導金属層は、ニオブを含む。128では、方法100は終了する。

10

【0090】

図2A~図2Jは、図1の方法100による、製造の連続的段階で製造された超伝導回路の一部分の断面図を示す。

【0091】

図2Aは、図1の方法100によって説明される製造プロセスの第1の段階における、超伝導集積回路200aの一部分の断面図である。回路200aは、基板202及び第1の超伝導金属層204(WIRA)を含む。いくつかの実施態様では、基板202はケイ素基板である。いくつかの実施態様では、第1の超伝導金属層204は、ニオブを含む。

20

【0092】

図2Bは、製造プロセスの後続の段階における、超伝導集積回路200bの一部分の断面図である。超伝導集積回路200bは、第1の超伝導金属層204(WIRA)をパターンニングして、1つ以上のトレースを含む第1の配線層を形成し、かつ第1の誘電体層206(HILD)を堆積させ、第1の誘電体層206を研磨して第1の超伝導金属層204の上面に戻すことによって、図2Aの回路200aから形成することができる。第1の超伝導金属層204のパターンニングは、第1の超伝導金属層204の少なくとも一部分をマスクング及びエッチングすることを含んでもよい。第1の誘電体層206を研磨することは、CMPを含んでもよい。

30

【0093】

任意選択の第2の誘電体層(図2A~図2Jには示されていない)を堆積させてから、超伝導金属層208を堆積させることができる。誘電体の第2の層は、例えば、WIRAの表面に保護を提供することを意図した二酸化ケイ素の薄層とすることができる。

【0094】

図2Cは、製造プロセスの後続の段階における、超伝導回路200cの一部分の断面図である。超伝導集積回路200cは、a)第2の超伝導金属層208を堆積させ、b)第2の超伝導金属層208をパターンニングして、第1の組の超伝導スタッドビアを形成し、c)第3の誘電体層210(HILD SV1)を堆積させ、d)第3の誘電体層210を研磨して第2の超伝導金属層208の上面に戻すことによって、図2Bの回路200bから形成することができる。いくつかの実施態様では、第2の超伝導金属層208は、アルミニウムを含む。他の実施態様では、第2の超伝導金属層208は、ニオブを含む。第2の超伝導金属層208をパターンニングすることは、第2の超伝導金属層208の少なくとも一部分をマスクング及びエッチングすることを含んでもよい。第3の誘電体層210を研磨することは、CMPを含んでもよい。

40

【0095】

図2Dは、製造プロセスの後続の段階における、超伝導回路200dの一部分の断面図である。超伝導集積回路200dは、第2の超伝導金属層208及び第3の誘電体層210の上に重なるように高力学インダクタンス層212を堆積させることによって、図2Cの回路200cから形成することができる。高力学インダクタンス層212はまた、本出

50

願では、流束貯蔵層 2 1 2 とも称される。いくつかの実施態様では、流束貯蔵層 2 1 2 は T i N を含む。

【 0 0 9 6 】

図 2 E は、製造プロセスの後続の段階における、超伝導回路 2 0 0 e の一部分の断面図である。超伝導集積回路 2 0 0 e は、流束貯蔵層 2 1 2 をパターニングすることによって、図 2 D の回路 2 0 0 d から形成することができる。流束貯蔵層 2 1 2 のパターニングは、流束貯蔵層 2 1 2 の少なくとも一部分をマスクング及びエッチングすることを含んでもよい。流束貯蔵層 2 1 2 の第 1 の部分は、力学インダクタの要素を形成することができる。流束貯蔵層 2 1 2 の第 2 の部分は、コンデンサの要素を形成することができる。いくつかの実施態様では、流束貯蔵層 2 1 2 は、約 5 0 n m の厚さを有してもよい。

10

【 0 0 9 7 】

いくつかの実施態様では、流束貯蔵層 2 1 2 のパターニングは、流束貯蔵層 2 1 2 の少なくとも第 1 の部分をマスクング及びエッチングして、力学インダクタの要素を形成することを含み、かつ、コンデンサの要素を形成するために、流束貯蔵層 2 1 2 の少なくとも第 2 の部分をマスクング及びエッチングすることを含まない。本出願のシステム及び方法によって形成されたコンデンサ内に、流束貯蔵層 2 1 2 の少なくとも一部分を含むことは任意選択である。

【 0 0 9 8 】

図 2 F は、製造プロセスの後続の段階における、超伝導回路 2 0 0 f の一部分の断面図である。超伝導集積回路 2 0 0 f は、流束貯蔵層 2 1 2 の少なくとも一部分の上に重なるように第 4 の誘電体層 2 1 4 を堆積させることによって、図 2 E の回路 2 0 0 e から形成することができる。いくつかの実施形態では、第 4 の誘電体層 2 1 4 は、S i N などの高品質誘電体である。

20

【 0 0 9 9 】

図 2 G は、製造プロセスの後続の段階における、超伝導回路 2 0 0 f の一部分の断面図である。超伝導集積回路 2 0 0 g は、第 4 の誘電体層 2 1 4 をパターニングすることによって、図 2 F の回路 2 0 0 f から形成することができる。第 4 の誘電体層 2 1 4 のパターニングは、第 4 の誘電体層 2 1 4 の少なくとも一部分をマスクング及びエッチングすることを含んでもよい。第 4 の誘電体層 2 1 4 の第 1 の部分は、例えば、力学インダクタの要素を保護し得る保護絶縁層を形成することができる。第 4 の誘電体層 2 1 4 の第 2 の部分は、コンデンサの誘電体層を形成することができる。いくつかの実施態様では、第 4 の誘電体層 2 1 4 は薄層であってもよく、例えば、第 4 の誘電体層 2 1 4 は、約 5 0 n m の厚さを有してもよい。

30

【 0 1 0 0 】

図 2 H は、製造プロセスの後続の段階における、超伝導回路 2 0 0 f の一部分の断面図である。超伝導集積回路 2 0 0 h は、第 3 の超伝導金属層 2 1 6 を堆積させ、第 3 の超伝導金属層 2 1 6 をパターニングして、1 つ以上のトレースを含む第 2 の配線層を形成することによって、図 2 G の回路 2 0 0 g から形成することができる。第 3 の超伝導金属層 2 1 6 をパターニングすることは、第 3 の超伝導金属層 2 1 6 の少なくとも一部分をマスクング及びエッチングすることを含んでもよい。いくつかの実施態様では、第 3 の超伝導金属層 2 1 6 は、ニオブを含む。

40

【 0 1 0 1 】

図 2 I は、製造プロセスの後続の段階における、超伝導回路 2 0 0 i の一部分の断面図である。超伝導集積回路 2 0 0 i は、第 5 の誘電体層 2 1 8 (H I L D 3) を堆積させ、かつ第 2 の配線層 2 1 6 の上面まで第 5 の誘電体層 2 1 8 内に 1 つ以上の孔 2 2 0 (図 2 I では、孔 2 2 0 - 1 及び 2 2 0 - 2 など) を形成することによって、図 2 H の回路 2 0 0 h から形成することができる。いくつかの実施態様では、孔 2 2 0 は、第 5 の誘電体層 2 1 8 に孔を穿設することによって形成することができる。

【 0 1 0 2 】

図 2 J は、製造プロセスの後続の段階における、超伝導回路 2 0 0 j の一部分の断面図

50

である。超伝導集積回路 200j は、第 4 の超伝導金属層 222 を孔 220 内に堆積させて、第 3 の超伝導金属層 216 に超伝導ビアを形成することによって、図 2I の回路 200i から形成することができる。いくつかの実施態様では、第 4 の超伝導金属層 222 は、ニオブを含む。

【0103】

別のアプローチでは、図 2C を参照して説明した方法と同様の製造方法を使用して、第 3 の超伝導金属層 216 への超伝導ビアが形成される。例えば、二酸化ケイ素の薄層（図 2A ~ 図 2J には図示せず）などの任意選択の第 5 の誘電体層を堆積させて、第 3 の超伝導金属層 216 の表面に保護を提供することができる。

【0104】

第 4 の超伝導金属層 222 が堆積され、パターンングされて、第 2 の組の超伝導スタッドビアを形成する。第 6 の誘電体層 218 が堆積され、第 4 の超伝導金属層 222 の上面に研磨して戻される。

【0105】

超伝導集積回路 200j は、ビア壁 224、力学インダクタ 226、及びコンデンサ 228 を含む。力学インダクタ 226 は、2 つの電極 230 及び 232 を備え、各電極は、超伝導金属層 204 内に形成されたトレースに電気的に結合されている。コンデンサ 228 は、2 つの電極 234 及び 236 を備える。電極 234 は、第 1 の超伝導金属層 204 内に形成されたトレースに電気的に結合されている。電極 236 は、第 4 の超伝導金属層 222 内に形成されたトレースに電気的に結合されている。いくつかの実施態様では、コンデンサ 228 は、流束貯蔵層 212 の少なくとも一部分と、第 4 の誘電体層 214 の少なくとも一部分とを含む。他の実施態様では、コンデンサ 228 は、第 4 の誘電体層 214 の少なくとも一部分を含み、流束貯蔵層 212 の少なくとも一部分を含まない。

【0106】

図 1 及び図 2A ~ 図 2J を参照して上述したシステム及び方法の利点は、力学インダクタ及びコンデンサを含む超伝導集積回路の製造において処理行為数を低減することができることである。より少ない処理行為は、通常、より低い製造コスト及びより高い製造歩留まりをもたらす。

【0107】

いくつかの実施態様では、力学インダクタ内の高力学インダクタンス層及び同じ超伝導集積回路内のコンデンサ内の高力学インダクタンス層は、例えば、力学インダクタ及びコンデンサのための別個のマスキング及びエッチング作用を使用することによって、別個の行為によって形成される。例えば、図 1 の行為 118 は、同じ超伝導集積回路内の力学インダクタ及びコンデンサのための別個のマスキング及びエッチングを含むことができる。

【0108】

別のアプローチでは、力学インダクタ及びコンデンサは、超伝導集積回路の別個の層内に形成される。それぞれが別個の層にある、力学インダクタ及びコンデンサを含む、超伝導集積回路を製造するためのプロセスを図 18A ~ 図 18J に示す。

【0109】

スタッドビア形成のためのデュアルマスク

このセクションは、スタッドビアを形成するためにデュアルマスクを使用するためのシステム及び方法を説明する。一実施態様では、スタッドビアは、超伝導集積回路内の超伝導スタッドビアである。

【0110】

以下に説明するシステム及び方法の特徴は、ハードマスク（例えば、二酸化ケイ素）及びソフトマスク（例えば、フォトレジスト）をデュアルマスクとして組み合わせて使用し得ることである。デュアルマスクのアプローチの利点は、リソグラフィプロセスにおける段差高さによって引き起こされる不具合を回避するか、又は少なくとも低減することである。別の利点は、（スタッドビアを取り囲む）下層のサイズを、例えば 100nm に小さくすることができることである。

10

20

30

40

50

【 0 1 1 1 】

以下に説明するシステム及び方法では、まず、スタッドビアパターン及び配線層パターンを画定することができ、次いで、ハードマスク材料とソフトマスク材料との間の差動選択性を利用するプロセスを使用してパターンが転写される。例示的なプロセスは、反応性イオンエッチングである。

【 0 1 1 2 】

図 3 は、本開示の例示される一実施形態による、超伝導集積回路の一部分を製造するための方法 3 0 0 を示すフローチャートである。方法 3 0 0 は、行為 3 0 2 ~ 3 2 0 を含むが、当業者であれば、代替的な実施形態では、特定の行為が省略されてもよく、及び/又は追加の行為が追加されてもよいことを理解するであろう。当業者であれば、図示された行為の順序が例示の目的のみで示され、代替の実施形態で変化し得ることを理解するであろう。

10

【 0 1 1 3 】

方法 3 0 0 は、例えば、製造プロセスの開始に応答して、3 0 2 で開始する。3 0 4 では、基板の上に重なるように第 1 の超伝導金属層 (W I R B) を堆積させる。第 1 の超伝導金属層は、ある温度範囲内で超伝導性である。いくつかの実施態様では、第 1 の超伝導金属層は、ニオブを含む。第 1 の超伝導金属層は、配線層であってもよい。配線層は、1 つ以上の超伝導トレースを形成するようにパターンニングすることができる。

【 0 1 1 4 】

3 0 6 では、エッチングストップ層は、第 1 の超伝導金属層 W I R B の少なくとも一部分の上に重なるように堆積される。エッチングストップ層は、ある温度範囲内で超伝導性である。一実施態様では、エッチングストップ層は、アルミニウムの薄層である。

20

【 0 1 1 5 】

3 0 8 では、第 2 の超伝導金属層は、エッチングストップ層の少なくとも一部分の上に重なるように堆積される。第 2 の超伝導金属層は、ある温度範囲内で超伝導性である。いくつかの実施態様では、第 2 の超伝導金属層は、ニオブ及びアルミニウムのうちの少なくとも 1 つを含む。第 2 の超伝導金属層は、スタッドビア層である。

【 0 1 1 6 】

3 1 0 では、スタッドビア層の一部分の上に重なるようにハードマスクを堆積又は転写させる。一実施態様では、ハードマスクは、二酸化ケイ素を含む。ハードマスクは、ポリマー又は他の有機ソフトマスク (又はフォトレジスト) 材料の代わりにエッチングマスクとして集積回路 (例えば、超伝導集積回路) の製造に使用される材料である。ハードマスクの材料は、酸素、フッ素、又は塩素などの反応性ガスによるエッチングに対して、ソフトマスクよりも脆弱性が低い。

30

【 0 1 1 7 】

3 1 2 では、ハードマスクの少なくとも一部分及びスタッドビア層の少なくとも一部分の上に重なるようにソフトマスクを堆積させる。いくつかの実施態様では、ソフトマスクは、フォトレジストを含む。ソフトマスクは、集積回路 (例えば、超伝導集積回路) の製造に使用される材料であり、通常、ポリマー又は他の有機軟質レジスト材料である。ソフトマスクは、例えばプラズマエッチング中に反応性ガスによって、ハードマスクよりも容易にエッチングされる。

40

【 0 1 1 8 】

3 1 4 では、露出したスタッドビア層及びその上に重ね合わされ又は露出したエッチングストップ層がエッチングされる。3 1 6 では、ソフトマスクを剥離し、任意選択ですすぎ洗いする。3 1 8 では、露出したスタッドビア層、配線層、及びエッチングストップ層がエッチングされる。3 2 0 では、方法 3 0 0 は終了する。いくつかの実施態様では、ソフトマスクはフォトレジストであり、3 1 6 で剥離された後にフォトレジストをすすぎ洗いするために洗浄剤を使用することができる。しかしながら、イソプロパノールなどの一般的な洗浄剤は、配線層を腐食させる場合がある。非腐食性洗浄剤、例えば、D u P o n t から市販されている E K C 4 0 0 0 (商標) を使用してフォトレジストをすすぎ洗いす

50

ることが有利であり得る。

【0119】

図4A～図4Fは、本発明のシステム及び方法による、その製造の様々な段階における、スタッドビアを含む例示的な超伝導集積回路の一部分の断面図である。

【0120】

図4Aは、図3の方法300によって説明される製造プロセスの第1の段階における、超伝導集積回路400aの一部分の断面図である。回路400aは、第1の超伝導金属層402及びエッチングストップ層404を備える。

【0121】

いくつかの実施態様では、第1の超伝導金属層402は、基板の上に重なる。第1の超伝導金属層402は、ある温度範囲内で超伝導性である。いくつかの実施態様では、第1の超伝導金属層402は、ニオブを含む。第1の超伝導金属層は、配線層であってもよい。配線層は、1つ以上の超伝導トレースを形成するようにパターンニングすることができる。

10

【0122】

エッチングストップ層404は、ある温度範囲内で超伝導性である。いくつかの実施態様では、エッチングストップ層404は、アルミニウムの薄層である。

【0123】

図4Bは、製造プロセスの後続の段階における、超伝導集積回路400bの一部分の断面図である。超伝導集積回路400bは、エッチングストップ層404の少なくとも一部分の上に重なるように第2の超伝導金属層406を堆積させることによって、図4Aの回路400aから形成することができる。第2の超伝導金属層406は、ある温度範囲内で超伝導性である。いくつかの実施態様では、第2の超伝導金属層406は、ニオブ及びアルミニウムのうちの少なくとも1つを含む。第2の超伝導金属層は、スタッドビア層とすることができる。

20

【0124】

図4Cは、製造プロセスの後続の段階における、超伝導回路400cの一部分の断面図である。超伝導集積回路400cは、ハードマスク408を堆積又は転写することによって、図4Bの回路400bから形成することができる。いくつかの実施態様では、ハードマスク408は、二酸化ケイ素を含む。

【0125】

図4Dは、製造プロセスの後続の段階における、超伝導回路400dの一部分の断面図である。超伝導集積回路400dは、ハードマスクの少なくとも一部分及びスタッドビア層の少なくとも一部分の上に重なるようにソフトマスク410を堆積又は転写することによって、図4Cの回路400cから形成することができる。いくつかの実施態様では、ソフトマスクは、フォトレジストを含む。

30

【0126】

図4Eは、製造プロセスの後続の段階における、超伝導回路400eの一部分の断面図である。超伝導集積回路400eは、第2の超伝導金属層406（スタッドビア層）をエッチングストップ層404までエッチングすることによって、図4Dの回路400dから形成することができる。

40

【0127】

図4Fは、製造プロセスの後続の段階における、超伝導回路400fの一部分の断面図である。超伝導集積回路400fは、第2の超伝導層406、エッチングストップ層404、及び第1の超伝導層402をエッチングして、超伝導スタッドビア412を形成することによって、図4Eの回路400eから形成することができる。

【0128】

超伝導スタッドビア412は、第2の超伝導層406、エッチングストップ層404、及び第1の超伝導層402のそれぞれの少なくとも一部分を含むことができる。超伝導スタッドビア412の一部を形成する第1の超伝導金属層402の部分は、部分414である。

50

【 0 1 2 9 】

図 5 A ~ 図 5 C は、本発明のシステム及び方法による、自己整合デュアルマスクプロセスの様々な段階における、例示的な超伝導回路の一部分の平面図である。図 5 A ~ 図 5 C に示す自己整合デュアルマスクプロセスは、図 3 及び図 4 A ~ 図 4 F を参照して上述した製造プロセスなどの、超伝導スタッドビアを形成する製造プロセスの要素であってもよい。

【 0 1 3 0 】

図 5 A は、ハードマスク 5 0 2 を備える例示的な超伝導集積回路 5 0 0 a の一部分の平面図である。ハードマスク 5 0 2 は、第 1 のエッチングプロセスによってパターンニングすることができる。ハードマスク 5 0 2 は、例えば、スタッドビアを画定することができる。

【 0 1 3 1 】

図 5 B は、ハードマスク 5 0 2 及びソフトマスク 5 0 4 を備える例示的な超伝導集積回路 5 0 0 b の一部分の平面図である。ハードマスク 5 0 4 は、ハードマスク 5 0 2 の少なくとも一部分の上に重なるように堆積又は転写することができる。ソフトマスク 5 0 4 は、例えば配線を画定することができる。

【 0 1 3 2 】

図 5 C は、ハードマスク 5 0 2 が第 2 の時間エッチングされた後のハードマスク 5 0 2 及びソフトマスク 5 0 4 を備える、例示的な超伝導集積回路 5 0 0 c の一部分の平面図である。ハードマスク 5 0 2 及びソフトマスク 5 0 4 によってそれぞれ画定されたスタッドビア及び配線は、自己整合させることができる。

【 0 1 3 3 】

図 5 D は、上部配線層 5 0 8 による、スタッドビア 5 0 6 のエンクロージャ（例えば、図 5 A ~ 5 C のエッチングされたハードマスク 5 0 2 によって画定される）を示す、例示的な超伝導集積回路 5 0 0 d の一部分の平面図である。スタッドビア 5 0 6 は、上部配線層 5 0 8 と下部配線層 5 1 0 との間に、超伝導電気的結合を提供することができる。図 5 D に示す構成の利点は、上部配線層 5 0 8 のエッチングが、製造プロセスにおける後の段階で平坦化問題を生じ得るスタッドビア 5 0 6 に影響を及ぼす可能性が低いことである。いくつかの実施形態では、エンクロージャは 1 0 0 nm である。

【 0 1 3 4 】

図 5 E は、相互に交差する 2 本の配線 5 1 4 と 5 1 6 との間に電気的結合を提供するスタッドビア 5 1 2 を示す、例示的な超伝導集積回路 5 0 0 e の一部分の平面図である。図 5 E に示されるクロスカップリングは、上部配線 5 1 4 の配線層の下にエッチングストップ層を追加することによって形成することができる。エッチングストップ層は、例えば、アルミニウムの薄層であってもよい。エッチングストップ層は、上部配線層のエッチング後にエッチング除去することができる。

【 0 1 3 5 】

超伝導用途の（誘電体エッチングストップ層を有する）スタッドビア形成

図 6 は、本発明のシステム及び方法による、スタッドビアを含む超伝導集積回路の一部分を製造するための方法 6 0 0 を示すフローチャートである。方法 6 0 0 は、行為 6 0 2 ~ 6 2 2 を含むが、当業者であれば、代替的な実施形態では、特定の行為が省略されてもよく、及び / 又は追加の行為が追加されてもよいことを理解するであろう。当業者であれば、図示された行為の順序が例示の目的のみで示され、代替の実施形態で変化し得ることを理解するであろう。

【 0 1 3 6 】

方法 6 0 0 は、例えば、製造プロセスの開始にตอบสนองして、6 0 2 で開始する。6 0 4 では、基板の上に重なるように第 1 の超伝導金属層を堆積させる。第 1 の超伝導金属層は、ある温度範囲内で超伝導性である。いくつかの実施態様では、第 1 の超伝導金属層は、ニオブを含む。第 1 の超伝導金属層は、配線層であってもよい。配線層は、1 つ以上の超伝導トレースを形成するようにパターンニングすることができる。6 0 6 では、第 1 の超伝導金属層をマスクング及びエッチングして配線層を形成する。

【 0 1 3 7 】

10

20

30

40

50

608では、第1の誘電体層が、第1の超伝導金属層の少なくとも一部分の上に重なるように堆積され、第1の超伝導金属層の上面に研磨して戻される。いくつかの実施態様では、第1の誘電体は二酸化ケイ素を含む。

【0138】

610では、第2の誘電体層が、第1の超伝導金属層の少なくとも一部分の上に重なるように堆積され、次いでマスクング及びエッチングされる。いくつかの実施態様では、第2の誘電体層は、二酸化ケイ素の薄層である。

【0139】

612では、第2の超伝導金属層は、配線層の少なくとも一部分の上に重なるように堆積される。第2の超伝導金属層は、ある温度範囲内で超伝導性である。いくつかの実施態様では、第2の超伝導金属層は、ニオブ及びアルミニウムのうちの少なくとも1つを含む。第2の超伝導金属層は、スタッドピア層である。

10

【0140】

614では、第2の超伝導金属をマスクング及びエッチングして、1つ以上のスタッドピアを形成する。616では、第3の誘電体層が堆積され、スタッドピアのうちの少なくとも1つの上面に研磨して戻される。いくつかの実施態様では、研磨は、CMPを含む。スタッドピア層が追加されることが所望されないため、618でスタッドピアの製造が完了した場合、方法600の制御は620に進み、方法600は終了する。

【0141】

618で別のスタッドピア層を加えることが望ましい場合、方法600の制御は622に進み、第4の誘電体層が堆積され、マスクング及びエッチングされる。行為604~618を繰り返して、別のスタッドピア層を加える。一実施態様では、方法600は、行為622を含まず、行為618は、行為604に直接進む。

20

【0142】

618の後、一部の酸化物は、スタッドピアの上面上に留まり得る。任意選択的に、ピアの上面上に残っている酸化物の量を少なくとも低減するために、行為を含んでもよい。1つのアプローチは、別のマスクを使用し、618の後に残っている酸化物の少なくとも一部を除去するために、スタッドピアの上面の穏やかなエッチングを行うことである。別のアプローチは、逆マスクプロセスを使用し、i) 第3の誘電体層を、スタッドピア層と少なくともほぼ同じ厚さに堆積させること、ii) マスクングし、次いで、スタッドピアの上面の上に重なる第3の誘電体層の少なくとも一部分から誘電体をエッチングすることと、iii) 穏やかなCMP(バッファ)を実行して、エッチング後に、スタッドピアの上に重なる誘電体の少なくとも一部を除去することにより、618を置き換えることである。

30

【0143】

図7A~7Gは、本発明のシステム及び方法による、その製造の様々な段階における、スタッドピアを含む例示的な超伝導集積回路の一部分の断面図である。

【0144】

図7Aは、図6の方法600によって説明される製造プロセスの第1の段階における、超伝導集積回路700aの一部分の断面図である。回路700aは、基板702と、基板702の少なくとも一部分の上に重なるように堆積及びパターンニングされた第1の配線層704とを備える。第1の配線層704は、ある温度範囲内で超伝導性である。いくつかの実施態様では、第1の配線層704は、ニオブを含む。他の実施態様では、第1の配線層704は、アルミニウムを含む。配線層は、1つ以上の超伝導トレースを含む。

40

【0145】

図7Bは、製造プロセスの後続の段階における、超伝導集積回路700bの一部分の断面図である。超伝導集積回路700bは、基板702及び第1の配線層704の少なくとも一部分の上に重なるように第1の誘電体層706を堆積させ、かつ第1の誘電体層706を研磨して第1の配線層704の少なくとも一部分の上面に戻すことによって、図7Aの回路700aから形成することができる。いくつかの実施態様では、第1の誘電体層706は、二酸化ケイ素を含む。いくつかの実施態様では、第1の誘電体層706を研磨す

50

ることは、CMPを含む。

【0146】

図7Cは、製造プロセスの後続の段階における、超伝導回路700cの一部分の断面図である。超伝導集積回路700cは、第1の誘電体層706の少なくとも一部分の上に重なるように第2の誘電体層708を堆積させ、次いでマスキング及びエッチングすることによって、図7Bの回路700bから形成することができる。いくつかの実施態様では、第2の誘電体層708は、二酸化ケイ素の薄層である。

【0147】

図7Dは、製造プロセスの後続の段階における、超伝導回路700dの一部分の断面図である。超伝導集積回路700dは、第1の配線層704及び第2の誘電体層708の少なくとも一部分の上に重なるように第2の超伝導金属層710を堆積させることによって、図7Cの回路700cから形成することができる。第2の超伝導金属層710は、ある温度範囲内で超伝導性である。いくつかの実施態様では、第2の超伝導金属層710は、ニオブ及びアルミニウムのうちの少なくとも1つを含む。一実施態様では、第2の超伝導金属層710は、第2の超伝導金属層710の少なくとも一部分の上に重なる薄いニオブ層を有するアルミニウムを含む。薄いニオブ層は、研磨停止層又は保護層として機能することができる。第2の超伝導金属層は、スタッドビア層とすることができる。

10

【0148】

図7Eは、製造プロセスの後続の段階における、超伝導回路700eの一部分の断面図である。超伝導集積回路700eは、図7Dの第2の超伝導金属層710をマスキング及びエッチングして、例えば図7Eの710a及び710bのような1つ以上の超伝導スタッドビアを形成することによって、図7Dの回路700dから形成することができる。

20

【0149】

図7Fは、製造プロセスの後続の段階における、超伝導回路700fの一部分の断面図である。超伝導集積回路700fは、第3の誘電体層712を堆積させ、第3の誘電体層712を研磨してスタッドビア710a及び710bの少なくとも一部分の上面に戻すことによって、図7Eの回路700eから形成することができる。いくつかの実施態様では、第3の誘電体層712は、二酸化ケイ素を含む。いくつかの実施態様では、第3の誘電体層712を研磨することは、CMPを含む。

【0150】

図7Gは、製造プロセスの後続の段階における、超伝導回路700gの一部分の断面図である。超伝導集積回路700gは、

30

a) 第3の誘電体層712及びスタッドビア710a及び710bの少なくとも一部分の上に重なる第4の誘電体層714と、

b) 第4の誘電体層714の少なくとも一部分の上に重なる第2の配線層716と、

c) 第4の誘電体層714の少なくとも一部分の上に重なり、第5の誘電体層718を研磨して第2の配線層716の上面に戻す、第5の誘電体層718と、

d) 第2の配線層716の少なくとも一部分の上に重なる第6の誘電体層720と、

e) 第2のスタッドビア層722と、

f) 第6の誘電体層720の少なくとも一部分の上に重なり、第7の誘電体層718を研磨して第2のスタッドビア層722の上面に戻す、第7の誘電体層724と、を加えることによって、図7Fの回路700fから形成することができる。

40

【0151】

いくつかの実施態様では、第2の配線層716は、ニオブを含む。いくつかの実施態様では、第2のスタッドビア層722は、ニオブ及びアルミニウムのうちの少なくとも1つを含む。いくつかの実施態様では、第5の誘電体層718及び第7の誘電体層724は、二酸化ケイ素を含む。いくつかの実施態様では、第6の誘電体層720は、二酸化ケイ素の薄層である。いくつかの実施態様では、第6の誘電体層720の厚さは、50nm~200nmの範囲である。

【0152】

50

図7A～7Gを参照して上述した動作又は行為は、任意の特定の集積回路設計において必要に応じて多くの層を提供するために、追加の誘電体層及び配線層（必要に応じて追加のスタッドビア接続を有する）を繰り返してもよい。

【0153】

いくつかの実施態様では、図7Gに示す誘電体層の一部を省略することができる。例えば、いくつかの実施態様では、スタッドビアを含む超伝導集積回路を製造するためのプロセスは、第2の誘電体層708、第4の誘電体層714、及び第6の誘電体層720のうちの少なくとも1つを省略することができる。例えば、図7Hは、製造プロセスの後続の段階における、超伝導回路700hの一部分の断面図であり、

a) 第1の配線層704は、基板702の上に重なるように堆積され、次いでマスキング及びエッチングされ、

b) 第1の誘電体層706は、基板及び第1の配線層704の少なくとも一部分の上に重なるように堆積され、次いで第1の配線層704の上面まで研磨して戻され、

c) スタッドビア層710は、第1の配線層704の少なくとも一部分の上に重なるように堆積され、次いでマスキング及びエッチングされ、

d) 第3の誘電体層712は、第1の誘電体層706の少なくとも一部分の上に重なるように堆積され、スタッドビア層710の上面まで研磨して戻され、

e) 第2の配線層716は、第2のスタッドビア層710の少なくとも一部分の上に重なるように堆積され、次いでマスキング及びエッチングされ、

f) 第5の誘電体層718は、第3の誘電体層712の少なくとも一部分の上に重なるように堆積され、第2の配線層716の上面まで研磨して戻され、

g) 第2のスタッドビア層722は、第2の配線層716の少なくとも一部分の上に重なるように堆積され、次いでマスキング及びエッチングされ、

h) 第7の誘電体層724は、第5の誘電体層718の上に重なるように堆積され、第2のスタッドビア層722の上面まで研磨して戻される。

【0154】

図7Hは、第2の誘電体層708、第4の誘電体層714、及び第6の誘電体層720が、図7Gの超伝導集積回路700gから省略されている、一例示的な実施態様を示す。他の実施態様では、第2の誘電体層708、第4の誘電体層714、及び第6の誘電体層720のうちの1つ又は2つを省略することができる。前述のように、任意の特定の集積回路設計において必要に応じて多くの層を提供するために、追加の誘電体層及び配線層（必要に応じて追加のスタッドビア接続を有する）が存在し得る。

【0155】

超伝導集積回路製造のいくつかの事例では、金属層の少なくとも一部分を上に乗る誘電体が研磨して戻されるときの引っ掻き傷から保護するために、金属層の少なくとも一部分の上に重なるように薄い研磨停止層を堆積させることが有利な場合がある。研磨停止層を有するスタッドビア形成を含む超伝導集積回路を製造するためのプロセスが、図17A～17Gに示されている。

【0156】

層間ずれを測定するための電気バーニヤ

1つ以上の超伝導配線層及び1つ以上の超伝導スタッドビアを含む超伝導集積回路を含むウェハをスクリーニングしながら、位置ずれした層を特定することが有益であり得る。以下に説明するシステム及び方法は、例えば10nmの精度で、超伝導集積回路上の層間ずれを測定することができる。層間ずれの光学的測定は、欠点を有する場合がある。以下に記載されるシステム及び方法は、層の位置ずれを決定するための電氣的測定を使用する。

【0157】

電気バーニヤは、4線測定でのウェハプローブ中の抵抗を測定することによって、層の位置ずれを検出することができる。4線測定は、図8Cに示され、以下でより詳細に説明される。

【0158】

図 8 A は、本発明のシステム及び方法による、電気バーニヤ 8 0 0 を含む例示的な超伝導集積回路の一部分の断面図である。バーニヤ 8 0 0 は、第 1 の配線層（例えば、W I R A）内の第 1 のマーク 8 0 2、第 2 の配線層（例えば、W I R B）内の第 2 のマーク 8 0 4、及びスタッドビア 8 0 6 を備える。マーク 8 0 4 は、抵抗オーバーラップ領域 8 0 8 においてスタッドビア 8 0 6 とオーバーラップする。マーク 8 0 2 及び 8 0 4 並びにスタッドビア 8 0 6 の寸法を適切に選択することにより、抵抗オーバーラップ領域 8 0 8 が、第 1 の配線層から第 2 の配線層への抵抗測定を、スタッドビアを通じて支配させることができる。具体的には、マーク 8 0 2 及び 8 0 4 並びにスタッドビア 8 0 6 は、抵抗オーバーラップ領域 8 0 8 よりもはるかに低い抵抗を有するのに十分な大きさであるように選択することができる。

10

【 0 1 5 9 】

図 8 B は、電気バーニヤ 8 0 0 を含む、図 8 A の例示的な超伝導集積回路の一部分の平面図である。第 1 のマーク 8 0 2 は、幅 W_1 、長さ $(L_1 + L_3)$ 、及び厚さ t_{wire} （図 8 B には図示せず）を有する。第 2 のマーク 8 0 4 は、幅 W_2 、長さ $(L_2 + d)$ 、及び厚さ t_{wire} を有する。スタッドビア 8 0 6 は、幅 W_3 及び長さ L_3 を有する。マーク 8 0 4 は、距離 によってマーク 8 0 2 から横方向にオフセットされる。

【 0 1 6 0 】

図 8 B に示される例には示されていないが、第 1 のマーク 8 0 2 は、第 1 のマーク 8 0 2 の長さに平行な、及び / 又は第 1 のマーク 8 0 2 の長さに垂直な、スタッドビア 8 0 6 に対してオフセットされてもよい。

20

【 0 1 6 1 】

図 8 C は、図 8 A の電気バーニヤ 8 0 0 を含む例示的な超伝導集積回路の一部分を示す概略図であり、リード線は 4 線測定に取り付けられている。回路は 4 つのリード線 8 1 0 a、8 1 0 b、8 1 0 c、及び 8 1 0 d を含む。2 つのリード線 8 1 0 a 及び 8 1 0 b は、マーク 8 0 2 に電氣的に接続され、かつ 2 つのリード線 8 1 0 c 及び 8 1 0 d は、マーク 8 0 4 に電氣的に接続されている。図 8 C は、電気バーニヤ 8 0 0 を使用して層間ずれ測定を行うことができる構成を示す。

【 0 1 6 2 】

配線の抵抗は $R = L / A = L / t \times W$ であり、 R は抵抗率であり、 L は配線の長さであり、 A は配線の面積であり、 t は配線の厚さであり、 W は配線の幅である。バーニヤマークの総抵抗は、上部及び下部配線からの寄与の合計であり、スタッドビアと上部及び下部配線との間のオーバーラップである。配線及びスタッドビアの寸法の好適な選択により、スタッドビアと上部配線との間のオーバーラップの抵抗が、総抵抗の測定値を支配することができる。好適な値は、例えば、可能な形状を通して掃引することによって見出すことができ、それぞれの場合、典型的な位置ずれの間の抵抗の変化を決定することによって見出すことができる。値は、例えば、チップ上の小さいフットプリントを維持しながら、所与の位置ずれに対する抵抗の所望の変化を実現することに基づいて選択することができる。

30

【 0 1 6 3 】

一例示的選択では、抵抗の変化は、 $0 \text{ nm} \sim 20 \text{ nm}$ のオフセット間で決定される。1 つの測定シナリオでは、層間ずれを測定するのに $0.5\% \sim 5\%$ の抵抗の変化が好適である。

40

【 0 1 6 4 】

配線及びスタッドビアの寸法の例示的な選択は、以下のとおりである。

$$L_A = L_V = d = 250 \text{ nm}$$

$$L_B = 500 \text{ nm}$$

$$W_A = W_V = 2,000 \text{ nm}$$

$$W_B = 250 \text{ nm}$$

$$t_{wire} = 300 \text{ nm}$$

$$t_{via} = 200 \text{ nm}$$

50

【 0 1 6 5 】

ニオブ配線及びニオブのスタッドビアについては、 のオフセットに対する抵抗の計算は、以下のとおりである。

【 0 1 6 6 】

【数 1】

$$R_{total} = \rho_{Nb} \left(\frac{L_A}{t_{wire} W_A} + \frac{(t_{wire} + t_{via})}{L_V W_V} + \frac{t_{wire}}{d(W_B - \varepsilon)} + \frac{L_B}{t_{wire} W_B} \right)$$

【 0 1 6 7 】

0 nm から 0 nm へのオフセットの変化に対する抵抗の微小変化は、以下のとおりである。

【 0 1 6 8 】

【数 2】

$$\frac{\Delta R_{total}}{R_{total}} = \frac{\rho_{Nb} t_{wire}}{d W_B R_{total}} \left(\frac{W_B}{(W_B - \varepsilon_0)} - 1 \right)$$

【 0 1 6 9 】

$N_b = 152 \text{ nm}$ については、 $0 = 20 \text{ nm}$ であるとき、百分率として表される微小変化は 3.2% であり、 $0 = 5 \text{ nm}$ であるとき、 0.8% である。

【 0 1 7 0 】

図 9 は、本発明のシステム及び方法による、図 8 A ~ 8 C の例示的な超伝導集積回路におけるスタッドビアの縁部からの最上部配線層の縁部の横方向オフセット (nm 単位) の関数としての抵抗の変動 (オーム単位) を示す例示的なプロットである。図 9 のグラフ上の各点は、異なるバーニヤマークに対する抵抗の測定値である。図 9 に示される例では、それぞれが対応するオフセットを有し、オフセットが 5 nm のステップサイズで $-90 \text{ nm} \sim +90 \text{ nm}$ の範囲である、37 個のバーニヤマークの測定値が存在する。位置ずれは、図 9 の曲線の膝の水平軸に沿った位置から推測することができる。図 9 に示される例は、32 nm の層間ずれのためのものである。曲線の膝は、水平軸上において 32 nm で生じる。

【 0 1 7 1 】

いくつかの実施態様では、スタッドビア層のオーバーエッチングは、配線層をその上方にエッチングする際に生じ得る。いくつかの実施態様では、オーバーエッチングは、120 nm ~ 200 nm の範囲である。層間ずれは、図 8 A のバーニヤ 800 などの電気バーニヤを使用して、オーバーエッチングの存在下で測定することができる。

【 0 1 7 2 】

いくつかの実施態様では、上部配線層 (例えば、WIRB をエッチングする際の STVB のオーバーエッチング) をエッチングするときに、スタッドビア層のオーバーエッチングが存在し得る。一部の状況では、スタッドビア層の完全なオーバーエッチングが存在する場合があります、この場合、スタッドビアは、もはや上部配線層の境界を越えて延在しなくなる。完全なオーバーエッチングの利点は、層間の測定された位置ずれが、上層と下層との間の位置ずれの直接測定であることである。

【 0 1 7 3 】

完全なオーバーエッチングでは、0 nm から 0 nm へのオフセットの変化に対する抵抗の微小変化は、以下のとおりである。

【 0 1 7 4 】

【数 3】

10

20

30

40

50

$$\frac{\Delta R_{total}}{R_{total}} = \frac{\rho_{Nb}(t_{wire} + t_{via})}{dW_B R_{total}} \left(\frac{W_B}{(W_B - \varepsilon_0)} - 1 \right)$$

【0175】

$N_b = 152 \text{ nm}$ 、及び $W_B = 500 \text{ nm}$ については、 $\varepsilon_0 = 20 \text{ nm}$ であるとき、百分率として表される微小変化は 1.6% であり、 $\varepsilon_0 = 5 \text{ nm}$ であるとき、 0.4% である。

【0176】

バーニヤマークの寸法の選択は、以下のように、オーバーエッチングなしと完全なオーバーエッチングとの間のオーバーエッチングに一般化することができる。

【0177】

E のオーバーエッチングでは、 0 nm から $\varepsilon_0 \text{ nm}$ へのオフセットの変化に対する抵抗の微小変化は、以下のとおりである。

【0178】

【数4】

$$\frac{\Delta R_{total}}{R_{total}} = \frac{\rho_{Nb}(t_{wire} + E)}{dW_B R_{total}} \left(\frac{W_B}{(W_B - \varepsilon_0)} - 1 \right)$$

【0179】

$N_b = 152 \text{ nm}$ 、 $L_B = 250 \text{ nm}$ 、 $L_V = 500 \text{ nm}$ 、 $W_A = 1,000 \text{ nm}$ 、 $W_B = 500 \text{ nm}$ 、 $E = 120 \text{ nm}$ については、 $\varepsilon_0 = 20 \text{ nm}$ であるとき、百分率として表される微小変化は 2% であり、 $\varepsilon_0 = 5 \text{ nm}$ であるときは、約 0.5% である。オーバーエッチングが増加するにつれて、オーバーラップ領域はより支配的になり、オーバーエッチングは、少なくともほぼ直線的に総抵抗を増加させる。

【0180】

100 nm 層間ずれを測定するための電気バーニヤの一実施態様では、スタッドビア層 (STVB) は、配線に沿った寸法及び配線横断寸法において (例えば、いずれの場合も「平面内」の位置ずれとして表示される)、製造に下部配線層 (WIRA) と比較して最大 100 nm 位置ずれする可能性がある。上部配線層 (WIRB) は、配線に沿った寸法及び配線横断寸法において (例えば、いずれの場合も「平面内」の位置ずれとして表示される)、製造時に WIRA と比較して最大 100 nm 位置ずれする可能性がある。同じ実施態様では、STVB は、WIRA と WIRB とのオーバーラップよりも、配線に沿った方向に少なくとも 100 nm 大きく、かつ STVB は、WIRA と WIRB とのオーバーラップよりも、配線横断方向に少なくとも 225 nm 大きい。STVB の縁部間の距離は、少なくとも $1,000 \text{ nm}$ である。いくつかの実施態様では、WIRA と WIRB とのオーバーラップは、 $250 \text{ nm} \times 250 \text{ nm}$ である。

【0181】

図15A及び15Bは、スタッドビア層のオーバーエッチングを含む例示的な超伝導集積回路1500の図である。図15A及び15Bは、上部及び下部配線を含む回路1500の寸法、並びにスタッドビアをラベル化する。図15Aは平面図であり、図15Bは断面図である。

【0182】

1つの実施態様のための例示的な寸法を、以下の表1に列挙する。

【0183】

10

20

30

40

50

【表 1】

表 1 : 例示的な寸法

名前	例示的な寸法
L _{A1}	875nm
L _{A2}	375nm
W _{A1}	500nm
W _{A2}	125nm
L _{V1}	450nm
L _{V2}	100nm
W _V	750nm
L _{B1}	500nm
L _{B2}	250nm
W _{B1}	125nm
W _{B2}	250nm
W _{B3}	125nm

10

【0184】

上記の実施態様及び寸法は、実施例である。他の寸法及びオーバーラップを使用することができる。当業者であれば、他の寸法及び組み合わせを使用して、電気バーニヤを使用して層間ずれを測定することができることを理解するであろう。

20

【0185】

いくつかの実施態様では、いくつかの電気バーニヤは、STVBに関してWIRAのオフセットを使用して構築され、他の電気バーニヤは、STVBに関してWIRBのオフセットを使用して構築される。これらのバーニヤを使用して、WIRAとSTVBとの間並びにWIRBとSTVBとの間の層間ずれの組み合わせ効果を分離するために使用することができる。

【0186】

層間ずれを測定するための電気バーニヤ（チェーン及びホイートストンブリッジ）

層間ずれを測定するための1つのアプローチは、電気バーニヤのチェーンを使用することである。このアプローチは、低抵抗を測定する課題のいくつかを克服することができる。1つの課題は、配線内を流れる電流によって引き起こされ得る発熱である。例えば、1mA超～250nmの配線の電流は、抵抗測定を歪めるために十分な発熱を引き起こす場合がある。

30

【0187】

この課題に対処するための1つのアプローチは、配線を通して流れる電流を低減することである。しかしながら、いくつかの測定器具は、電流を下げるために調整を行うことを可能にはしない。また、電流を低下させることは、測定値の精度に影響を及ぼし得る。

【0188】

電流の流れによって引き起こされる発熱を緩和するためのより良好なアプローチ、及び多くの測定器具に適用することができるものは、例えば、電気バーニヤのチェーンを構築することによって、電気バーニヤの抵抗を増加させることである。いくつかの実施態様では、最大で、例えば1,000個の電気バーニヤのチェーンを使用して、層間ずれを測定することができる。電気バーニヤの寸法は、所望の測定感度を提供するように選択することができる。

40

【0189】

図10Aは、本発明のシステム及び方法による、電気バーニヤ1000aを含む例示的な超伝導集積回路の一部分の平面図である。バーニヤ1000aは、第1のマーク1002と、第2のマーク1004と、スタッドビア1006と、を備える。

【0190】

50

図10Bは、本発明のシステム及び方法による、電気バーニヤ1000bのチェーンの例示的な実施態様を含む、例示的な超伝導集積回路の一部分の平面図である。チェーン1000bは、4つの電氣的に接続された電気バーニヤ1008、1010、1012及び1014を備える。

【0191】

図10Cは、本発明のシステム及び方法による、電気バーニヤ1000cのチェーンの別の例示的な実施態様を含む、例示的な超伝導集積回路の一部分の平面図である。チェーン1000cは、4つの電氣的に接続された電気バーニヤ1016、1018、1020及び1022を備える。チェーン1000cは、縦方向のチェーン1000bの鏡像である。チェーン1000b及び1000cは、電気バーニヤの異なる構成を有する例示的な実施態様である。チェーン1000b及び1000cはそれぞれ4つのバーニヤを備えるが、他の実施態様は、好適な数のバーニヤを含むことができる。前述したように、いくつかの実施態様では、チェーンは、例えば、1,000個のバーニヤを含むことができる。

【0192】

バーニヤのチェーンの総抵抗は、チェーン長を調節することによって選択することができる。抵抗は、ウェハプロービングシステムに好適な範囲であるように選択することができる。例示的な実施態様では、2,500オームの抵抗を選択することができる。抵抗を0.2%以内まで測定することができるプローブを用いて、2nm程度の小さい層間ずれを検出することができる。別の例示的な実施態様では、抵抗は、3,200個のバーニヤのチェーンについて測定され、総抵抗は約6,000オームである。

【0193】

抵抗の小さい変化による信号を増加させる別のアプローチは、ホイートストンブリッジなどのブリッジ回路を使用することである。ホイートストンブリッジは、4つの類似値の抵抗器の4線測定である。図11は、4つの抵抗器の配置を示すホイートストンブリッジ1100の例示的な実施態様の概略図である。図11に示される実施例では、ブリッジの2つのアームは、対応するR1の抵抗をそれぞれ提供する、図10Bに示される配向のチェーンからなる。ブリッジの反対側の2つのアームは、対応するR2の抵抗をそれぞれ提供する、図10Cに示される垂直方向に鏡写された同じチェーンからなる。

【0194】

上部金属層が下部金属層と位置合わせされると、R1及びR2は等しく、ブリッジ全体にわたってゼロ電圧が測定される。第1の例では、上部金属層が下部金属層に対して位置ずれしている場合、R1上のオーバーラップ領域は同じであり、抵抗は変化しない。鏡像配置R2では、上部層と下部層との位置ずれの結果、オーバーラップ領域は小さくなる。その結果、抵抗R2は、層が位置合わせされたときよりも高く、ブリッジ全体にゼロ以外の電圧をもたらす。第2の例では、反対方向の位置ずれにより、R1が抵抗を増加させ、R2が同じ抵抗を維持する。ブリッジ全体にわたる得られたゼロ電圧は、第1の例とは反対の符号を有してもよい。

【0195】

図12は、本発明のシステム及び方法による、位置ずれ(nm単位)の関数としての測定電圧(mV単位)の変動を示す例示的なプロットである。測定された電圧を使用して、層間ずれを決定することができる。ブリッジの値は、層間ずれに対する好適な感度を提供するように選択することができる。

【0196】

図12の例示的なプロットでは、測定された電圧は、層間ずれがない場合にはゼロである。図示の実施例では、示される電圧範囲において、層間ずれと測定電圧との間にはほぼ線形の関係が存在する。正のずれは、負の測定電圧を引き起こすことができる。例えば、-20mVの測定電圧は、約100nmの層間ずれから生じ得る。1Vの印加信号と、数マイクロボルトの測定デバイス上の解像度とを有する場合、図11のブリッジ1100は、サブnmの層間ずれを測定することができる。

【0197】

10

20

30

40

50

3層（又はより多層の）超伝導集積回路のための、取り囲まれた整合オンチップ伝送線路
 オンチップ伝送線路は、理想的には、完全に取り囲まれるように設計され（結合点を除く）、50オーム整合するように設計されている。インピーダンス整合は、最小限の、又は少なくとも低減された信号歪みが生じることを確実にする。伝送線路を取り囲むことにより、ボックスモード又はオンチップ構造への結合が最小限に抑えられるか、又は少なくとも低減される。加えて、伝送線路を取り囲むシールドは、線路上を伝播する高周波ノイズからオンチップデバイス（例えば、量子ビット）を少なくとも部分的に絶縁することができる。

【0198】

3層（又はより多層の）超伝導集積回路内に50オームの伝送線路を実装することは困難な場合がある。例えば、製造スタックにおいて、中心線と接地との間に望ましくない大きな容量が存在する場合があります、特に誘電体厚さが小さく、配線幅が大きすぎる場合があります。より高い容量は、より低い特性インピーダンスをもたらすことができる。

10

【0199】

図13A及び13Bを参照して以下に説明するシステム及び方法は、大きな力学インダクタンスを有する中心導体を有する伝送線路を含む。例えば、伝送線路の中心導体は、窒化チタン（TiN）を含むことができる。中心線のより高いインダクタンスは、中心線と接地との間のより高い容量を補償することができる。このアプローチを使用して、製造スタック内に3つ程度の金属層で、完全に取り囲まれた50オームの伝送線路を形成することができる。図13A及び13Bは、アプローチの2つの例示的な実施形態を示す。

20

【0200】

図13Aは、本発明のシステム及び方法による、オンチップ伝送線路を含む例示的な超伝導集積回路1300aの一部分の断面図である。回路1300aは、基板1302と、基板1302の少なくとも一部分の上に重なるように堆積された第1の超伝導金属層1304と、を備える。いくつかの実施態様では、基板1302はケイ素を含む。第1の超伝導金属層1304は、ある温度範囲内で超伝導性である。いくつかの実施態様では、第1の超伝導金属層1304は、ニオブを含む。いくつかの実施態様では、第1の超伝導金属層1304は、300nmの厚さを有する。いくつかの実施態様では、第1の超伝導金属層1304は、配線層である。第1の超伝導金属層1304は、パターンニングされて、1つ以上の超伝導トレースの第1の組を形成することができる。

30

【0201】

回路1300aは、第1の超伝導金属層1304の少なくとも一部分の上に重なる第1の誘電体層1306と、第1の誘電体層1306の少なくとも一部分の上に重なる高力学インダクタンス層1308と、を更に含む。いくつかの実施態様において、回路1300aは、高力学インダクタンス層1308及び第1の誘電体層1306の少なくとも一部分の上に重なる保護層1310を更に備える。保護層1310は、高力学インダクタンス層1308への酸素拡散を少なくとも低減するための拡散バリアであってもよく、拡散は、例えば、フォトレジストを剥離するために酸素プラズマを使用することによって生じる。他の実施態様では、保護層1310は、製造スタックから省略される。

【0202】

40

図1及び図2A～図2Jの説明で上述したように、力学インダクタンスは、交流電界における移動電荷キャリアの等価直列インダクタンスを指し、通常、超伝導体などの高キャリア移動度導体において観察される。高力学インダクタンス層1308は、その高いキャリア移動度のために選択された超伝導性材料を含むことができる。高力学インダクタンス層1308は、回路1300aの動作に好適な等価直列インダクタンスを提供するように選択することができる。超伝導配線の力学インダクタンスは、その長さに比例し、その断面積に反比例し、クーパー対の密度に反比例する。

【0203】

ロンドン侵入深さは、超伝導体の固有の特性であり、磁界が超伝導体に侵入する距離を特徴付ける。通常、より大きなロンドン侵入深さを有する超伝導体は、同じ物理的寸法に

50

においてより大きな力学インダクタンスを有する。いくつかの実施態様では、高力学インダクタンス層 1308 は、第 1 の超伝導金属層 1304 を形成する超伝導金属の侵入深さの少なくとも 3 倍の侵入深さを有する材料を含む。

【0204】

侵入深さは、クーパ対の密度に関連する。同じ電流において、より低い密度のクーパ対を有する超伝導体におけるクーパ対は、より速く移動し、したがって、より大きな運動エネルギーを有する、すなわち、より高い密度のクーパ対を有する超伝導体の場合よりも、磁界（磁気インダクタンス）よりも運動エネルギー（力学インダクタンス）に大きなエネルギーの割合が貯蔵される。

【0205】

力学インダクタが高力学インダクタンス層 1308 から形成される回路 1300 a の一実施態様では、力学インダクタは、長さ 1,000 nm、幅 1,000 nm、及び厚さ 50 nm を有する。力学インダクタンスは、約 5 pH である。同様に寸法決定された下部力学インダクタンス配線のインダクタンスは、約 0.5 pH である。

【0206】

高力学インダクタンス層 1308 は、パターンニングされて、第 1 の組の 1 つ以上の高力学インダクタンス構造又はトレースを形成することができる。いくつかの実施態様では、第 1 の誘電体層 1306 は、二酸化ケイ素を含む。いくつかの実施態様では、第 1 の誘電体層 1306 は、200 nm の厚さを有する。高力学インダクタンス層 1308 は、ある温度範囲内で超伝導性である。いくつかの実施態様では、高力学インダクタンス層 1308 は、窒化チタン (TiN) を含む。他の実施態様では、高力学インダクタンス層 1308 は、窒化ニオブ (NbN) を含む。更に他の実施態様では、高力学インダクタンス層 1308 は、TiN、NbN、窒化ニオブチタン (NbTiN)、窒化モリブデン (MoN)、及びタングステンシリサイド (WSi) のうちの少なくとも 1 つを含む。

【0207】

いくつかの実施態様では、高力学インダクタンス層 1308 は、50 nm の厚さを有する。いくつかの実施態様では、保護層 1310 は、窒化ケイ素 (SiN) を含む。いくつかの実施態様では、保護層 1310 は、50 nm の厚さを有する。

【0208】

回路 1300 a は、高力学インダクタンス層 1308（及び任意選択の保護層 1310）の少なくとも一部分の上に重なるように堆積された第 2 の超伝導金属層 1312 を更に備える。第 2 の超伝導金属層 1312 は、ある温度範囲内で超伝導性である。いくつかの実施態様では、第 2 の超伝導金属層 1312 は、ニオブを含む。いくつかの実施態様では、第 2 の超伝導金属層 1312 は、300 nm の厚さを有する。いくつかの実施態様では、第 2 の超伝導金属層 1312 は、配線層である。第 2 の超伝導金属層 1312 は、パターンニングされて、1 つ以上の超伝導トレースの第 2 の組を形成することができる。

【0209】

回路 1300 a は、第 2 の超伝導金属層 1312 の上に重なる第 2 の誘電体層 1314 を更に備える。いくつかの実施態様では、第 2 の誘電体層 1314 は、二酸化ケイ素を含む。いくつかの実施態様では、第 2 の誘電体層 1314 は、200 nm の厚さを有する。

【0210】

回路 1300 a は、第 2 の誘電体層 1314 の少なくとも一部分の上に重なるように堆積された第 3 の超伝導金属層 1316 を更に含む。第 3 の超伝導金属層 1316 は、ある温度範囲内で超伝導性である。いくつかの実施態様では、第 3 の超伝導金属層 1316 は、ニオブを含む。いくつかの実施態様では、第 3 の超伝導金属層 1316 は、300 nm の厚さを有する。いくつかの実施態様では、第 3 の超伝導金属層 1316 は、配線層である。第 3 の超伝導金属層 1316 は、パターンニングされて、1 つ以上の超伝導トレースの第 3 の組を形成することができる。

【0211】

回路 1300 a 内の各層の材料及び形状は、所望の 50 オームインピーダンスを実現す

10

20

30

40

50

るために、中心線幅と組み合わせて選択することができる。

【0212】

図13Bは、本発明のシステム及び方法による、オンチップ伝送線路を含む別の例示的な超伝導集積回路1300bの一部分の断面図である。回路1300bは、基板1302と、基板1302の少なくとも一部分の上に重なるように堆積された第1の超伝導金属層1304と、を含む。いくつかの実施態様では、基板1302はケイ素を含む。第1の超伝導金属層1304は、ある温度範囲内で超伝導性である。いくつかの実施態様では、第1の超伝導金属層1304は、ニオブを含む。いくつかの実施態様では、第1の超伝導金属層1304は、300nmの厚さを有する。いくつかの実施態様では、第1の超伝導金属層1304は、配線層である。第1の超伝導金属層1304は、パターニングされて、1つ以上の超伝導トレースの第1の組を形成することができる。

10

【0213】

回路1300bは、第1の超伝導金属層1304の少なくとも一部分の上に重なる第1の誘電体層1306と、第1の誘電体層1306の少なくとも一部分の上に重なる高力学インダクタンス層1308と、を更に備える。いくつかの実施態様において、回路1300bは、高力学インダクタンス層1308及び第1の誘電体層1306の少なくとも一部分の上に重なる保護層1310を更に含む。他の実施態様では、保護層1310は、製造スタックから省略される。

【0214】

いくつかの実施態様では、第1の誘電体層1306は、二酸化ケイ素を含む。いくつかの実施態様では、第1の誘電体層1306は、200nmの厚さを有する。高力学インダクタンス層1308は、ある温度範囲内で超伝導性である。いくつかの実施態様では、高力学インダクタンス層1308は、窒化チタン(TiN)を含む。いくつかの実施態様では、高力学インダクタンス層1308は、50nmの厚さを有する。いくつかの実施態様では、保護層1310は、窒化ケイ素(SiN)を含む。いくつかの実施態様では、保護層1310は、50nmの厚さを有する。

20

【0215】

回路1300bは、保護層1310の上に重なる第2の誘電体層1318を更に備える。いくつかの実施態様では、第2の誘電体層1318は、二酸化ケイ素を含む。いくつかの実施態様では、第2の誘電体層1318は、200nmの厚さを有する。

30

【0216】

回路1300bは、第2の誘電体層1318の少なくとも一部分の上に重なるように堆積された第2の超伝導金属層1320を更に備える。第2の超伝導金属層1320は、ある温度範囲内で超伝導性である。いくつかの実施態様では、第2の超伝導金属層1320は、ニオブを含む。いくつかの実施態様では、第1の超伝導金属層1320は、300nmの厚さを有する。いくつかの実施態様では、第2の超伝導金属層1320は、配線層である。第2の超伝導金属層1320は、パターニングされて、1つ以上の超伝導トレースの第2の組を形成することができる。

【0217】

回路1300b内の各層の材料及び形状は、所望の50オームインピーダンスを実現するために、中心線幅と組み合わせて選択することができる。

40

【0218】

図13A及び13Bの最下部及び最上位の配線層によって、2つの接地面を形成することができる。2つの接地面は、ビアによって接続することができる。いくつかの実施態様では、2つの接地面は、超伝導スタッドビアによって接続することができる。いくつかの実施態様では、連続的なビア壁が、2つの接地面を接続するために使用される。いくつかの実施態様では、ビアは、中心線の幅の3倍ずつ、各側の中心線から分離することができる。この分離を提供する利点は、インピーダンスに対するスタッドビアの影響を排除することができる、又は少なくとも低減することができることである。

【0219】

50

図 1 3 C は、本発明のシステム及び方法による、オンチップ伝送線路及び接続された接地面を含む例示的な超伝導集積回路 1 3 0 0 c の一部分の断面図である。

【 0 2 2 0 】

図 1 3 D は、本発明のシステム及び方法による、オンチップ伝送線路及び接続された接地面を含む別の例示的な超伝導集積回路 1 3 0 0 d の一部分の断面図である。

【 0 2 2 1 】

図 1 3 C を参照すると、第 1 の超伝導層 1 3 0 4 及び第 2 の超伝導層 1 3 1 2 はビア 1 3 2 2 及び 1 3 2 4 によって接続されている。図 1 3 D を参照すると、第 1 の超伝導層 1 3 0 4 及び第 2 の超伝導層 1 3 2 0 はビア 1 3 2 6 及び 1 3 2 8 によって接続されている。ビア 1 3 2 2 及び 1 3 2 4 は、保護層 1 3 1 0 及び第 1 の誘電体層 1 3 0 6 内のトレンチをエッチングし、超伝導金属を堆積させて、同時に第 2 の超伝導層 1 3 1 2 及びビア 1 3 2 2 及び 1 3 2 4 を形成することによって形成することができる。同様に、ビア 1 3 2 6 及び 1 3 2 8 は、保護層 1 3 1 0、第 1 の誘電体層 1 3 0 6 及び第 2 の誘電体層 1 3 1 8 内のトレンチをエッチングし、超伝導金属を堆積させて、同時に第 2 の超伝導層 1 3 2 0 及びビア 1 3 2 6 及び 1 3 2 8 を形成することによって形成することができる。

【 0 2 2 2 】

超伝導用途のための金属配線層の封止

パターニングされた金属配線層を別の導電性材料で封止することは、例えば、超伝導集積回路のノイズ性能を向上させるための様々な用途に望ましい場合がある。封止は、超伝導体の製造における課題を提示することができる。図 1 6 及び図 1 4 A ~ 図 1 4 C を参照して以下に記載されるシステム及び方法は、パターニングされた金属配線層を封止するための新規な技術である。

【 0 2 2 3 】

1 つのアプローチは、a) 第 1 のマスクを用いて超伝導金属配線層を形成及びパターニングすることと、b) 封止層を堆積させることと、c) 第 2 のマスクを用いて封止層をパターニングすることと、を含む。配線層を封止するために、封止層のパターニングは、第 1 のマスクに位置合わせされ得る。第 1 のマスクと第 2 のマスクとの間の位置合わせ誤差は、2 つの特徴間の特徴及び / 又は分離間隙がどのようにサイズ決定され得るかを制限することができる。このような超伝導金属配線層としては、例えばニオブを挙げることができる。

【 0 2 2 4 】

以下に説明するシステム及び方法は、パターニングされた超伝導金属配線層を第 2 のマスクを使用せずに封止するための自己整合アプローチを使用する。自己整合は、位置合わせ誤差を排除するか、又は少なくとも低減することができ、その結果、アライメント誤差から生じ得る制限を排除するか、又は少なくとも低減することができる。

【 0 2 2 5 】

図 1 6 は、本発明のシステム及び方法による、配線層を含む超伝導集積回路の一部分を製造するための方法を示すフローチャート 1 6 0 0 である。方法 1 6 0 0 は、行為 1 6 0 2 ~ 1 6 2 2 を含むが、当業者であれば、代替的な実施形態では、特定の行為が省略されてもよく、及び / 又は追加の行為が追加されてもよいことを理解するであろう。当業者であれば、図示された行為の順序が例示の目的のみで示され、代替の実施形態で変化し得ることを理解するであろう。

【 0 2 2 6 】

方法 1 6 0 0 は、例えば、製造プロセスの開始にตอบสนองして、1 6 0 2 で開始する。1 6 0 4 では、第 1 の封止層が、基板上に堆積される。いくつかの実施態様では、基板はケイ素である。いくつかの実施態様では、第 1 の封止層は、アルミニウムを含み、又はアルミニウムからなり、ある温度範囲内で超伝導性である。他の実施態様では、第 1 の封止層は、窒化チタン (TiN) を含むか、又はそれからなり、ある温度範囲内で超伝導性である。1 6 0 6 では、第 1 の超伝導金属層は、第 1 の封止層の少なくとも一部分の上に重なるように堆積される。いくつかの実施態様では、第 1 の超伝導金属層は、ニオブを含む。1

10

20

30

40

50

608では、第1の超伝導金属層の少なくとも一部分の上に重なるように第2の封止層が堆積される。いくつかの実施態様では、第2の封止層は、第1の封止層と同じ材料を含む。いくつかの実施態様では、第2の封止層は、アルミニウムを含む。他の実施態様では、第2の封止層は、TiNを含む。1610では、第2の封止層の少なくとも一部分の上に重なるように第1の誘電体層が、堆積される。いくつかの実施態様では、第1の誘電体層は、二酸化ケイ素を含む。

【0227】

1612では、第1及び第2の封止層、第1の超伝導金属層、及び第1の誘電体層は、1つ以上のピラー又はスタックを形成するようにパターニングされてもよい。層をパターニングすることは、層をマスクング及びエッチングすることを含んでもよい。いくつかの実施態様では、2つ以上の層を同じ工程でマスクング及びエッチングすることができる。

10

【0228】

1614では、第3の封止層が、第1の誘電体層の少なくとも一部分の上に重なるように堆積され、ピラーを封止する。第3の封止層は、各ピラーの上面、各ピラーの側面、及び各ピラーの基底部の基板の上に堆積され得る。いくつかの実施態様では、第3の封止層は、第1又は第2の封止層と同じ材料を含む。いくつかの実施態様では、第3の封止層は、アルミニウムを含む。他の実施態様では、第3の封止層は、TiNを含む。

【0229】

1616では、第2の誘電体層がエッチングされ、1618では、第3の封止層がエッチングされる。1620では、方法1600は終了する。

20

【0230】

図14A～図14Cは、本発明のシステム及び方法による、製造の様々な段階における、配線層を含む例示的な超伝導集積回路の断面図である。

【0231】

図14Aは、本発明のシステム及び方法による、製造の初期段階における、配線層を含む例示的な超伝導集積回路1400aの断面図である。回路1400aは、基板1402と、基板1402の少なくとも一部分の上に重なる第1の封止層1404と、第1の封止層1404の少なくとも一部分の上に重なる超伝導金属配線層1406とを備える。いくつかの実施態様では、基板1402はケイ素を含む。いくつかの実施態様では、基板1402は、誘電体層、例えば、二酸化ケイ素の層である。いくつかの実施態様では、第1の封止層1404は、ある温度範囲内で超伝導性である。いくつかの実施態様では、第1の封止層1404はアルミニウムを含む。他の実施態様では、第1の封止層1404は、TiNを含む。超伝導金属配線層1406は、ある温度範囲内で超伝導性である。いくつかの実施態様では、超伝導金属配線層1406は、ニオブを含む。

30

【0232】

回路1400aは、超伝導金属配線層1406の上に重なる第2の封止層1408と、第2の封止層1408の上に重なる第1の誘電体層1410と、を更に備える。いくつかの実施態様では、第2の封止層1408は、ある温度範囲内で超伝導性である。いくつかの実施態様では、第2の封止層1408はアルミニウムを含む。他の実施態様では、第2の封止層1408は、TiNを含む。いくつかの実施態様では、第1の誘電体層1410は、二酸化ケイ素を含む。

40

【0233】

層1404、1406、1408及び1410は、マスクング及びエッチングされて、図14Aの1412a及び1412bなどの1つ以上のスタック又はピラーを形成する。先の図を参照して上述したシステム及び方法を使用して、超伝導スタッドピアを形成することができる。

【0234】

図14Bは、本発明のシステム及び方法による、後続の製造段階における配線層を含む例示的な超伝導集積回路1400bの断面図である。回路1400bは、第3の封止層1414及び第2の誘電体層1416を備える。いくつかの実施態様では、第3の封止層1

50

414は、ある温度範囲内で超伝導性である。いくつかの実施態様では、第3の封止層1414はアルミニウムを含む。他の実施態様では、第3の封止層1414は、TiNを含む。いくつかの実施態様では、第2の誘電体層1416は、二酸化ケイ素を含む。

【0235】

図14Cは、本発明のシステム及び方法による、後続の製造段階における配線層を含む例示的な超伝導集積回路1400cの断面図である。回路1400cは、a)第2の誘電体層1416のブランク異方性エッチング、及びb)配線の不必要な電氣的結合を除去する第2の封止層1414のエッチング(例えば、図14の場所1418における)によって、図14Bの回路1400bから形成することができる。

【0236】

場合によっては、特に、フォトレジストをエッチングするために酸素プラズマを使用する場合、パターニングされた配線層(例えば、図14Aの超伝導金属配線層1406)の表面上に酸化物を存在させることができ、パターニングされた配線層を封止する前に酸化物の量を少なくとも低減することが望ましい場合がある。1つのアプローチは、CF₄、NF₃、又は別の好適なフッ素化学物質、又は他の好適な非フッ素化学物質を使用して、表面から酸化物を除去することである。酸化物の除去は、フォトレジストを剥離するために使用されるチャンバと同じチャンバ内で実行することができる。酸化物の除去は、パターニングされた配線層内の超伝導金属の一部のエッチングを引き起こすことができ、エッチングは、回路設計において(例えば、設計内の配線厚を増加させることによって)補償することができる。

【0237】

後続の製造段階中に、超伝導ビア内の超伝導金属(例えば、ニオブ)中の酸素拡散を少なくとも低減することが、超伝導集積回路の製造において望ましい場合がある。1つのアプローチは、窒素及びアルゴンガスの組み合わせを使用して、誘電体堆積前に窒素プラズマを生成することである。窒素プラズマは金属配線層と反応して、保護スキンを形成し、これは、通常酸素プラズマを使用する誘電体堆積中に金属配線層が酸化されるのを防ぐことができる。例えば、窒素及びアルゴンを流して形成された窒素プラズマは、ニオブ配線層上に薄い保護窒化ニオブ層を成長させることができる。別のアプローチは、アンモニアなどの窒素含有ガスを使用して、窒化ニオブ層を形成するプラズマを生成することである。超伝導配線を封止するための上記のシステム及び方法は、ビアを形成する超伝導金属を封止するために使用することができる。ビアを形成する超伝導金属(例えば、ニオブ)の封止は、製造の後続の段階中の酸素拡散を少なくとも低減することができる。

【0238】

超伝導用途の(超伝導金属研磨停止層を有する)スタッドピア形成

図7A~図7Hに記載される方法などの、超伝導集積回路製造の場合には、配線層又はスタッドピア層に使用される材料は、軟質金属を含むことができ、軟質金属は、CMPなどの研磨プロセスの間に引っ掻き傷を受けやすい場合がある。このため、配線層又はスタッドピア層の上に比較的硬質の金属を含む薄い研磨停止層を堆積させて、配線層又はスタッドピア層を引っ掻き傷から保護することが有利となり得る。

【0239】

図17A~図17Gは、スタッドピア及び超伝導金属研磨停止層を含む例示的な超伝導集積回路の一部分の断面図である。

【0240】

図17Aは、製造プロセスの第1の段階における、超伝導集積回路1700aの一部分の断面図である。回路1700aは、基板1702と、基板1702の少なくとも一部分の上に重なる第1の超伝導層1704と、第1の超伝導金属層1704の少なくとも一部分の上に重なる薄い第1の研磨停止層1706とを備える。第1の超伝導金属層は、配線層であってもよい。第1の超伝導金属層1704及び第1の研磨停止層1706は、ある温度範囲内で超伝導性であってもよい。第1の研磨停止層1706は、第1の超伝導金属層1704より薄くてもよい。一実施態様では、第1の超伝導金属層1704はアルミニ

10

20

30

40

50

ウムを含み、第 1 の研磨停止層 1706 はニオブを含む。

【0241】

図 17B は、製造プロセスの後続の段階における、超伝導集積回路 1700b の一部分の断面図である。超伝導回路 1700b は、第 1 の超伝導金属層 1704 の少なくとも一部分及び第 1 の研磨停止層 1706 の少なくとも一部分をマスクング及びエッチングすることによって、図 17A の回路 1700a から形成することができる。

【0242】

図 17C は、製造プロセスの後続の段階における、超伝導集積回路 1700c の一部分の断面図である。超伝導集積回路 1700c は、基板 1702 の少なくとも一部分及び第 1 の研磨停止層 1708 の少なくとも一部分の上に重なるように第 1 の誘電体層 1708 を堆積させ、次いで第 1 の誘電体層 1708 を研磨して第 1 の研磨停止層 1706 の少なくとも一部分の上面に戻すことによって、図 17B の超伝導集積回路 1700b から形成することができる。一実施態様では、第 1 の誘電体層 1708 を研磨することは、CMP を含む。

10

【0243】

図 17D は、製造プロセスの後続の段階における、超伝導集積回路 1700d の一部分の断面図である。超伝導集積回路 1700d は、第 1 の誘電体層 1708 の少なくとも一部分及び第 1 の研磨停止層 1706 の少なくとも一部分の上に重なるように第 2 の超伝導金属層 1710 を堆積させ、次いで第 2 の超伝導金属層 1710 の少なくとも一部分の上に重なるように第 2 の研磨停止層 1712 を堆積させることによって、図 17C の回路 1700c から形成することができる。第 2 の超伝導金属層 1710 及び第 2 の研磨停止層 1712 は、ある温度範囲内で超伝導性とすることができる。第 2 の超伝導金属層 1710 は、スタッドピア層とすることができる。第 2 の研磨停止層 1712 は、第 2 の超伝導金属層 1710 より薄くてもよい。一実施態様では、第 2 の超伝導金属層 1710 はアルミニウムを含み、第 2 の研磨停止層 1712 は、ニオブを含む。別の実施態様では、第 2 の超伝導金属層 1710 はニオブを含み、第 2 の研磨停止層 1712 はニオブを含む。

20

【0244】

図 17E は、製造プロセスの後続の段階における、超伝導集積回路 1700e の一部分の断面図である。超伝導集積回路 1700e は、第 2 の研磨停止層 1712 第 2 の超伝導金属層 1710 及び第 1 の研磨停止層 1706 のそれぞれの少なくとも一部分をマスクング及びエッチングすることによって、図 17D の回路 1700d から形成することができる。一実施態様では、エッチングは、第 1 の超伝導金属層 1704 上で停止することができる。

30

【0245】

図 17F は、製造プロセスの後続の段階における、超伝導集積回路 1700f の一部分の断面図である。超伝導集積回路 1700f は、第 2 の研磨停止層 1712、第 2 の超伝導金属層 1710、第 1 の誘電体層 1708 及び第 1 の超伝導金属層 1704 の少なくとも一部分の上に重なるように第 2 の誘電体層 1714 を堆積させ、次いで、第 2 の誘電体層 1714 を研磨して第 2 の研磨停止層 1712 に戻すことによって、図 17E の回路 1700e から形成することができる。一実施態様では、第 2 の誘電体層 1714 を研磨することは、CMP を含む。

40

【0246】

図 17G は、製造プロセスの後続の段階における、超伝導集積回路 1700f の一部分の断面図である。超伝導集積回路 1700g は、第 2 の誘電体層 1714 及び第 2 の研磨停止層 1712 のそれぞれの少なくとも一部分の上に重なるように第 3 の超伝導金属層 1716 を堆積させ、次いで、第 3 の超伝導金属層 1716 の少なくとも一部分をマスクング及びエッチングすることによって、図 17F の回路 1700f から形成することができる。第 3 の超伝導金属層 1716 は、配線層であってもよい。第 3 の超伝導金属層 1716 は、ある温度範囲内で超伝導性であってもよい。一実施態様では、第 3 の超伝導金属層 1716 はアルミニウムを含む。いくつかの実施態様では、図 17A ~ 図 17G に示す製

50

造プロセスでは、第1の研磨停止層1706及び第2の研磨停止層1712のうちの1つは省略される。

【0247】

別個の層内の力学インダクタ及びコンデンサを製造するための統合プロセス

図1及び図2A～図2Jに示されるシステム及び方法は、超伝導集積回路の同じ層内に、力学インダクタ及びコンデンサを製造するための統合プロセスを説明する。図2E及び図2Fは、流束貯蔵層をマスキング及びエッチングし、次いで、誘電体層をマスキング及びエッチングして、同じ層内に力学インダクタ及びコンデンサを形成することを説明する。例えば、力学インダクタとコンデンサとの間の望ましくない電氣的又は通信的結合のリスクを軽減するために、別個の層内に力学インダクタ及びコンデンサを製造することが有利な場合がある。

10

【0248】

図18A～図18Jは、製造の連続的段階において、力学インダクタ及び別個の層で製造されたコンデンサを含む、超伝導回路の一部分の断面図である。

【0249】

図18Aは、製造プロセスの中間段階における、超伝導集積回路1800aの一部分の断面図である。例えば、回路1800aは、図2A～図2Dに示されるシステム及び方法に従って製造プロセスの段階に後続する段階とすることができる。回路1800aは、例えば、高力学インダクタンス層212をパターンニングして、高力学インダクタンス要素1812を形成することによって、図2Dの回路200dから形成することができる。(高力学インダクタンス層212は、図2A～図2Dを参照して、本出願では、流束貯蔵層212とも称される。)

20

【0250】

回路1800aはまた、基板1802と、基板1802の少なくとも一部分の上に重なる第1の超伝導金属層1804と、基板1802の少なくとも一部分の上に重なる第1の誘電体層1806と、第1の配線層1804の少なくとも一部分の上に重なる第2の超伝導金属層1808と、第1の配線層1804及び第1の誘電体層1806の少なくとも一部分の上に重なる第2の誘電体層1810と、を備えることができる。

【0251】

高力学インダクタンス要素1812は、第2の超伝導金属層1808の少なくとも一部分の上に重なる。高力学インダクタンス層212をパターンニングして、高力学インダクタンス要素1812を形成することは、高力学インダクタンス層212の少なくとも一部分をマスキング及びエッチングすることを含んでもよい。いくつかの実施態様では、高力学インダクタンス要素1812は、TiNを含む。いくつかの実施態様では、高力学インダクタンス要素1812は、NbNを含む。いくつかの実施態様では、高力学インダクタンス要素1812は、約50nmの厚さを有する。

30

【0252】

図18Bは、製造プロセスの後続の段階における、超伝導集積回路1800bの一部分の断面図である。回路1800bは、高力学インダクタンス要素1812、第2の誘電体層1810、及び第2の超伝導金属層1808のそれぞれの少なくとも一部分の上に重なるように第3の誘電体層1814を堆積させることによって、図18Aの回路1800aから形成することができる。一実施態様では、第3の誘電体層1814を堆積させることは、その場堆積を含む。いくつかの実施態様では、第3の誘電体層1814は、窒化ケイ素(SiN)などの高品質誘電体である。第3の誘電体層1814は、高力学インダクタンス要素1812を保護するための保護絶縁層として機能することができる。

40

【0253】

図18Cは、製造プロセスの後続の段階における、超伝導集積回路1800cの一部分の断面図である。回路1800cは、第3の誘電体層1814及び高力学インダクタンス要素1812のそれぞれの少なくとも一部分をエッチングすることによって、図18Bの回路1800bから形成することができる。第3の誘電体層1814は、第3の誘電体層

50

1814が第2の超伝導金属層1808及び/又は第2の誘電体層1810とほとんど又は全く接触しないように、エッチングすることができる。

【0254】

図18Dは、製造プロセスの後続の段階における、超伝導集積回路1800dの一部分の断面図である。回路1800dは、第2の超伝導金属層1808の少なくとも一部分の上に重なるように第3の超伝導金属層1816を堆積させ、次いで第3の超伝導金属層1816の少なくとも一部分をマスキング及びエッチングすることによって、図18Cの回路1800cから形成することができる。第3の超伝導金属層1816は、配線層であってもよい。いくつかの実施態様では、第3の超伝導金属層1816は、ニオブを含むことができる。

10

【0255】

図18Eは、製造プロセスの後続の段階における、超伝導集積回路1800eの一部分の断面図である。回路1800eは、第3の超伝導金属層1816、第3の誘電体層1814、及び第2の誘電体層1810のそれぞれの少なくとも一部分の上に重なるように第4の誘電体層1818を堆積させ、次いで第4の誘電体層1818を研磨して第3の超伝導金属層1816の上面に戻すことによって、図18Dの回路1800dから形成することができる。

【0256】

一実施態様では、第3の誘電体層1814はSiNを含み、高力学インダクタンス要素1812は、TiN及びNbNのうちの少なくとも1つを含み、力学インダクタ1834の一部を形成する。一実施態様では、第1の超伝導金属層1804及び第2の超伝導金属層1808は、ニオブ及びアルミニウムのうちの少なくとも1つを含む。一実施態様では、第4の誘電体層1818は、二酸化ケイ素を含む。

20

【0257】

図18Fは、製造プロセスの後続の段階における、超伝導集積回路1800fの一部分の断面図である。回路1800fは、第3の超伝導金属層1816の少なくとも一部分の上に重なるように第4の超伝導金属層1820を堆積させ、次いで第4の超伝導金属層1820の少なくとも一部分をマスキング及びエッチングすることによって、図18Eの回路1800eから形成することができる。第4の超伝導金属層1820は、ニオブ及びアルミニウムのうちの少なくとも1つを含むことができる。

30

【0258】

任意選択的に、薄い誘電体層(図示せず)を保護層として第3の超伝導金属層1816上に堆積させることができ、薄い誘電体層は、第3の超伝導金属層1816及び第4の超伝導金属層1820が電気的に結合され得る1つ以上のビアを形成することができる。

【0259】

図18Gは、製造プロセスの後続の段階における、超伝導集積回路1800gの一部分の断面図である。回路1800gは、a)第4の誘電体層1818、第3の超伝導金属層1816、及び第4の超伝導金属層1820のそれぞれの少なくとも一部分の上に重なるように第5の誘電体層1822を堆積させ、b)第5の誘電体層を研磨して第4の超伝導金属層1820の少なくとも一部分の上面に戻し、c)第4の超伝導金属層1820及び第5の誘電体層1822のそれぞれの少なくとも一部分の上に重なるように第6の誘電体層1824を堆積させ、d)第6の誘電体層1824の少なくとも一部分をマスキング及びエッチングすることによって、図18Fの回路1800fから形成することができる。一実施態様では、第6の誘電体層1824は、SiNなどの高品質誘電体である。いくつかの実施態様では、第6の誘電体層1824は、約50nm~70nmの範囲の厚さを有する。いくつかの実施態様では、第6の誘電体層1824は、コンデンサの要素である。いくつかの実施態様では、第5の誘電体層1822は、二酸化ケイ素を含む。

40

【0260】

いくつかの実施態様では、超伝導集積回路の製造は、第4の超伝導金属層1820の少なくとも一部分の上に重なるように追加の流束貯蔵層を堆積させることと、追加の流束貯

50

蔵層をマスキング及びエッチングして、少なくとも1つの流束貯蔵要素（図18Gには図示せず）を形成することと、を含むことができる。追加の流束貯蔵層を含む実施態様の一部では、追加の流束貯蔵層から形成された流束貯蔵要素のうちの1つは、コンデンサの少なくとも一部を形成することができる。追加の流束貯蔵層を含む他の実施態様では、追加の流束貯蔵層から形成された流束貯蔵要素のうちの1つは、力学インダクタの少なくとも一部を形成することができる。

【0261】

図18Hは、製造プロセスの後続の段階における、超伝導集積回路1800hの一部分の断面図である。回路1800hは、第4の超伝導金属層1820及び第6の誘電体層1824のそれぞれの少なくとも一部分の上に重なるように第5の超伝導金属層1826を堆積させ、次いで第5の超伝導金属層1826の少なくとも一部分をマスキング及びエッチングすることによって、図18Gの回路1800gから形成することができる。第5の超伝導金属層1826は、配線層であってもよい。第5の超伝導金属層1826は、第4の超伝導金属層1820との接触がほとんど又は全く行われないうちにエッチングすることができる。第5の超伝導金属層1826は、1つ以上の超伝導トレースを含むことができる。

10

【0262】

図18Iは、製造プロセスの後続の段階における、超伝導集積回路1800iの一部分の断面図である。回路1800iは、第5の誘電体層1822、第5の超伝導金属層1826、及び第6の誘電体層1824のそれぞれの少なくとも一部分の上に重なるように第7の誘電体層1828を堆積させ、次いで第7の誘電体層1828を研磨して第5の超伝導金属層1826の上面に戻すことによって、図18Hの回路1800hから形成することができる。いくつかの実施態様では、第7の誘電体層1828は、二酸化ケイ素を含む。

20

【0263】

ビア壁1830は、第1の超伝導金属層1804、第2の超伝導金属層1808、第3の超伝導金属層1816、第4の超伝導金属層1820、及び第5の超伝導金属層1826のそれぞれの少なくとも一部分から形成することができる。力学インダクタ1832は、第3の誘電体層1814、高力学インダクタンス要素1812のそれぞれの少なくとも一部分から形成することができる。2つの電極は、各第1の超伝導金属層1804及び第2の超伝導金属層1808の少なくとも一部分から形成することができる。

30

【0264】

コンデンサ1834は、第6の誘電体層1824の少なくとも一部分と、第5の超伝導金属層1826及び第4の超伝導金属層1820のそれぞれの少なくとも一部分から形成された2つの電極とから形成することができる。コンデンサ1834は、追加の流束貯蔵層の少なくとも一部分を任意選択で含むことができる。一実施態様では、第5の超伝導金属層1826は、ニオブ及びアルミニウムのうちの少なくとも1つを含むことができる。いくつかの実施態様では、第6の誘電体層1824は、SiNを含むことができる。

【0265】

図18Jは、製造プロセスの後続の段階における、超伝導集積回路1800jの一部分の断面図である。回路1800jは、第5の超伝導金属層1826の少なくとも一部分の上に重なるように第6の超伝導金属層1836を堆積させ、次いで第6の超伝導金属層1836の少なくとも一部分をマスキング及びエッチングすることによって、図18Iの回路1800iから形成することができる。

40

【0266】

第6の超伝導金属層1836の少なくとも一部分は、ビア壁1830の一部を形成することができる。第6の超伝導金属層1836は、ニオブ及びアルミニウムのうちの少なくとも1つを含むことができる。

【0267】

任意選択的に、薄い誘電体層（図示せず）を保護層として第5の超伝導金属層1826上に堆積させることができ、薄い誘電体層は、マスキング及びエッチングして、第5の超

50

伝導金属層 1 8 2 6 及び第 6 の超伝導金属層 1 8 3 6 が電氣的に結合され得る 1 つ以上のビアを生成することができる。

【 0 2 6 8 】

図 1 8 A ~ 図 1 8 J は、スタック内の 1 つのレベルの力学インダクタと、スタック内のより高いレベルのコンデンサとを含む超伝導集積回路の例示的な実施態様の製造を例示するが、他の実施態様は、スタック内の 1 つのレベルの力学インダクタと、スタック内のより低いレベルのコンデンサと、を含むことができる。いくつかの実施態様では、超伝導集積回路は、スタック内の 1 つのレベルで 1 つ以上の力学インダクタと、スタック内のより高い又はより低いレベルの 1 つ以上のコンデンサと、を含むことができる。いくつかの実施態様は、スタック内の同じレベルで 1 つ以上の力学インダクタ及び 1 つ以上のコンデンサを含む。したがって、力学インダクタ及びコンデンサは、異なる層 (図 1 8) において同じ層 (図 2) にあることができ、これらの実施態様のいずれかにおいて、コンデンサは、流束貯蔵層を含むか、又は含まなくてもよい (省略する) ことができる。

10

【 0 2 6 9 】

拡散支援酸化

例えば、超伝導集積回路内にジョセフソン接合を製造する 1 つのアプローチは、例えば、超伝導体 - 絶縁体 - 超伝導体 (S I S) の三層などの三層構造を使用することである。一実施態様では、S I S 三層は Nb / Al - Al O_x / Nb 三層であり、ニオブを含む超伝導上部層及び下部層、並びにアルミニウム及び酸化アルミニウムの薄いバリア層を含む中間層である。三層ジョセフソン接合は、例えば、米国特許第 6 , 7 5 3 , 5 4 6 号により詳細に記載されている。

20

【 0 2 7 0 】

酸化アルミニウム (Al₂O₃) のバリア層の少なくともほぼ均一な厚さを有することが望ましい場合がある。ジョセフソン接合及びその領域の常態抵抗の積は、本明細書では R n A と称される。R n A は、バリア層の厚さと相関し得る。超伝導集積回路を含むウェハ全体にわたる R n A の測定は、バリア層の不均一な厚さを示す変動性を呈することができる。

【 0 2 7 1 】

三層の中間層は、下部超伝導層上にアルミニウムの層を堆積させ、酸化チャンバ内でアルミニウムの表面を酸化して Al₂O₃ の薄いバリア層を形成することによって形成することができる。バリア層の不均一な厚さは、酸化チャンバに入るガス状酸素の不均一な分布から生じ得る。酸化チャンバ内、及び各ウェハにわたる酸素のより均一な分布によって、Al₂O₃ の厚さの均一性を改善することができる。

30

【 0 2 7 2 】

酸素供給中の 1 つ以上のガス拡散器を使用して、例えば、ガスの粘性及び分子流特性を調節することによって、酸素のより均一な分布を提供することができる。ガス拡散器は、例えば、供給が酸化チャンバに到達するとガスが分配される領域を増加させることができる。ガス拡散器は、例えば、酸化チャンバに入る際の酸素ガスの流れの方向性を低減することができる。ガス拡散器は、例えば、酸化チャンバ内の酸素のより均質な分布に寄与し得る。

40

【 0 2 7 3 】

一実施態様では、複数のウェハは、酸化チャンバ内のウェハカセット内に垂直に積層される。1 つ以上のガス拡散体を使用して、ウェハへの酸素の流れを構成して、例えば、各ウェハ及び / 又はウェハ間にバリア層をより均一な厚さにさせることができる。

【 0 2 7 4 】

長距離カブラの製造

米国特許出願第 1 5 / 4 1 8 , 4 9 7 号に記載されている実施態様などのいくつかの実施態様では、超伝導集積回路は、1 つ以上のカブラを含むことができる。いくつかのカブラは、局部又は近隣の量子ビット間の通信結合を提供する。局部又は近隣の量子ビットは、量子ビットのトポロジ及び関連するカブラの同じトポロジに属し得る。他のカブラは、

50

局部又は近隣の量子ビットよりも遠くに位置する量子ビット間の通信結合を提供する長距離カプラである。長距離カプラは、トポロジ内の異なるトポロジに属する量子ビット間の通信結合を提供することができる。

【0275】

長距離カプラは、長距離カプラ専用の1つ以上の製造層を使用して、超伝導集積回路内に製造することができる。

【0276】

長距離カプラ用の専用の製造層を使用する1つの利点は、長距離カプラと局部カプラなどの他のカプラとの間の交点が、より容易に回避されることである。長距離カプラのための製造層を追加することにより、例えば、より大きなトポロジ柔軟性、特により高い接続性を提供することができる、超伝導集積回路の有効次元性を増加させる。

10

【0277】

長距離カプラ用の専用の製造層を使用する別の利点は、長距離カプラの製造に使用される材料が、量子ビット及び/又は局部カプラの製造に使用されるものとは異なり得ることである。例えば、量子ビット及び/又は局部カプラなどの他のデバイスの超伝導金属層を取り囲む誘電体の誘電率よりも低い誘電率を有する、長距離カプラの超伝導金属層を取り囲む誘電体を使用する性能的な利益が存在し得る。

【0278】

一実施態様では、低密度のプラズマ化学気相堆積SiO_x誘電体によって取り囲まれたニオブ超伝導金属層を使用して、量子ビット及び/又は局部カプラを製造する。この第1の誘電体の誘電率は、 5.5×10^{-6} の範囲とすることができる。ノイズは、量子ビットなどのデバイスの性能に影響を及ぼし得るため、第1の誘電体は、少なくとも部分的に低雑音誘電体となるように選択される。

20

【0279】

同じ実施態様では、誘電率が $< 4 \times 10^{-6}$ である第2の誘電体によって取り囲まれたニオブ超伝導金属層を使用して、長距離カプラを製造する。第2の誘電体はよりノイズが多い場合があるが、より低い誘電率の利点は、デバイス容量(この場合、長距離カプラの容量)を低下させることができることであり、それによって、長距離カプラの電位範囲を増大させることができる。

【0280】

本発明のシステム及び方法の特定の態様は、室温で実現されてもよく、特定の態様は、超伝導温度で実現されてもよい。したがって、本明細書及び添付の特許請求の範囲を通して、「超伝導金属」などの物理的構造を説明するために使用されるとき、用語「超伝導」は、適切な温度で超伝導体として挙動することができる材料を示すために使用される。超伝導物質は、本発明のシステム及び方法の全ての実施形態では、常に、超伝導体としての役割を果たす必要はない場合がある。

30

【0281】

例示された実施形態についての上記の説明は、要約書に記載されたものを含めて、排他的であることも、実施形態を開示された形態と同じものに限定的にも意図していない。特定の実施形態及び実施例が、本明細書において例示の目的で説明されるが、当業者であれば認識するように、本開示の趣旨及び範囲から逸脱することなく、様々な均等な変更がなされ得る。様々な実施形態について本明細書で提供される教示は、必ずしも以上で一般的に説明された例示的な超伝導回路及び構造ではなく、他の超伝導回路及び構造に適用することができる。

40

【0282】

上に記載の様々な実施形態は、更なる実施形態を提供するように組み合わせることができる。本明細書における特定の教示及び定義と矛盾しない程度に、本明細書で言及され、及び/又は出願データシートに記載されているD-Wave Systems Inc.に譲渡された全ての米国特許、米国特許出願公開、米国特許出願、米国仮特許出願第62/453,358号、外国特許、外国特許出願は、その全体が参照により本明細書に組み入

50

れられる。実施形態の態様を、必要であれば、様々な特許、出願及び刊行物のシステム、回路、及び概念を利用して変更することによって、更に他の実施形態を提供することが可能である。

【 0 2 8 3 】

これら及び他の変更を、上記の詳細な説明に照らして、実施形態に対して行うことができる。一般に、以下の請求項において、使用される用語は、本明細書及び請求項で開示された特定の実施形態に、請求項を限定するものと捉えるべきではなく、かかる請求項に与えられる均等の全範囲を併せた可能なあらゆる実施形態を含むものと捉えるべきである。したがって、特許請求の範囲は、本開示によって限定されない。

10

20

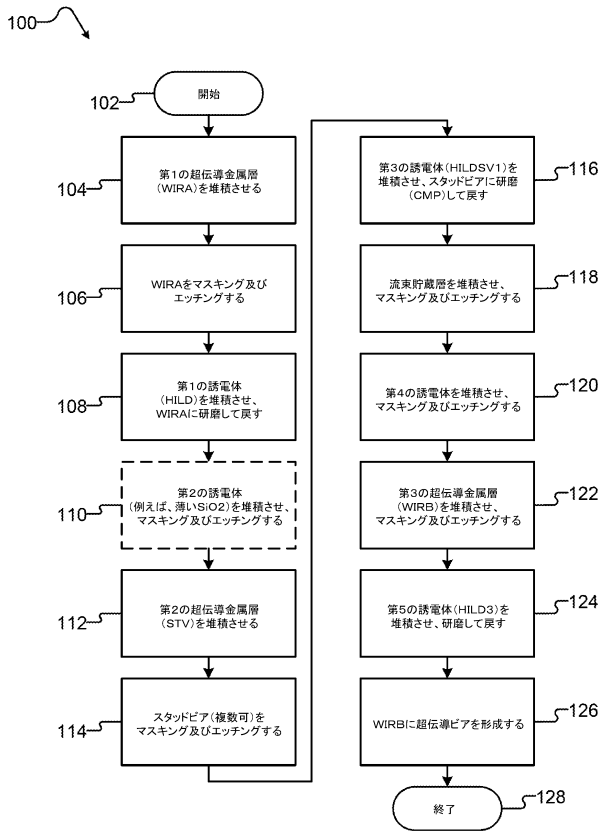
30

40

50

【図面】

【図 1】



【図 2 A】

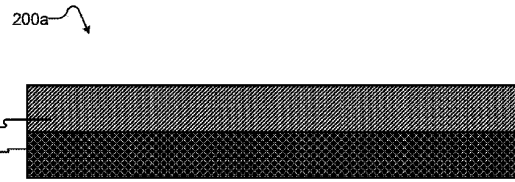


FIGURE 2A

10

20

【図 2 B】

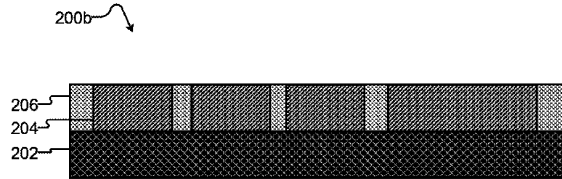


FIGURE 2B

【図 2 C】

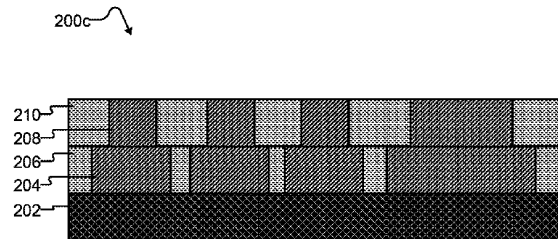


FIGURE 2C

30

40

50

【 2 D 】

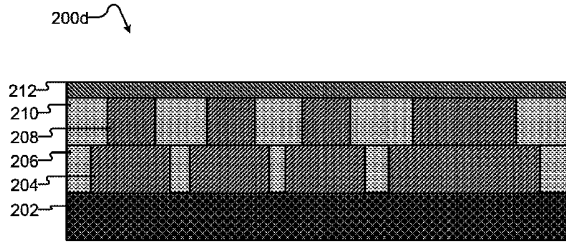


FIGURE 2D

【 2 E 】

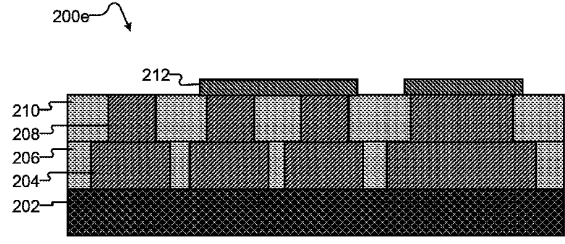


FIGURE 2E

10

【 2 F 】

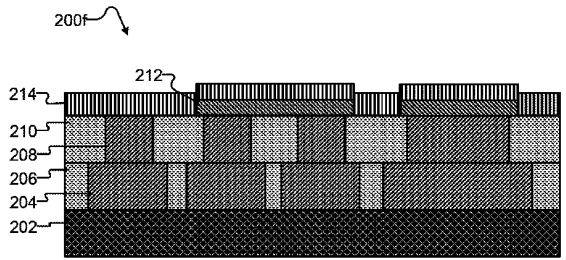


FIGURE 2F

【 2 G 】

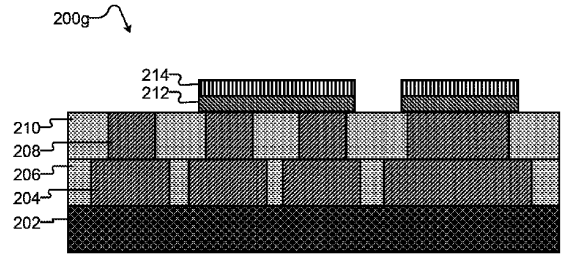


FIGURE 2G

20

【 2 H 】

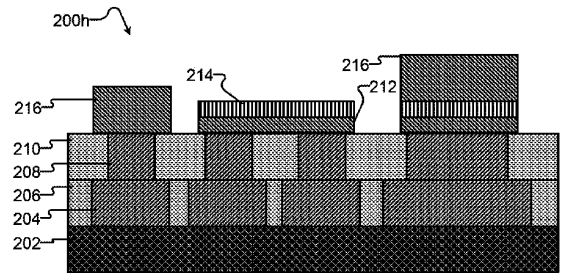


FIGURE 2H

【 2 I 】

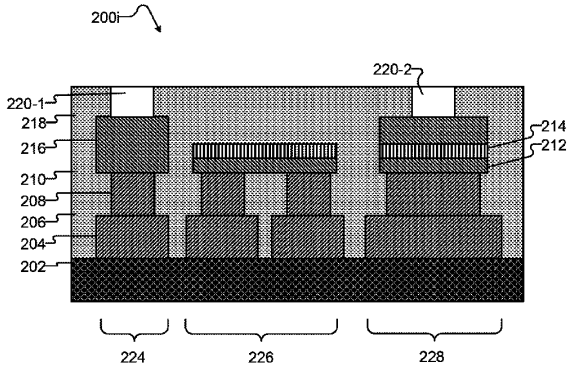


FIGURE 2I

30

40

50

【 図 2 J 】

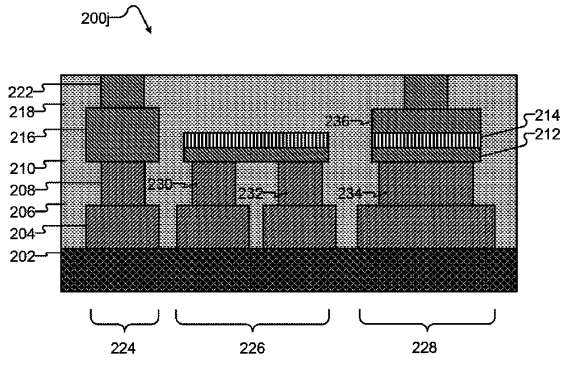
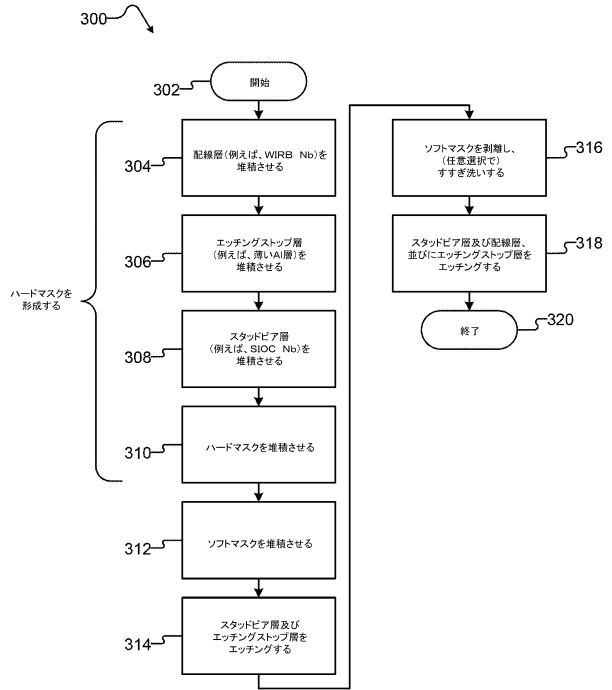


FIGURE 2J

【 図 3 】



ハードマスクを形成する

10

20

【 図 4 A 】

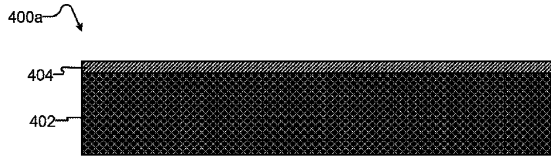


FIGURE 4A

【 図 4 B 】

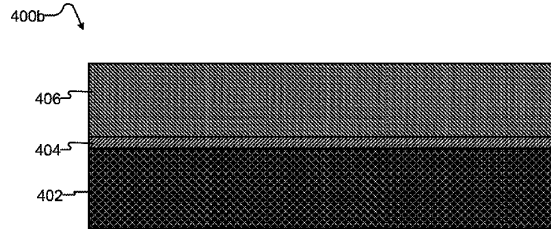


FIGURE 4B

30

40

50

【 4 C 】

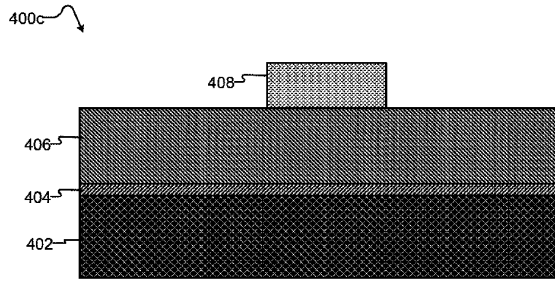


FIGURE 4C

【 4 D 】

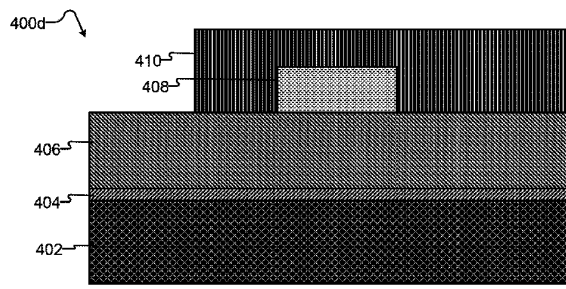


FIGURE 4D

10

【 4 E 】

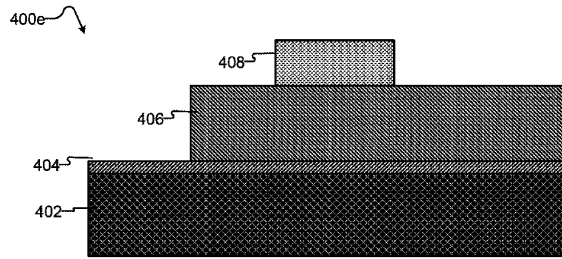


FIGURE 4E

【 4 F 】

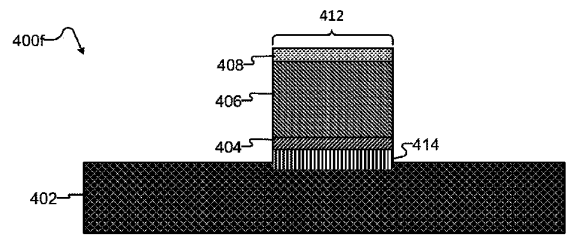


FIGURE 4F

20

【 5 A 】

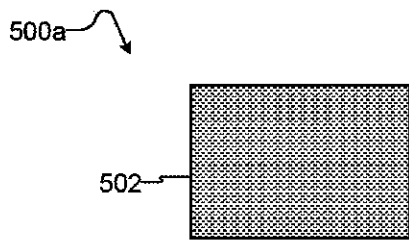


FIGURE 5A

【 5 B 】

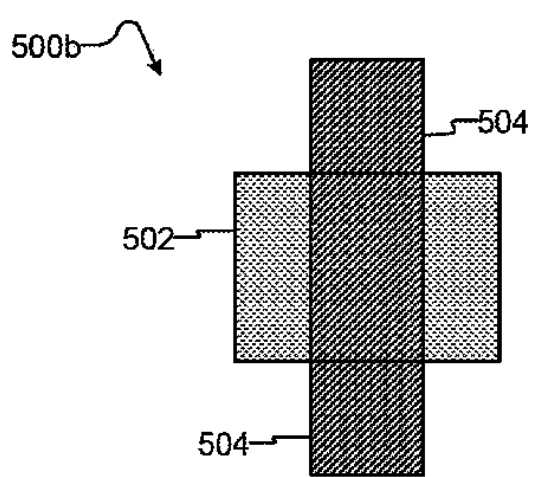


FIGURE 5B

30

40

50

【図5C】

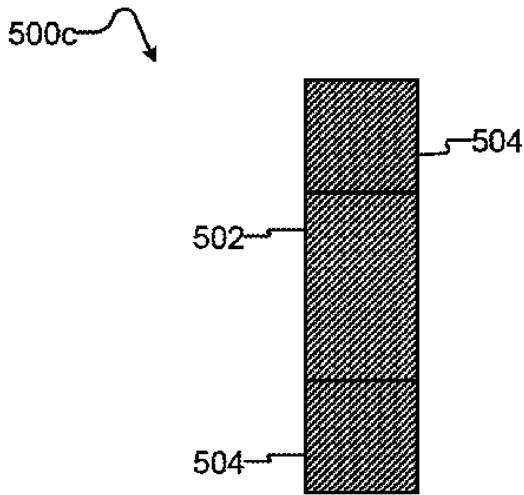


FIGURE 5C

【図5D】

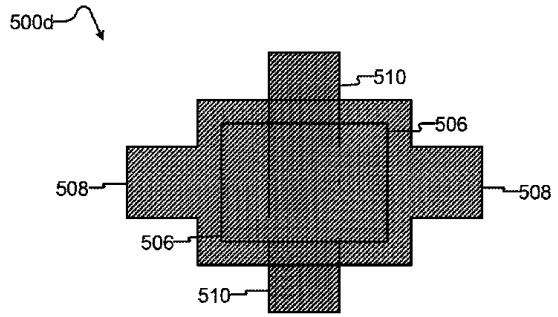


FIGURE 5D

【図5E】

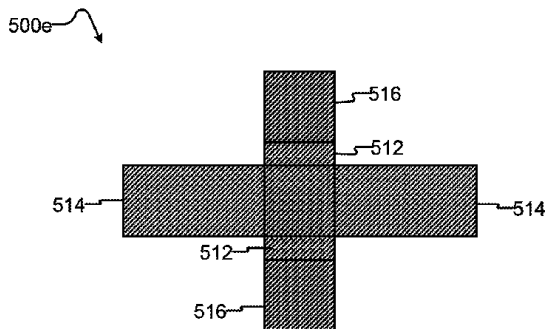
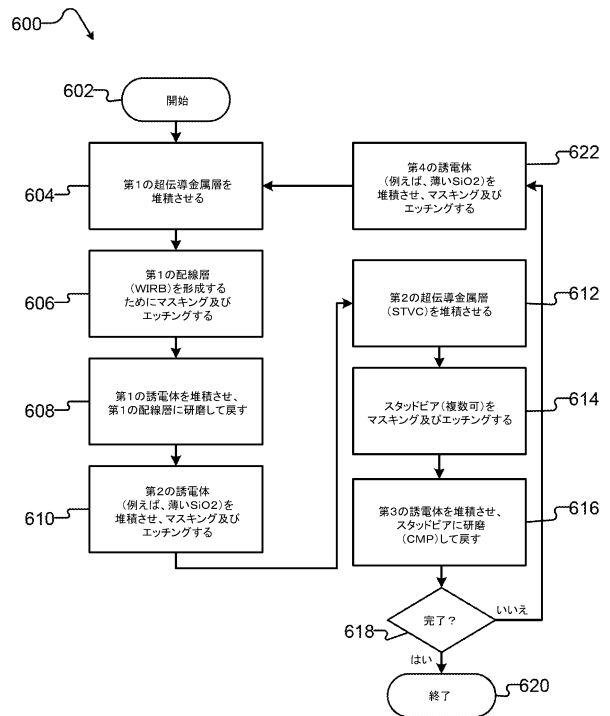


FIGURE 5E

【図6】



10

20

30

40

50

【 図 7 A 】

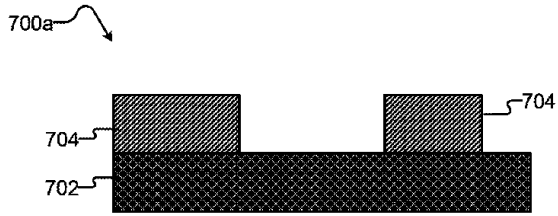


FIGURE 7A

【 図 7 B 】

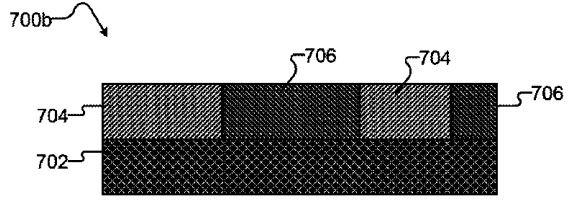


FIGURE 7B

【 図 7 C 】

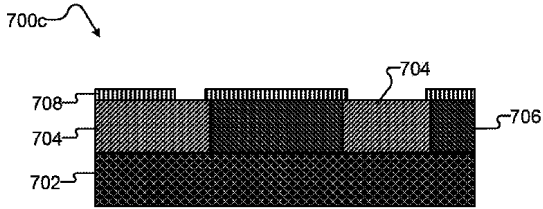


FIGURE 7C

【 図 7 D 】

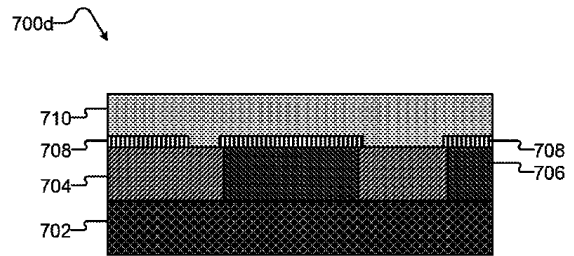


FIGURE 7D

【 図 7 E 】

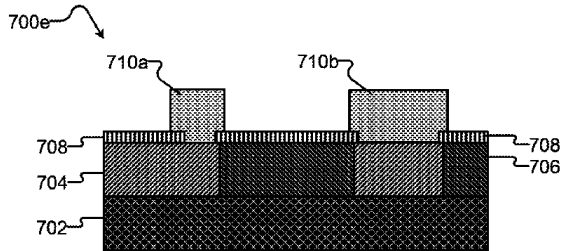


FIGURE 7E

【 図 7 F 】

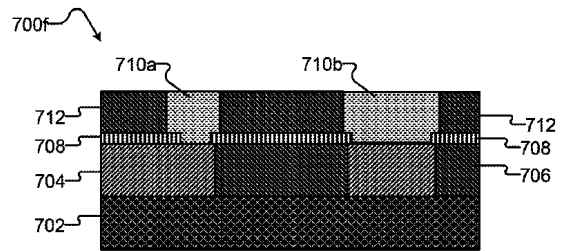


FIGURE 7F

10

20

30

40

50

【 7 G 】

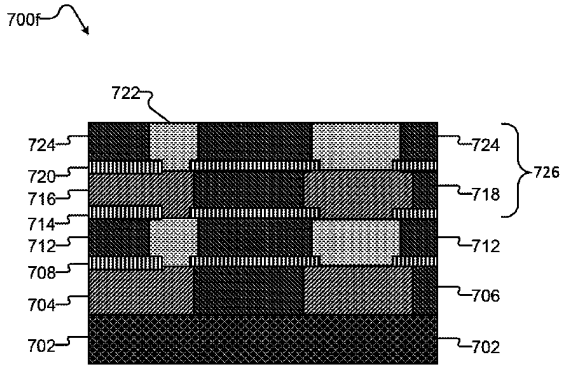


FIGURE 7G

【 7 H 】

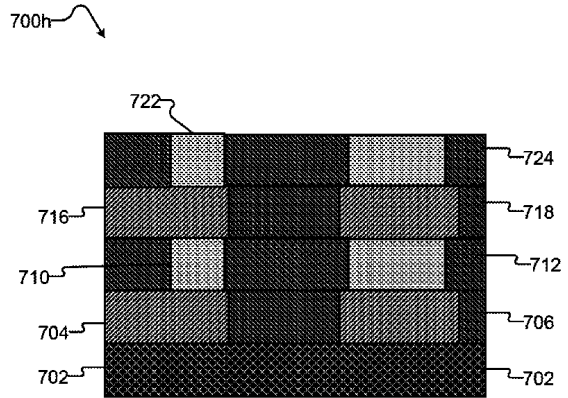


FIGURE 7H

10

【 8 A 】

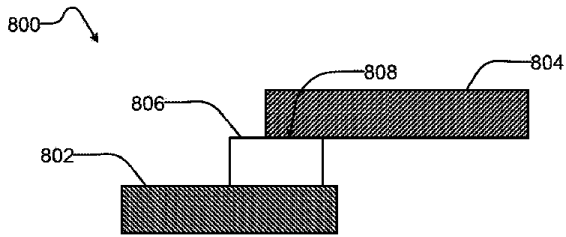


FIGURE 8A

【 8 B 】

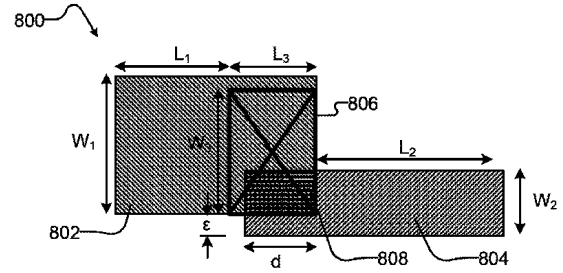


FIGURE 8B

20

30

40

50

【 図 8 C 】

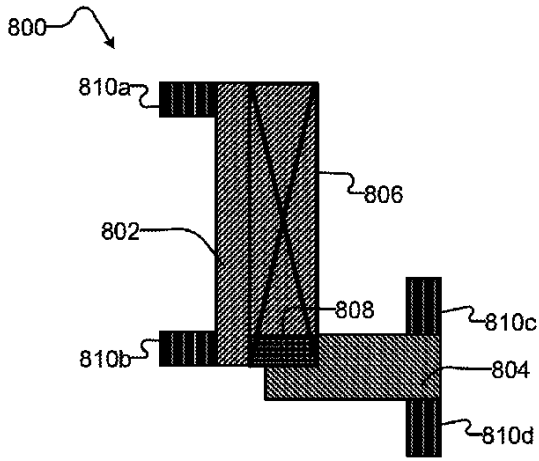
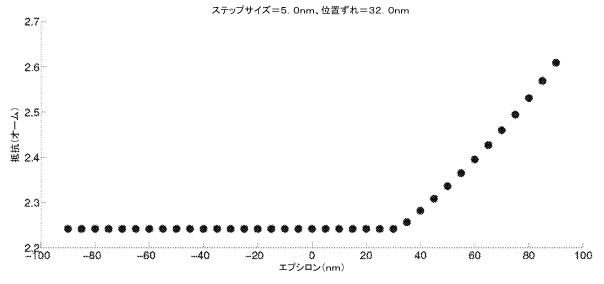


FIGURE 8C

【 図 9 】



10

【 図 1 0 A 】

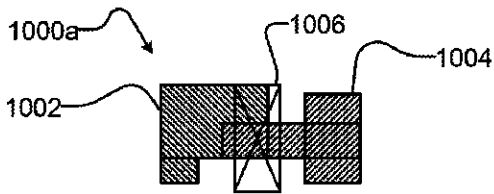


FIGURE 10A

【 図 1 0 B 】

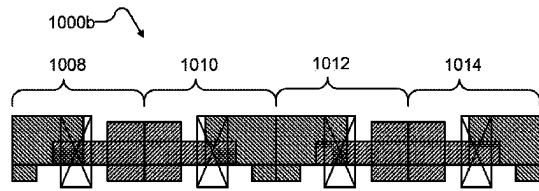


FIGURE 10B

20

30

40

50

【図 10C】

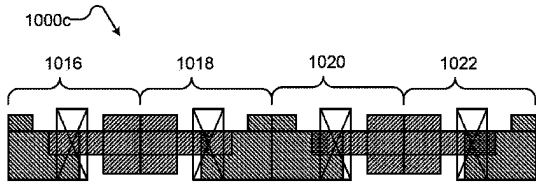


FIGURE 10C

【図 11】

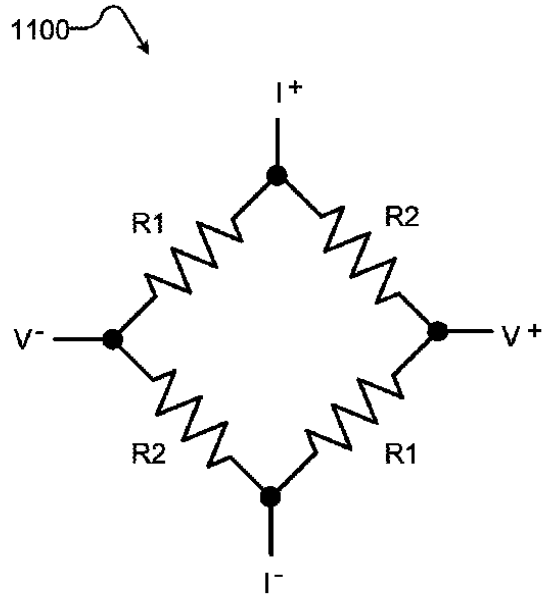
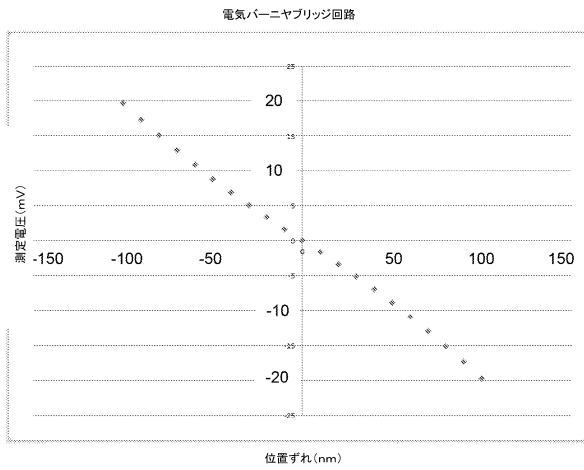


FIGURE 11

【図 12】



【図 13A】

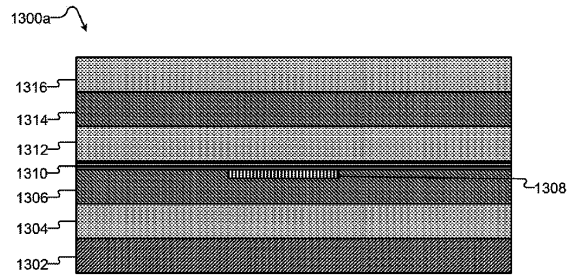


FIGURE 13A

10

20

30

40

50

【図 13 B】

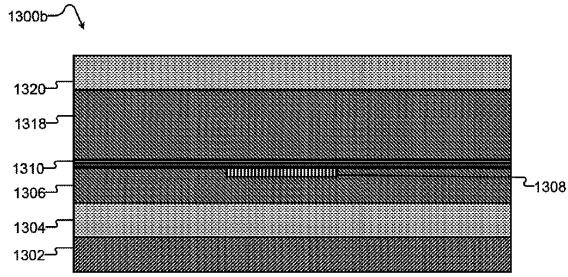


FIGURE 13B

【図 13 C】

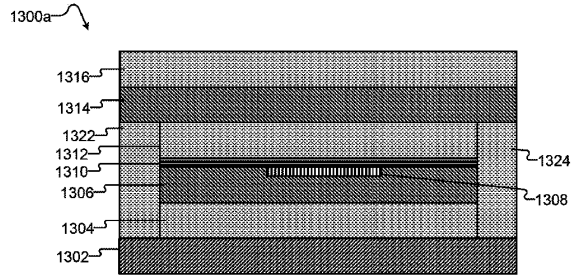


FIGURE 13C

10

【図 13 D】

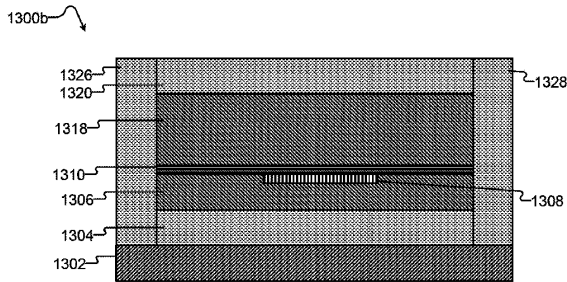


FIGURE 13D

【図 14 A】

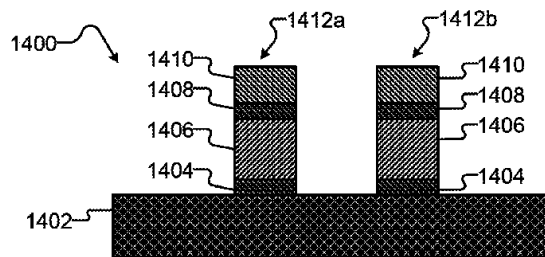


FIGURE 14A

20

【図 14 B】

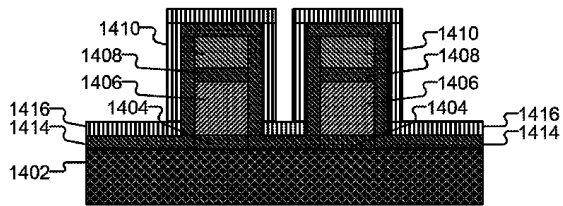


FIGURE 14B

【図 14 C】

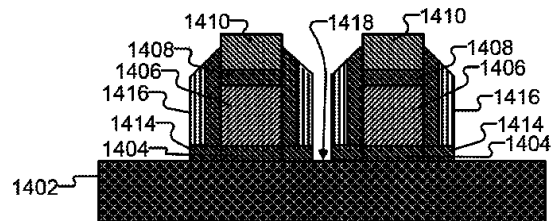


FIGURE 14C

30

40

50

【図15A】

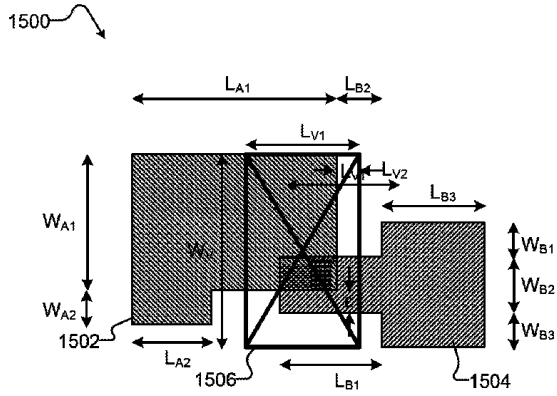


FIGURE 15A

【図15B】

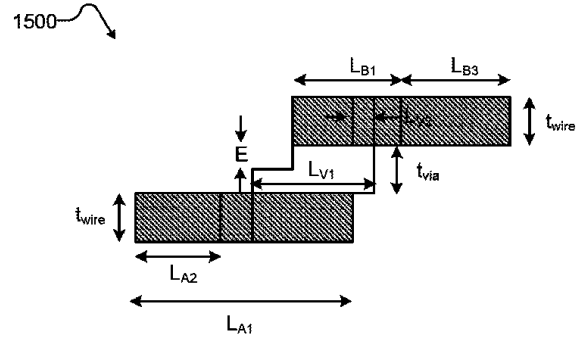
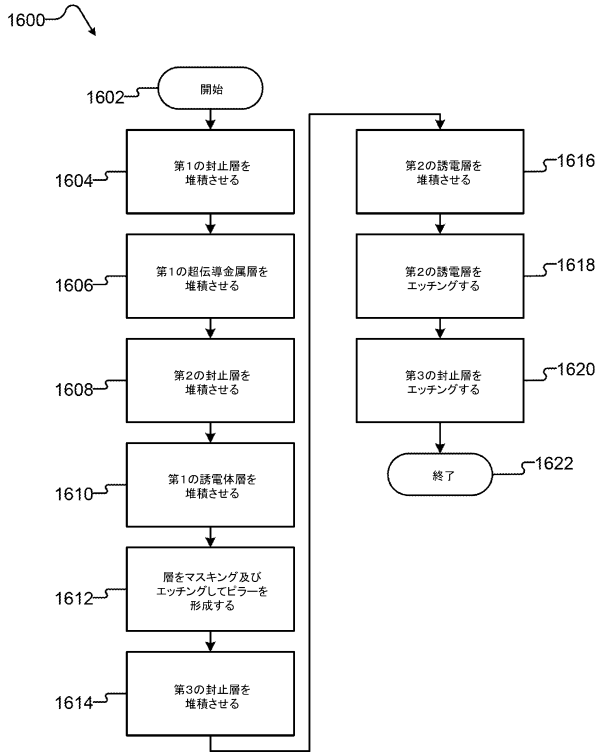


FIGURE 15B

10

【図16】



【図17A】

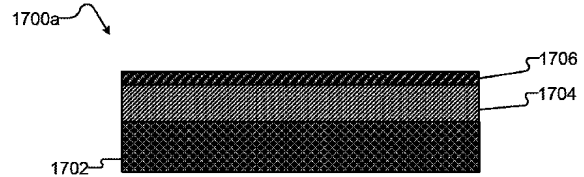


FIGURE 17A

20

30

40

50

【 17 B 】

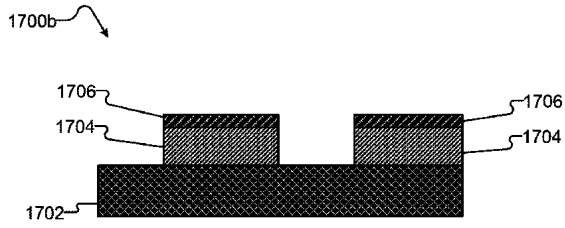


FIGURE 17B

【 17 C 】

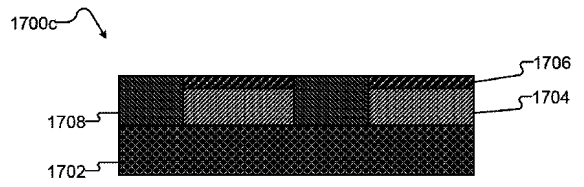


FIGURE 17C

10

【 17 D 】

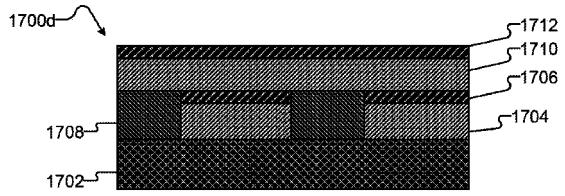


FIGURE 17D

【 17 E 】

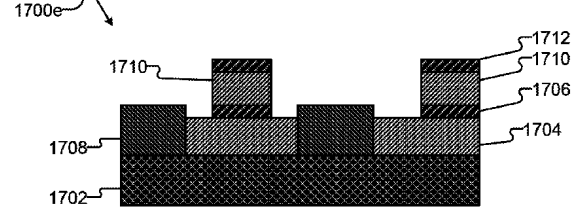


FIGURE 17E

20

【 17 F 】

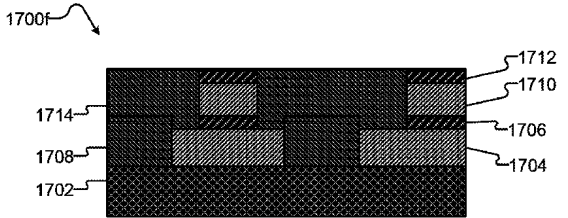


FIGURE 17F

【 17 G 】

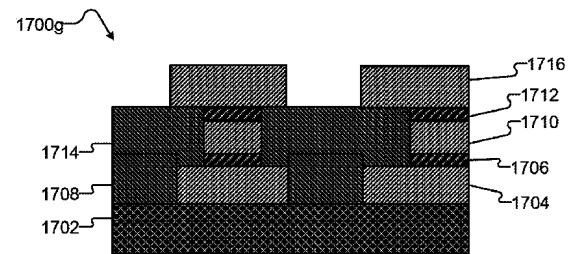


FIGURE 17G

30

40

50

【図18A】

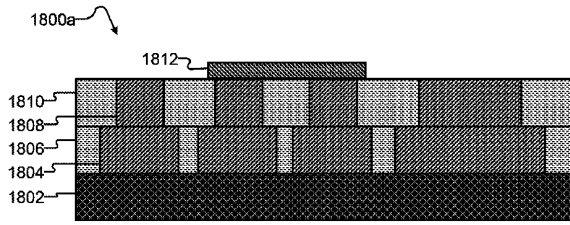


FIGURE 18A

【図18B】

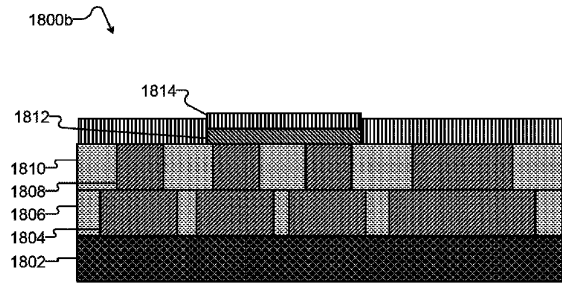


FIGURE 18B

10

【図18C】

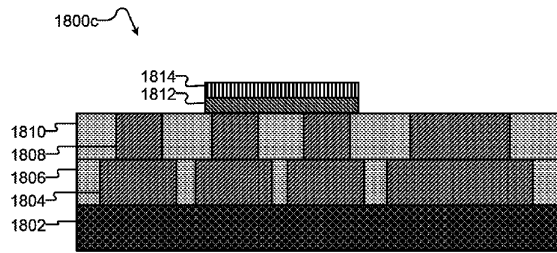


FIGURE 18C

【図18D】

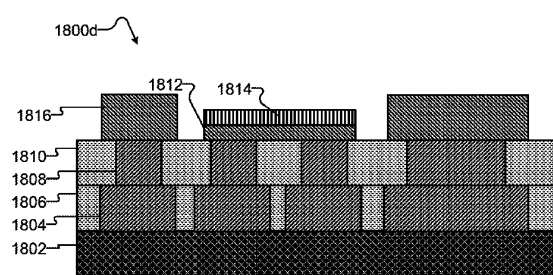


FIGURE 18D

20

【図18E】

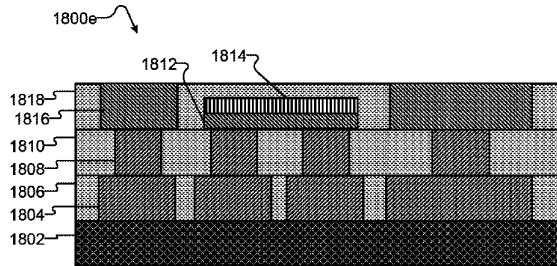


FIGURE 18E

【図18F】

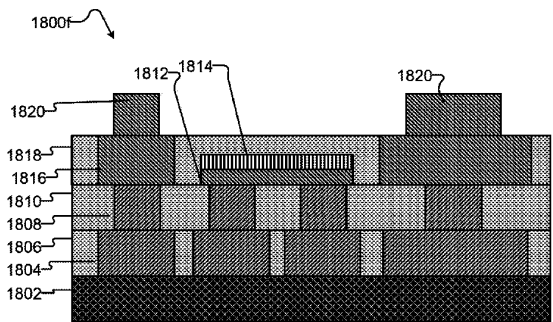


FIGURE 18F

30

40

50

【 18 G 】

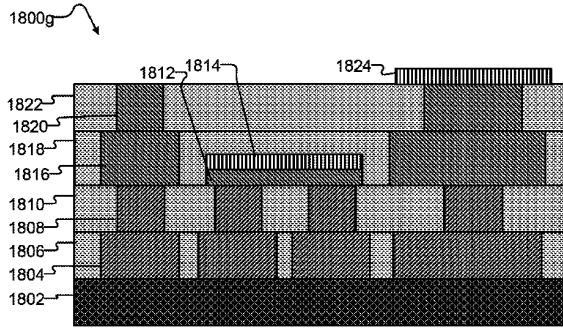


FIGURE 18G

【 18 H 】

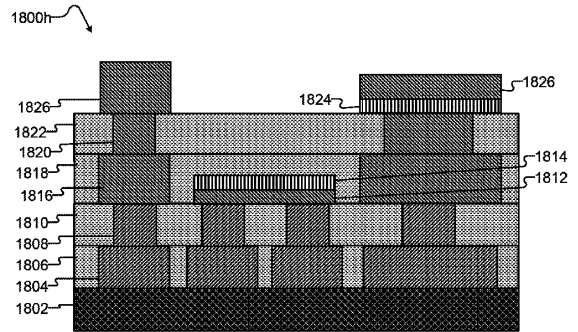


FIGURE 18H

10

【 18 I 】

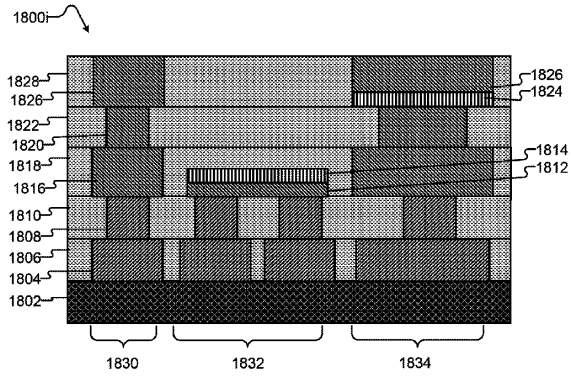


FIGURE 18I

【 18 J 】

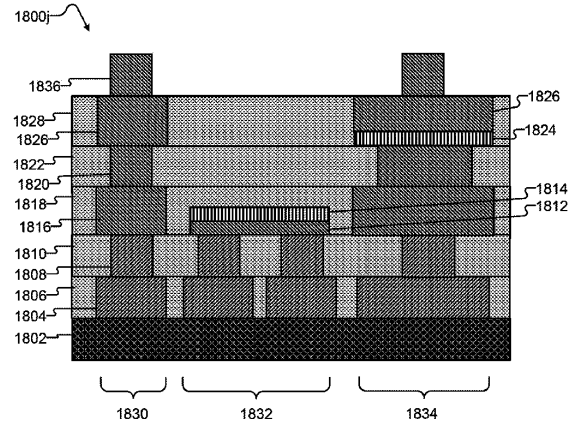


FIGURE 18J

20

30

40

50

フロントページの続き

- カナダ国, プリティッシュ コロンビア州 ブイ5ジー 4エム9, バーナビー, ベータ アベニュー
3033
- (72)発明者 オ, ビヨン, エイチ.
カナダ国, プリティッシュ コロンビア州 ブイ5ジー 4エム9, バーナビー, ベータ アベニュー
3033
- (72)発明者 ステッドラー, ダグラス, ピー.
カナダ国, プリティッシュ コロンビア州 ブイ5ジー 4エム9, バーナビー, ベータ アベニュー
3033
- (72)発明者 ステルブカ, エドワード, ジー.
カナダ国, プリティッシュ コロンビア州 ブイ5ジー 4エム9, バーナビー, ベータ アベニュー
3033
- (72)発明者 ブニク, ポール, アイ.
カナダ国, プリティッシュ コロンビア州 ブイ5ジー 4エム9, バーナビー, ベータ アベニュー
3033
- (72)発明者 ウィタカー, ジェド, ディー.
カナダ国, プリティッシュ コロンビア州 ブイ5ジー 4エム9, バーナビー, ベータ アベニュー
3033
- (72)発明者 アルトマーレ, ファビオ
カナダ国, プリティッシュ コロンビア州 ブイ5ジー 4エム9, バーナビー, ベータ アベニュー
3033
- (72)発明者 ハリス, リチャード, ジー.
カナダ国, プリティッシュ コロンビア州 ブイ5ジー 4エム9, バーナビー, ベータ アベニュー
3033
- (72)発明者 エンデルド, コリン, シー.
カナダ国, プリティッシュ コロンビア州 ブイ5ジー 4エム9, バーナビー, ベータ アベニュー
3033
- (72)発明者 スウェンソン, ローレン, ジェー.
カナダ国, プリティッシュ コロンビア州 ブイ5ジー 4エム9, バーナビー, ベータ アベニュー
3033
- (72)発明者 ラディジンスキー, ニコラス, シー.
カナダ国, プリティッシュ コロンビア州 ブイ5ジー 4エム9, バーナビー, ベータ アベニュー
3033
- (72)発明者 ヤオ, ジェイソン, ジェイ.
カナダ国, プリティッシュ コロンビア州 ブイ5ジー 4エム9, バーナビー, ベータ アベニュー
3033
- (72)発明者 ラディジンスキー, エリック, ジー.
カナダ国, プリティッシュ コロンビア州 ブイ5ジー 4エム9, バーナビー, ベータ アベニュー
3033
- 審査官 上田 智志
- (56)参考文献 米国特許第09520180 (US, B1)
特開2005-039244 (JP, A)
特開平05-114756 (JP, A)
特開昭51-084591 (JP, A)
TOLPYGO, Sergey K. et al., Advanced Fabrication Processes for Superconducting Very Large-Scale Integrated Circuits, IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY, 2016年01月19日, VOL. 26, NO. 3, 1100110, DOI: 10.1109/TASC.2016.2519388
- (58)調査した分野 (Int.Cl., DB名)
H01L 39/24、27/18、
23/522、21/768