

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第6199564号  
(P6199564)

(45) 発行日 平成29年9月20日(2017.9.20)

(24) 登録日 平成29年9月1日(2017.9.1)

(51) Int.Cl.

F I

H O 1 L 21/302 (2006.01)

H O 1 L 21/302 2 O 1 B

請求項の数 18 外国語出願 (全 17 頁)

(21) 出願番号	特願2013-4130 (P2013-4130)	(73) 特許権者	501419107
(22) 出願日	平成25年1月13日 (2013.1.13)		エフ・イー・アイ・カンパニー
(65) 公開番号	特開2013-157601 (P2013-157601A)		アメリカ合衆国オレゴン州 9 7 1 2 4, ヒルズバラ, ノースイースト・ドーソンクリーク・ドライブ 5 3 5 0
(43) 公開日	平成25年8月15日 (2013.8.15)	(74) 代理人	100103171
審査請求日	平成28年1月2日 (2016.1.2)		弁理士 雨貝 正彦
(31) 優先権主張番号	61/593, 281	(72) 発明者	チャド・ルー
(32) 優先日	平成24年1月31日 (2012.1.31)		アメリカ合衆国 オレゴン州 9 7 2 2 9
(33) 優先権主張国	米国 (US)		ポートランド エヌダブリュー ロック・クリーク・ブルヴァード 2 1 3 3 5
(31) 優先権主張番号	13/717, 272		
(32) 優先日	平成24年12月17日 (2012.12.17)		
(33) 優先権主張国	米国 (US)		
		審査官	鈴木 聡一郎
		最終頁に続く	

(54) 【発明の名称】 低エネルギー・イオン・ビーム・エッチング

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

ポリイミド材料を含む加工物の化学的に強化された集束イオン・ビーム・ミリングの方法であって、

酸素含有エッチング支援ガスを前記加工物の表面に供給するステップと、

前記ポリイミド材料に向かって集束イオン・ビームを導いて、前記酸素含有エッチング支援ガスの存在下で前記ポリイミド材料をエッチングするステップであり、前記集束イオン・ビームは、キセノン・イオンを含み、16 keV未満のビーム・エネルギーを有しており、前記酸素含有エッチング支援ガスと前記ポリイミド材料との反応によって酸素および前記ポリイミド材料を含むパッシベーション層を形成するのには不十分である、ステップと

を含む方法。

【請求項 2】

前記ポリイミド材料に向かって前記集束イオン・ビームを導くステップが、10 keV未満のビーム・エネルギーを有する集束イオン・ビームを導くステップを含む、請求項1に記載の方法。

【請求項 3】

酸素含有エッチング支援ガスを前記加工物に向かって導くステップが、O<sub>2</sub>を前記加工物に向かって導くステップを含む、請求項1または2に記載の方法。

【請求項 4】

ポリイミド材料を含む基板の化学的に強化された集束イオン・ビーム・ミリングの方法であって、

前記基板を集束イオン・ビーム・システム内へ装填するステップと、

酸素含有酸化剤を含むエッチング支援ガスを前記基板に向かって供給するステップと、

前記エッチング支援ガスの存在下で前記基板に、キセノン・イオンを含み、16 keV未満のビーム・エネルギーを有する集束イオン・ビームを導くステップと、

化学的に強化された集束イオン・ビーム・ミリングを使用してポリイミド材料を前記基板から除去するステップと

を含む方法。

【請求項5】

前記エッチング支援ガスが $O_2$ ガスを含む、請求項4に記載の方法。

【請求項6】

前記エッチング支援ガスが $N_2O$ または $NO_x$ を含む、請求項4に記載の方法。

【請求項7】

前記 $NO_x$ は、 $NO_2$ または $NO$ である、請求項6に記載の方法。

【請求項8】

前記ポリイミド材料が膜状である、請求項4から7のいずれか一項に記載の方法。

【請求項9】

前記集束イオン・ビームのエネルギーが8 keVから14 keVである、請求項4から8のいずれか一項に記載の方法。

【請求項10】

化学的に強化された集束イオン・ビーム・ミリングを使用してポリイミド材料を前記基板から除去するステップが、前記基板のイオン・ビーム・スパッタリングおよびガス支援エッチングを含む、請求項4から9のいずれか一項に記載の方法。

【請求項11】

前記集束イオン・ビーム・システムが、 $Xe^+$ プラズマ集束イオン・ビーム・システムを含む、請求項4から10のいずれか一項に記載の方法。

【請求項12】

前記集束イオン・ビームのイオン、前記エッチング支援ガスおよび前記ポリイミド材料の相互作用によって、前記基板上に耐エッチング性のパッシベーション層が形成されない、請求項4から11のいずれか一項に記載の方法。

【請求項13】

前記集束イオン・ビーム・システムの電流密度が $0.5 \text{ pA} / \mu\text{m}^2$ 超、ドウェル時間が1000ナノ秒未満、室圧が $0.1 \times 10^{-5}$ トル超である、請求項4から12のいずれか一項に記載の方法。

【請求項14】

ミリング速度が $0.3 \mu\text{m}^3 / \text{nC}$ よりも大きい、請求項4から13のいずれか一項に記載の方法。

【請求項15】

化学的に強化された集束イオン・ビーム・ミリングを使用してポリイミド材料を前記基板から除去するステップが、損傷したポリイミド層を除去して、前記損傷した層の下の損傷していないポリイミド層を露出させるステップを含み、前記損傷していない層が、前記集束イオン・ビームによって損傷せず、その電気絶縁特性を維持する、請求項4から14のいずれか一項に記載の方法。

【請求項16】

前記集束イオン・ビームのビーム・エネルギーが8 keV以下である、請求項15に記載の方法。

【請求項17】

前記エッチング支援ガスが水蒸気、 $O_2$ 、 $N_2O$ または $NO_x$ を含む、請求項15または16に記載の方法。

10

20

30

40

50

## 【請求項 18】

前記  $\text{NO}_x$  は、 $\text{NO}_2$  または  $\text{NO}$  である、請求項 17 に記載の方法。

## 【発明の詳細な説明】

## 【技術分野】

## 【0001】

本発明は、ポリイミド膜または他の類似の有機膜の集束イオン・ビーム・エッチングに関し、より具体的には、 $\text{Xe}^+$  プラズマ集束イオン・ビームを使用したポリイミドのエッチングに関する。

## 【背景技術】

## 【0002】

最新の集積回路 (IC) は、導体、および絶縁体、半導体など基板材料の複数の層からなる。IC 内の回路または他の内部に隠れた特徴部分の検査および編集では、目標エリアまで進み、複数の基板材料層のうちの 1 つまたは複数の層を貫いてミリングする必要がある。回路編集 (CE) は、設計デバッグ (debug) 段階中に必要なマスク・セットの数を減らすことによって IC の開発費を低減させ、市場に出すまでの総時間を短縮する。

## 【0003】

現在、大部分の CE 作業は集束イオン・ビーム (FIB) システムを使用して実行されており、FIB システムは、基板材料をミリングによって除去して隠れた特徴部分を露出させるために、また材料を高精度で付着させるために一般的に使用されている。これらの能力を使用して、デバイス内の回路を切断および接続し、電気試験のためのプローブ・ポイント (probe point) を形成することができる。応用例には、設計変更の妥当性の検証、生産段階のデバイスのデバッグおよび最適化、費用と時間のかかるマスク・セットの製造を省いた新たなデバイスの試作などがある。

## 【0004】

FIB システムでの材料除去は一般に、比較的大きなイオンのビームを使用して基板材料をスパッタリングにより物理的に除去することによって行われる。大部分の FIB システムが、液体金属イオン源 (LMIS) によって生成されたガリウム・イオン ( $\text{Ga}^+$ ) を使用している。これは、液体金属イオン源が、製造しやすく、室温で動作し、信頼性が高く、寿命が長く、安定しているためである。さらに、FIB 処理中に加工物の表面に化学剤を導入して、選択した材料のミリング速度を都合よく操作することができる。化学剤を使用して FIB ミリング速度を高める、または抑制する操作は一般に「ガス支援エッチング (Gas-Assisted Etching) (GAE)」と呼ばれている。

## 【0005】

ポリイミド (PI) は、IC パッケージ・デバイスに対する一般的な封入材料であるため、回路編集または故障解析中にポリイミド層の一部を除去する必要性がしばしばある。一般的なポリイミド除去法は、 $\text{Ga}^+$  FIB を用いて水蒸気の存在下でポリイミド層をエッチングする方法である。水蒸気は、エッチング支援ガスとして機能し、水蒸気は、ポリイミドのエッチング速度を、デフォルト (default) のミリング速度 (エッチング支援ガスなしで FIB を使用した場合のミリング速度と定義される) の 5 倍から 10 倍に高めることが知られている。ポリイミドなどの有機化合物 (炭素を含む化合物) に対するエッチング支援ガスとして水蒸気を使用することは、参照によって本明細書に組み込まれる Russell 他「Method for water vapor enhanced charged-particle-beam machining」という名称の米国特許第 5,958,799 号 (1999 年 9 月 28 日) に記載されている。

## 【0006】

$\text{Ga}^+$  FIB は、数十年の間、IC 製造で使用する最も一般的なタイプの FIB であり続けているが、その一方で、キセノン・イオン ( $\text{Xe}^+$ ) などの不活性イオンを使用するプラズマ FIB 機器は、液体金属イオン源を使用する従来の  $\text{Ga}^+$  FIB にはないいくつかの著しい利点を提供する。例えば、あるプラズマ FIB は、従来のガリウム・ベースの FIB で使用されるビーム電流の 20 倍から 100 倍のビーム電流を供給し、その結果

10

20

30

40

50

、材料除去速度は大幅に増大する。さらに、不活性イオンを使用するプラズマ F I B は、 $Ga^+$  の注入によって引き起こされるものなど、問題のあるイオン汚染を引き起こさない。

【 0 0 0 7 】

ポリイミド膜または他の類似の有機膜によってカプセル封入された I C パッケージ・デバイスの回路編集または故障解析に  $Xe^+$  プラズマ F I B などのプラズマ F I B を使用することの著しい 1 つの欠点は、 $Xe^+$  プラズマ F I B と一緒に使用したときに、水蒸気が、ポリイミドに対するエッチング支援ガスとして機能するように思われないことである。レーザおよびプラズマ・エッチング・ツールを含め、ポリイミドを除去する他の外位置 ( *ex - situ* ) の ( F I B 真空室外で実施する ) 方法も知られてはいるが、先行技術において、 $Xe^+$  F I B ツールに対して有効な原位置 ( *in - situ* ) 法は知られていない。

10

【 0 0 0 8 】

したがって、ポリイミド膜および他の有機膜を原位置でより迅速にかつより効率的にエッチングする方法が求められている。

【先行技術文献】

【特許文献】

【 0 0 0 9 】

【特許文献 1】米国特許第 5 , 9 5 8 , 7 9 9 号

【発明の概要】

20

【発明が解決しようとする課題】

【 0 0 1 0 】

本発明の好ましい一実施形態は、炭素質材料または他の有機材料の新規の化学剤支援 ( *chemical - assisted* ) イオン・ビーム・エッチング法を対象とする。

【課題を解決するための手段】

【 0 0 1 1 】

ビーム・エネルギーを低くすると、 $O_2$  などの酸素含有ガスは、非常に有効なエッチング支援ガスとして機能し始めることを本出願の出願人は見出した。例えば、8 k e V から 1 4 k e V のビーム・エネルギーを有する  $Xe^+$  プラズマ F I B およびエッチング支援ガスとしての  $O_2$  を使用する実施形態は、ポリイミドのデフォルトのミリング速度の 3 0 倍

30

【 0 0 1 2 】

以上では、以下の本発明の詳細な説明をより十分に理解できるように、本発明の特徴および技術上の利点をかなり広く概説した。以下では、本発明の追加の特徴および利点を説明する。開示される着想および特定の実施形態を、本発明の同じ目的を達成するために他の構造を変更しまたは設計するベースとして容易に利用することができることを当業者は理解すべきである。さらに、このような等価の構造は、添付の特許請求の範囲に記載された本発明の趣旨および範囲を逸脱しないことを当業者は理解すべきである。

【 0 0 1 3 】

次に、本発明および本発明の利点のより完全な理解のため、添付図面に関して書かれた以下の説明を参照する。

40

【図面の簡単な説明】

【 0 0 1 4 】

【図 1】封入ポリイミド層を有する一般的な I C パッケージ・デバイスの一部分を示す概略図である。

【図 2】F I B を使用した一般的なガス支援エッチング・プロセスの概略図である。

【図 3】より高いエネルギーの  $Xe^+$  プラズマ・イオン・ビームを使用したポリイミド・エッチングの顕微鏡写真である。

【図 4】より高い加速電圧の  $Xe^+$  プラズマ F I B を使用したガス支援エッチングの概略図である。

50

【図 5】より低い加速電圧の  $X e^+$  プラズマ F I B を使用した  $O_2$  支援 (  $O_2$  - a s s i s t e d ) エッチングの概略図である。

【図 6】より低いエネルギーの  $X e^+$  プラズマ・イオン・ビームを使用したポリイミド・エッチングの F I B 顕微鏡写真である。

【図 7】順次付着させた 2 つのポリイミド層間の境界面を露出させるために上位のポリイミド層をエッチングによって除去した、大面積ポリイミド除去の F I B 顕微鏡写真である。

【図 8】下位のポリイミド層をエッチングによって除去し、その下の酸化物層を露出させた、図 7 の大面積ポリイミド除去の F I B 顕微鏡写真である。

【図 9】吸収された ( ステージ ) 電流を、本発明の一実施形態のポリイミド・エッチング処理中の時間に対して示した図である。

【図 10】部分的に損傷したポリイミド表面の低倍率 F I B 顕微鏡写真である。

【図 11】ポリイミド薄膜 1001 の図 10 と同じセクションを示す図であり、長方形の走査ボックスは修復を実行する位置を示す図である。

【図 12】図 10 および 11 の損傷したポリイミド膜の修復の進捗を示す一連の F I B 画像である。

【発明を実施するための形態】

【0015】

添付図面は、原寸に比例して示すことを意図されていない。これらの図面では、さまざまな図に示されている同一の構成要素またはほぼ同一の構成要素が、同様の符号によって示されている。見やすくするため、全ての図面の全ての構成要素に符号が付けられているわけではない。

【0016】

本発明の好ましい実施形態は、 $X e^+$  プラズマ F I B を使用する新規のポリイミド除去法を対象としている。純粋な酸素ガス ( $O_2$ ) をエッチング支援ガスとして使用することの P I のエッチング速度に対する効果も、比較的高いビーム・エネルギー (  $20\text{ keV}$  超 ) で使用したときには、あったとしてもあまり大きいものではない。しかしながら、 $X e^+$  プラズマ F I B のビーム・エネルギーを低くすると、 $O_2$  は、非常に有効なエッチング支援ガスとして機能し始めることを本出願の出願人は見出した。本発明の好ましい一実施形態によれば、特定のポリイミド組成に応じて、 $8\text{ keV}$  から  $14\text{ keV}$  のビーム・エネルギーを有する  $X e^+$  プラズマ F I B およびエッチング支援ガスとしての  $O_2$  を使用すると、エッチング速度の増大が、デフォルトのミリング速度に比べて 30 倍近くになりうる。

【0017】

$G a^+$  F I B を使用してポリイミド ( P I ) 膜をエッチングする従来の方法は、エッチング支援ガスとして水蒸気を使用する方法である。この技法は、 $30\text{ keV}$  の加速電圧 ( ビーム・エネルギーとも呼ばれる ) で約  $2\text{ }\mu\text{m}^3/\text{nC}$  の P I 除去速度を与えるが、実際の除去速度は、除去する P I の正確なタイプによってかなりの変動を示す。上で論じたとおり、この除去速度は一般に、( エッチング支援ガスを使用しない F I B に関する ) デフォルトのミリング速度の 5 倍から 10 倍である。

【0018】

$X e^+$  プラズマ F I B を使用することには、より従来の  $G a^+$  F I B にはないいくつかの利点があるが、 $X e^+$  プラズマ F I B を使用したときには、どのビーム・エネルギーにおいても、水蒸気 ( $H_2O$ ) の使用は、P I のエッチング速度をあまり増大させない。純粋な酸素ガス ( $O_2$ ) をエッチング支援ガスとして使用することの P I のエッチング速度に対する効果も、比較的高いビーム・エネルギー (  $20\text{ keV}$  超 ) で使用したときには、あったとしてもあまり大きいものではない。

【0019】

しかしながら、意外にも、 $X e^+$  プラズマ F I B のビーム・エネルギーを低くすると、 $O_2$  は、非常に有効なエッチング支援ガスとして機能し始めることを本出願の出願人は見出した。後により詳細に説明するが、 $X e^+$  プラズマ F I B を使用したポリイミド・エッ

10

20

30

40

50

チングの典型的なあるデフォルトのミリング速度は約  $0.3 \mu\text{m}^3/\text{nC}$  である。30 keV のビーム・エネルギーにおいて、ポリミドのエッチング速度に対する  $\text{O}_2$  を追加することの効果はほとんどまたは全くない。しかしながら、ビーム・エネルギーを低くすると、16 keV 未満でエッチング速度の向上が現われ始め、8 keV から 14 keV の範囲で最も大きな増大が見られる。ポリミドの組成によっては、本発明の好ましい一実施形態を使用することによるエッチング速度の増大が、デフォルトのミリング速度に比べて 30 倍近くになりうる。

#### 【0020】

本明細書の議論の多くは、 $\text{Xe}^+$  プラズマ FIB を使用してポリミドをエッチングすることに限定されているが、本発明のいくつかの実施形態は、従来の液体金属イオン源を使用した FIB または異なるイオン種を使用したプラズマ FIB を含む、他のタイプの集束イオン・ビームを利用することができる。同様に、本発明の実施形態は、ポリミド膜とだけでなく、他の類似の有機膜と一緒に使用することができる。

10

#### 【0021】

図1は、封入ポリミド層102と、エッチング・ストップとして機能する二酸化シリコン層104（後に論じる）と、数本の金属線106とを含む、一般的なICパッケージ・デバイス100の一部分を示す概略断面図である。図1のICパッケージ・デバイスで、ポリミドは2つのステップで付着させたものであり、その結果、2つのポリミド層（PI1およびPI2）が形成されている。これらのポリミド層は互いにわずかに異なる層とすることができる。回路編集または故障解析の簡略化された典型的な一例の目標は、最初にミリングまたはエッチングによってポリミド層102を除去することによって、金属線106を露出させることである。

20

#### 【0022】

図2は、FIB202を使用して加工物を処理する一般的なガス支援エッチング・プロセスの概略図である。上で論じたとおり、FIBシステムにおける材料の除去は、比較的大きなイオンのビームを使用して、加工物204から材料をスパッタリングにより物理的に除去することによって達成することができる。エッチング・ガス（前駆体ガスと呼ばれる）を使用することによって、FIBシステムによるスパッタリングをさらに強化し、前述の問題のうちのいくつかの問題を最小限に抑えることができる。エッチング・ガスは、加工物の表面にガス分子206が吸着するように、ガス送達ノズル201を通して加工物の表面の近くに導入される。

30

#### 【0023】

画定されたエリアをイオン・ビーム202で走査すると基板の表面が局所的に加熱される。すなわちフォノン密度が局所的に高まる。それらのフォノンは、おそらくはイオン・ビーム202によって誘起された2次電子とともに、吸着した前駆体ガスの分子206を活性化（または分解）すると考えられる。活性化されたこれらの吸着分子206は次いで表面分子205と反応して、その下の表面のエッチングを促進する。次いで、このプロセスの揮発性生成物208が表面から離脱し、それらの揮発性生成物208は、スパッタリングによって除去された一部の表面分子と一緒に、真空システムのポンプによって排出される。一部のエッチング・ガスは、加工物の表面と直接に（すなわちビームによる活性化を必要とすることなく）反応する。

40

#### 【0024】

図3は、より高いエネルギーの $\text{Xe}^+$  プラズマ・イオン・ビームを使用したポリミド・エッチングの顕微鏡写真である（加工物の画像化にはFIBを使用した）。図3に示すように、ボックス302内においてポリミド300の一部がエッチングによって除去されているが、ミリングされたボックスの床304は依然としてポリミドであり、そのため、除去したいポリミド材料の全てが除去されているわけではない。この画像において、ミリングされたボックスの内側と外側の両方のポリミド表面が明灰色に見えることは重要である。このタイプのFIB画像において、ポリミドなどの電気絶縁材料は暗い色に見えるはずである。このコントラストの変化は、イオン・ビームによって引き起こされ

50

た損傷の結果としてポリイミドが電気伝導性になったことを示している。現時点で、損傷の正確な機構についてははっきりとは分かっていないが、本出願の出願人は、(ミリングまたは画像化の目的のビームにさらされた)上面がある程度、電気伝導性になるような方式で、ビーム・エネルギーが分子を配列し直したものと理論づけしている。

#### 【0025】

さらに、この損傷の結果、エッチング・ガスとして使用されている酸素に対して化学的に抵抗性のパッシベーション層が形成されると本出願の出願人は考えている。すなわち、 $30\text{ keV}$ のイオン・ビーム(例えば $\text{Xe}^+$ )によって損傷したポリイミドの反応性は、損傷していないポリイミドのそれよりもかなり低い。図3に示されているとおり、破線の円310および312によって示されたエリア内のミリングされたボックスの床の縁の損傷していないより暗色のポリイミドは、より明灰色のエリアよりも大規模にエッチングされているように見える。

#### 【0026】

図4は、より高い加速電圧( $16\text{ keV}$ 超)の $\text{Xe}^+$ プラズマFIBを使用したガス支援エッチングの概略図である。図2と同様に、表面にガス分子406が吸着するように、加工物の表面の近くにエッチング・ガス(この場合には $\text{O}_2$ )が導入される。 $\text{Xe}^+$ プラズマFIB402中のより高いエネルギーのイオンは、表面分子405と反応し、酸素と反応してエッチングを促進することがあまりないパッシベーション層404の形成を引き起こすと本出願の出願人は考えている。その結果、イオン・スパッタリングが、材料除去に対して意味のある唯一の機構になる。さらに、このイオン・ビームは、損傷したポリイミド分子410をスパッタリングによって除去するとき、その下のポリイミド分子405にも損傷を与え、その結果、損傷していないポリイミドのエッチングを酸素化学反応が支援する機会はほとんどない。

#### 【0027】

より低いビーム・エネルギーでは、イオン・ビームに起因するポリイミドの損傷ははるかに小さいと本出願の出願人は考えている。その結果、損傷していないポリイミドのエッチングを酸素化学反応が増強する機会が生じる。図5は、より低い加速電圧( $8\text{ keV}$ から $14\text{ keV}$ )の $\text{Xe}^+$ プラズマFIB502を使用したガス支援( $\text{O}_2$ )エッチングの概略図である。このエッチングは例えば、電流密度が $0.5\text{ pA}/\mu\text{m}^2$ 超の $\text{Xe}^+$ プラズマFIB、1000ナノ秒未満のドウェル時間(dwelling time)、 $0.1 \times 10^{-5}$ トル超の室圧を使用して実行することができる。一実施形態では、このビームが、 $8\text{ keV}$ の $\text{Xe}^+$ プラズマFIBであり、電流が $4\text{ pA}/\mu\text{m}^2$ 、ドウェル時間=100ナノ秒、画素の重なり(pixel overlap)=0%、 $\text{O}_2$ 弁が開いた状態での室圧= $2 \times 10^{-5}$ トルである。これらの条件は、除去速度が約 $9.8\text{ }\mu\text{m}^3/\text{nC}$ になるように実験的に決定したものであり、一方、 $\text{Xe}^+$ プラズマFIBを使用してポリイミドをエッチングする従来の方法( $30\text{ keV}$ の水蒸気支援(water-assisted)エッチング)の除去速度は約 $0.35\text{ }\mu\text{m}^3/\text{nC}$ でしかない。この例では、本発明の好ましい一実施形態を使用して達成される除去速度が、水支援エッチングを使用したときの除去速度の25倍を超える。

#### 【0028】

より低いエネルギーのイオンは、図4の例に見られるような著しいパッシベーション層の生成を引き起こさないと本出願の出願人は考えている。したがって、導入された $\text{O}_2$ 分子506は、損傷していないポリイミドの表面に吸着する。画定されたエリアを走査しているイオン・ビーム202が、吸着した前駆体ガスの $\text{O}_2$ 分子506を活性化(または分解)し、次いで活性化された $\text{O}_2$ 分子506が表面分子505と反応して、その下の表面のエッチングを促進する。次いで、このプロセスの揮発性成分508が表面から離脱し、それらの揮発性成分508は、スパッタリングによって除去された表面分子509の一部と一緒に、真空システムのポンプによって排出される。これらのより低いビーム・エネルギーであっても一部のポリイミド分子は損傷する可能性があるが、それらの損傷した分子510はおそらく、ビームの物理的なスパッタリング作用によって除去される。

## 【 0 0 2 9 】

本明細書に記載した化学反応は、本発明のさまざまな実施形態がどのように機能するのかについての本出願の出願人の理解を表現しており、それらの化学反応は、本明細書に記載した例を当業者が他の実施形態に拡張する際に役立つように示したもののだが、根底にある理論についての本出願の出願人の理解が正しいか否かに関わらず、本発明が機能することは証明されている。

## 【 0 0 3 0 】

$O_2$ の方が水よりも効果的である理由を裏付ける物理学的な機構については現在も研究中であり、まだよく分かっていない。本明細書に記載した理論は、本発明のさまざまな実施形態がどのように機能するのかについての本出願の出願人の理解を表現しており、それらの理論は、本明細書に記載した例を当業者が他の実施形態に拡張する際に役立つように示したものである。とは言うものの、根底にある理論についての本出願の出願人の理解が正しいか否かに関わらず、 $Xe^+$ プラズマ FIB を使用したポリイミドのエッチングに使用するエッチング支援ガスとして  $O_2$  は水よりも優れているとする経験的な観察に疑問をはさむ余地はない。

## 【 0 0 3 1 】

図 6 は、より低いエネルギー (  $8\text{ keV}$  から  $14\text{ keV}$  ) の  $Xe^+$  プラズマ・イオン・ビームを使用したポリイミド・エッチングの FIB 顕微鏡写真である。トレンチ 601 の底には、暗色の材料である酸化物 602 が、くの字形 ( *elbow-shaped* ) の明色の特徴部分である金属線 604 と同じ高さに見えている。酸素は、FIB の存在下で金属または酸化物のエッチングを引き起こさないため、トレンチの底が平らなのは、酸素支援 ( *oxygen-assisted* ) エッチングの選択性のためである。その代わりにポリイミドが選択的に除去されており、残りの特徴部分は損傷せずに残っている。

## 【 0 0 3 2 】

図 6 に示されているように、この場合も、トレンチの周囲のポリイミド 606 の表面が、イオン・ビームによる損傷を示す明灰色のコントラストを示している。図 6 の加工物では、この損傷が、 $30\text{ keV}$  の  $Xe^+$  プラズマ・イオン・ビームを使用した ( トレンチを掘る所望の位置を突き止める ) ナビゲーション段階に対する準備の結果であった。一般に、IC デバイスの臨界の斜めの線間に、この損傷に起因する漏電が生じない限り、全体的にかなる方法でも、この表面損傷を修復する必要はない。

## 【 0 0 3 3 】

以上の議論では、エッチング支援ガスとして  $O_2$  を使用することを重点的に論じたが、限定はされないが  $N_2O$ 、 $NO_2$ 、 $NO$ 、 $NO_x$  および他の強い酸化剤を含む他のガスが有効であることもあり、または他のガスの方が  $O_2$  よりもうまくいくこともある。異なる組成のポリイミドは異なる振舞いを見せることがあることも言い添えておく。例えば、前述の実験結果に続いて、別の組成のポリイミドを調べた。この第 2 のタイプのポリイミドの振舞いはやや異なっていたが、結果は疑いなく一貫していた。この第 2 の加工物では、最適な除去が得られるイオン・エネルギーがわずかに高く (  $10 \sim 14\text{ keV}$  )、最大除去速度がわずかに低かった (  $6.2\text{ }\mu\text{m}^3/\text{nC}$  )。それでもやはり、本明細書に記載した方法は依然として、先行技術に比べて大幅に改善された  $Xe^+$  プラズマ FIB を使用したポリイミド・エッチングを提供し、除去速度は、前述の従来の除去速度の 1.7 倍を超えた。

## 【 0 0 3 4 】

図 7 は、順次付着させた 2 つのポリイミド層間の境界面を露出させるために上位のポリイミド層をエッチングによって除去した、ポリイミド・エッチングの FIB 顕微鏡写真である。図 8 は、大面積のポリイミド除去の他の例 800 を示す。トレンチ 802 の底の暗色の材料 801 は露出した二酸化シリコンである。

## 【 0 0 3 5 】

図 9 は、吸収された ( ステージ ) 電流 901 を、本発明のポリイミド・エッチング・プロセス中の時間 902 に対して示した図 900 である。曲線 903 は、複合ポリイミド・

10

20

30

40

50



オーバコーティングの異なる層の除去に対応する２つの平坦部 9 0 4 および 9 0 5 を示している。この終点プロットのこれらに特有の特徴部分は、F I B ミリングがどのくらいの深さまで進んだのかをオペレータに知らせる。

#### 【 0 0 3 6 】

上で論じたとおり、ポリイミドは通常、電気絶縁体である（したがって F I B 画像中では暗く見える）が、高エネルギーのイオンにさらされると損傷することがあり、それによってポリイミドは部分的に電気伝導性の物質に変化し、F I B 画像中で明るく見えるようになる。回路編集（C E）時、損傷した電気伝導性のポリイミドからの漏電経路が存在することによって、編集が失敗に終わることがある。同様に、受動的な電圧 - コントラスト分離切断を含む故障解析（F A）用途も、やはり電気伝導性のポリイミドによって引き起こされうる漏電を許容することができない。

10

#### 【 0 0 3 7 】

前述の方法を使用して、F I B 処理後の損傷したポリイミドを「修復する」こと、したがってポリイミドの電気絶縁特性を回復させ、F I B 画像中でポリイミドが再び暗色に見えるようにすることができる。このことは、ポリイミドを含むより幅広い範囲の C E および F A 用途で、F I B 処理によって加工物の電気特性が根本的に変化する恐れなしに、F I B ツール、特に  $X e^+$  プラズマ・ツールを、使用することを可能にする。本発明のこの実施形態に基づくポリイミド修復を、 $G a^+$  F I B システムと  $X e^+$  F I B システムの両方で使用することができることは重要である。

20

#### 【 0 0 3 8 】

図 1 0 は、部分的に損傷したポリイミド表面 1 0 0 1 の低倍率 F I B 顕微鏡写真である。図の右下の暗色の領域 1 0 0 4 は損傷していない絶縁性のポリイミドである。図の左側および中心のより明るい領域 1 0 0 6 は損傷したポリイミドであり、高エネルギー（3 0 k e V）の  $X e^+$  イオンにさらされた結果として部分的に電気伝導性であるようである。右上の明るい物体 1 0 0 8 はガス噴射ノズルの端である。

#### 【 0 0 3 9 】

この損傷したポリイミドを、低エネルギー（8 k e V 以下）のイオンを使用して、水または  $O_2$  の存在下で修復することができる。図 1 1 は、ポリイミド膜 1 0 0 1 の図 1 0 と同じセクションを示す図であり、長方形の走査ボックス 1 1 1 0 は修復を実行する位置を示している。 $O_2$  の存在下でイオン・ビームが走査ボックス 1 1 1 0 内のエリアを走査するにつれて、損傷したポリイミドは徐々に消費され、F I B 画像内の明るく輝いている部分は消えていく。損傷したポリイミドは実際には「修復されて」はならず、その代わりに、低エネルギーのガス支援エッチングを使用してゆっくりと徐々に除去されていることに留意されたい。図 1 2 は、図 1 0 および 1 1 の損傷したポリイミド膜の修復の進捗を示す一連の F I B 画像である。走査された中央のエリア 1 1 1 0 は、酸素の存在下で低エネルギー（8 k e V）の  $X e^+$  イオンにさらされる。時間の経過（矢印 1 2 4）とともに修復が進み、酸素の存在下でポリイミドが低エネルギーでエッチングされると、損傷したポリイミドが徐々に除去されてその下の損傷していないポリイミドが露出するにつれて、F I B 画像では、走査ボックス内の損傷した明るい領域が暗くなる。 $X e^+$  イオンのより低いエネルギー（8 k e V。それに対して当初の損傷領域の形成に使用されたエネルギーは 3 0 k e V である）のためにその下のポリイミドに追加の損傷を導入することなしに、低エネルギーの  $X e^+$  を用いて、ポリイミドの損傷した部分を選択的に除去することが可能であることに留意されたい。このタイプのポリイミド修復に対しては、特定のツール・パラメータがさまざまな値をとりうるが、一般に、イオン・エネルギーは 8 k e V から 1 2 k e V、室圧（酸素が流れている状態）は約  $1 \times 10^{-5}$  トル、画素ドウェル時間は 1 0 0 ナノ秒、画素の重なりは 0 % である。

30

40

#### 【 0 0 4 0 】

このタイプの限定された材料除去に対しては、エッチング支援ガスとして、水蒸気、 $N_2O$ 、 $NO_2$ 、 $NO$  および他の強い酸化剤を含む他のガスが有効であることがあることを本出願の出願人は確認した。イオン・エネルギーはこのプロセスの重要な構成要素である。

50

使用するガスが何であれ、イオン・エネルギーが高すぎる（ $8\text{ keV}$ 超）場合には、損傷が蓄積する速度が、損傷した副生物が除去される速度を上回る。以上の実施形態は、高真空室内で加工物に向かってガスを導くこととしているが、加工物表面のそばにガスを含む環境制御型走査電子顕微鏡または環境制御型セル内において本発明を実施することもできる。以上の実施形態は、ポリイミドをエッチングすることとしているが、本発明の実施形態によって、任意の炭素質材料または有機材料をエッチングすることができる。イオン・エネルギーが、エッチングに耐えるパッシベーション層を形成しない十分に低いものであり、かつ基板材料をエッチングする十分に高いものである限りにおいて、他の材料をエッチングすることができ、他のエッチング支援ガスを使用することができる。

【0041】

10

本発明のいくつかの実施形態によれば、炭素質材料を含む加工物の化学的に強化されたイオン・ビーム・ミリング（chemically-enhanced ion beam milling）の方法は、酸素を含むエッチング支援ガスを加工物の表面に供給するステップと、酸素を含む酸素含有エッチング支援ガスと炭素質材料との反応によってパッシベーション層を形成するのには不十分なエネルギーを有するイオン・ビームを、炭素質材料に向かって導いて、エッチング支援ガスの存在下で炭素質材料をエッチングするステップとを含む。

【0042】

いくつかの実施形態では、炭素質材料に向かってイオン・ビームを導くステップが、 $16\text{ keV}$ 未満のイオン・ビームを導くステップを含む。いくつかの実施形態では、炭素質材料に向かってイオン・ビームを導くステップが、 $10\text{ keV}$ 未満のイオン・ビームを導くステップを含む。

20

【0043】

いくつかの実施形態では、炭素質材料に向かってイオン・ビームを導くステップが、キセノン・イオンのビームを導くステップを含む。いくつかの実施形態では、炭素質材料に向かってイオン・ビームを導くステップが、 $16\text{ keV}$ 未満のエネルギーを有するキセノン・イオンのビームをポリイミド材料に向かって導くステップを含む。いくつかの実施形態では、酸素含有エッチング支援ガスを加工物に向かって導くステップが、 $\text{O}_2$ を加工物に向かって導くステップを含む。

【0044】

30

本発明のいくつかの実施形態によれば、基板の化学的に強化されたイオン・ビーム・ミリングの方法は、基板をイオン・ビーム・システム内へ装填するステップと、酸化剤を含むエッチング支援ガスを加工物に向かって供給するステップと、エッチング支援ガスの存在下で加工物に、 $16\text{ keV}$ 未満のビーム・エネルギーを有するイオン・ビームを導くステップと、化学的に強化されたイオン・ビーム・ミリングを使用して材料を除去するステップとを含む。

【0045】

いくつかの実施形態では、エッチング支援ガスが $\text{O}_2$ ガスを含む。いくつかの実施形態では、エッチング支援ガスが $\text{N}_2\text{O}$ 、 $\text{NO}_2$ 、 $\text{NO}$ または $\text{NO}_x$ を含む。

【0046】

40

いくつかの実施形態では、基板がポリイミド膜または他の有機膜を含む。いくつかの実施形態では、イオン・ビームのエネルギーが $8\text{ keV}$ から $14\text{ keV}$ である。いくつかの実施形態では、化学的に強化されたイオン・ビーム・ミリングを使用して材料を除去するステップが、基板をイオン・ビーム・スパッタリングまたはイオン・ビーム・エッチングするステップを含む。

【0047】

いくつかの実施形態では、イオン・ビーム・システムが、 $\text{Xe}^+$ プラズマ集束イオン・ビーム・システムまたは他のプラズマ集束イオン・ビーム・システムを含む。いくつかの実施形態では、イオン、エッチング支援ガスおよび基板の相互作用によって、基板上にパッシベーション層があまり形成されない。いくつかの実施形態では、イオン・ビーム・シ

50

ステムの電流密度が  $4 \text{ pA} / \mu\text{m}^2$ 、ドウェル時間が  $100 \text{ ナノ秒}$ 、画素の重なりが  $0\%$ 、室圧が  $2 \times 10^{-5}$  トルである。

【0048】

いくつかの実施形態では、ミリング速度が  $0.3 \mu\text{m}^3 / \text{nC}$  よりも大きい。いくつかの実施形態では、化学的に強化されたイオン・ビームを使用して材料を除去するステップが、損傷したポリイミド層を除去して、損傷した層の下の損傷していないポリイミド層を露出させるステップを含み、損傷していない層が、イオン・ビームによって損傷せず、その電気絶縁特性を維持する。いくつかの実施形態では、イオン・ビームのビーム・エネルギーが  $8 \text{ keV}$  以下である。

【0049】

いくつかの実施形態では、エッチング支援ガスが水蒸気、 $\text{O}_2$ 、 $\text{N}_2\text{O}$ 、 $\text{NO}_2$ 、 $\text{NO}$  または  $\text{NO}_x$  を含む。いくつかの実施形態では、イオン・ビーム・システムが、 $\text{Ga}^+$  プラズマ集束イオン・ビーム・システムまたは  $\text{Xe}^+$  プラズマ集束イオン・ビーム・システムを含む。

【0050】

以上の本発明の説明は主に、ポリイミド膜または他の類似の有機膜をエッチングする方法を対象としているが、そのような方法を実行する装置も本発明の範囲に含まれることを認識すべきである。さらに、本発明の実施形態は、コンピュータ・ハードウェアによって、ハードウェアとソフトウェアの組合せによって、またはコンピュータ可読の非一時的記憶装置に記憶されたコンピュータ命令によって実現することができることも認識すべきである。本発明の方法は、標準プログラミング技法を使用した、本明細書に記載された方法および図に基づくコンピュータ・プログラムとして実現することができ、このコンピュータ・プログラムには、コンピュータ・プログラムを含むように構成されたコンピュータ可読の非一時的記憶媒体が含まれ、そのように構成された記憶媒体は、コンピュータを、予め定義された特定の方式で動作させる。コンピュータ・システムと通信するため、それぞれのプログラムは、高水準手続き型プログラミング言語またはオブジェクト指向プログラミング言語で実現することができる。しかしながら、所望ならば、それらのプログラムを、アセンブラ言語または機械語で実現することもできる。いずれにせよ、その言語は、コンパイルまたは解釈される言語とすることができる。さらに、そのプログラムは、そのプログラムを実行するようにプログラムされた専用集積回路上で実行することができる。

【0051】

さらに、方法論は、限定はされないが、荷電粒子ツールもしくは他の画像化デバイスとは別個の、荷電粒子ツールもしくは他の画像化デバイスと一体の、または荷電粒子ツールもしくは他の画像化デバイスと通信するパーソナル・コンピュータ、ミニコンピュータ、メインフレーム、ワークステーション、ネットワーク化されたコンピューティング環境または分散コンピューティング環境、コンピュータ・プラットフォームなどを含む、任意のタイプのコンピューティング・プラットフォームで実現することができる。本発明の諸態様は、取外し可能であるか、またはコンピューティング・プラットフォームと一体であるかを問わない、ハードディスク、光学式読取りおよび/もしくは書込み記憶媒体、RAM、ROMなどの記憶媒体上または記憶装置上に記憶された機械可読コードであって、プログラム可能なコンピュータが、本明細書に記載された手順を実行するために、その記憶媒体または記憶装置を読み取ったときそのコンピュータを構成し、動作させるために、そのコンピュータが読み取ることができるように記憶された機械可読コードとして実現することができる。さらに、機械可読コードまたは機械可読コードの一部を、有線または無線ネットワークを介して伝送することができる。本明細書に記載された発明は、マイクロプロセッサまたは他のデータ処理装置と連携して上述の諸ステップを実現する命令またはプログラムを含む、これらのさまざまなタイプのコンピュータ可読記憶媒体、およびその他のさまざまなタイプのコンピュータ可読記憶媒体を含む。本発明はさらに、本明細書に記載された方法および技法に従ってプログラムされたコンピュータを含む。

【0052】

入力データに対してコンピュータ・プログラムを使用して、本明細書に記載された機能を実行し、それによって入力データを変換して出力データを生成させることができる。この出力情報は、ディスプレイ・モニタなどの1つまたは複数の出力装置に出力される。本発明の好ましい実施形態では、変換されたデータが物理的な実在する物体を表し、これには、その物理的な実在する物体の特定の視覚的描写をディスプレイ上に生成することが含まれる。

#### 【0053】

本発明の好ましい実施形態はさらに、粒子ビームを使用して加工物を画像化するために、FIB、SEMなどの粒子ビーム装置を利用する。加工物を画像化するために使用されるこのような粒子は加工物と本来的に相互作用し、その結果、加工物はある程度、物理的に変形する。さらに、本明細書の全体を通じて、「計算する」、「決定する」、「測定する」、「生成する」、「検出する」、「形成する」などの用語を利用した議論は、コンピュータ・システムまたは同様の電子装置の動作および処理に言及し、そのコンピュータ・システムまたは同様の電子装置は、コンピュータ・システム内の物理量として表されたデータを操作し、そのデータを、その同じコンピュータ・システムまたは他の情報記憶装置内、伝送装置内もしくは表示装置内の、物理量として同様に表された他のデータに変換する。

10

#### 【0054】

本発明は幅広い適用可能性を有し、上記の例において説明し、示した多くの利点を提供することができる。本発明の実施形態は、具体的な用途によって大きく異なる。全ての実施形態が、これらの全ての利点を提供するわけではなく、全ての実施形態が、本発明によって達成可能な全ての目的を達成するわけでもない。本発明を実施するのに適した粒子ビーム・システムは例えば、本出願の譲受人であるFEI Companyから市販されている。

20

#### 【0055】

上記の説明の多く部分が半導体ウェーハを対象としているが、本発明は、適当な任意の基板または表面に対して使用することができる。また、本明細書において、用語「自動」、「自動化された」または類似の用語が使用されるとき、これらの用語は、自動プロセスもしくは自動ステップまたは自動化されたプロセスもしくは自動化されたステップの手動による開始を含むものと理解される。以上の議論および特許請求の範囲では、用語「含む(including)」および「備える(comprising)」が、オープン・エンド(open-ended)型の用語として使用されており、したがって、これらの用語は、「...を含むが、それらだけに限定はされない(including, but not limited to)」ことを意味すると解釈すべきである。用語「集積回路」は、マイクロチップの表面にパターン形成された一組の電子構成部品およびそれらの相互接続(ひとまとめにして内部電気回路要素)を指す。用語「半導体デバイス」は、総称的に、集積回路(IC)を指し、この集積回路(IC)は、半導体ウェーハと一体でも、またはウェーハから切り離されていて、または回路板上で使用するためにパッケージングされていてよい。本明細書では用語「FIB」または「集束イオン・ビーム」が、イオン光学部品によって集束させたビームおよび整形されたイオン・ビームを含む、平行イオン・ビームを指すために使用される。

30

40

#### 【0056】

本明細書で特に定義されていない場合、その用語は、その通常の一般的な意味で使用されることが意図されている。添付図面は、本発明の理解を助けることが意図されており、特に明記しない限り、一律の尺度では描かれていない。

#### 【0057】

本発明および本発明の利点を詳細に説明したが、添付の特許請求の範囲によって定義された本発明の趣旨および範囲から逸脱することなく、本明細書に記載の実施形態に、さまざまな変更、置換および改変を加えることができることを理解すべきである。全ての実施形態で、源の全てのパラメータおよび特性が計算されるわけではない。さらに、本出願の

50

範囲が、本明細書に記載されたプロセス、機械、製造、組成物、手段、方法およびステップの特定の実施形態に限定されることは意図されていない。当業者なら本発明の開示から容易に理解するように、本明細書に記載された対応する実施形態と実質的に同じ機能を実行し、または実質的に同じ結果を達成する既存のまたは今後開発されるプロセス、機械、製造、組成物、手段、方法またはステップを、本発明に従って利用することができる。したがって、添付の特許請求の範囲は、その範囲内に、このようなプロセス、機械、製造、組成物、手段、方法またはステップを含むことが意図されている。

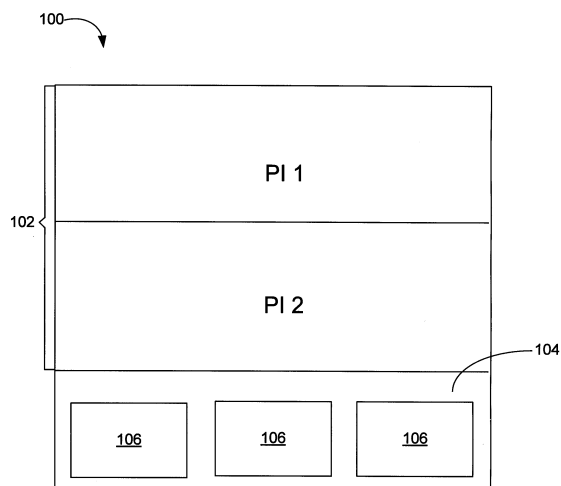
【符号の説明】

【 0 0 5 8 】

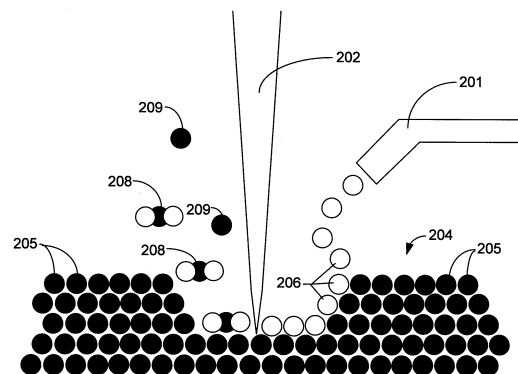
- 1 0 0    I C パッケージ・デバイス
- 1 0 2    カプセル封入ポリイミド層
- 1 0 4    二酸化シリコン層
- 1 0 6    金属線
- 2 0 1    ガス送達ノズル
- 2 0 2    集束イオン・ビーム
- 2 0 4    加工物

10

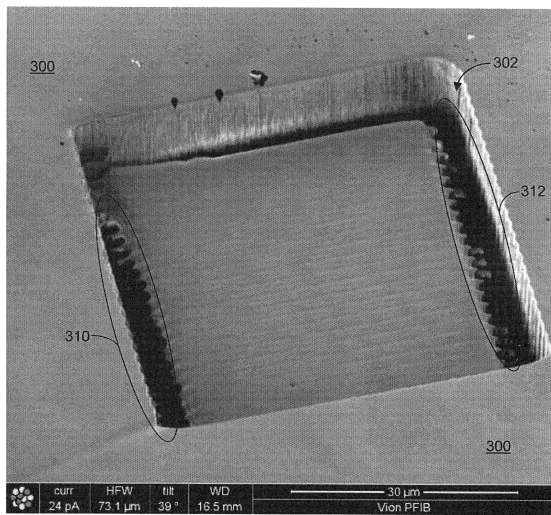
【 図 1 】



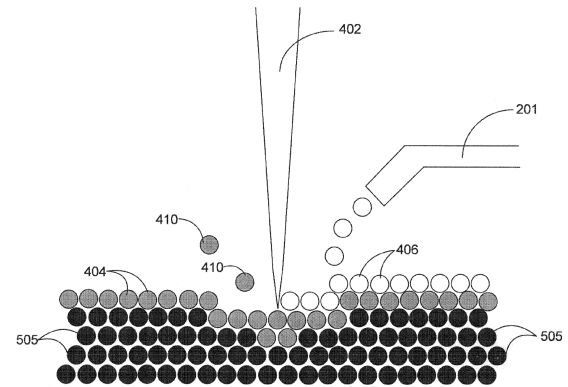
【 図 2 】



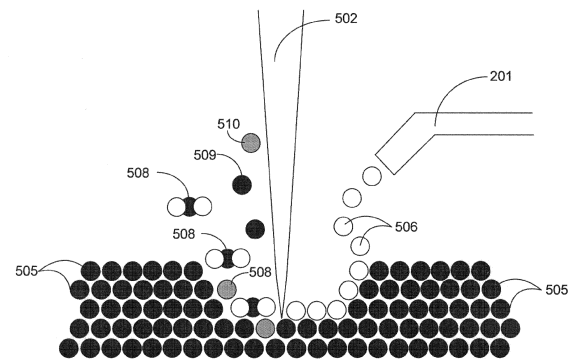
【図 3】



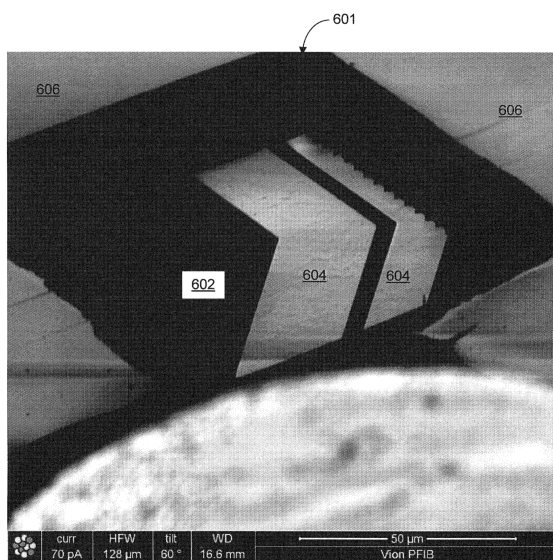
【図 4】



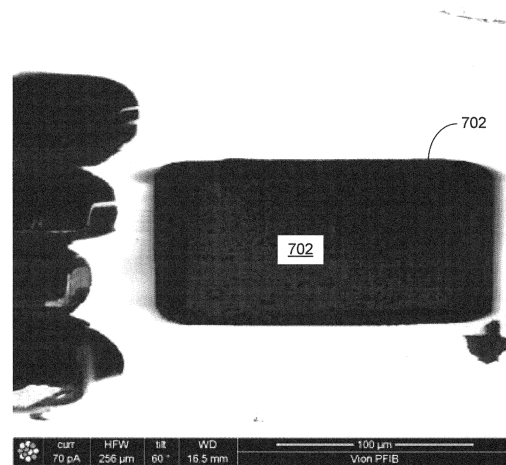
【図 5】



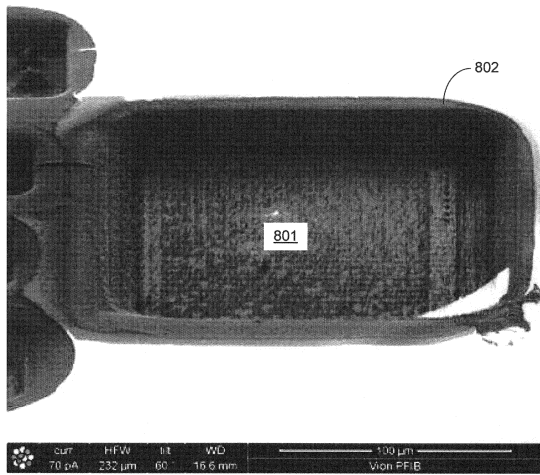
【図 6】



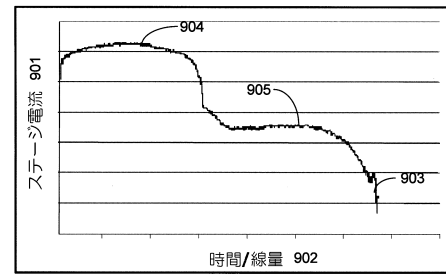
【図 7】



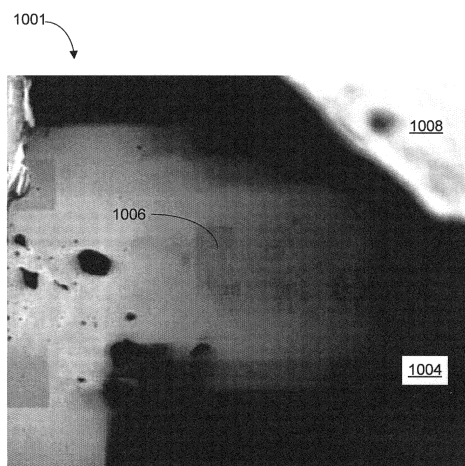
【図 8】



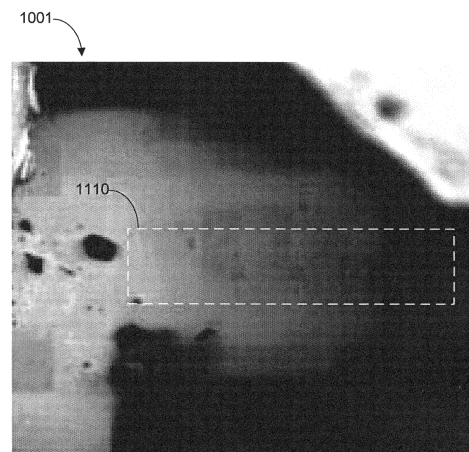
【図 9】



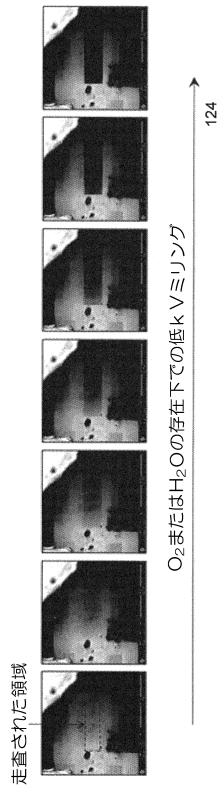
【図 10】



【図 11】



【図 12】





---

フロントページの続き

(56)参考文献 特開平05-013319(JP,A)

特開2010-165626(JP,A)

特開2005-026359(JP,A)

特開平09-031631(JP,A)

特開2000-122064(JP,A)

特開昭63-220525(JP,A)

米国特許第07670956(US,B2)

B. Lucas et al., "Ion Beam Assisted Etching of a Fluorinated Polyimide in order to Insert it in an Electro-Optical System", Synthetic Metals, NL, Elsevier Science S.A., 1999年, Vol. 102, pp. 1423-1424

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

H01L 21/302

H01L 21/3065

H01L 21/461

JST7580(JDreamIII)

JSTPlus(JDreamIII)