(19)日本国特許庁(JP)　(12)特　許　公　報(B2)　(11)特許番号

特許第5773319号
(P5773319)

(45)発行日　平成27年9月2日(2015.9.2)　(24)登録日　平成27年7月10日(2015.7.10)

(51)Int.Cl.			F I		
H01L	21/027	(2006.01)	H01L	21/30	570
H01L	21/3065	(2006.01)	H01L	21/302	104H
G03F	7/40	(2006.01)	H01L	21/302	105B
H05H	1/46	(2006.01)	G03F	7/40	511
			H05H	1/46	A

請求項の数 18　(全 24 頁)

(21)出願番号　特願2013-531679 (P2013-531679)
(86)(22)出願日　平成23年9月23日 (2011.9.23)
(65)公表番号　特表2013-546165 (P2013-546165A)
(43)公表日　平成25年12月26日 (2013.12.26)
(86)国際出願番号　PCT/US2011/052981
(87)国際公開番号　WO2012/044536
(87)国際公開日　平成24年4月5日 (2012.4.5)
審査請求日　平成26年4月24日 (2014.4.24)
(31)優先権主張番号　12/896,036
(32)優先日　平成22年10月1日 (2010.10.1)
(33)優先権主張国　米国(US)

(73)特許権者　500324750
バリアン・セミコンダクター・エクイップメント・アソシエイツ・インコーポレイテッド
アメリカ合衆国マサチューセッツ州０１９３０，グロスター，ドリー・ロード３５
(74)代理人　110000877
龍華国際特許業務法人
(72)発明者　ゴデット、ルドヴィック
アメリカ合衆国マサチューセッツ州０１９３０，グロスター，ドリー・ロード３５
バリアン・セミコンダクター・エクイップメント・アソシエイツ・インコーポレイテッド内

最終頁に続く

(54)【発明の名称】レジストフィーチャの表面粗度を低減する方法、およびパターニングレジストフィーチャの粗度を修正する方法

(57)【特許請求の範囲】
【請求項１】
基板上に設けられているレジストフィーチャの表面粗度を低減する方法であって、
プラズマシースおよびイオンを内部に含むプラズマを生成する段階と、
プラズマシース修正部を用いて、前記プラズマと前記プラズマシースとの間に画定される境界のうち前記基板に対向している部分が前記基板によって画定されている平面に平行にならないように、前記境界の形状を修正する段階と、
第１の照射において、予め定められた波長帯域を持つ電磁波を前記レジストフィーチャに照射する段階と、
前記第１の照射において、所与の角度範囲にわたって、前記レジストフィーチャに向けて、修正した前記形状を持つ前記境界を越えて前記イオンを加速する段階と
を備え、
前記プラズマシース修正部は、前記予め定められた波長帯域を持つ前記電磁波を透過させ、前記予め定められた波長帯域以外の波長帯域を持つ電磁波を遮蔽する方法。
【請求項２】
前記境界の形状を修正する段階は、一対の修正部材を持つプラズマシース修正部であって、前記一対の修正部材の間に間隙を画定しているプラズマシース修正部を用意する段階を有し、
前記境界の前記形状は、前記間隙において、前記平面に対して凸形状である請求項１に記載の方法。

【請求項３】
前記角度範囲は、前記基板が画定している前記平面に垂直な軸を中心として正の６０度から負の６０度までの範囲である請求項１または２に記載の方法。
【請求項４】
前記照射する段階および前記加速する段階は、同時に行われる請求項１から３のいずれか一項に記載の方法。
【請求項５】
前記イオンのドーズのエネルギーは、１ｋｅＶから１０ｋｅＶの間である請求項１から４のいずれか一項に記載の方法。
【請求項６】
前記第１の照射において、前記基板の温度を摂氏３０度以上に維持する段階をさらに備える請求項１から５のいずれか一項に記載の方法。
【請求項７】
前記プラズマシース修正部は、半導体膜から形成される１以上の層を含む請求項１から６のいずれか一項に記載の方法。
【請求項８】
前記予め定められた波長帯域は、紫外（ＵＶ）波長帯域を含む請求項１から７のいずれか一項に記載の方法。
【請求項９】
前記プラズマシース修正部は、ＵＶ線に対して略透明である請求項１から８のいずれか一項に記載の方法。
【請求項１０】
基板上に設けられているパターニングレジストフィーチャの粗度を修正する方法であって、
前記レジストフィーチャは、第１の粗度を持ち、
プラズマシースおよびイオンを内部に持つプラズマを生成する段階と、
前記プラズマと前記プラズマシースとの間の境界の形状を修正する開口を画定しているプラズマシース修正部（ＰＳＭ）を用意する段階と、
第１の照射において、前記パターニングレジストフィーチャに向けて、修正後の前記形状を持つ前記境界を越えてイオンを加速する段階と、
前記第１の照射の少なくとも一部において、第１の波長帯域を持つ電磁波を前記パターニングレジストフィーチャに照射する段階と
を備え、
前記電磁波は、前記プラズマから放出され、
前記パターニングレジストフィーチャは、前記イオンおよび前記第１の波長帯域を持つ前記電磁波が照射されると、前記第１の粗度より低い第２の粗度を持ち、
前記プラズマシース修正部は、前記第１の波長帯域以外の第２の波長帯域を持つ電磁波を遮蔽する材料を含む方法。
【請求項１１】
前記第１の波長帯域は、ＵＶ波長帯域である請求項１０に記載の方法。
【請求項１２】
前記第１の波長帯域は、赤外（ＩＲ）波長帯域である請求項１０に記載の方法。
【請求項１３】
前記プラズマは、第１の種および第２の種を含み、
前記第１の種は、前記レジストフィーチャに衝突すると前記第１の粗度を低減するイオンを生成し、
前記第２の種は、ＵＶ波長帯域内の前記電磁波を放出する請求項１０から１２のいずれか一項に記載の方法。
【請求項１４】
前記第１の照射において、摂氏３０度と摂氏３００度との間に到達するように基板温度

を上昇させる段階をさらに備える請求項１０から１３のいずれか一項に記載の方法。
【請求項１５】
前記プラズマシース修正部は、石英を含む請求項１０から１４のいずれか一項に記載の方法。
【請求項１６】
前記プラズマシース修正部は、１以上のシリコン薄膜を含む請求項１０から１５のいずれか一項に記載の方法。
【請求項１７】
前記イオンは、前記第１の照射において、所与の角度範囲にわたって、前記パターニングレジストフィーチャに衝突する請求項１０から１６のいずれか一項に記載の方法。
【請求項１８】
レジストフィーチャの粗度を低減する方法であって、
プラズマシースを含むプラズマを生成する段階と、
前記プラズマと前記プラズマシースとの間に画定されている境界の形状の一部が、前記プラズマに対向している基板が画定している平面に平行でなくなるように、前記境界の前記形状を、プラズマシース修正部を用いて修正する段階と、
第１の照射において、前記基板の温度を、摂氏３０度から摂氏３００度までの範囲内に維持する段階と、
前記第１の照射において、所与の角度範囲にわたって、前記レジストフィーチャに前記プラズマからイオンを衝突させ、前記レジストフィーチャの粗度を低減する段階と、
前記第１の照射の少なくとも一部において、第１の波長帯域を持つ電磁波を前記レジストフィーチャに照射する段階と
を備え、
前記電磁波は、前記プラズマから放出され、
前記プラズマシース修正部は、前記第１の波長帯域以外の第２の波長帯域を持つ電磁波を遮蔽する材料を含む方法。
【発明の詳細な説明】
【技術分野】
【０００１】
本発明の実施形態は、デバイス製造の分野に関する。本発明は特に、基板をパターニングして、デバイスを製造するために基板に注入処理を実行する方法、システムおよび構造に関する。
【背景技術】
【０００２】
光リソグラフィーは、電子デバイスを製造する場合にしばしば利用される技術である。光リソグラフィーは、基板をパターニングして、そのパターンに応じて基板上に回路を形成するプロセスである。図１Ａから図１Ｅを参照すると、光リソグラフィープロセスを説明するための簡略図が図示されている。一般的に、基板１１２は、光硬化性のポリマーフォトレジスト１１４（図１Ａ）でコーティングされている。この後、所望の開口パターンを持つマスク１４２を、基板１１４と光源（不図示）との間に配置する。光源からの光１０をマスク１４２の開口を介して基板１１２上に照射し、マスクの開口を透過した光（または、パターンの画像）をフォトレジスト１１４上に投影する。フォトレジストの一部１１４ａを、光１０に露光して硬化させ、フォトレジストの残り１１４ｂは未硬化のままとする（図１Ｂ）。この結果、フォトレジストの硬化部分１１４ａによってマスクの開口のイメージが形成されるとしてよい。
【０００３】
図１Ｃに図示されているように、フォトレジストの未硬化部分１１４ｂをはがすと、マスクの開口パターンに対応する３Ｄのフォトレジストフィーチャまたはレリーフ１１４ａが基板１１２上に残るとしてよい。この後、基板をエッチングして、マスクの開口パターンのネガティブイメージに対応するトレンチ１１６を形成するとしてよい（図１Ｄ）。残

りのフォトレジスト１１４ｂを除去すると、パターニングされた基板１１２が形成されるとしてよい（図１Ｅ）。トレンチに金属層を成膜すると、所望のパターンを持つ回路が基板１１２上に形成されるとしてよい。

【０００４】

図２を参照すると、マスクの開口パターンの画像を基板に投影する従来の光リソグラフィーシステム２００が図示されている。光リソグラフィーシステム２００は、光源２２２、光結合器２３２および集光レンズ２３４を備える。さらに、光リソグラフィーシステム２００は、所望の開口パターンを持つマスク１４２と、投影レンズ２５２とを備える。同図に示すように、所望の波長を持つ光を光源２２２から光結合器２３２および集光レンズ２３４に照射する。光結合器２３２および集光レンズ２３４は、照明部２３０と総称する。照明部２３０では、光１０を拡大、均等化、集光等、調整する。光１０は、所望の開口パターンを持つマスク１４２に照射されて、基板１１２上に投影される。マスク１４２の開口を透過する光１０は、マスクの開口パターンに関する情報を含むとしてよい。光１０はこの後、投影レンズ２５２によって捕えられ、投影レンズ２５２は、光１０またはマスクの開口パターンのイメージを、基板１１２上に成膜されているフォトレジスト上に投影する。画像を投影する際、投影レンズ１０は、４または５の倍数でイメージを縮小するとしてよい。

【０００５】

生成する回路パターンのフィーチャサイズ（例えば、トレンチの幅）を小型化するべく、幾つかの点で当該プロセスを修正している。関連技術分野で公知であるように、小さくてもフィーチャの明瞭なイメージを投影できるか否かは、何より、プロセスで用いられる光の波長に左右されるとしてよい。現時点において、波長が３６５ｎｍ、２４８ｎｍおよび１９３ｎｍである紫外（ＵＶ）光が利用されている。

【０００６】

光リソグラフィーは、スループットが高い効率的なプロセスであるが、短所がないわけではない。短所の１つとして、ラインウィドスラフネス（ＬＷＲ）またはラインエッジラフネス（ＬＥＲ）が挙げられるとしてよい。関連技術分野で公知であるように、ＬＷＲは、フォトレジストの未硬化部分１１４ｂを基板から剥離して形成されるフォトレジストフィーチャの幅の過剰なバラツキである。このバラツキは、フォトレジストのレリーフまたはフィーチャの側面で見られる場合、ＬＥＲと呼ばれる。ＬＷＲまたはＬＥＲといった粗度またはバラツキが短所となるのは、エッチング時にトレンチに転写され、最終的には回路に転写されるためである。このバラツキは、フォトレジストのレリーフまたはトレンチのフィーチャサイズが小さくなるほどに顕著になる。３２ｎｍのデバイスの場合、４ｎｍ以上のバラツキが見られている。パターニングレジストフィーチャの幾何学的形状は、ＬＷＲおよびＬＥＲ等のライン粗度の影響も含め、レジスト層の下方に恒久的に存在するデバイス層のパターニング時に、レジスト層から当該デバイス層に転写されるので、ＬＷＲおよびＬＥＲは、約１００ｎｍ未満の寸法の場合について許容可能なレベルの品質を持つデバイスを形成する可能性を制限する要因となり得る。このようなバラツキは、回路の不均一性につながり、最終的にはデバイスの劣化または故障につながる可能性がある。また、設計基準に応じて、デバイス性能は、小、中または大のいずれかの範囲の粗度による影響を大きく受けるとしてよい。

【０００７】

ＬＷＲおよびＬＥＲの影響に対処するべく幾つかの方策が試されている。一例を挙げると、ドライ化学エッチングプロセスは、レジストを除去することができるが、パターン依存性のローディング効果が発生することが多い。この場合、除去処理は、分離されたフィーチャと、密にパターニングされている領域とで異なる。このようなドライ化学エッチングプロセスはさらに、収率損失の原因となり得る望ましくない欠陥をレジストパターンに発生させる可能性がある。また、レジストのＬＷＲ／ＬＥＲに対処するべく用いられるプロセスはいずれも、パターニングすべきフィーチャのクリティカルディメンション（ＣＤ）に関して厳密な制御を維持するべく、本来のレジスト属性、例えば、レジストの高さ、

幅およびプロフィールには影響を与えないことが重要である。

【０００８】

粗いパターンをＵＶランプに露光することによって深紫外線（ＤＵＶ）硬化を利用する別の方法では、照射による加熱を利用して粗いラインを円滑化する。この方法では、ラインセグメントの角部分でパターンが後退する望ましくない現象が副次的に発生し、デバイスが利用できなくなってしまう程度までラインを変形させてしまう。

【０００９】

ラインまたは他のパターンのフィーチャサイズのＣＤが照射の回折限界未満の場合、レジストのＵＶリソグラフィープロセスの回折限界に対処するべく、ダブルパターニングリソグラフィー（ＤＰＬ）が開発された。ＤＰＬが成功するようさまざまな方法が開発されており、セルフアラインダブルパターニングリソグラフィーおよび化学凍結リソグラフィー等が挙げられる。しかし、こういったプロセスはいずれも、コストおよび／または収率に関して、長所と同時に短所も持ち合わせている。

【００１０】

上記を鑑みて、非常に小型のフィーチャサイズ、例えば、ＣＤがサブ１００ｎｍのデバイスを必要とする技術のためにレジストリソグラフィープロセスを改良する必要性が認められる。

【発明の概要】

【課題を解決するための手段】

【００１１】

本発明の実施形態は、特に、下方に位置する基板をパターニングするために利用されるレジストフィーチャ群の粗度を改善することによって、基板のパターニングを改良する方法およびシステムに関する。実施形態例を挙げると、基板上に設けられているレジストフィーチャの表面粗度を低減する方法は、プラズマシースおよびイオンを含むプラズマを生成する段階を備える。プラズマとプラズマシースとの間の境界の形状を、プラズマシース修正部を用いて修正して、当該境界のうち基板に対向する部分が、基板が画定している平面と平行にならないようにする。第１の照射において、レジストフィーチャには、所望の波長を持つ電磁波が照射される。修正後の形状を持つ境界を超えて、所与の角度範囲にわたって、レジストフィーチャに向ってイオンが加速される。

【００１２】

別の実施形態によると、第１の粗度を持ち、基板上に設けられているパターニングレジストフィーチャの粗度を修正する方法が提供される。当該方法は、プラズマシースおよびイオンを含むプラズマを生成する段階と、プラズマとプラズマシースとの間の境界の形状を修正する開口を画定しているプラズマシース修正部（ＰＳＭ）を用意する段階と、第１の照射において、修正後の形状を持つ境界を超えて、パターニングレジストフィーチャに向ってイオンを加速する段階とを備える。当該方法はさらに、第１の照射の少なくとも一部において、パターニングレジストフィーチャに対して、プラズマから放出され第１の波長帯域を持つ電磁波を照射する段階を備える。パターニングレジストフィーチャは、イオンおよび第１の波長範囲を持つ電磁波が照射されると、第１の粗度より小さい第２の粗度となる。

【００１３】

別の実施形態によると、基板上に設けられているレジストフィーチャを処理するシステムは、プラズマシースを含むプラズマを生成するプラズマ源と、プラズマと基板との間に配置されているプラズマシース修正部とを備える。プラズマシース修正部は、プラズマとプラズマシースとの間に画定されている境界の形状を制御して、当該境界の形状の一部が、プラズマの前方において基板が画定している平面と平行にならないように制御し、プラズマから放出される所望の波長帯域を持つ電磁波を透過させる。プラズマシース修正部は、予め定められた波長帯域以外の電磁波帯域を遮蔽してよい。予め定められた波長帯域は、ＵＶ波長帯域であってよい。予め定められた波長帯域は、ＩＲ波長帯域であってよい。

【００１４】

別の実施形態によると、レジストフィーチャの粗度を低減する方法は、プラズマシースを含むプラズマを生成する段階と、プラズマとプラズマシースとの間に画定されている境界の形状をプラズマシース修正部で修正して、当該境界の形状の一部が、プラズマに対向しており基板が画定している平面と平行にならないようにする段階と、第１の照射において基板の温度が約摂氏３０度から約摂氏３００度の間になるように維持する段階と、第１の照射において、所与の角度範囲にわたって、プラズマからのイオンをレジストフィーチャに衝突させて、レジストフィーチャの粗度を低減する段階とを備える。

【図面の簡単な説明】

【００１５】

【図１Ａ】従来の光リソグラフィープロセスのステップを説明するための基板の概略断面図である。

【図１Ｂ】従来の光リソグラフィープロセスのステップを説明するための基板の概略断面図である。

【図１Ｃ】従来の光リソグラフィープロセスのステップを説明するための基板の概略断面図である。

【図１Ｄ】従来の光リソグラフィープロセスのステップを説明するための基板の概略断面図である。

【図１Ｅ】従来の光リソグラフィープロセスのステップを説明するための基板の概略断面図である。

【００１６】

【図２】マスクの開口パターンのイメージを基板に投影する、従来の光リソグラフィーシステムを示す概略図である。

【００１７】

【図３Ａ】本発明の一実施形態に係る、基板処理システムを示す概略図である。

【００１８】

【図３Ｂ】本発明の実施形態が提供する、基板上での入射粒子の角度分布の一例を示す図である。

【００１９】

【図４】本発明の特徴の一例を示すレジストフィーチャおよびプラズマシース修正部の概略断面図である。

【００２０】

【図５】本発明に応じた構成のプラズマシース修正部を用いてプラズマシステムから引き出されたイオンを照射する前後のレジストラインのＬＥＲデータの一例を示すグラフである。

【００２１】

【図６】本発明に応じた構成のプラズマシース修正部を用いてプラズマシステムから引き出されたイオンを照射する前後のレジストラインの粗度の周波数変動を示すデータ例を示すグラフである。

【００２２】

【図７】本発明の一構成に応じて構成されるプラズマシステムの詳細な内容を示す図である。

【００２３】

【図７Ａ】プラズマから放出されるＵＶ光子をＰＳＭが透過させるシステム構成の一例を示す図である。

【００２４】

【図７Ｂ】プラズマから放出されるＵＶ光子をＰＳＭが遮蔽するシステム構成の一例を示す図である。

【００２５】

【図７Ｃ】プラズマから放出されるＵＶ光子をＰＳＭが選択的に透過させるシステム構成の一例を示す図である。

【００２６】
【図８】本発明の一構成を採用して基板温度を変化させた場合のＬＷＲおよびＣＤのデータの一例を示すグラフを示す。
【００２７】
【図９】本発明に係る方法に含まれるステップの一例を図示する要約図である。
【００２８】
【図１０Ａ】本発明の別の実施形態に係る３Ｄ構造を処理する技術を示す断面図である。
【図１０Ｂ】本発明の別の実施形態に係る３Ｄ構造を処理する技術を示す平面図である。
【発明を実施するための形態】
【００２９】
以下では、添付図面を参照しつつ本発明をより詳しく説明する。添付図面には、本発明の好ましい実施形態を図示している。しかし、本発明は、多くの異なる形態で実施し得るものであり、本明細書で記載する実施形態に限定されると解釈されるべきではない。これに代えて、これらの実施形態は、本開示を完全に網羅して説明するために記載されているのであり、当業者は本発明の範囲を十分に理解するであろう。複数の図面にわたって同様の参照番号が用いられている場合、同様の構成要素を意味する。
【００３０】
上述した方法に関連する問題点を解決するべく、新規且つ進歩的な基板パターニング方法および基板パターニングシステムを記載する。具体的には、本開示は、レジストフィーチャの品質を改善するべく、例えば、レジストフィーチャのＬＷＲおよびＬＥＲを改善するべく、イオン注入プロセスを利用する技術を主に利用する。本明細書で開示するプロセスは、幅の狭いフィーチャ、例えば、非常に小さいピッチのアレイに組み込まれるフィーチャを形成するプロセスと共に利用され得るものである。非常に小さいピッチとは、例えば、約２５０ｎｍ未満のピッチである。このようなプロセスは、従来のＤＵＶリソグラフィー、ダブルパターニングリソグラフィー、セルフアラインダブルパターニングリソグラフィー、および、他のリソグラフィープロセスを含む。しかし、当業者であれば、本明細書に開示する技術は、特定のリソグラフィー技術または特定の範囲のレジストフィーチャ寸法と組み合わせての利用に限定されるものではないと認めるであろう。
【００３１】
本発明の一部の実施形態では、非常に小さい寸法のレジストフィーチャを処理するべくプラズマ浸漬注入プロセスを利用する。３次元（３Ｄ）構造を処理する新規の方法を含む幾つかの実施形態を開示する。説明を明確且つ簡略にするべく、実施形態は、複数の角度に配向される面を持つフォトレジストを処理する技術として説明する。しかし、当業者であれば、本開示はこれらに限定されないと認めるであろう。さまざまな角度に配向されている面を持つ任意の種類の構造であってよい。
【００３２】
実施形態はさらに、プラズマを用いる基板処理システムを採用する技術として説明される。しかし、当業者であれば、他の種類の原子より小さい粒子、原子粒子、または、分子粒子を利用する基板処理システム、例えば、プラズマスパッタリングおよびビームラインイオン注入システムは本開示の範囲に含まれるものと認めるであろう。
【００３３】
図３Ａを参照すると、本発明の一実施形態に応じて３Ｄ構造を処理する基板処理システム３００が図示されている。図３Ｂは、フォトレジストを処理する粒子の角度分布を示す図である。両図は、必ずしも実寸に即したものではない。
【００３４】
図３Ａに図示しているように、システム３００は、基板１１２と、基板１１２を支持しているプラテン３０４とが内部に配置されている処理チャンバ３０２を備えるとしてよい。本開示では、基板１１２は、金属基板、半導体基板、または、絶縁基板であってよい。本開示では、パターニングフォトレジストが基板上に設けられているとしてよい。パターニングフォトレジストは、未硬化部分をはがした後に基板上に残っているフォトレジスト

の硬化部分であるとしてよい。

【００３５】

システム３００はさらに、処理チャンバ３０２に含まれるプラズマ３０６を生成するプラズマ源（不図示）を備えるとしてよい。プラズマ源は、インサイチュ方式またはリモート方式のどちらであってもよく、誘導結合プラズマ源、容量結合プラズマ源、ヘリコン源、マイクロ波源、または、任意のその他の種類のプラズマ源であってよい。当業者であれば、プラテン３０４がプラズマ源として動作する場合もあることを認めるであろう。

【００３６】

プラズマ３０６と基板１１２との間には、１以上のプラズマシース修正部３１２が設けられているとしてよい。本実施形態によると、プラズマシース修正部３１２では、一対の修正部材３１２ａおよび３１２ｂが互いに間隙「ｙ」を空けて設けられているとしてよい。別の実施形態によると、修正部３１２は、一の修正部材を含むとしてよい。しかし、他の実施形態において、修正部３１２は、３つ以上の修正部材が互いに離間して設けられており、間には間隙が設けられているとしてよい。

【００３７】

プラズマシース修正部３１２は、プラズマシースの電界を調整可能であるとしてよい。一部の実施形態によると、プラズマシース修正部３１２は、正または負に荷電しているとしてよい。プラズマシース修正部３１２は、電気的に絶縁性の材料（例えば、石英）または導電性材料（例えば金属）、または、これらの組み合わせで形成されるとしてよい。これに代えて、プラズマシース修正部３１２は、半導体材料（例えば、Ｓｉ）で形成されるとしてよい。システム３００は複数の修正部材を有するとしてよく、それぞれの修正部材は材料が同じであってもよいし、または、異なる材料であってもよい。例えば、システム３００は、２つの修正部材３１２ａおよび３１２ｂから構成されるプラズマシース修正部３１２を備えるとしてもよい。修正部材３１２ａおよび３１２ｂは、同じ材料で形成されるとしてもよいし、異なる材料で形成されるとしてもよい。

【００３８】

プラズマシース修正部３１２が２つ以上の部材で構成される場合、部材は同一平面上または複数の異なる平面上に設けられるとしてよい。例えば、処理システム３００が備えるプラズマシース修正部３１２は、２個の修正部材３１２ａおよび３１２ｂを有するとしてよく、これらの部材は、基板１１２とそれぞれの修正部材３１２ａとの間の垂直方向の間隙「ｚ」が同じになるように、同一平面内に設けられるとしてよい。別の実施形態では、修正部３１２は、２つの修正部材３１２ａおよび３１２ｂを有するとしてよく、修正部材３１２ａおよび修正部材３１２ｂは、基板１１２との間の垂直方向の間隙「ｚ」の値が異なるように離間させるとしてよい。プラズマシース修正部を備える処理システムの更なる説明については、同時係属中の米国特許出願第１２／４１７，９２９号（出願日：２００９年４月３日、米国特許第７，７６７，９７７号として発行）、および、第１２／４１８，１２０号（出願日：２０１０年４月３日）、第１２／６４４，１０３号（出願日：２００９年１２月２２日）、および、第１２／８４８，３５４号（出願日：２０１０年８月２日）に記載されている。各出願の内容は全て、参照により組み込まれる。

【００３９】

動作について説明すると、インサイチュ方式またはリモート方式で生成されるプラズマを、処理チャンバ３０２の内部に含めるとしてよい。プラズマ３０６は、所望の種の電子、プロトン、および、原子イオンまたは分子イオン、中性子、および、ラジカルといったフラグメントを含むとしてよい。本開示では、プラズマフラグメントを用いて、基板１１２上にドーピング、エッチング、または材料の成膜を実行するとしてよい。プラズマ３０６内に含まれている種は、１以上の特定の種に限定されない。種は、第１族および第３Ａ族－第８Ａ族の１以上の元素を含むとしてよい。プラズマ３０６に含まれる種の例を挙げると、水素（Ｈ）、ヘリウム（Ｈｅ）またはその他の希ガス、炭素（Ｃ）、酸素（Ｏ）、窒素（Ｎ）、ヒ素（Ａｓ）、ホウ素（Ｂ）、リン（Ｐ）、アンチモン、ガリウム（Ｇａ）、インジウム（Ｉｎ）、カルボラン（$C_2B_{10}H_{12}$）またはその他の分子化合物があ

るとしてよい。図３Ａに図示されているように、プラズマ３０６はさらに、周縁部の近傍にプラズマシース３０８を含むとしてよい。本実施形態では、プラズマシース３０８は、正電荷イオン３１０を含むとしてよい。

【００４０】

図面に図示されているように、プラズマシース３０８は、プラズマ３０６とのシースの境界によって表されている。しかし、プラズマシース３０８はプラズマ３０６のエッジからプラズマ３０６の周囲の物体の表面に向って有限距離だけ延在するもの、例えば、プラズマシース３０８は基板１１２の表面まで延在すると理解されたい。

【００４１】

プラズマシース３０８またはプラズマ３０６に含まれるイオン３１０は、基板１１２にＤＣバイアス源またはＲＦバイアス源（不図示）によってバイアスが印加されているので、基板１１２に向うとしてよい。基板１１２に印加されるバイアス信号は、ＤＣまたはＲＦのいずれかに関わらず、連続信号またはパルス状信号であってよい。

【００４２】

プラズマシース修正部３１２は、プラズマシース３０８の形状を修正して、イオン３１０の入射角分布を制御するとしてよい。例えば、プラズマシース修正部３１２は、プラズマシース２４２内の電界を修正するとしてよく、そして、プラズマシース３０８の形状を修正するとしてよい。本実施形態によると、プラズマシース修正部３１２は、プラズマシース３０８の少なくとも一部分を、バルクプラズマ３０６に対して凹形状のプラズマシース３０８ｂ（修正済みシース３０８ｂ）、または、バルクプラズマ３０６に対してドーム形状（凸形状）のプラズマに修正するとしてよい。基板１１２に比べると、修正済みシース３０８ｂの形状は、基板１１２が画定している平面に対して平行でないとしてよい。基板１１２にバイアスが印加されている場合、基板１１２に向って誘引されるイオン３１０は、広い範囲にわたる入射角で、修正部材３１２ａと修正部材３１２ｂとの間の間隙「ｙ」を通過するとしてよい。従来のプラズマを利用した処理システムでは、基板に最も近いプラズマシースは、基板に対して平行になっている。基板にバイアスが印加されると、イオンは、プラズマシースに対して略垂直な経路で移動するので、基板に対して略垂直な経路で移動する。この結果、従来のプラズマ処理システムのイオンは、入射角の範囲が－５度から＋５度の範囲内であり、通常の入射角はゼロ度に近い。しかし、本実施形態によると、イオン３１０の入射角は、修正済みシース３０８ｂで修正されるとしてよい。図３Ａに図示されているように、修正済みシース３０８ｂは、基板に対する角が一定ではない。このため、修正済みシース３０８ｂに対して垂直に進むイオン３１０は、さまざまな角度で進むとしてよい。基板１１２に対してイオン３１０が修正済みシース３０８ｂのさまざまな部分から進むと、入射角がさまざまな角度となるので、イオン３１０の入射角の範囲が大きくなるとしてよい。図３Ｂに図示されているように、イオン３１０の入射角は、約０度を中心として約＋６０度から約－６０度の範囲内であるとしてよい。一部の実施形態によると、イオン３１０の入射角はさらに、プラズマシース修正部３１２が形成する電界によって修正されるとしてよい。

【００４３】

これらに限定されないが、プラズマシース修正部３１２の構成および特性等、複数の要因に基づき、イオン３１０の入射角をさらに修正するとしてよい。このような要因の例には、修正部材３１２ａと修正部材３１２ｂとの間の水平方向の間隙（ｙ）、修正部３１２と基板１１２との間の垂直方向の間隙（Ｚ）、基板１１２と修正部材３１２ａとの間の垂直方向の間隙（ｚ）と、基板１１２と修正部材３１２ｂとの間の距離（ｚ）との間の差分（不図示）、および、修正部３１２の電気特性が含まれるとしてよい。他のプラズマ処理パラメータはさらに、イオン３１０の入射角および／または入射角分布を調整するべく、調整されるとしてよい。更なる説明は、同時係属中の米国特許出願第１２／４１８，１２０号、第１２／４１７，９２９号、第１２／６４４，１０３号および第１２／８４８，３５４号に記載されているとしてよい。各出願の内容は全て、上述したように、参照により本願に組み込まれる。

【００４４】
プラズマシース３１２を修正することによって、さまざまな角度に配向されている複数の面を持つ３次元構造を、コンフォーマルまたは等方的に処理するとしてよい。後述するように、修正済みプラズマシース３１２は、例えば、３Ｄフォトレジストレリーフ等の３Ｄ構造の複数の表面を、同時に等方的に処理するために利用されるとしてよい。
【００４５】
図４を参照すると、本発明の一実施形態に係る、３Ｄ構造を処理する技術が図示されている。本実施形態において、当該技術を用いて、３Ｄフォトレジストレリーフ１１４ａのＬＥＲおよびＬＷＲを低減させるとしてよい。上述したように、ＬＥＲおよびＬＷＲは、光リソグラフィーを用いる場合に、フォトレジストの未硬化部分を除去した後で、３Ｄフォトレジストレリーフ１１４ａに見られるとしてよい。本実施形態によると、フォトレジストレリーフ１１４ａに見られるＬＥＲおよびＬＷＲは、フォトレジストレリーフ１１４ａが持つ複数の面に対してプラズマシース修正部３１２を利用してプラズマ支援ドーピング（ＰＬＡＤ）処理またはプラズマ浸漬イオン注入（ＰＩＩＩ）処理を実行することによって、低減されるとしてよい。当業者であれば、図面は必ずしも実寸に即したものではないことを認めるであろう。
【００４６】
図４に示すように、側面１１４ａ－１および上面１１４ａ－２を持つ３Ｄフォトレジストレリーフ１１４ａが基板１１２上に設けられているとしてよい。プラズマシース修正部３１２を含むプラズマ処理システムの内部に、基板１１２およびフォトレジストレリーフ１１４ａが設けられており、基板１１２の近傍にはプラズマが配置されている。この後、プラズマに含まれるイオン３１０は、プラズマシース修正部材３１２ａとプラズマシース修正部材３１２ｂとの間の間隙を通過するように、フォトレジストレリーフ１１４ａの表面に向って、方向付けられるとしてよい。図面に図示されているように、イオン３１０は、複数の入射角で進むとしてよい。
【００４７】
本実施形態では、イオン３１０は、フォトレジストレリーフ１１４ａの上面１１４ａ－２および側面１１４ａ－１に注入されるとしてよい。さまざまなイオン種を注入するとしてよいが、本発明ではヘリウム（Ｈｅ）またはアルゴン（Ａｒ）イオンを注入するとしてよい。レジストにイオンを照射する時間は多岐にわたるとしてよいが、照射時間は約１秒から数分の間であるとしてよい。
【００４８】
本発明に応じて構成されたプラズマ処理システム（ＰＳＭシステム）がＬＥＲにどのような効果をもたらすか調べるべく、実験を行った。本明細書で用いる場合、「ＰＳＭシステム」または「ＰＳＭプラズマシステム」という用語は、プラズマシース修正部を利用してプラズマの一部分に隣接して配置されている基板に向ってイオンの角度分布を広範囲に分布させるプラズマ処理システムを意味する。「広い」、「広範囲」または「広い角度範囲」といった用語は、イオン入射角に関連して用いられ、合計で約５度以上の範囲にわたる一連の角度を意味する。プラズマシース修正部は、図３Ｂに示すように、広い角度範囲にわたって分散しているイオンドーズを含む照射を実行するべく利用された。図４を再度参照すると、公称ＣＤが約４０ｎｍである一連のレジストラインに、３ｋｅＶでＨｅのプラズマを照射した。Ｈｅイオン３１０をフォトレジストレリーフ１１４ａの上面１１４ａ－２および側面１１４ａ－１に３－４ｋｅＶで注入することによって、ＬＥＲは５．６ｎｍから３．２ｎｍに改善し、ＬＥＲおよびＬＷＲについては約４０％の改善が見られた。プラズマシース修正部３１２を用いてＨｅイオンを注入することによって、フォトレジストレリーフ１１４ａの複数の表面１１４ａ－１および１１４ａ－２が同時に等方的に改善される。
【００４９】
また、フォトレジストレリーフ１１４ａのクリティカルディメンションの縮小は、最小限に抑えられた。具体的には、処理前に測定されたＣＤは３９．１ｎｍであったが、処理

後には３７．６ｎｍに縮小したのみであり、レジストレリーフ１１４ａにＨｅイオン３１０を複数の入射角で注入した場合には縮小は４％に留められた。ファセッティングまたはスパッタリングも最小限に抑えられた。ＰＬＡＤ処理またはＰＩＩＩ処理は、低エネルギープロセスであるので、イオン３１０が注入される深さは非常に浅い。このため、イオン注入によってフォトレジストレリーフ１１４ａに発生するいかなる変化も、例えば、レジスト縮小および／またはスパッタリングも、最小限に抑えられるとしてよい。

【００５０】

さらに、フォトレジストレリーフ１１４ａの複数の表面の同時且つ等方的な硬化が見られた。フォトレジストレリーフ１１４ａが同時且つ等方的に硬化することは、ダブルパターニングリソグラフィー（ＤＰＬ）プロセスまたはセルフアラインダブルパターニングリソグラフィー（ＳＡＤＰＬ）プロセスを実行するべく追加で光リソグラフィープロセスが実行される場合に有益であるとしてよい。ＤＰＬまたはＳＡＤＰＬの場合、最初のリソグラフィープロセスで形成される２つのフォトレジストレリーフの間にさらにフォトレジストレリーフを生成するべく別のリソグラフィープロセスを追加で実行する。追加でフォトレジストレリーフを形成すると、レリーフ間の距離が小さくなるとしてよく、基板１１２に形成されるトレンチの幅をさらに小さくすることになるとしてよい。追加で行われるリソグラフィープロセスでは、化学処理を実行するとしてよい。実行されると、最初のリソグラフィープロセスで形成されたフォトレジストレリーフの構造に悪影響が出る場合があるとしてよい。本実施形態によると、等方的に硬化するフォトレジストレリーフ１１４ａは、追加リソグラフィープロセスに対応付けられる化学処理に対する耐性を持つとしてよい。このため、ＤＰＬまたはＳＡＤＰＬを実行する追加リソグラフィープロセスが可能になるとしてよい。

【００５１】

本発明の他の実施形態によると、イオンのエネルギーおよび種類は、図４に示すように、複数の角度でイオンを衝突させるパターニングレジストフィーチャのＬＥＲまたはＬＷＲを最適化するように選択されるとしてよい。レジストフィーチャの粗度にイオンの種類およびエネルギーが与える影響を図５および図６に図示する。図５は、従来のプラズマ構成を利用し、本発明に係る構成のプラズマシース修正部を利用するプラズマシステムから引き出されたイオンの照射前および照射後（「基準」）のレジストラインのＬＥＲを図示している。照射前は、ＬＥＲは約４．４ｎｍである。プラズマをＬＥＲに照射して得られる効果は、Ｓｉプラズマ、ＡｒプラズマおよびＨｅプラズマ等のさまざまなプラズマについて示している。図５はさらに、ＡｒおよびＳｉについて、同じ種を用いてイオンエネルギーを変化させた場合の、ＬＥＲへの影響を示す。図５に示す全てのプラズマ条件では、ＬＥＲが大幅に低減している。「大幅」という用語は概して、本明細書においてＬＥＲおよびＬＷＲ等の粗度パラメータと共に用いられる場合、所与の値が約５％以上減少することを意味する。従来のプラズマ構成を利用すると、２ｋｅＶおよび８ｋｅＶのシリコンイオンの場合、プラズマ照射後のＬＥＲは、それぞれ約３．９ｎｍおよび４．０ｎｍまで低減し、２ｋｅＶおよび８ｋｅＶのＡｒの場合は、ＬＥＲはそれぞれ、約３．８ｎｍおよび３．７ｎｍまで低減した。しかし、本発明に係るＰＳＭ構成を利用すると、Ａｒプラズマを４ｋｅＶで照射した場合、および、Ｈｅプラズマを３ｋｅＶで照射した場合に、はるかに大きな低減幅が見られる。ＬＥＲは、それぞれ約２．５ｎｍおよび２．３ｎｍまで低減する。それぞれ、ＬＥＲが４３％および４８％低減したことになる。

【００５２】

ＬＥＲおよびＬＷＲの改善に加えて、本発明の実施形態は、図６に示すように、低周波数粗度および中周波数粗度を改善する。低周波数粗度および中周波数粗度の改善は、電界効果トランジスタのチャネル長L_{eff}に影響を与えるので、デバイス性能を改善する上で特に有用であるとしてよい。公知であるが、パターニング基板の物理的なゲート寸法のバラツキは、その下方にゲート構造をパターニングするために利用されるレジストフィーチャのＬＷＲと直接関連している。ゲートと活性領域との重複部分が比較的小さいデバイスの場合、中周波数粗度成分がデバイス性能を主に左右し、ゲートと活性領域との重複部

分が比較的大きいデバイスの場合、中周波数粗度成分および低周波数粗度成分の両方がデバイス性能に影響を与える。

【００５３】

上記を鑑みると、パターニングレジストフィーチャの最適ライン粗度は、パターニングレジストを用いて下方の基板に製造すべきデバイスの性質に応じて決まるとしてよい。したがって、本発明の実施形態において、フィーチャの粗度の低減を最適化するように一連のパラメータを調整するとしてよい。これらのパラメータには、他にもあるが、イオンの種類、イオンのエネルギー、レジストの種類、レジストフィーチャサイズ、プラズマシース修正部の幾何学的な特徴が含まれるとしてよい。図３Ａを再度参照すると、プラズマシース修正部の幾何学的な特徴には、水平方向の間隙Ｙ、垂直方向の間隙Ｚ等の要素が含まれる。さらに詳細な内容については、同時係属中の米国特許出願第１２／４１８，１２０号、第１２／４１７，９２９号および１２／６４４，１０３号に開示されている。

【００５４】

本発明の別の実施形態によると、パターニングレジストフィーチャには、プラズマシース修正部３１２によってさまざまな角度でイオンドーズを実行することに加えて、電磁波を照射するとしてもよい。特に明記しない限り、「電磁波」という用語は、本明細書で用いられる場合、ＵＶ－可視－赤外（ＩＲ）スペクトル範囲内の放射線を意味する。本発明者達は、イオン衝突および電磁波を組み合わせることで、加算的または相乗的に、レジストフィーチャの粗度を無くす働きがあることを認めた。

【００５５】

一実施形態によると、一連のパターニングレジストフィーチャにイオンドーズを供給するために用いられるプラズマはさらに、同じパターニングレジストフィーチャにＵＶ線を供給するためにも利用される。プラズマに含まれるイオン化ガスは通常、可視線を放出することに加えて、紫外スペクトル範囲のエネルギーを持った放射線を放出する。本発明の実施形態で供給されるプラズマ等のプラズマから放出される放射線は、励起された種が低エネルギー状態に戻るので、励起された種について緩和プロセスが発生するという特徴を持つことが知られている。ＡｒプラズマまたはＨｅプラズマ等、不活性ガスのプラズマを含むプラズマにおいて通常、多くのこのような緩和プロセスが発生する。ＩＲ線、可視光またはＵＶ線を出射させることになる緩和プロセスは、適切なエネルギーの光子を供給して、レジストフィーチャに衝突させ、フォトレジストを変化させるとしてよい。公知のフォトリソグラフィー処理を利用してＵＶ線を照射することで、まだ照射していないポジ型のフォトレジストに化学変化を発生させて、照射部分はその後現像液で溶解させる。本発明では、ＩＲ線、可視光またはＵＶ線をパターニングレジストフィーチャ（言い換えると、最初のレジストのうち、パターニングレジストフィーチャを形成するために利用された最初のリソグラフィープロセスで照射されていない一部分であって、現像後に基板上に残っている部分）に照射することで、化学変化および／または物理変化を発生させるとしてよい。パターニングレジストフィーチャはリソグラフィー処理後に焼成されるが、ＵＶ線等の電磁波の照射は、パターニングレジストを軟化させるために、または、プラズマによるイオン衝突に反応しやすいようにパターニングレジストを変化させるために、十分な大きさであるとしてよい。このようにして、パターニングレジストフィーチャの表面粗度を改善するべく、イオン衝突を電磁波と共に利用するとしてよい。

【００５６】

以下では、説明のため、パターニングレジストフィーチャを修正するべくプラズマからＵＶ線を照射する本発明の実施形態を記載する。ＰＳＭプラズマからのイオン束を広い角度範囲で照射している間にパターニングレジストにインサイチュ方式でＵＶ光子を照射することで、広い角度範囲のイオン束のみを照射した場合に比べて、発生するレジスト粗度への影響が大きくなるとしてよい。このようにして、ＬＥＲおよびＬＷＲは、ＵＶ線ドーズが供給されない場合に比べて、より効果的に低減するとしてよい。しかし、本発明はさらに、広い角度範囲でのイオン束の照射と組み合わせて、他の波長の電磁波、例えば、波長が可視－（ＩＲ）スペクトルにある光等を利用する方法およびシステムを含む。したが

って、本発明は、波長がＵＶ－可視－ＩＲ波長帯域（スペクトル）にある放射線をパターニングレジストに供給するシステムおよび方法を含む。

【００５７】

本発明の実施形態によると、プラズマ特性および／またはプラズマシステム構成は、広い角度範囲のイオンドーズ、および、レジストにイオンドーズを照射することで発生し得る粗度低減効果を高める効果を持つＵＶ線ドーズの両方を供給するように調整される。

【００５８】

プロセスの一例を挙げると、レジストシステム、プラズマガス組成、および、一連の動作条件は、ＰＳＭプラズマシステムで利用されることを考えて選択され、内部で形成されるプラズマは、選択されたレジストシステムで変化を発生させる一連の周波数でＵＶ線を供給する。プラズマガス組成は、例えば、ＡｒまたはＨｅ等の一種類のガスに基づいて決まるとしてもよいし、複数種類の不活性ガスの混合物（Ａｒ／Ｈｅ、Ａｒ／Ｎｅ等）、フッ化炭素／不活性ガスの混合物、酸素を含むガス組成物またはその他のガス組成等、複数のガスを混合させるとしてもよい。

【００５９】

レジストシステムは、公知のレジスト、例えば、１９３ｎｍまたは２４８ｎｍの光リソグラフィーシステムで利用されるように構成されているレジストであってよい。方法の一例によると、ガス組成物およびプラズマ動作条件は、１００ｎｍから３００ｎｍの範囲内のＵＶ線を生成するべく選択されるとしてよい。この範囲のＵＶ波長は、特に、レジストの表面領域において、レジストシステムにおける化学結合を変化させる効果があるとしてよい。例えば、Ａｒ／フッ化炭素プラズマ放電がＵＶ線を発生させることが公知である。実施形態例によると、ＵＶフォトレジストシステム、例えば、公知のメタクリレート系システムを、パターニングフォトレジストシステムを形成するべく利用するとしてよい。これらの種類のポリマーは、適切な波長のＵＶ線を照射すると除去され易い酸素含有ペンダント基を持つとしてよい。この結果、主鎖が切断されるか、または、ポリマー構造および／またはポリマー組成に影響を及ぼす他の反応が発生する可能性がある。

【００６０】

ＰＳＭプラズマから引き出したＵＶ線を用いてパターニングフォトレジストのポリマー構造および／またはポリマー組成を変化させることによって、同様にＰＳＭプラズマから供給される広い角度範囲のイオン束は、フォトレジストフィーチャの粗度をより効率的に低減するとしてよい。例えば、フォトレジストフィーチャの少なくとも一部は、ＵＶ線の照射によって発生する化学変化／物理変化によって軟化するとしてよい。この軟化によって、フォトレジストフィーチャにイオンを衝突させて実行する円滑化が容易になるとしてよい。

【００６１】

しかし、ＵＶ照射が過度になると、レジストフィーチャの分解が望ましくない程度に到達したり、または、レジストの除去が過剰になったりするので、ＣＤ損失が過剰に成ったり、または、表面粗度の改善に失敗したりするとしてよい。したがって、本発明の実施形態は、加算的または相乗的に、プラズマから引き出されたイオンでパターニングレジストフィーチャのＬＷＲおよびＬＥＲを改善するのに適切なＵＶ線ドーズ量を供給することに関する。

【００６２】

図７は、本発明の一の構成に応じたＰＳＭプラズマシステム７００を示す詳細図である。システム７００はプラズマ７０６を含み、プラズマ７０６から、イオン７１０およびＵＶ光子７１４が基板１１２に向けて放出される。システム７００は、チャンバ壁および基板ホルダ（共に不図示）を備えるとしてよい。ＰＳＭ７１２は、部材７１２ａおよび７１２ｂを有しており、プラズマシース境界７０８ａに、部材７１２ｂと部材７１２ａとの間の開口領域の上方において、凹型領域７０８ｂが形成される。イオン７１０は、図３Ａから図６を参照しつつ上述したように、図示しているように広い範囲の角度にわたって基板１１２に衝突して、レジストフィーチャのＬＥＲおよびＬＷＲを改善させるとしてよい。

また、プラズマ７０６から放出されるＵＶ光子７１４の一部は、基板７１０に供給されるとしてよい。例えば、プラズマ７０６が点火されている間、ＩＲ線、可視光およびＵＶ光子を含む電磁波が広い範囲の角度にわたって放出されるとしてよい。図示を簡略化するべく、基板１１２に垂直に向かう光子のみが図示されている。

【００６３】

本発明に応じて、以下で詳細に説明するが、プラズマ７０６およびプラズマシース修正部７１２は、基板１１２に対するＵＶ源として機能する。プラズマガス組成物、ＰＳＭ材料およびＰＳＭ７１２の幾何学的構造を適宜選択して、基板１１２へのＵＶ線７１４の照射を調整するとしてよい。

【００６４】

図７Ａは、ＰＳＭ７１６がＵＶ光子７１４を透過させて、プラズマ７０６から放出される光子を基板１１２の全面に衝突させるシステム構成７０２を図示する。ＰＳＭ７１６は、所望の周波数範囲にわたってＵＶ線に対する透過率が高くなる材料で構成されるとしてよい。例えば、上述したように、基板１１２上に設けられているパターニングレジストフィーチャ（不図示）は、波長帯域が１８０ｎｍから２５０ｎｍのＵＶ線に対して感度を持つフォトレジストを含むとしてよい。言い換えると、フォトレジストは、１８０－２５０ｎｍの波長の放射線が照射されると、化学変化および／または物理変化が発生しやすいとしてよい。したがって、図７Ａに示すように、ＰＳＭ７１６は、ＵＶ光子７１４を基板１１２全体に透過させるべく、１８０ｎｍ－２５０ｎｍの範囲内の放射線に対する透過率が高い材料を含むとしてよい。例えば、ＰＳＭ７１６は、カットオフ周波数が約１８０ｎｍ未満の溶融石英材料を含むとしてよい。これに代えて、１３０ｎｍ－１５０ｎｍの範囲内の放射線に対して感度を持つフォトレジストと共に利用する場合、ＰＳＭ７１６は、約１３０ｎｍの波長までの短波長について透過率が高いＣａＦ２材料を含むとしてよい。ＰＳＭ７１６は、さまざまな絶縁体から構成されるスタックを含む複数の材料を含むとしてよい。ＰＳＭ７１６のバルク部分は、１以上の面に薄膜でコーティングされている。酸化アルミニウム、酸化シリコン、バンドギャップの大きい半導体等の材料は、少なくとも部分的にＰＳＭ７１６を形成するべく利用されるとしてよい。

【００６５】

ＵＶ線を透過するＰＳＭ７１６を提供することによって、本実施形態は、プラズマ７０６が存在する中でＵＶ線およびイオン衝突の両方を基板１１２に照射しやすくなる。例えば、ＰＳＭ７１６は、ＰＳＭ７１６と基板１１２との間で相対的な横方向の並進運動を実現する機構（不図示）を有するとしてよい。この機構がアクティブ化されると、ＰＳＭ７１６の開口をＬと定義されている＋／－方向に基板１１２全体の上方で移動させるとしてよい。この結果、スキャンによって基板１１２全体にイオン７１０を照射する。このようなスキャンを１回または複数回行う間、イオン７１０は、どの時点においても、横方向の寸法ｗで画定される基板１１２の一部のみに照射される一方、ＵＶ線７１４は、スキャン中を通して基板１１２全体に照射し得ることは明らかである。したがって、図７Ａに示す構成は、所望の化学変化または物理変化を発生させるべく、イオン束、例えば、ＬＷＲまたはＬＥＲを低減するためのイオン７１０に比べて、比較的大量のＵＶ束を必要とするレジストシステムに利用される。

【００６６】

図７Ｂは、ＰＳＭ７１８がＵＶ光子７１４を遮蔽して、部材７１８ａと部材７１８ｂとの間に形成されている開口の下方の領域を除き、プラズマ７０６から放出されたＵＶ光子が基板１１２に衝突しないようにしているシステム構成７０４の一例を示す図である。ＰＳＭ７１８は、ＵＶ光子７１４を遮蔽する任意の材料を含むとしてよい。この構成では、スキャン機構が利用される場合、どの時点においても、基板１１２のうちイオン束を受け取る領域（領域「ｗ」と図示している）は、ＵＶ光子（領域「ｙ」として図示している）を受け取る領域と同等または幾分大きいとしてよい。したがって、図７Ｂの構成は、ＬＷＲまたはＬＥＲを低減する広い角度範囲のイオン束と共に作用する所望の化学変化または物理変化を発生させるべく、イオン束に比べて、相対的に少量のＵＶ束を必要とするレジ

ストシステムに利用可能であるとしてよい。

【００６７】

図７Ｃは、ＰＳＭ７２０が部分的にＵＶ光子７１４を遮蔽して、プラズマ７０６から放出されるＵＶ光子が、光子波長に基づき、ＰＳＭ７２０によって選択的に透過されるシステム構成７０５を示す図である。例えば、ＰＳＭ７２０は、第１のＵＶ範囲を選択的に透過させて、第２のＵＶ範囲を遮蔽するとしてよい。この選択性は、ＰＳＭ７２０を製造する際に公知の材料を利用することで実現され得る。酸化物材料、例えば、シリカ系材料にドーパントを添加すると、シリカのＵＶ範囲での透過率が変更され得ることは公知である。このように、ＰＳＭ７２０は、ＵＶスペクトルの一部分でのみＵＶ線を透過させるバルク材料で構成されるとしてよい。これに代えて、ＰＳＭ７２０は、特定範囲のＵＶ波長のみを通過させるフィルタとして機能する層構造を含むとしてよい。例えば、ＰＳＭ７２０は、遮蔽波長帯域、つまり、ＰＳＭ７２０が透過させない波長帯域を挟んで分離している２つの異なる波長帯域を通過させるように構成されているとしてよい。このようなフィルタは、複数の酸化物層、半導体層および酸化物層、および、他の組み合わせを含むとしてよい。多層構造は、例えば、複数の同様の厚みの層を含むとしてもよいし、または、１以上の表面が薄膜でコーティングされているバルク層を含むとしてもよい。したがって、図７Ｃの構造では、どの時点においても、プラズマ７０６から放出される光子の全てのＵＶ波長（光子７１４ａ、７１４ｂ）が、領域「ｙ」において基板１２２に到達する一方、より大きな領域Ｌにおいては、フィルタリングされない波長７１４ｂのＵＶ光子のみがＰＳＭ７２０を透過して基板１１２に到達している。

【００６８】

このように、図７ＣのＰＳＭ構成は、選択波長帯域（７１４ｂ）でイオン７１０によってＬＷＲを低減させ、好ましくない範囲（７１４ａ）は、ＬＷＲの低減に利用されず、および／または、ＬＷＲまたはその他のレジスト特性、例えば、更なるリソグラフィー処理への耐性（レジスト「硬度」）に悪影響を与えるようなレジストシステムに利用され得る。

【００６９】

本発明の別の実施形態では、パターニングレジスト構造に、図３Ａおよび図７から図７Ｃに図示している構造等のＰＳＭを利用することで、広い角度範囲のイオン束が照射されている間、基板温度は調整され得る。図８は、本発明に係る構成のＰＳＭを備えるようにプラズマシステムを利用して、４ｋｅＶのＡｒイオンをさまざまな基板温度でレジストフィーチャに衝突させる実験の測定結果を示す。室温から摂氏７５度まで基板温度を昇温させると、Ａｒイオン処理によるＣＤ損失が低減され、ＬＷＲを大幅に改善する。基板温度の上昇幅が大きくなると、ＬＷＲ／ＬＥＲが大きく改善すると考えられたい。しかし、基板温度の昇温の程度は、上昇後の温度で分解、軟化または溶融が始まると、制限されるとしてよい。

【００７０】

上述したシステム、方法および組成の例は概して、粗度を改善するべく任意に組み合わせて利用して、例えば、ＬＷＲ／ＬＥＲの低減、高周波数粗度、低周波数粗度および中周波数粗度のバラツキの低減、および、同様のパターニングレジスト属性の低減を実現するとしてよい。

【００７１】

図９は、本発明の実施形態に係る、パターニングレジストフィーチャの粗度を低減する方法に含まれるステップの一例を示す要約図である。一部のステップについては、黒丸で示す選択基準がさらに適用されるとしてよい。そのような選択基準は、方法のサブステップの一例を含むとしてよい。ステップ９０２において、レジストプロセスプロフィールを決定する。プロセスプロフィールは、例えば、パターニングフォトレジストフィーチャを形成するために用いられているレジストの種類を含むとしてよい。例えば、業界基準のレジストであってもよいし、または、特定用途向けに開発されたレジストプロフィールであってよい。レジストプロセスプロフィールはさらに、パターニングレジストフィーチャを

生成するべく利用されるフォトリソグラフィー処理の種類を含むとしてよい。例えば、標準的なリソグラフィープロセスであってよく、または、本発明が実現するプラズマ処理の後利用される追加フォトリソグラフィー処理ステップに対する耐性を持つロバスト性の高いレジストを必要とするダブルパターニングプロセスを含むとしてよい。

【００７２】

ステップ９０４において、適切なプラズマイオンプロフィールを提供する。「プラズマイオンプロフィール」という用語は、パターニングレジストを処理するために用いられるプラズマのパラメータであって、基板に供給されるイオンのエネルギーおよび種類を含むパラメータを意味する。図５および図６に示すように、これらのパラメータは、ＬＷＲ／ＬＥＲの低減、具体的には、小および中の範囲の粗度の低減に強い影響力を持つとしてよい。プラズマイオンプロフィールは、プラズマ浸漬注入システムにおいて、パターニングレジスト層を含む基板が当該システム内に載置されるとプラズマを発生させるべく、ＰＳＭプラズマを操作する制御システムに供給されるとしてよい。

【００７３】

適切なプラズマイオンプロフィールはさらに、適切なイオンドーズに関する情報を含むとしてよい。このドーズに関する情報は、ＬＷＲの目標値等の設計基準、および、パターニングレジストに実行される追加処理工程群等のプロセス因子に基づいて決まるとしてよい。例えば、目標とするデバイス設計は、レジストフィーチャのＬＷＲおよび／または低周波数粗度が目標値であることを要件としているとしてよい。このため、レジストフィーチャを製造するために用いられる第１のリソグラフィープロセスに要件を課す。第１のリソグラフィープロセスは、第２のリソグラフィープロセスが実施されるダブルパターニングプロセスフローの一部であってよい。所与のイオンエネルギーおよび角度分布を持つ場合、第１のイオンドーズが、第１のリソグラフィープロセスによってパターニングレジストのＬＷＲの最大低減幅を実現するという効果を奏し、イオンドーズを高くしても実質的に粗度に影響を与えることはないことは、公知であるか、または、実験から導き出されるとしてよい。さらに、第１のイオンドーズよりも大きい第２のイオンドーズは、パターニングレジストを硬化させる上で、第１のイオンドーズよりも効果的であることは、公知であるか、または、実験から導き出されるとしてよい。このように、第２のイオンドーズをパターニングレジストに照射することによって、第２のリソグラフィープロセスをレジストに適用した場合のＣＤ損失またはその他の悪影響が低減されるとしてよい。したがって、適切なイオンドーズとは、必要なＬＷＲ、および、レジストを第２のリソグラフィープロセスに備えるために必要なレジスト硬化の両方を実現する第２のイオンドーズであってよい。

【００７４】

別の例を挙げると、ＬＷＲが第１のイオンドーズで最低値に到達するが、第１のドーズより大きいイオンドーズで増加する場合、高いイオンドーズを利用するのは好ましくないとしてよい。したがって、最適なドーズは、第１のドーズと第２のドーズとの間になるように選択されるとしてよい。つまり、ＬＷＲを最適化することと、第２のリソグラフィープロセスで発生し得る悪影響に備えて硬度を改善することとの間で妥協点を探る。

【００７５】

ステップ９０６において、適切なプラズマ照射プロフィールは、本発明に係るプラズマシース修正部を備えるプラズマイオン注入システム等の処理システムに供給される。「プラズマ照射プロフィール」という用語は、本明細書で用いられる場合、上述したように、ガス種の選択等のさまざまな要因で発生し得るプラズマから得られる電磁波特性を意味する。このプラズマ照射プロフィールは、同じプラズマから引き出されたイオンを衝突させることで得られるレジスト円滑化効果を高めるべく選択されるとしてよい。このように、適切なプラズマ照射プロフィールを提供することは、プラズマを発生させる場合に所望の波長帯域の構成を生成するガス種およびプラズマ動作条件を選択することを含むとしてよい。一例を挙げると、ステップ９０４でのイオン種の提供およびステップ９０６でのプラズマ照射プロフィールの提供は、イオンを衝突させることで得られる円滑化効果、および

、ＵＶを照射することで得られる、この効果の改善効果の両方を可能とするガス種を選択することを含むとしてよい。例えば、プラズマから引き出され、エネルギーを持つＡｒイオンを照射することによって発生し得る、パターニングレジストフィーチャ円滑化効果を奏する低エネルギーＡｒプロセスが特定されるとしてよい。当該低エネルギーＡｒプロセスはさらに、所与のレジストシステムについて円滑化効果を改善する周波数のＵＶ光子を放出するとしてよい。

【００７６】

別の例を挙げると、ステップ９０４のイオン種の選択およびステップ９０６のプラズマ照射プロフィールの選択は、第１のガス種が（少なくとも部分的に）イオン衝突に起因し得る円滑化効果を実現し、第２のガス種が（少なくとも部分的に）ＵＶ線照射に起因し得る、円滑化効果の強化を実現する複数のガス種を選択することを含むとしてよい。例えば、プラズマから引き出されたエネルギーを持つＡｒイオンを照射したことに起因し得るパターニングレジストフィーチャについて円滑化効果を実現するＡｒイオンを利用するプロセスが特定されるとしてよい。また、フッ化炭素種は円滑化効果を向上させる効果を持つエネルギーのＵＶ光子等の放射線を放出することが、公知であるか、または、実験から分かっているとしてよい。したがって、パターニングレジストフィーチャに対して、効果的にイオンを衝突させると共に、円滑化効果が向上するように効果的に放射線を照射することが可能なＡｒ／フッ化炭素種の混合物を含むプラズマガス組成が決定されるとしてよい。

【００７７】

ステップ９０８において、適切なＰＳＭ構成が提供される。これは、適切なＰＳＭ形状、および、適切な一連のＰＳＭ形成材料特性を提供することを含むとしてよい。適切な一連のＰＳＭ形成材料特性は、対象となる波長帯域における電磁波の適切な透過率を含むとしてよい（透過プロフィール）。一例を挙げると、ＰＳＭは、フォトレジストを変化させる効果を奏する波長帯域でＵＶ線を透過させるように設定されるＵＶ透過プロフィールを持つ。

【００７８】

上述したように、本発明に係るプラズマシース修正部は、基板に対する法線方向を中心とした約＋／－６０度の範囲にわたって、広い角度範囲のイオン束を供給するとしてよい。しかし、この分布は、例えば、上述した垂直方向（Ｚ）および水平方向（ｙ）の間隙を相対的に調整することによって、入射イオンの角度の範囲を増減させるべく、特定のレジストシステムおよびレジスト構造に合わせて調整するとしてよい。また、詳細に上述したように、ＰＳＭで利用される材料の選択は、パターニングレジストに到達するＵＶ線の量および波長を調整するべく、変更するとしてよい。

【００７９】

ステップ９１０において、パターニングレジストを支持する基板は、ＰＳＭプラズマを照射している間、適切な温度に保たれる。これは、例えば、基板温度を室温よりも高い温度まで昇温させて、ＬＷＲまたはＬＥＲのさらに大きく低減することを含むとしてよい。

【００８０】

本明細書で説明する方法は、図９を参照しつつ上述したステップを含め、例えば、命令を実行可能なマシンで読出可能なコンピュータ可読格納媒体で複数の命令から成るプログラムを有形に具現化することによって、自動化されるとしてもよい。汎用コンピュータは、このようなマシンの一例である。関連技術分野で公知の適切な格納媒体は、これらに限定されないが、読出可能または書込可能なＣＤ、フラッシュメモリチップ（例えば、サムデバイス）、さまざまな磁気格納媒体等のデバイスを含む。

【００８１】

上述した本発明の実施形態は概して、表面フィーチャの粗度を低減するべくイオン衝突処理を採用すると同時にこのような円滑化処理で発生し得るクリティカルディメンションの損失を低減するシステムおよびプロセスに関するが、他の実施形態では表面パターニングフィーチャに材料を添加することを目的としてイオン衝突処理を採用する機構を設ける

。図１０Ａおよび図１０Ｂを参照すると、本開示の別の実施形態に係る、３Ｄ構造を処理する技術を説明するための簡略図が図示されている。本実施形態では、孔の面積を縮小する技術を図示している。本実施形態では、基板５００は、金属基板、半導体基板または誘電体基板であるとしてよい。基板５００は、孔５１２を持つとしてよい。本実施形態は第１の半径R_1を持つ孔が設けられている基板を処理することに関連して説明されるが、本開示はこれに限定されない。先述した実施形態のフォトレジストと同様に、本発明に係る基板５００は単に、垂直方向に延伸する面を１以上持つ構造であってよい。

【００８２】

本実施形態によると、イオン３１０を複数の入射角で孔５１２の側壁に向ける。イオンが好ましいが、本発明は、ラジカルまたは他の中性子を含む他の粒子を除外するものではない。孔５１２の表面に方向付けられるイオン３１０は、孔５１２の表面上に堆積させられることにより、第２の半径R_2を持つ境界層５２２を形成するとしてよい。プラズマシース修正部５２２を利用することによって、イオン３１０は、複数の入射角で孔５１２の表面に方向付けられるとしてよい。この結果、コンフォーマル且つ等方的に堆積が実行されるとしてよく、均一な厚みを持つ境界層５２２が形成されるとしてよい。さらに、基板５００に本来あった孔の半径は、コンフォーマル且つ均一に、R_1からR_2に減少するとしてよい。

【００８３】

要約すると、本発明は、パターニングフィーチャ、例えば、フォトレジストの粗度を低減するための新規且つ進歩的な方法およびシステムを提供する。本発明は、供給するイオンおよび他の種がパターニングフィーチャ内に侵入しても侵入深さはわずかに抑えることが出来る、比較的低いイオンエネルギーを利用するシステム、例えば、プラズマ浸漬システムで利用され得る。これによって、レジストパターン属性、例えば、プロフィールおよびＣＤ等に大きく影響を与えることなく、表面円滑化を実現可能にする。法線から離れた角度で大量のイオン束を供給することにより、本発明に係るＰＳＭアーキテクチャは特に、表面粗度の影響を最も直接受けるレジストフィーチャの領域、つまり、レジストの側壁を処理するのに効果的である。本発明の実施形態は、不活性ガスプラズマを利用する実施形態を含め、ＲＩＥ等のドライ化学プロセスを利用する際に広く見られるパターン依存効果の影響は受けない。さらに、本発明は、プラズマシース修正部を浸漬注入システム等のプラズマ処理システムと共に利用することによって、レジスト処理プロセスを調整する上で大きな柔軟性を持つ。これは、ガス組成、イオンエネルギー、イオン入射角範囲、プラズマ照射プロフィール、ＰＳＭ透過プロフィールおよび基板温度等、多岐にわたる実験パラメータが、独立して簡便に調整可能であるためである。

【００８４】

本発明の範囲は、本明細書で説明した具体的な実施形態に限定されるものではない。本開示の他のさまざまな実施形態および本開示の変形例は、上述の説明および添付図面を参照すれば、本明細書で説明したもの以外にも存在することが当業者には明らかであろう。本発明は、低エネルギーイオンを利用するプラズマ浸漬イオン注入システムで利用されているが、イオン注入以外に、または、イオン注入に加えて、イオン衝突処理もレジストを円滑化させることに貢献するとしてよく、本発明は、低エネルギーイオンを供給可能な他のプラズマシステムで利用されるとしてよい。さらに、本発明は、ＰＳＭプラズマから放出されるＩＲ／可視光が表面粗度を低減する効果を持つシステムおよび方法を含む。このような実施形態では、プラズマ照射プロフィールは、少なくとも部分的に、ＩＲ／可視光放出特性に基づいて選択されるとしてよい。そして、ＰＳＭ構成は、ＩＲ／可視スペクトルの１以上の範囲におけるＰＳＭの遮蔽特性または透過特性に基づいて選択されるとしてよい。

【００８５】

さらに、注入または成膜に加えて、本開示で開示した技術は、フォトレジスト構造以外の構造、または、フォトレジスト構造に対して、エッチングを実行するために用いられるとしてもよい。例えば、本開示で開示される技術は、トランジスタのゲートのクリティカ

ルディメンションを低減するためのフォトレジストトリミングプロセスを実行するために用いられるとしてよい。一の表面に対して一度でO_2＋ＨＢｒプラズマを利用して実行される従来のトリミングプロセスとは対照的に、本開示に係る技術はエッチング剤（例えば、イオン）を複数の角度で照射し、複数の表面に対して同時に等方的にトリミングプロセスを実行するために、用いられるとしてもよい。このため、トリミングプロセスは、より効率的且つより均一に実行されるとしてよい。このような他の実施形態および変形例は、本開示の範囲内に含まれるものとする。さらに、本開示は特定の目的を実現するべく特定の環境で特定の方法で実施されるものとして本明細書で説明したが、当業者であれば、本開示の有用性はこれらに限定されることなく、本開示は任意の目的を実現するべく任意の環境で実施しても有益であることを認めるであろう。したがって、本開示の主題は、本明細書で説明しているように、本開示の全範囲およびあらゆる意図を鑑みて、解釈されたい。

【図１ａ】

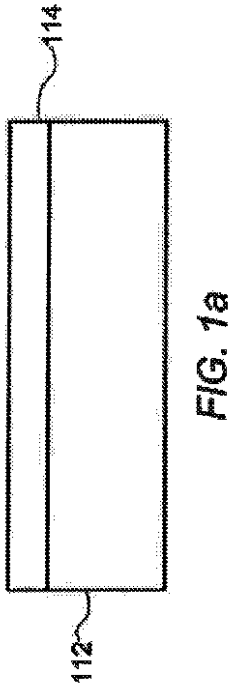


FIG. 1a

【図１ｂ】

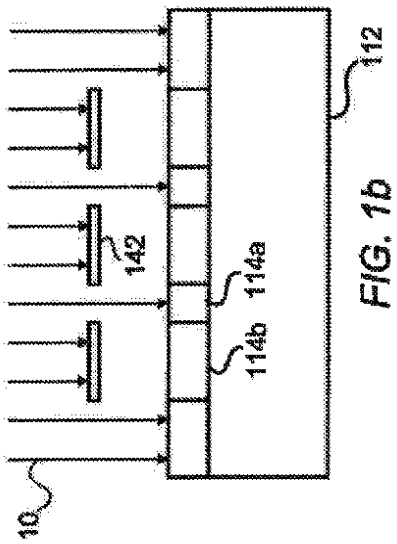


FIG. 1b

【図１ｃ】

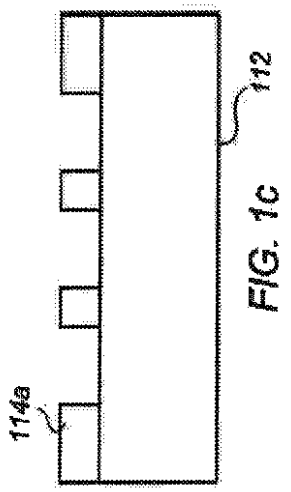


FIG. 1c

【図１ｄ】

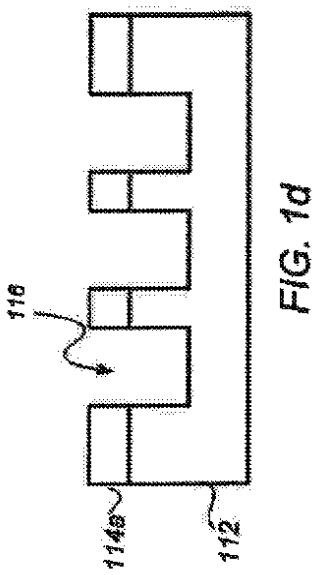


FIG. 1d

【図１ｅ】

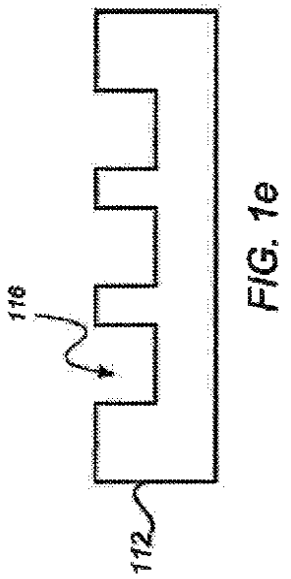


FIG. 1e

【図２】

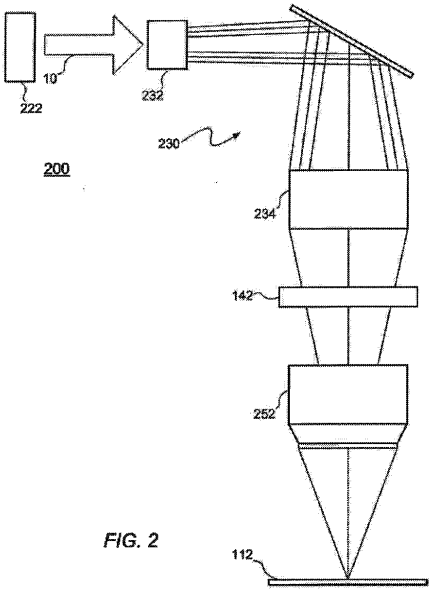
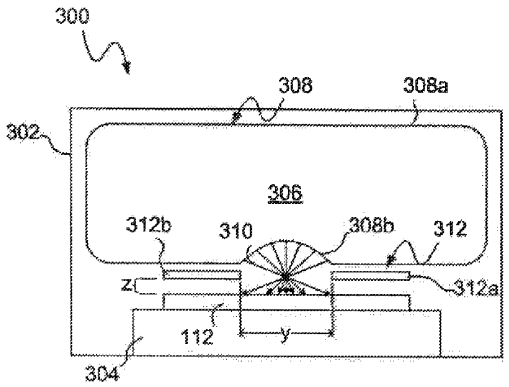
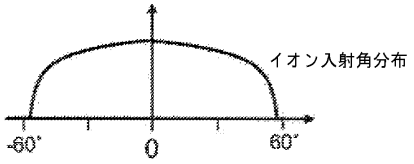


FIG. 2

【図３Ａ】



【図３Ｂ】



【図４】

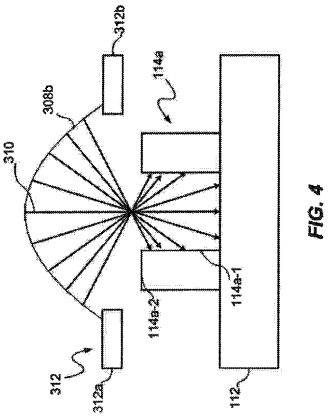
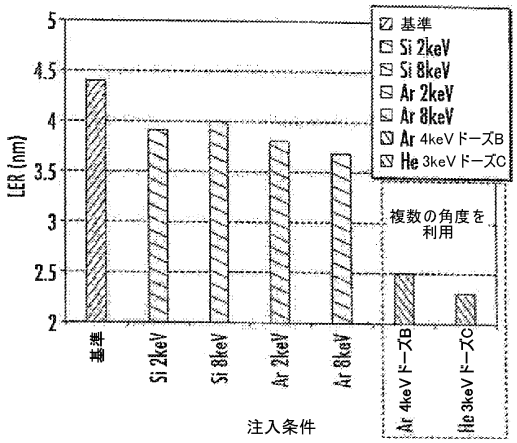
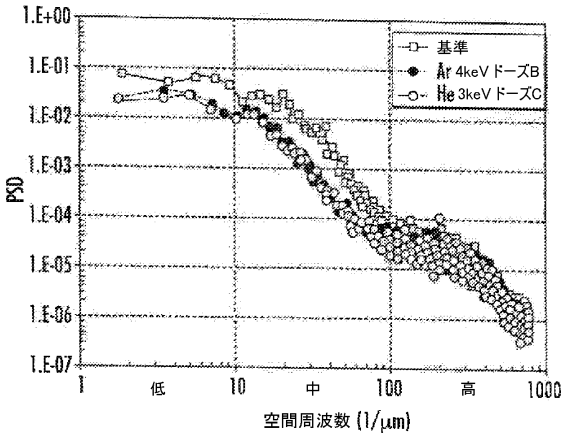


FIG. 4

【図５】



【図６】



【図７】

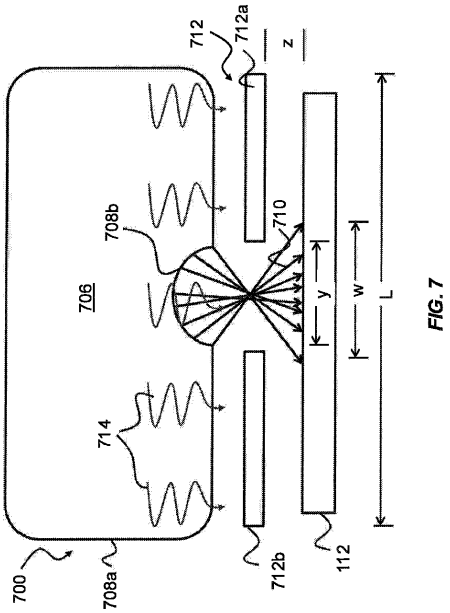


FIG. 7

【図７ａ】

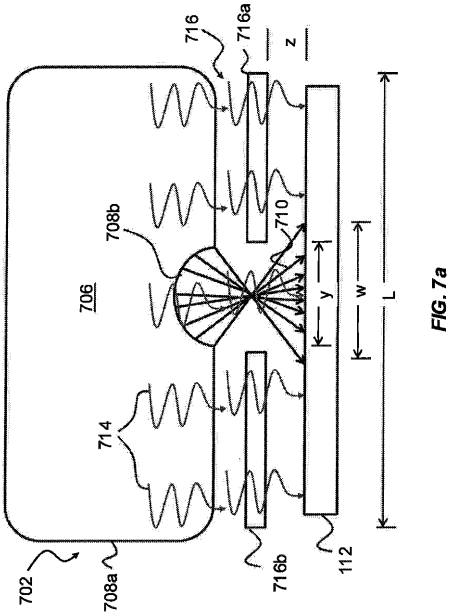


FIG. 7a

【図７ｂ】

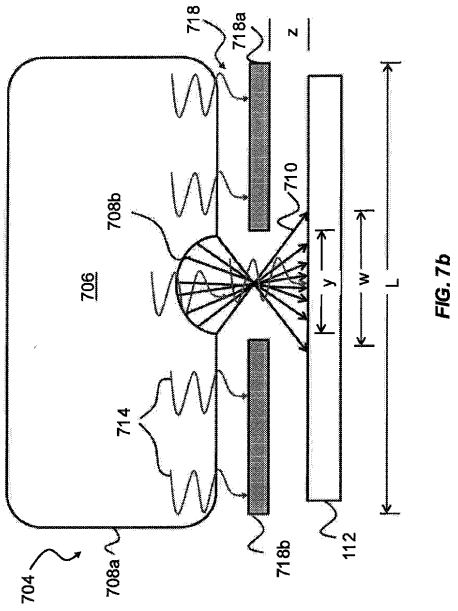


FIG. 7b

【図７ｃ】

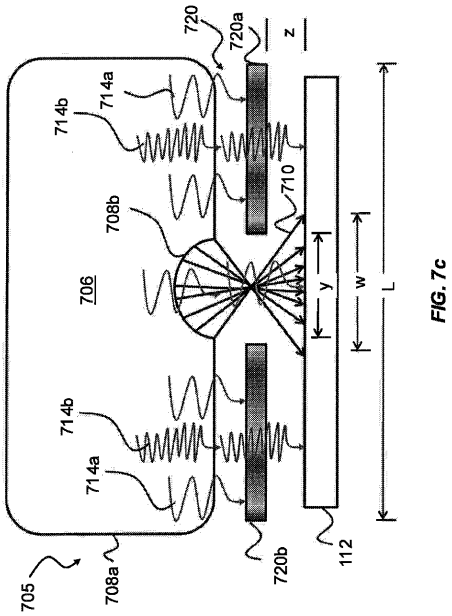
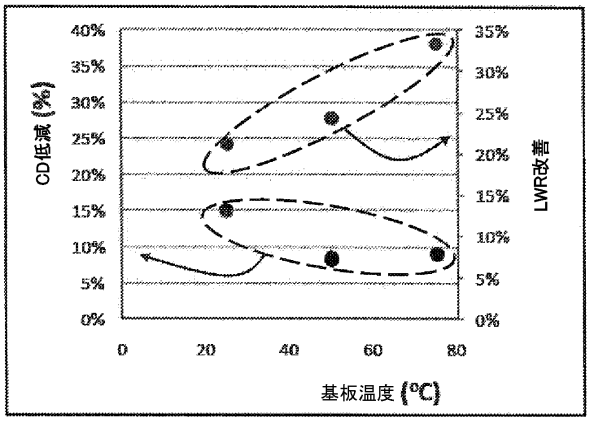
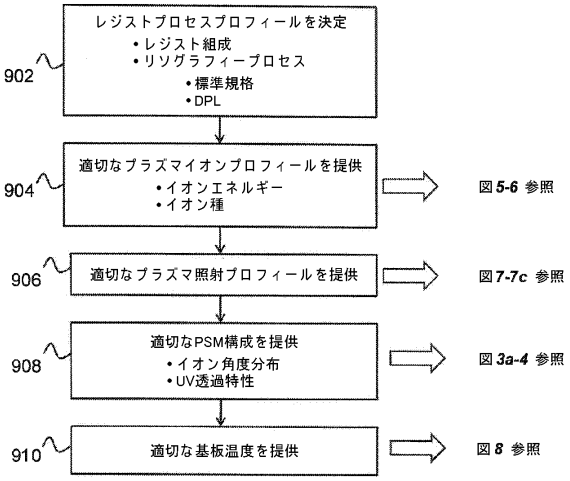


FIG. 7c

【図８】



【図９】



【図１０ａ】

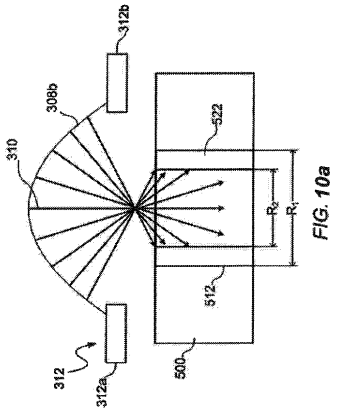


FIG. 10a

【図１０ｂ】

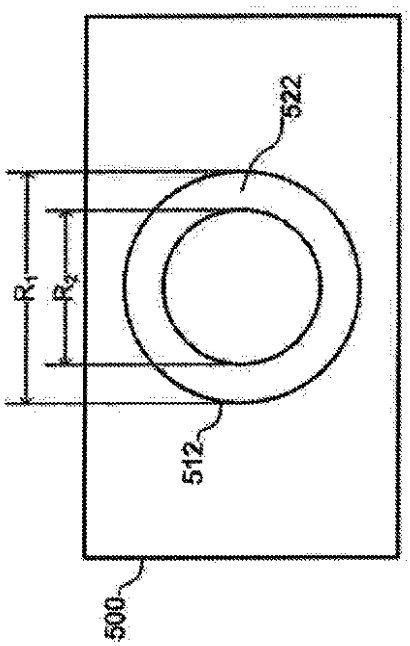


FIG. 10b

フロントページの続き

(72)発明者　マーティン、パトリック、エム.
アメリカ合衆国マサチューセッツ州０１９３０，グロスター，ドリー・ロード３５　バリアン・セミコンダクター・エクイップメント・アソシエイツ・インコーポレイテッド内

審査官　赤尾　隼人

(56)参考文献　特開２０１０－０６２２１２（ＪＰ，Ａ）
特開２００８－１９８９８８（ＪＰ，Ａ）
特開２００７－２１９２９２（ＪＰ，Ａ）
米国特許出願公開第２００５／００５１５１７（ＵＳ，Ａ１）
特開２００９－０１６４５３（ＪＰ，Ａ）
特表２０１２－５２３１２２（ＪＰ，Ａ）
特表２０１２－５２３１２０（ＪＰ，Ａ）

(58)調査した分野(Int.Cl.，ＤＢ名)
Ｈ０１Ｌ　２１／０２７；２１／３０２
Ｇ０３Ｆ　７／４０
Ｈ０１Ｊ　２７／００－２７／２６；３７／０４－３７／０８；
３７／３１７－３７／３２