



(10) **DE 10 2019 201 468 A1** 2020.08.06

(12)

Offenlegungsschrift

(21) Aktenzeichen: **10 2019 201 468.2**

(22) Anmeldetag: **05.02.2019**

(43) Offenlegungstag: **06.08.2020**

(51) Int Cl.: **G03F 1/74 (2012.01)**

G03F 1/80 (2012.01)

G21K 1/00 (2006.01)

B81C 1/00 (2006.01)

H01J 37/26 (2006.01)

H01J 37/30 (2006.01)

C23C 14/28 (2006.01)

(71) Anmelder:
Carl Zeiss SMT GmbH, 73447 Oberkochen, DE

(74) Vertreter:
**BARDEHLE PAGENBERG Partnerschaft mbB
Patentanwälte, Rechtsanwälte, 81675 München,
DE**

(72) Erfinder:
**Budach, Michael, 63456 Hanau, DE; Hoinkis,
Otmар, 64297 Darmstadt, DE**

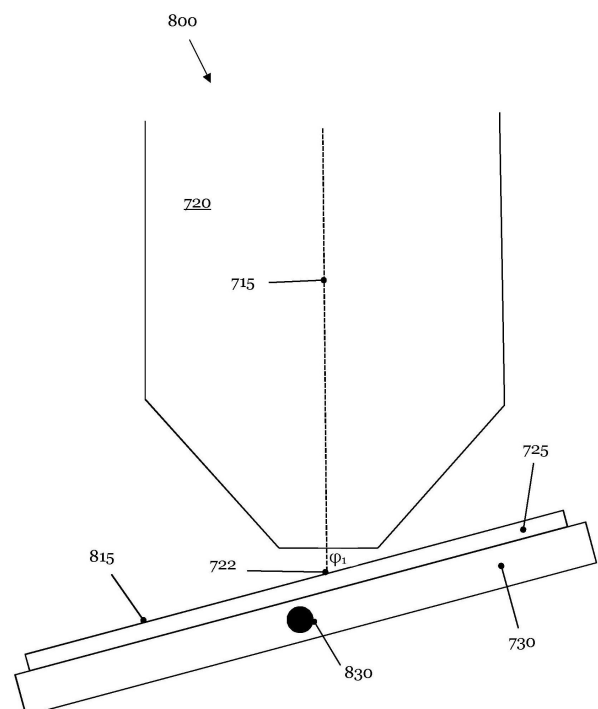
(56) Ermittelter Stand der Technik:
US 2003 / 0 000 921 A1

Prüfungsantrag gemäß § 44 PatG ist gestellt.

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen.

(54) Bezeichnung: **Vorrichtung und Verfahren zum Reparieren einer fotolithographischen Maske**

(57) Zusammenfassung: Die vorliegende Anmeldung betrifft eine Vorrichtung (700) zum Bearbeiten einer fotolithographischen Maske (150, 200, 1500), die aufweist: (a) zumindest einen zeitlich veränderlichen Teilchenstrahl (410, 715), der für eine lokale Abscheidereaktion und/oder eine lokale Ätzreaktion auf der fotolithographischen Maske (150, 200, 1500) ausgebildet ist; (b) zumindest ein erstes Mittel (740, 750, 760) zum Bereitstellen zumindest eines Präkursor-Gases, wobei das Präkursor Gas ausgebildet ist, mit dem Teilchenstrahl (410, 715) bei der lokalen Abscheidereaktion und/oder der lokalen Ätzreaktion zusammenzuwirken; und (c) zumindest ein zweites Mittel (830, 930, 1050), das einen mittleren Auftreffwinkel (φ) zwischen dem zeitlich veränderlichen Teilchenstrahl (410, 715) und einer Oberfläche (115) der fotolithographischen Maske (150, 200, 1500) verringert.



Beschreibung

Technisches Gebiet

[0001] Die vorliegende Erfindung betrifft eine Vorrichtung und ein Verfahren zum Reparieren einer fotolithographischen Maske.

Stand der Technik

[0002] Als Folge der wachsenden Integrationsdichte in der Halbleiterindustrie müssen fotolithographische Masken zunehmend kleinere Strukturen auf Wafer abbilden. Eine Möglichkeit diesem Trend Rechnung zu tragen, ist der Einsatz von fotolithographischen Masken, deren aktinische Wellenlänge zu immer kleineren Wellenlängen verschoben wird. Derzeit werden in der Fotolithographie häufig ArF- (Argonfluorid) Excimerlaser als Lichtquellen eingesetzt, die bei einer Wellenlänge von etwa 193 nm emittieren.

[0003] Gegenwärtig befinden sich Lithographiesysteme in der Entwicklung, die elektromagnetische Strahlung im EUV- (extremen ultravioletten) Wellenlängenbereich (vorzugsweise im Bereich von 10 nm bis 15 nm) verwenden. Diese EUV-Lithographiesysteme basieren auf einem völlig neuen Strahlführungskonzept, das reflektierende optische Elemente verwendet, da derzeit keine Materialien verfügbar sind, die im angegebenen EUV-Bereich optisch transparent sind. Die technologischen Herausforderungen bei der Entwicklung von EUV-Systemen sind enorm und riesige Entwicklungsanstrengungen sind notwendig, um diese Systeme bis zur industriellen Einsatzreife zu bringen.

[0004] Ein maßgeblicher Anteil an der Abbildung immer kleinerer Strukturen in den auf einem Wafer angeordneten Fotolack kommt den fotolithographischen Masken, Belichtungsmasken, Fotomasken oder einfach Masken zu. Mit jeder weiteren Steigerung der Integrationsdichte wird es zunehmend wichtiger, die minimale Strukturgröße der Belichtungsmasken zu verringern. Der Herstellungsprozess fotolithographischer Masken wird deshalb zunehmend komplexer und damit zeitaufwändiger und letztlich auch teurer. Aufgrund der winzigen Strukturgrößen der Pattern-Elemente können Fehler bei der Maskenherstellung nicht ausgeschlossen werden. Diese müssen - wann immer möglich - repariert werden.

[0005] Die Reparatur von Maskendefekten wird derzeit häufig durch Elektronenstrahlinduzierte lokale Abscheide- und/oder Ätzprozess ausgeführt. Aufgrund der abnehmenden Strukturgrößen der Pattern-Elemente werden die Anforderungen an die Reparaturprozesse immer herausfordernder. Aufgrund der kleiner werdenden Strukturelemente ist es erforderlich, dass sich die Kantensteilheit der mittels der Reparaturprozesse erzeugten Strukturen immer mehr

den vom Design vorgegebenen Referenzstrukturen annähert. Diese Problematik trifft in gleicher Weise auf die Reparatur von Defekten von Templates zu, die in der Nanoprägelithographie (englisch: NIL für nanoimprint lithography) zu.

[0006] Die nachfolgend genannten, beispielhaften Dokumente beschreiben das Füllen von engen Löchern auf Wafern bzw. das Herstellen von Proben für die Transmissionselektronenmikroskopie mit Hilfe eines fokussierten Ionenstrahls: US 2012 / 0 217 590 A1, US 2014 / 0 170 776 A1, US 9 530 674 B2, US 5 656 811 und US 2012 / 0 235 055 A1.

[0007] Der vorliegenden Erfindung liegt das Problem zu Grunde, eine Vorrichtung und ein Verfahren anzugeben, die es ermöglichen, das Reparieren von fotolithographischen Masken und/oder von Templates für die Nanoprägelithographie zu verbessern.

Zusammenfassung der Erfindung

[0008] Gemäß einem Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung wird dieses Problem durch eine Vorrichtung nach Anspruch 1 und ein Verfahren nach Anspruch 15 gelöst. In einer Ausführungsform weist die Vorrichtung zum Bearbeiten einer fotolithographischen Maske auf: (a) zumindest einen zeitlich veränderlichen Teilchenstrahl, der für eine lokale Abscheidereaktion und/oder eine lokale Ätzreaktion auf der fotolithographischen Maske ausgebildet ist; (b) zumindest ein erstes Mittel zum Bereitstellen zumindest eines Präkursor-Gases, wobei das Präkursor Gas ausgebildet ist, mit dem Teilchenstrahl bei der lokalen Abscheidereaktion und/oder der lokalen Ätzreaktion zusammenzuwirken; und (c) zumindest ein zweites Mittel, das einen mittleren Auftreffwinkel zwischen dem zeitlich veränderlichen Teilchenstrahl und einer Oberfläche der fotolithographischen Maske zu verringert.

[0009] Durch das Verringern des mittleren Auftreffwinkels eines eine lokale Abscheide- oder Ätzreaktion auslösenden Teilchenstrahls auf die Oberfläche einer fotolithographischen Maske kann eine Kantensteilheit einer zu ätzenden und/oder einer abzuschneidenden Struktur bezüglich der Oberfläche der fotolithographischen Maske vergrößert werden, d.h. in eine bessere Übereinstimmung mit dem typischerweise vom Design vorgegebenen Winkel von 90° gebracht werden. Ferner ermöglicht das Verringern des mittleren Auftreffwinkels des Teilchenstrahls auf die Oberfläche der fotolithographischen Maske das Erzeugen reparierter Stellen, deren Kurvenradius im Wesentlichen nicht von dem Kurvenradius entsprechender defektfreier Stellen der fotolithographischen Maske abweicht. Darüber hinaus werden durch das Verringern des mittleren Auftreffwinkels des Teilchenstrahls auf die Oberfläche der fotolithographi-

schen Maske die durch das Ausführen eines lokalen Reparaturprozesses in der Umgebung einer zu reparierenden Stellen erzeugten Beschädigungen der fotolithographischen Maske minimiert.

[0010] Typischerweise tastet ein Teilchenstrahl einen Scan-Bereich einer Fotomaske oder allgemein einer Probe ab, indem der Teilchenstrahl zeilenweise über den Scan-Bereich gerastert wird. Während des Scannens einer Zeile ändert sich der Auftreffwinkel des Teilchenstrahls auf die Oberfläche der Probe geringfügig. Diese Winkeländerung des Teilchenstrahls während eines Zeilen-Scans oder generell während des Abtastens eines Scan-Bereichs meint die oben unter dem Punkt (c) angegebene Verringerung des Auftreffwinkels auf die Oberfläche einer fotolithographischen Maske nicht. Um die oben definierte Verringerung des Auftreffwinkels von der Auftreffwinkeländerung während eines Zeilen-Scans zu unterscheiden, wird der Ausdruck „mittlerer Auftreffwinkel“ eingeführt. Dieser beschreibt den mittleren Winkel unter dem ein Teilchenstrahl während eines Zeilen-Scans auf eine Probe auftrifft. Beispielsweise kann der mittlere Auftreffwinkel als der arithmetische Mittelwert aller Auftreffwinkel eines Zeilen-Scans oder allgemein eines Scan-Bereichs des Teilchenstrahls definiert sein.

[0011] Der Ausdruck „im Wesentlichen“ bedeutet hier wie auch an anderen Stellen der Beschreibung eine Angabe einer Messgröße innerhalb der üblichen Messfehler, wenn bei der Bestimmung der Messgröße Messgeräte gemäß dem Stand der Technik eingesetzt werden.

[0012] In dieser Anmeldung umfasst der Begriff „fotolithographische Maske“ ebenfalls ein Template für die Nanoprägelithographie.

[0013] Eine fotolithographische Maske weist typischerweise ein Substrat mit darauf angeordneten Pattern-Elementen oder in das Substrat geätzten Pattern-Elementen auf. Als Oberfläche der fotolithographischen Maske wird in dieser Anmeldung ein Bereich einer Oberfläche einer Fotomaske verstanden, der keine das auftreffende Licht abbildenden Strukturelemente aufweist.

[0014] Das zweite Mittel kann zumindest ein Element aus der Gruppe umfassen: eine Kippvorrichtung zum Verkippen der fotolithographischen Maske relativ zum Teilchenstrahl; eine Schwenkvorrichtung einer Strahlquelle zum Verkippen des Teilchenstrahls relativ zur fotolithographischen Maske; und zumindest eine Ablenkvorrichtung für Teilchen des Teilchenstrahls zum Verringern des mittleren Auftreffwinkels des Teilchenstrahls auf die fotolithographische Maske.

[0015] Die Schwenkvorrichtung der Strahlquelle kann das Realisieren eines festen von 90° verschiedenen Winkels zwischen dem Teilchenstrahl der Strahlquelle und einem Probenstück der Vorrichtung zum Bearbeiten einer fotolithographischen Maske umfassen.

[0016] Natürlich ist es auch möglich, dass das zweite Mittel mehr als eine der oben aufgeführten Vorrichtungen umfasst und das Verringern des mittleren Auftreffwinkels durch ein Zusammenwirken von zwei oder drei der angegebenen Vorrichtungen ausgeführt wird.

[0017] Das zweite Mittel kann ausgebildet sein, den verringerten Auftreffwinkel des zeitlich veränderlichen Teilchenstrahls um die optische Achse der fotolithographischen Maske zu drehen.

[0018] In Kugelkoordinaten betrachtet und unter der Annahme, dass die optische Achse der fotolithographischen Maske parallel zur z-Achse eines Koordinatensystems in Kugelkoordinaten ist, ist das zweite Mittel in jedem Fall ausgebildet, einen Polarwinkel zwischen dem Teilchenstrahl und der optischen Achse zu ändern, d.h. zu vergrößern. Indem das zweite Mittel neben einer Änderung des Polarwinkels auch eine Änderung des Azimutwinkels ermöglicht, kann das verbesserte Bearbeiten der fotolithographischen Maske mittels einer lokalen Abscheide- oder Ätzreaktion an einer beliebigen Stelle oder Seite eines Pattern-Elements der Fotomaske ausgeführt werden.

[0019] Die Ablenkvorrichtung kann zumindest ein Element aus der Gruppe umfassen: ein elektrisches Ablenkensystem, und ein magnetisches Ablenkensystem.

[0020] Eine Kombination eines elektrischen und eines magnetischen Ablenkensystems ist ebenfalls möglich. Dabei kann ein elektrisches Ablenkensystem den Teilchenstrahl in eine erste Richtung ablenken und das magnetische Ablenkensystem kann den Teilchenstrahl in eine zweite Richtung ablenken. Es ist aber auch möglich, dass das elektrische und das magnetische Ablenkensystem den Teilchenstrahl in die gleiche Richtung auslenken und sich so gegenseitig in ihrer Wirkung auf den Teilchenstrahl verstärken.

[0021] Ferner kann die Ablenkvorrichtung ausgebildet sein, den Teilchenstrahl in zwei Richtungen abzulenken. Die beiden Ablenkrichtungen der Ablenkvorrichtung können im Wesentlichen einen Winkel von 90° zueinander aufweisen.

[0022] Die Ablenkvorrichtung kann Teil der Strahlquelle des Teilchenstrahls sein. Die Ablenkvorrichtung kann nicht Teil der Strahlquelle des Teilchenstrahls sein. Wenn die Ablenkvorrichtung Teil der Strahlquelle des Teilchenstrahls ist und die Strahlquelle beispielsweise ein Rasterelektronenmikroskop

umfasst, kann die Ablenkvorrichtung in einer Säule des Rasterelektronenmikroskops angeordnet sein. Falls die Ablenkvorrichtung nicht Teil der Strahlquelle des Teilchenstrahls ist und die Strahlquelle ein Rasterelektronenmikroskop umfasst, kann die Ablenkvorrichtung außerhalb der Säule des Rasterelektronenmikroskops angeordnet sein.

[0023] Es ist aber auch möglich, dass sowohl das elektrische wie auch das magnetische Ablenkssystem Teil der Strahlquelle des Teilchenstrahls sind. So kann beispielsweise das elektrische Ablenkssystem vor einer elektronenoptischen Linse der Strahlquelle und das magnetische Ablenkssystem hinter einer elektronenoptischen Linse der Strahlquelle angeordnet sein.

[0024] Das elektrische Ablenkssystem kann zumindest ein Ablenkplattenpaar umfassen. Das elektrische Ablenkssystem kann zumindest zwei Ablenkplattenpaare umfassen, die parallel zueinander angeordnet sind. Das elektrische Ablenkssystem kann vor einer elektronenoptischen Objektivlinse der Strahlquelle für den Teilchenstrahl angeordnet sein.

[0025] Das magnetische Ablenkssystem kann zumindest eine Spulenordnung umfassen. Die zumindest eine Spulenordnung kann zumindest ein Spulenpaar umfassen. Das magnetische Ablenkssystem kann aber auch zumindest einen oder mehrere Permanentmagneten umfassen.

[0026] Die Kippvorrichtung kann einen um zumindest zwei Achsen drehbaren Probenstisch für die fotolithographische Maske umfassen, und die zwei Achsen können in einer Ebene der fotolithographischen Maske liegen und nicht parallel sein. Es ist vorteilhaft, wenn die beiden Drehachsen des Probenstisches aufeinander senkrecht stehen.

[0027] Der Probenstisch kann um eine dritte Achse drehbar sein, wobei die dritte Drehachse des Probenstisches im Wesentlichen parallel zur optischen Achse der fotolithographischen Maske ist. Eine Kombination aus einem zweiten Mittel, das den mittleren Auftreffwinkel des zeitlich veränderlichen Teilchenstrahls auf die Oberfläche der fotolithographischen Maske in einer Richtung verringert, und eines um die optische Achse der fotolithographischen Masken drehbaren Probenstisches ermöglicht die Einstellung des mittleren Auftreffwinkels des zeitlich veränderlichen Teilchenstrahls in zwei Raumrichtungen zu ändern. Dadurch wird ein Zugang zu einem beliebigen Bearbeitungsort auf der fotolithographischen Maske möglich.

[0028] Das zweite Mittel kann den mittleren Auftreffwinkel zwischen dem zeitlich veränderlichen Teilchenstrahl und der Oberfläche der fotolithographischen Maske um $> 5^\circ$, bevorzugt $> 10^\circ$, mehr bevor-

zugt $> 20^\circ$, und am meisten bevorzugt $> 30^\circ$ verringern.

[0029] Der Teilchenstrahl kann am Auftreffpunkt auf die fotolithographische Maske einen Fokusbereich mit einem Durchmesser von 0,1 nm bis 1000 nm, bevorzugt 0,2 nm bis 200 nm, mehr bevorzugt von 0,4 nm bis 50 nm, und am meisten bevorzugt von 0,5 nm bis 2 nm aufweisen.

[0030] Der Teilchenstrahl kann einen Öffnungswinkel von 0,1 mrad bis 1000 mrad, bevorzugt von 0,2 mrad bis 700 mrad, mehr bevorzugt von 0,5 mrad bis 500 mrad, und am meisten bevorzugt von 1 mrad bis 200 mrad aufweisen. Die Abkürzung „mrad“ steht für Milli-Radian.

[0031] Die kinetische Energie der Teilchen eines Teilchenstrahls kann einen Bereich von 0,01 keV bis 500 keV, bevorzugt 0,05 keV bis 200 keV, mehr bevorzugt 0,1 keV bis 50 keV, und am meisten bevorzugt 0,1 keV bis 1 keV umfassen.

[0032] Ein zeitlich veränderlicher Teilchenstrahl kann einen Teilchenstrahl umfassen, der über einen Scan-Bereich der fotolithographischen Maske rastert. Das Scannen eines Teilchenstrahls kann durch die Parameter Verweilzeit (dwell time) und Wiederholzeit (repetition time) charakterisiert werden.

[0033] Ein zeitlich veränderlicher Teilchenstrahl kann aber auch einen Teilchenstrahl umfassen, wobei die kinetische Energie seiner Teilchen und/oder wobei der Fokusbereich des Teilchenstrahls eine zeitliche Änderung erfahren.

[0034] Die Vorrichtung zur Bearbeiten einer fotolithographischen Maske kann ferner eine Auswerteeinheit aufweisen, die ausgebildet ist, Scan-Daten einer zu bearbeitenden Stelle der fotolithographischen Maske zu analysieren. Insbesondere kann die Auswerteeinheit aus den Scan-Daten Bilddaten erzeugen. Die Bilddaten können gespeichert werden und/oder können auf einem Bildschirm dargestellt werden.

[0035] Die Auswerteeinheit kann ferner ausgebildet sein, aus den analysierten Scan-Daten zumindest eine Veränderung des mittleren Auftreffwinkels des Teilchenstrahls auf die Oberfläche der fotolithographischen Maske zu bestimmen.

[0036] Die Auswerteeinheit kann ausgebildet sein, die Verringerung des mittleren Auftreffwinkels des Teilchenstrahls aus der kinetischen Energie des Teilchenstrahls zum Ausführen der lokalen Ätzreaktion und/oder der lokalen Abscheidereaktion zu bestimmen. Zudem kann die Auswerteeinheit ausgebildet sein, die Verringerung des mittleren Auftreffwinkels des Teilchenstrahls aus einer Materialzusammensetzung

zung des abzuschneidenden und/oder des zu ätzenden Materials zu bestimmen. Ferner kann die Auswerteeinheit ausgebildet sein, den mittleren Auftreffwinkel des Teilchenstrahls auf Basis der Scan-Daten einzustellen.

[0037] Die kinetische Energie der Teilchen des Teilchenstrahls und die Materialzusammensetzung, auf die die Teilchen des Teilchenstrahls treffen, beeinflussen die Größe des Wechselwirkungsbereichs des Teilchenstrahls mit der fotolithographischen Maske und damit die Fläche der Maske, die durch das Ausführen eines lokalen Abscheideprozesses oder eines lokalen Ätzprozesses bearbeitet bzw. beeinträchtigt werden kann.

[0038] Die Auswerteeinheit kann ferner ausgebildet sein, eine Fläche und eine Materialzusammensetzung für eine Schutzschicht um eine Bearbeitungsstelle zu bestimmen.

[0039] Die Vorrichtung zum Bearbeiten einer fotolithographischen Maske kann ferner eine Steuerungseinrichtung aufweisen, die ausgebildet ist, das zweite Mittel zum Verändern des mittleren Auftreffwinkels des Teilchenstrahls auf die Oberfläche der fotolithographischen Maske zu steuern.

[0040] Das erste Mittel kann zumindest ein Element aus der Gruppe umfassen: zumindest einen Vorratsbehälter, der ausgebildet ist zum Speichern des zumindest einen Präkursor-Gases, zumindest ein Steuerventil, das ausgebildet ist zum Kontrollieren eines Gasmengenstroms des zumindest einen Präkursor-Gases, zumindest ein Gasleitungssystem, das ausgebildet ist, das zumindest eine Präkursor-Gas von dem zumindest einen Vorratsbehälter zum Auftreffpunkt des Teilchenstrahls auf die fotolithographische Maske zu leiten, und zumindest eine Düse, die ausgebildet ist, das Präkursor-Gas am Auftreffpunkt des Teilchenstrahls auf die Oberfläche der fotolithographischen Maske zu konzentrieren.

[0041] Das zumindest eine Präkursor-Gas kann zumindest ein Element aus der Gruppe umfassen: zumindest ein Ätzgas, zumindest ein Abscheidegas und zumindest ein additives Gas.

[0042] Das zumindest eine Ätzgas kann zumindest eine Halogen-enthaltende Verbindung umfassen. Eine Halogen-enthaltende Verbindung kann zumindest ein Element aus der Gruppe umfassen: Fluor (F₂), Chlor (Cl₂), Brom (Br₂), Jod (I₂), Xenondifluorid (XeF₂), Xenontetrafluorid (XeF₄), Xenonhexafluorid (XeF₆), Xenonchlorid (XeCl), Argonfluorid (ArF), Kryptonfluorid (KrF), Schwefeldifluorid (SF₂), Schwefeltetrafluorid (SF₄), Schwefelhexafluorid (SF₆), Phosphortrifluorid (PF₃), und Phosphorpen-tafluorid (PF₅).

[0043] Das zumindest eine Abscheidegas kann zumindest ein Element aus der Gruppe umfassen: ein Metallalkyl, ein Übergangselementalkyl, ein Hauptgruppenalkyl, ein Metallcarbonyl, ein Übergangselementcarbonyl, ein Hauptgruppencarbonyl, ein Metallalkoxyd, ein Übergangselementalkoxyd, ein Hauptgruppenalkoxyd, ein Metallkomplex, ein Übergangselementkomplex, ein Hauptgruppenkomplex, und eine organische Verbindung.

[0044] Das Metallalkyl, das Übergangselementalkyl und das Hauptgruppenalkyl können zumindest ein Element aus der Gruppe umfassen: Cyclopentadienyl- (Cp) Trimethyl-Platin (CpPtMe₃), Mehtyl-cyclopentadienyl- (MeCp) Trimethyl-Platin (MeCpPtMe₃), Tetramethylzinn (SnMe₄), Trimethylgallium (GaMe₃), Ferrocen (Co₂Fe), und Bis-Aryl-Chrom (Ar₂Cr). Das Metallcarbonyl, das Übergangselementcarbonyl und das Hauptgruppencarbonyl können zumindest ein Element aus der Gruppe umfassen: Chromhexacarbonyl (Cr(CO)₆), Molybdänhexacarbonyl (Mo(CO)₆), Wolframhexacarbonyl (W(CO)₆), Dikobaltoctacarbonyl (Co₂(CO)₈), Trirutheniumdodecadecarbonyl (Ru₃(CO)₁₂), und Eisenpentacarbonyl (Fe(CO)₅). Das Metallalkoxyd, das Übergangselementalkoxyd und das Hauptgruppenalkoxyd können zumindest ein Element aus der Gruppe umfassen: Tetraethylorthosilicat (TEOS, Si(OC₂H₅)₄) und Tetraisopropoxytitan (Ti(OC₃H₇)₄). Das Metallhalogenid, das Übergangselementhalogenid und das Hauptgruppenhalogenid können zumindest ein Element aus der Gruppe umfassen: Wolframhexafluorid (WF₆), Wolframhexachlorid (WCl₆), Titanhexachlorid (TiCl₆), Bortrichlorid (BCl₃) und Siliziumtetrachlorid (SiCl₄). Der Metallkomplex, der Übergangselementkomplex und der Hauptgruppenkomplex können zumindest ein Element aus der Gruppe umfassen: Kupfer-Bis-Hexafluoroacetylacetonat (Cu(C₅F₆HO₂)₂) und Dimethyl-Gold-Trifluoroacetylacetonat (Me₂Au(C₅F₃H₄O₂)). Die organische Verbindung kann zumindest ein Element aus der Gruppe umfassen: Kohlenstoffmonoxid (CO), Kohlenstoffdioxid (CO₂), einen aliphatischen Kohlenwasserstoff, einen aromatischen Kohlenwasserstoff, einen Bestandteil von Vakuum-Pumpenölen, und eine volatile organische Verbindung.

[0045] Das zumindest eine additive Gas kann zumindest ein Element aus der Gruppe umfassen: ein Oxidationsmittel, ein Halogenid, und ein Reduktionsmittel.

[0046] Das Oxidationsmittel kann zumindest ein Element aus der Gruppe umfassen: Sauerstoff (O₂), Ozon (O₃), Wasserdampf (H₂O), Wasserstoffperoxid (H₂O₂), Distickstoffoxid (N₂O), Stickstoffoxid (NO), Stickstoffdioxid (NO₂), und Salpetersäure (HNO₃). Das Halogenid kann zumindest ein Element aus der Gruppe umfassen: Chlor (Cl₂), Salzsäure (HCl), Xenondifluorid (XeF₂), Flusssäure (HF), Jod

(I₂), Hydrogenjodid (HI), Brom (Br₂), Hydrogenbromid (HBr), Nitrosylchlorid (NOCl), Phosphortrichlorid (PCl₃), Phosphorpentachlorid (PCl₅), und Phosphortrifluorid (PF₃). Das Reduktionsmittel kann zumindest ein Element aus der Gruppe umfassen: Wasserstoff (H₂), Ammoniak (NH₃), und Methan (CH₄).

[0047] Der Teilchenstrahl kann zumindest ein Element aus der Gruppe umfassen: einen Elektronenstrahl, einen Ionenstrahl, einen Atomstrahl, einen Molekülstrahl, und einen Photonenstrahl.

[0048] Ferner kann die Steuerungseinrichtung ausgebildet sein, das erste Mittel zu steuern. Zudem kann die Steuerungseinrichtung ausgebildet sein, den Teilchenstrahl und das erste Mittel zum Abscheiden einer Schutzschicht um die Bearbeitungsstelle zu steuern.

[0049] Die Vorrichtung zum Bearbeiten einer fotolithographischen Maske kann zudem zumindest einen Detektor umfassen, der ausgebildet ist, die von der fotolithographischen Maske herrührenden Teilchen, die von dem Teilchenstrahl hervorgerufen werden, zu detektieren. Die von der fotolithographischen Maske herrührenden Teilchen können die Teilchenart des zeitlich veränderlichen Teilchenstrahls umfassen. Die von der fotolithographischen Maske herrührenden Teilchen können von der Teilchenart des Teilchenstrahls verschieden sein.

[0050] Zudem kann die Vorrichtung zum Bearbeiten einer fotolithographischen Maske ausgebildet sein, die Schritte der nachfolgend definierten Verfahren zum Bearbeiten einer fotolithographischen Maske auszuführen.

[0051] In einer Ausführungsform weist das Verfahren zum Bearbeiten einer fotolithographischen Maske die Schritte auf: (a) Bereitstellen zumindest eines Präkursor-Gases; (b) Ausführen einer lokalen Abscheidereaktion und/oder einer lokalen Ätzreaktion auf der fotolithographischen Maske durch Einwirken eines zeitlich veränderlichen Teilchenstrahls auf das Präkursor-Gas; und (c) Verringern eines mittleren Auftreffwinkels zwischen dem zeitlich veränderlichen Teilchenstrahl und einer Oberfläche der fotolithographischen Maske während zumindest eines Teils des Ausführens der lokalen Abscheidereaktion und/oder der lokalen Ätzreaktion.

[0052] Das Verfahren zum Bearbeiten einer fotolithographischen Maske kann ferner den Schritt aufweisen: Analysieren der fotolithographischen Maske mit dem Teilchenstrahl.

[0053] Das Verfahren zum Bearbeiten einer fotolithographischen Maske kann ferner den Schritt aufweisen: Verändern des Auftreffwinkels während des Ausführens der lokalen Abscheidereaktion und/oder

der lokalen Ätzreaktion. Wie bereits oben ausgeführt, umfasst der Auftreffwinkel in Kugelkoordinaten den Azimutwinkel oder den Polarwinkel.

[0054] Das Verfahren zum Bearbeiten einer fotolithographischen Maske kann ferner den Schritt aufweisen: Unterbrechen der lokalen Abscheidereaktion und/oder der lokalen Ätzreaktion und Analysieren eines erzeugten Teils einer zu erzeugenden Struktur und/oder einer zu ätzenden Stelle mit dem Teilchenstrahl.

[0055] Das Verfahren zum Bearbeiten einer fotolithographischen Maske kann während eines lokalen Bearbeitungsprozesses der fotolithographischen Maske unterbrochen werden. Der Teilchenstrahl kann eingesetzt werden, um die Bearbeitungsstelle zu analysieren. Basierend auf dem Analyseprozess kann der mittlere Auftreffwinkel vor einem Fortführen des Bearbeitungsprozesses geändert werden. Durch diese Prozessführung wird es möglich, die Kantensteilheit einer Seitenwand einer zu erzeugenden Struktur während eines Bearbeitungsprozesses zu ändern.

[0056] Das Verändern des mittleren Auftreffwinkels des Teilchenstrahls auf die Oberfläche der fotolithographischen Maske kann durch eine Steuerungseinrichtung in automatisierter Form erfolgen.

[0057] Ein Computerprogramm kann Anweisungen umfassen, die ein Computersystem einer Vorrichtung nach einem der oben beschriebenen Aspekte veranlassen, die Verfahrensschritte einer der oben angegebenen Aspekte auszuführen, wenn das Computersystem das Computerprogramm ausführt.

Figurenliste

[0058] In der folgenden detaillierten Beschreibung werden derzeit bevorzugte Ausführungsbeispiele der Erfindung unter Bezugnahme auf die Zeichnungen beschrieben, wobei

Fig. 1 im oberen Teilbild einen schematischen Schnitt einer Kante eines Pattern-Elements einer fotolithographischen Maske, wie vom Design vorgegeben, dargestellt und im unteren Teilbild eine defektfrei hergestellte Kante des Pattern-Elements des oberen Teilbildes wiedergibt;

Fig. 2 einen schematischen Schnitt einer Kante eines Pattern-Elements einer fotolithographischen Maske zeigt, die einen Defekt in Form überschüssigen Materials aufweist;

Fig. 3 einen schematischen Schnitt der Kante des Pattern-Elements der **Fig. 2** nach Ausführen eines lokalen Reparaturprozesses zum Entfernen des Defekts gemäß dem Stand der Technik präsentiert;

Fig. 4 im oberen Teilbild die **Fig. 2** wiedergibt, wobei ein Teilchenstrahl mit einem Öffnungswinkel β auf die fotolithographische Maske auftrifft, und im unteren Teilbild die Intensitätsverteilung im Fokus des Teilchenstrahls des oberen Teilbildes illustriert;

Fig. 5 einen Wechselwirkungsbereich („Streubirne“) des Teilchenstrahls der **Fig. 4** beim Bearbeiten einer Kante oder einer Seitenwand des Pattern-Elements der fotolithographischen Maske der **Fig. 2** gemäß dem Stand der Technik darstellt;

Fig. 6 schematisch das Ausführen eines Teilchenstrahl-induzierten Abscheideprozesses gemäß dem Stand der Technik veranschaulicht;

Fig. 7 einen schematischen Schnitt durch einige Komponenten einer Vorrichtung zum Bearbeiten einer fotolithographischen Maske zeigt;

Fig. 8 einen vergrößerten Ausschnitt der Vorrichtung der **Fig. 7** mit einer Kippvorrichtung zum Verkippen der fotolithographischen Maske relativ zum Teilchenstrahl der Vorrichtung der **Fig. 7** wiedergibt;

Fig. 9 einen vergrößerten Ausschnitt der Vorrichtung der **Fig. 7** mit einer Schwenkvorrichtung zum Verkippen des Teilchenstrahls der Vorrichtung der **Fig. 7** relativ zur fotolithographischen Maske darstellt;

Fig. 10 einen vergrößerten Ausschnitt der Vorrichtung der **Fig. 7** mit einer Ablenkvorrichtung in Form eines magnetischen Ablenksystems am Ausgang einer Säule eines Rasterelektronenmikroskops präsentiert;

Fig. 11 einen vergrößerten Ausschnitt der Vorrichtung der **Fig. 7** mit einer Ablenkvorrichtung in Form eines elektrischen Ablenksystems am Proben-seitigen Ende der Säule des Rasterteilchenmikroskops wiedergibt;

Fig. 12 die **Fig. 4** reproduziert, wobei ein mittlerer Auftreffwinkel zwischen dem zeitlich veränderlichen Elektronenstrahl der Vorrichtung der **Fig. 7** und einer Oberfläche einer Probe verringert ist;

Fig. 13 die Wechselwirkungsbereiche der **Fig. 5** wiedergibt, wobei der mittlere Auftreffwinkel des Elektronenstrahls der Vorrichtung 7 während des Ausführens eines Bearbeitungsprozesses verringert ist;

Fig. 14 den Abscheideprozess der **Fig. 6** wiederholt, wobei der mittlere Auftreffwinkel zwischen dem Teilchenstrahl der Vorrichtung der **Fig. 7** und der Oberfläche einer fotolithographischen Maske verringert ist;

Fig. 15 einen Ausschnitt einer elektronenmikroskopischen Aufnahme einer fotolithographi-

schen Maske mit einem Pattern-Element zeigt, wobei das Pattern-Element einen Defekt fehlenden Pattern-Materials aufweist;

Fig. 16 den Ausschnitt der **Fig. 15** nach Ausführen einer Reparatur des Defekts fehlenden Pattern-Materials darstellt; und

Fig. 17 ein Flussdiagramm des Verfahrens zum Bearbeiten einer fotolithographischen Maske angibt.

Detaillierte Beschreibung bevorzugter Ausführungsbeispiele

[0059] Im Folgenden werden derzeit bevorzugte Ausführungsformen einer erfindungsgemäßen Vorrichtung und eines erfindungsgemäßen Verfahrens zum Bearbeiten einer fotolithographischen Maske genauer erläutert. Die erfindungsgemäße Vorrichtung wird am Beispiel eines Rasterelektronenmikroskops beschrieben. Die erfindungsgemäße Vorrichtung ist jedoch nicht auf ein Rasterelektronenmikroskop beschränkt. Vielmehr kann eine erfindungsgemäße Vorrichtung auf einem beliebigen Rasterteilchenmikroskop beruhen, d.h. eine in dieser Anmeldung definierte Vorrichtung kann eine beliebige Teilchenart zum Bearbeiten einer Fotomaske einsetzen. Ferner können mit einer erfindungsgemäßen Vorrichtung und beim Einsatz eines erfindungsgemäßen Verfahrens nicht nur fotolithographische Masken bearbeitet werden. Vielmehr können die erläuterten Vorrichtungen und Verfahren zum Bearbeiten diverser mikrostrukturierter Komponenten eingesetzt werden. Beispiele hierfür sind Templates für die Nanoimprint-Lithographie, Wafer, ICs (integrated circuits), MEMSs (micro-electromechanical systems) und PICs (photonic integrated circuits).

[0060] Das obere Teilbild **105** der **Fig. 1** zeigt schematisch einen Schnitt eines Ausschnitts einer fotolithographischen Maske **100**. Die Maske **100** kann eine transmittierende oder eine reflektierende Maske **100** sein. Im Beispiel der **Fig. 1** umfasst die Fotomaske **100** ein Substrat **110** und ein Pattern-Element **120** oder ein Struktur-Element. **120**. Das Substrat **110** kann ein Quarz-Substrat und/oder ein Material mit niedrigem Wärmeausdehnungskoeffizienten (LTE- (low thermal expansion) Substrat) umfassen. Das Pattern-Element **120** kann ein Struktur-Element **120** einer binären Fotomaske **100** sein. In diesem Fall kann das Pattern-Element **120** ein Element einer Absorber-Struktur **120** umfassen und beispielsweise Chrom aufweisen. Das Pattern-Element **120** kann aber auch ein Struktur-Element **120** einer phasenschiebenden Fotomaske **100** umfassen. Eine phasenschiebende Maske **100** kann zum Beispiel durch Ätzen eines entsprechenden Musters in das Substrat **110** der Maske **100** hergestellt werden. Ferner ist es möglich, dass das Pattern-Element **120** ein Struktur-Element **120** umfasst, das sowohl die Phase der ak-

tinischen Strahlung relativ zur auf das Substrat **110** auftreffenden Strahlung verschiebt als auch einen Teil des auf das Pattern-Element **120** einfallenden Lichts der aktinischen Wellenlänge absorbiert. Beispiels hierfür sind OMOG- (opaque MoSi (molybdenum silicide) on glass) Masken.

[0061] Das obere Teilbild **105** der **Fig. 1** zeigt eine ideale vom Design vorgegebene Kante **130** oder einen Schnitt durch eine Seitenwand **140**. Die Kante **130** des Pattern-Elements **120** ist durch den Flankenwinkel α der Seitenwand **140** und durch die Radien **150** oder Krümmungsradien **150** charakterisiert, mit denen die Kante **130** einerseits in die Oberfläche **115** des Substrats **110** der Maske **100** und andererseits in die ebene Oberfläche **125** des Pattern-Elements **120** übergeht. Typischerweise gibt das Design Flankenwinkel α für die Seitenwand **140** von im Wesentlichen 90° vor. Die Krümmungsradien **150** der Kanten **130** oder der Seitenwände **140** der Pattern-Elemente **120** sollten möglichst klein sein, d.h. so nahe wie möglich bei null liegen.

[0062] Das untere Teilbild **155** der **Fig. 1** präsentiert einen Schnitt durch ein auf dem Substrat **110** der Fotomaske **100** erzeugtes Pattern-Element **120**, das gemäß den oben diskutierten Design-Vorgaben hergestellt wurde. Der Flankenwinkel α der Seitenwand **170** bzw. der Kante **160** weist im Wesentlichen 90° auf und stimmt damit gut mit der Vorgabe des Designs überein. Die Krümmungsradien **180** und **185** der Kante **160** sind zwar nicht Null aber doch so klein, dass das Pattern-Element **120** seine Funktion erfüllt. Dies bedeutet, eine fotolithographische Maske **100**, deren Struktur-Elemente **120** Kanten **160** oder Flankenwinkel α der Seitenwände **170**, wie im unteren Teilbild **155** der **Fig. 1** dargestellt, aufweisen, erfüllt die Spezifikation.

[0063] Die **Fig. 2** zeigt einen schematischen Schnitt durch eine fotolithographische Maske **200** mit einem Substrat **110** und einem Pattern-Element **120**, das an der Kante **160** oder der Seitenwand **170** überschüssiges Material **250** aufweist. Das überschüssige Material **250** kann Material des Pattern-Elements **120** oder Material des Substrats **110** umfassen. Der Defekt überschüssigen Materials **250** kann jedoch auch ein Partikel sein, das sich an die Kante **160** des Pattern-Elements **120** abgesetzt hat. Überschüssiges Material **250** in Form eines Partikels weist typischerweise eine Materialzusammensetzung auf, die von der der Fotomaske **200** verschieden ist.

[0064] In dem in der **Fig. 2** wiedergegebenen Beispiel weist der Defekt überschüssigen Materials **250** die gleiche Höhe wie das Pattern-Element **120** auf. Für den Einsatz einer in dieser Anmeldung beschriebenen Vorrichtung zum Bearbeiten des Defekts überschüssigen Materials **250** ist dies jedoch keine Voraussetzung. Vielmehr können die erläuterten Vorrich-

tungen die Defekte überschüssigen Materials **250** bearbeiten, die eine nahezu beliebige Form aufweisen.

[0065] Die **Fig. 3** präsentiert den Schnitt des Ausschnitts der Maske **200** der **Fig. 2** nach dem Entfernen des überschüssigen Materials **250** oder des Defekts überschüssigen Materials **250** mit Hilfe eines lokalen Teilchenstrahl-induzierten Ätzprozesses, etwa eines E-BIE- (electron beam induced etching) Prozesses gemäß dem Stand der Technik. Der in der **Fig. 3** präsentierten reparierten Fotomaske **300** ist zu entnehmen, dass der Flankenwinkel α' , der durch den lokalen Ätzprozess entstandenen Seitenwand **370**, deutlich von dem Design geforderten Winkel von $\alpha = 90^\circ$ abweicht. Ferner sind die Krümmungsradien **380**, **385** der Kante **360** des erzeugten Pattern-Elements **320** gegenüber dem im unteren Teilbild **155** der **Fig. 1** angegebenen Beispiel stark vergrößert. Zudem ist durch den lokalen Ätzprozess ein Teil **350** des Substrats **110** der Maske **200** in und um dem vorher durch das überschüssige Material **250** bedeckten Bereich entfernt worden. Als Folge der erläuterten nachteiligen Effekte des lokalen Ätzprozesses erfüllt die reparierte Maske **300** noch immer nicht die vorgegebene Abbildungsspezifikation.

[0066] Anhand der **Fig. 3** wurden oben die Schwierigkeiten beim Bearbeiten eines Defekts überschüssigen Materials **250** durch Ausführen eines Teilchenstrahl-induzierten lokalen Ätzprozesses erläutert. Ein zweite Klasse von häufig auftretenden Defekten fotolithographischer Masken sind Defekte fehlenden Materials, etwa fehlenden Absorber-Materials bei binären Masken (in der **Fig. 3** nicht dargestellt). Ähnlich wie beim lokalen Ätzen werden beim lokalen Abscheiden fehlenden Materials, etwa fehlenden Absorber-Materials, mit Hilfe eines Teilchenstrahl-induzierten Abscheideprozesses, etwa eines EBID- (electron beam induced deposition process) Prozesses, Flankenwinkel der Seitenwände der abgeschiedenen Pattern-Elemente erzeugt, die deutlich von 90° abweichen. Darüber hinaus sind häufig auch die Krümmungsradien der abgeschiedenen Pattern-Elemente deutlich größer als die Krümmungsradien **180**, **185** von im ursprünglichen Herstellungsprozess der defektfreien Maske **150** abgeschiedene Pattern-Elemente **120**. Überdies setzt sich infolge des lokalen Abscheideprozesses Material in unerwünschter Weise auf Teile der Oberfläche **115** des Substrats **110** ab, die frei von deponiertem Material sein sollten.

[0067] Dies bedeutet, der lokale Abscheideprozess erzeugt eine Art Halo um die lokale Bearbeitungsstelle. Üblicherweise beeinträchtigen, das zusätzlich auf Teile der Oberfläche **115** des Substrats **110** abgeschiedene Material und die oben beschriebenen Defizite eines lokalen EBID-Prozesses lokal die Funktionsweise einer reparierten fotolithographischen Maske.

[0068] Anhand der **Fig. 4** und **Fig. 5** wird im Folgenden zumindest ein Teil der Ursachen erläutert, die die oben im Kontext der **Fig. 3** diskutierten Probleme verursachen.

[0069] Das obere Teilbild **405** der **Fig. 4** reproduziert den Ausschnitt der fotolithographischen Maske **150** der **Fig. 2**. Auf das Substrat **110** der Maske **150** trifft ein Teilchenstrahl **410**, der einen Öffnungswinkel β aufweist. Der Öffnungswinkel β kann einen Winkelbereich von etwa 0,1 mrad bis 100 mrad umfassen. Der Teilchenstrahl **410** trifft im Wesentlichen senkrecht auf die Oberfläche **115** des Substrats **115** der Maske **150** auf. Das untere Teilbild **455** der **Fig. 4** zeigt die Intensitätsverteilung des Teilchenstrahls **410** in seiner Spitze **420** bzw. seinem Fokus **420** oder im Auftreffpunkt des Teilchenstrahls **410** auf die Oberfläche **115** des Substrats **110** der Maske **150** der **Fig. 2**. Typischerweise weist der Teilchenstrahl **410** in seinem Fokus **420** ein Gauß-förmiges oder ein Gauß-ähnliches Intensitätsprofil auf. Die minimal erreichbare Halbwertsbreite **450** (FWHM, full width half maximum) hängt von der Teilchenart des Teilchenstrahls **410** ab. Derzeit können Elektronenstrahlen auf Fleckdurchmesser im Fokus im Subnanometerbereich fokussiert werden.

[0070] Um eine möglichst hohe Ortsauflösung für einen lokalen Bearbeitungsprozess zu erreichen, ist es notwendig, den Teilchenstrahl **410** am Bearbeitungs-ort auf einen kleinen Fleck **450** zu fokussieren. Ähnlich wie im optischen Bereich bedingt die Forderung nach einem kleinen Fleckdurchmesser im Fokus jedoch einen großen Öffnungswinkel β für den Teilchenstrahl **410**. Wie im oberen Teilbild **405** der **Fig. 4** veranschaulicht, behindert ein großer Öffnungswinkel β des Teilchenstrahls **410** jedoch die Zugänglichkeit des Teilchenstrahls **410** zu Bearbeitungs- oder Reparaturorten, die in der Nähe von Kanten **160** oder steilen Seitenwänden **170** von Pattern-Elementen **120** verortet sind.

[0071] Die **Fig. 5** präsentiert die **Fig. 2**, wobei zusätzlich der Teilchenstrahl **410** der **Fig. 4** auf das Material der fotolithographischen Maske **150** auftrifft. Mit dem Bezugszeichen **510** ist in der **Fig. 5** der Wechselwirkungsbereich bezeichnet, den der Teilchenstrahl **410** beim Auftreffen auf das Substrat **110** der fotolithographischen Maske **150** erzeugt. Beim Auftreffen des Teilchenstrahls **410** auf das Substrat **110** werden dessen Teilchen, beispielsweise Elektronen, in dem elektromagnetischen Feld der Atomkerne des Substratmaterials **110** gestreut. Die Energie der auftreffenden Teilchen des Teilchenstrahls **410** erzeugt in dem Wechselwirkungsvolumen **510** oder der Streubirne **510** sekundäre Produkte. Beispielsweise wird durch die Streuprozesse der auftreffenden Teilchen mit den Atomkernen Energie auf das Gitter des Substratmaterials **110** der Maske **150** übertragen, wodurch das Substratmaterial **110** lo-

kal erwärmt wird. Die Elektronen des Substratmaterials **110** können durch Streuprozesse ebenfalls von den im Punkt **520** auf das Substrat **110** auftreffenden primären Teilchen des Teilchenstrahls **410** Energie aufnehmen und als Sekundärelektronen und/oder als rückgestreute Elektronen freigesetzt werden. Die Größe und die Form des Wechselwirkungsbereichs **510** hängt von der Teilchenart des Teilchenstrahls **410** und der kinetischen Energie der auf das Substrat **110** auftreffenden Teilchen des Teilchenstrahls **410** ab. Ferner beeinflusst das Material oder die Materialzusammensetzung des Substrats **110** die Größe und die Gestalt der Streubirne **510**.

[0072] Während eines Bearbeitungsprozesses sind an der Oberfläche **115** des Substrats **110** in der Nähe einer zu bearbeitenden Stelle Moleküle eines Präkursor-Gases adsorbiert. Moleküle eines Präkursor-Gases, die im Bereich des Auftreffpunktes **520** des Teilchenstrahls **410** auf der Oberfläche **125** des Substrats **110** der Maske **150**, **200** vorhanden sind, werden durch die im Wechselwirkungsbereich **510** ablaufenden Prozesse - etwa durch die Absorption von Sekundärelektronen und/oder rückgestreuten Elektronen - in ihre Bestandteile zerlegt bzw. lösen eine lokale chemische Reaktion zwischen den adsorbierten Präkursor-Gas-Molekülen und den Molekülen oder Atomen des Substratmaterials der Maske **150**, **200** aus.

[0073] Beim Auftreffen des Teilchenstrahls **410** auf das Substrat **110** liegt der Wechselwirkungsbereich **510** oder die Streubirne **510** im Wesentlichen innerhalb des Substrats **110** der Maske **150**. Falls der Teilchenstrahl **410** auf die Kante **160** oder die Seitenwand **170** des Pattern-Elements **120** der Maske **150** auftrifft, so findet nur ein Teil der in dem Wechselwirkungsbereich **510** ablaufenden Prozesse in dem Material des Pattern-Elements **120** der Maske **150** statt. Dies ist in der **Fig. 5** durch den deformierten oder im Wesentlichen halbierten Wechselwirkungsbereich **550** veranschaulicht. Ein Teil der in dem deformierten Wechselwirkungsbereich **550** erzeugten sekundären oder rückgestreuten Teilchen **560** kann den Wechselwirkungsbereich **550** verlassen und gelangt auf die Oberfläche **115** des Substrats **110** der Maske **100**. Dies ist in der **Fig. 5** durch die Pfeile **560** illustriert. Anders als in dem Material des Pattern-Elements **120** finden in der Vakuumumgebung, in der sich die Maske **150**, **200** während eines Bearbeitungsprozesses typischerweise befindet, kaum Wechselwirkungsprozesse statt.

[0074] Wie bereits oben ausgeführt, ist während eines Bearbeitungsprozesses der fotolithographischen Maske **200** die Oberfläche **125** des Substrats **110** der Maske **200** im Bereich der Kante **160** oder der Seitenwand **170** des Pattern-Elements **120** mit Molekülen des Präkursor-Gases bedeckt. Die auf die Oberfläche **115** des Substrats **110** auftreffenden sekundären Teil-

chen **560**, die von dem Teilchenstrahl **410** in dem deformierten Wechselwirkungsbereich **550** freigesetzt werden, setzen auf dem Substrat **110** unerwünschte lokale Bearbeitungsprozesse in Gang. Falls das Präkursor-Gas in Form eines Ätzigases vorliegt, ist dies ein Ätzprozess des Substrats **110**, der, wie in der **Fig. 3** angegeben, zu einer lokalen Vertiefung **350** des Substrats **110** führt. Präkursor-Gase, die in Form von Abscheide-Gasen vorliegen, führen hingegen häufig zu lokalen unerwünschten Abscheidungsprozessen auf dem Substrat **110** der fotolithographischen Maske **200**.

[0075] Das Diagramm **600** der **Fig. 6** veranschaulicht das Korrigieren eines Defekts fehlenden Materials durch das Abscheiden von Material **650** entlang der Seitenwand **170** des Pattern-Elements **120** auf das Substrat **110** der fotolithographischen Maske **150**. Die **Fig. 6** illustriert das Ausführen eines EBID-Prozesses gemäß dem Stand der Technik. Im Kontext der **Fig. 5** wurde erläutert, dass der Elektronenstrahl **410** beim Auftreffen auf die Oberfläche **115** des Substrats **110** der Maske **150** in dem Substrat einen Wechselwirkungsbereich **510** erzeugt. Die in dem Wechselwirkungsbereich **510** ablaufenden Prozesse ermöglichen das Spalten der Moleküle eines Präkursor-Gases, die an der Oberfläche **115** des Substrats **110** adsorbiert sind. Falls die auf der Oberfläche **115** des Substrats **110** adsorbierten Moleküle des Präkursor-Gases ein Abscheidegas sind, kann ein Bestandteil oder eine Komponente des durch die Einwirkung des Elektronenstrahls **410** gespaltenen Moleküle des Abscheidegases auf der Oberfläche **115** des Substrats abgeschieden oder deponiert werden. So wird beispielsweise ein Metallcarbonyl durch die direkte und/oder Einwirkung des Elektronenstrahls **410** in ein Metallatom bzw. Metallion und Kohlenstoffmonoxid gespalten. Das Metallatom kann sich auf der Oberfläche **115** des Substrats **110** absetzen, während die volatilen Kohlenstoffmonoxid-Moleküle zum überwiegenden Teil den Bearbeitungsort verlassen können.

[0076] Durch ein sequentielles Rastern des fokussierten Elektronenstrahls **410** über den Bereich fehlenden Materials **650** wird auf dem Substrat **110** bei Anwesenheit des Abscheidegases schichtweise das fehlende Material deponiert. Die Größe des von dem Elektronenstrahl **410** im Substrat oder im Deponat **650** bzw. abgeschiedenen Materials **650** erzeugten Wechselwirkungsbereichs **610** verhindert jedoch, dass Seitenwände **670** oder Kanten mit Flankenwinkeln von im Wesentlichen 90° abgeschieden werden können. Vielmehr legt die Größe des Wechselwirkungsbereichs **610** zumindest zum Teil die Größe des Flankenwinkels α der Seitenwand **670** oder der Kante **660** des Deponats **650** fest. Ähnlich wie beim Ausführen eines lokalen Ätzprozesses hängt die Größe und die Form des Wechselwirkungsbereichs **610** von der kinetischen Energie der Elektronen des Elektro-

nenstrahls **410** und der Materialzusammensetzung des Deponats **650** ab.

[0077] Die **Fig. 7** zeigt einen schematischen Schnitt durch einige wichtige Komponenten einer Vorrichtung **700**, mit der zumindest ein Teil der oben beschriebenen Schwierigkeiten beim lokalen Bearbeiten einer Probe **725** beispielsweise einer fotolithographischen Maske **200** vermieden werden können. Die beispielhafte Vorrichtung **700** der **Fig. 7** umfasst ein modifiziertes Rasterteilchenmikroskop **710** in Form eines Rasterelektronenmikroskops (SEM, Scanning Electron Microscope) **710**.

[0078] Ein Elektronenstrahl **715** als Teilchenstrahl **715** hat den Vorteil, dass dieser die Probe bzw. die fotolithographische Maske **200** im Wesentlichen nicht schädigen kann. Es ist jedoch auch möglich, in der Vorrichtung **700** einen Ionenstrahl, einen Atomstrahl oder einen Molekülstrahl zur Bearbeitung der Probe **725** einzusetzen (in der **Fig. 6** nicht dargestellt).

[0079] Das Rasterteilchenmikroskop **710** setzt sich aus einer Elektronenkanone **705** und einer Säule **715** zusammen, in der die Strahloptik **720** etwa in Form einer Elektronenoptik des SEM **710** angeordnet ist. In dem SEM **710** der **Fig. 7** erzeugt eine Elektronenkanone **705** einen Elektronenstrahl **715**, der von den in der Säule **720** angeordneten Abbildungselementen, die in der **Fig. 7** nicht dargestellt sind, als fokussierter Elektronenstrahl **715** an der Stelle **722** auf die Probe **725**, die die fotolithographische Maske **200** umfassen kann, gerichtet wird. Die Probe **725** ist auf einem Probentisch **730** (oder Stage) angeordnet. Die Abbildungselemente der Säule **720** des SEM **710** können ferner den Elektronenstrahl **715** über die Probe **725** rastern oder scannen). Mit dem Elektronenstrahl **715** des SEM **710** kann die Probe **725** untersucht werden. Der Elektronenstrahl **715** kann ferner zum Induzieren eines Teilchenstrahl-induzierten Abscheidungsprozesses (EBID, electron beam induced deposition) und/oder eines Teilchenstrahl-induzierten Ätzprozesses (EBIE, electron beam induced etching) eingesetzt werden. Darüber hinaus kann der Elektronenstrahl **715** des SEM **710** zum Analysieren der Probe **725** bzw. eines Defekts der Probe **725**, etwa des Defekts überschüssigen Materials **250** der fotolithographischen Maske **200** benutzt werden.

[0080] Die von dem Elektronenstrahl **715** in dem Wechselwirkungsbereich **510**, **550**, **610** der Probe **725** erzeugten rückgestreuten Elektronen und Sekundärelektronen werden von dem Detektor **717** registriert. Der Detektor **717**, der in der Elektronensäule **720** angeordnet ist, wird als „in lens detector“ bezeichnet. Der Detektor **717** kann in verschiedenen Ausführungsformen in der Säule **720** installiert werden. Der Detektor **717** setzt die von dem Elektronenstrahl **715** an dem Messpunkt **722** erzeugten Sekundärelektronen und/oder die von der Probe **725** rück-

gestreuten Elektronen in ein elektrisches Messsignal um und leitet dieses an eine Auswerteeinheit **785** eines Computersystems **780** der Vorrichtung **700** weiter. Der Detektor **717** kann einen Filter oder ein Filtersystem enthalten, um die Elektronen in der Energie und/oder im Raumwinkel zu diskriminieren (in der **Fig. 7** nicht wiedergegeben). Der Detektor **717** wird von einer Steuerungseinrichtung **790** der Vorrichtung **700** gesteuert.

[0081] Die Vorrichtung **700** kann einen zweiten Detektor **719** beinhalten. Der zweite Detektor **719** ist dafür ausgelegt, elektromagnetische Strahlung, insbesondere im Röntgenbereich zu detektieren. Dadurch ermöglicht der Detektor **719** das Analysieren der während eines Bearbeitungsprozesses der Probe **725** erzeugten Strahlung. Der Detektor **719** wird ebenfalls von der Steuerungseinrichtung **790** kontrolliert.

[0082] Ferner kann die Vorrichtung **700** einen dritten Detektor umfassen (in der **Fig. 7** nicht dargestellt). Der dritte Detektor ist häufig in Form eines Everhart-Thornley-Detektors ausgeführt und typischerweise außerhalb der Säule **720** angeordnet. Er wird in der Regel zum Detektieren von Sekundärelektronen eingesetzt.

[0083] Die Vorrichtung **700** kann eine Ionenquelle umfassen, die Ionen mit niedriger kinetischer Energie im Bereich der Probe **725** bereitstellt (in der **Fig. 7** nicht dargestellt). Die Ionen mit geringer kinetischer Energie können eine Aufladung der Probe **725** kompensieren. Ferner kann die Vorrichtung **700** ein Gitternetz am Ausgang der Säule **720** des modifizierten SEM **710** aufweisen (in der **Fig. 7** nicht gezeigt). Durch Anlegen einer elektrischen Spannung an das Gitternetz kann eine elektrostatische Aufladung einer Probe **725** ebenfalls kompensiert werden. Ferner ist es möglich, das Gitternetz zu erden.

[0084] Die Probe **725** wird auf einem Probenstisch **730** oder einer Probenhalterung **730** angeordnet. Ein Probenstisch **730** ist im Fachgebiet auch unter dem Ausdruck „Stage“ bekannt. Wie in der **Fig. 7** durch die Pfeile symbolisiert, kann der Probenstisch **730**, beispielsweise durch Mikromanipulatoren, die in der **Fig. 7** nicht dargestellt sind, in drei Raumrichtungen relativ zu der Säule **715** des SEM **710** bewegt werden.

[0085] Neben der translatorischen Bewegung kann der Probenstisch **730** um drei zueinander senkrecht stehende Achsen rotiert werden. Das Diagramm **800** der **Fig. 8** zeigt schematisch eine Rotation des Probenstisches **730** um eine senkrecht zur Papierebene stehende Achse. Durch diese Drehmöglichkeiten realisiert der Probenstisch **730** eine Kippvorrichtung **830**. Durch das Drehen des Probenstisches **730** kann der Auftreffwinkel φ_1 des Elektronenstrahls **715** auf

eine Oberfläche **815** der Probe **725** verglichen mit dem im Wesentlichen senkrechten Einfall der Elektronen des Elektronenstrahls **410** auf die Probe **725** der **Fig. 7** verringert werden. Die Kippvorrichtung **830** kann den Probenstisch **730** um bis zu 450 aus der Horizontalen kippen. Ferner kann die Kippvorrichtung **830** um eine Drehachse, die senkrecht zur Ebene des Probenstisches steht, um 360° drehen. Prinzipiell kann eine Kippvorrichtung **830** in zumindest drei Varianten ausgeführt werden. In einer ersten Ausführungsform, die schematisch in der **Fig. 8** dargestellt ist, ist die Kippachse fest und steht senkrecht zu Papierebene. Die Rotationsachse ist in der Papierebene und steht senkrecht auf der Rotationsachse. In einer zweiten Ausführungsform sitzt die Kippeinheit oder Kippvorrichtung auf der Rotationseinheit oder Rotationsvorrichtung. In diesem Ausführungsbeispiel ist die Rotationsachse fest. Letztere ist beispielsweise parallel zur z-Richtung, d.h. parallel zum Elektronenstrahl **715**. In einer dritten Ausführungsform wird die Probe **725**, beispielsweise die Maske **150**, **200** gekippt. Dies kann zum Beispiel durch zwei höhenverstellbare Auflagen erfolgen. Das zuletzt genannte Ausführungsbeispiel ist auf kleine Kippwinkel beschränkt.

[0086] Durch Rotation des Probenstisches **730** um zwei zueinander senkrechte Drehachsen und die zusätzliche Möglichkeit der Drehung der Probe **730** um die Achse des Elektronenstrahls **715** kann der Auftreffwinkel φ_1 auf die Oberfläche **815** der Probe **725** an jeder Stelle der Probe **725** in kontrollierter Weise verringert werden. Die Steuerungseinrichtung **790** der Vorrichtung **700** kann sowohl die translatorischen als auch die rotatorischen Bewegungen des Probenstisches **730** steuern.

[0087] Wieder mit Bezug zur **Fig. 7**, die Probe **725** kann jede beliebige mikrostrukturierte Komponente oder Bauteil sein, das einer Bearbeitung bedarf, beispielsweise der Reparatur eines lokalen Defekts **250**. So kann die Probe **725** beispielsweise eine transmissive oder eine reflektive Fotomaske **200** und/oder ein Template für die Nanoimprint-Technik umfassen. Die transmissive und die reflektive Fotomaske **150**, **200** kann alle Arten von Fotomasken umfassen, wie etwa binäre Masken, phasenschiebende Masken, OMOG-Masken, oder Masken für eine Doppel- oder Mehrfachbelichtung.

[0088] Die Vorrichtung **700** der **Fig. 7** kann ferner ein oder mehrere Rastersondenmikroskope, beispielsweise in Form eines Rasterkraftmikroskops (AFM, Atomic Force Microscope) aufweisen (in der **Fig. 7** nicht gezeigt), das zum Analysieren und/oder Bearbeiten der Probe **725** eingesetzt werden kann.

[0089] Die Säule **720** des Rasterelektronenmikroskops **710** kann um zumindest eine Achse geschwenkt oder gedreht werden. Das Diagramm **900** illustriert das Proben-seitige Ende der Säule **720** in

einem geschwenkten Zustand bezüglich eines horizontal angeordneten Probenstisches **730**. In der **Fig. 9** ist die Schwenkvorrichtung **930** durch eine senkrecht zur Papierebene stehende Dreh- oder Schwenkachse **930** angedeutet. Die Schwenkvorrichtung **930** kann die Säule **720** des SEM **710** in wenigstens eine Richtung schwenken. Es ist jedoch auch möglich, die Schwenkvorrichtung **930** so auszuführen, dass die Säule **720** in vorzugsweise zwei zueinander senkrecht stehende Schwenkachsen auszulenkten. Da die Säule **720** eines Rasterelektronenmikroskops **710** voluminös und schwer ist, ist es derzeit bevorzugt, die Schwenkvorrichtung **930** nur um eine Schwenkachse rotierbar auszuführen und den Probenstisch **730** um eine senkrecht zur Probenstischebene stehende Drehachse rotierbar auszubilden. In einem weiteren Ausführungsbeispiel ist es möglich, die Säule **720** unter einem festen, von 90° abweichenden Winkel gegenüber der Oberfläche des Probenstisches **730** in die Vorrichtung **700** einzubauen.

[0090] Es ist möglich, dass die Vorrichtung **700** sowohl eine Kippvorrichtung **830** für den Probenstisch **730** als auch eine Schwenkvorrichtung **930** für die Säule **720** des SEM **710** aufweist.

[0091] Wieder mit Bezug zur **Fig. 7**, der Elektronenstrahl **715** des modifizierten SEM **710** kann, wie bereits oben ausgeführt, neben dem Analysieren der Probe **725** auch zum Induzieren eines Elektronenstrahl-induzierten Abscheidungsprozesses und eines EBIE-Prozesses eingesetzt werden. Ferner kann der Elektronenstrahl **715** des SEM **710** der Vorrichtung **700** auch zum Ausführen eines EBID-Prozesses verwendet werden. Zum Ausführen dieser Prozesse weist die Vorrichtung **700** der **Fig. 7** drei verschiedene Vorratsbehälter **740**, **750** und **760** zum Speichern verschiedener Präkursor-Gase auf.

[0092] Der erste Vorratsbehälter **740** speichert ein Präkursor-Gas, beispielsweise ein Metallcarbonyl, etwa Chromhexacarbonyl ($\text{Cr}(\text{CO})_6$) oder ein Hauptgruppenmetallalkoyd, wie etwa TEOS. Mit Hilfe des im ersten Vorratsbehälter **740** gespeicherten Präkursor-Gases kann in einer lokalen chemischen Abscheidereaktion beispielsweise fehlendes Material der fotolithographischen Maske **200** auf diese abgeschieden werden. Fehlendes Material einer Maske **200** kann fehlendes Absorber-Material, beispielsweise Chrom, fehlendes Substrat-Material **110**, etwa Quarz, fehlendes Material einer OMOG-Maske, etwa Molybdänsilizid oder fehlendes Material einer Mehrschichtstruktur einer reflektierenden Fotomaske umfassen.

[0093] Wie oben im Kontext der **Fig. 5** beschrieben, fungiert der Elektronenstrahl **715** des SEM **710** als Energielieferant, um das im ersten Vorratsbehälter **740** bevorratete Präkursor-Gas an der Stelle zu spalten, an der Material auf der Probe **725** abgeschieden

werden soll. Dies bedeutet, durch das kombinierte Bereitstellen eines Elektronenstrahls **715** und eines Präkursor-Gases wird ein EBID- (Electron Beam Induced Deposition) Prozess zum lokalen Abscheiden fehlenden Materials beispielsweise fehlenden Materials der Fotomaske **200** ausgeführt. Das modifizierte SEM **710** der Vorrichtung **700** bildet in Kombination mit dem ersten Vorratsbehälter **740** eine Abscheidervorrichtung.

[0094] Ein Elektronenstrahl **715** kann auf einen Fleckdurchmesser von wenigen Nanometern fokussiert werden. Dadurch erlaubt ein EBID-Prozess das lokale Abscheiden von fehlendem Material mit einer Ortsauflösung typischerweise in einem Bereich von 5 nm bis 20 nm. Allerdings korreliert - wie im Kontext der **Fig. 4** diskutiert - ein kleiner Fokussdurchmesser des Elektronenstrahls **715** mit einem großen Öffnungswinkel β .

[0095] In der in der **Fig. 7** dargestellten Vorrichtung **700** speichert der zweite Vorratsbehälter **750** ein Ätzgas, das das Ausführen eines lokalen Elektronenstrahl-induzierten Ätzprozesses (EBIE, Electron Beam Induced Etching) möglich macht. Mit Hilfe eines Elektronenstrahl-induzierten Ätzprozesses kann überschüssiges Material von der Probe **725**, etwa das überschüssige Material **250** bzw. der Defekt überschüssigen Materials **250** von der Oberfläche **115** des Substrats **110** der fotolithographischen Maske **200** entfernt werden. Ein Ätzgas kann beispielsweise Xenondifluorid (XeF_2), ein Halogen oder Nitrosylchlorid (NOCl) umfassen. Somit bildet das modifizierte SEM **710** in Verbindung mit dem zweiten Vorratsbehälter **750** eine lokale Ätzvorrichtung.

[0096] In dem dritten Vorratsbehälter **760** kann ein additives oder ein zusätzliches Gas gespeichert werden, das dem im zweiten Vorratsbehälter **750** bereitgehaltenen Ätzgas oder dem im ersten Vorratsbehälter **740** gespeicherten Präkursor-Gas bei Bedarf hinzugegeben werden kann. Alternativ kann der dritte Vorratsbehälter **760** ein zweites Präkursor-Gas oder ein zweites Ätzgas speichern.

[0097] Jeder der Vorratsbehälter **740**, **750** und **760** hat in dem in der **Fig. 7** dargestellten Rasterelektronenmikroskop **710** sein eigenes Steuerventil **742**, **752** und **762**, um den pro Zeiteinheit bereitgestellten Betrag des entsprechenden Gases, d.h. den Gasstrom an der Stelle **722** des Auftreffens des Elektronenstrahls **715** auf die Probe **725** zu kontrollieren bzw. zu steuern. Die Steuerventile **742**, **752** und **762** werden durch die Steuerungseinrichtung **790** gesteuert und kontrolliert. Damit lassen sich die Partialdruckverhältnisse des bzw. der am Bearbeitungs-ort **722** zum Ausführen eines EBID- und/oder eines EBIE-Prozesses bereitgestellten Gase in einem weiten Bereich einstellen.

[0098] Ferner hat in dem beispielhaften SEM 710 der Fig. 7 jeder Vorratsbehälter 740, 750 und 760 sein eigenes Gaszuleitungssystem 745, 755 und 765, das mit einer Düse 747, 757 und 767 in der Nähe des Auftreffpunkts 722 des Elektronenstrahls 715 auf die Probe 725 endet.

[0099] Die Vorratsbehälter 740, 750 und 760 können ihr eigenes Temperatureinstellelement und/oder Kontrollelement haben, das sowohl ein Kühlen wie auch ein Heizen der entsprechenden Vorratsbehälter 740, 750 und 760 erlaubt. Dies ermöglicht das Speichern und insbesondere das Bereitstellen des Präkursor-Gases und/oder des bzw. der Ätzgase bei der jeweils optimalen Temperatur (in der Fig. 7 nicht gezeigt). Die Steuerungseinrichtung 790 kann die Temperatureinstellelemente und die Temperaturkontrollelemente der Vorratsbehälter 740, 750, 760 steuern. Während der EBID- und der EBIE-Bearbeitungsvorgänge können die Temperatureinstellelemente der Vorratsbehälter 740, 750 und 760 ferner eingesetzt werden, um durch die Wahl einer entsprechenden Temperatur den Dampfdruck der darin gespeicherten Präkursor-Gase einzustellen.

[0100] Die Vorrichtung 700 kann mehr als einen Vorratsbehälter 740 umfassen, um zwei oder mehr Präkursor-Gase zu bevorraten. Ferner kann die Vorrichtung 700 mehr als einen Vorratsbehälter 750 zum Speichern von zwei oder mehr Ätzgasen aufweisen (in der Fig. 7 nicht gezeigt).

[0101] Das in der Fig. 7 dargestellte Rasterelektronenmikroskop 710 wird in einer Vakuumkammer 770 betrieben. Zum Ausführen der EBID- und EBIE-Prozesse ist ein Unterdruck in der Vakuumkammer 770 bezogen auf den Umgebungsdruck notwendig. Zu diesem Zweck weist das SEM 710 der Fig. 7 ein Pumpensystem 772 zum Erzeugen und zum Aufrechterhalten eines in der Vakuumkammer 770 geforderten Unterdrucks auf. Bei geschlossenen Steuerventilen 742, 752 und 762 wird in der Vakuumkammer 770 ein Restgasdruck $< 10^{-4}$ Pa erreicht. Das Pumpensystem 772 kann separate Pumpensysteme für den oberen Teil der Vakuumkammer 770 zum Bereitstellen des Elektronenstrahls 715 des SEM 710 und des unteren Teils 775 bzw. des Reaktionsraumes 775 umfassen (in der Fig. 7 nicht gezeigt).

[0102] Die Vorrichtung 700 beinhaltet ein Computersystem 780. Das Computersystem 780 umfasst eine Scan-Einheit 782, die den Elektronenstrahl 725 über die Probe 725 scannt. Ferner umfasst das Computersystem 780 eine Steuerungseinheit 790, um die verschiedenen Parameter des modifizierten Rasterpartikelmikroskops 710 der Vorrichtung 700 einzustellen und zu kontrollieren. Darüber hinaus kann die Steuerungseinheit 790 die Kippvorrichtung 830 des Probenstisches 730 und die Schwenkvorrichtung 930 der Säule 720 des SEM 710 steuern.

[0103] Überdies weist das Computersystem 780 eine Auswerteeinheit 785 auf, die die Messsignale der Detektoren 717 und 719 analysiert und daraus ein Bild erzeugt, das in dem Display 795 des Computersystems 780 angezeigt wird. Insbesondere ist die Auswerteeinheit 785 dafür ausgelegt, aus den Messdaten des Detektors 717 die Lage und eine Kontur eines Defekts fehlenden Materials und/oder einen Defekt überschüssigen Materials 250 einer Probe 725, etwa einer fotolithographischen Maske 200 zu bestimmen. Die Auswerteeinheit 785 enthält zudem einen oder mehrere Algorithmen, die es ermöglichen, eine dem analysierten Defekte 250 der Maske 200 entsprechende Reparaturform zu bestimmen. Zudem kann die Auswerteeinheit 785 des Computersystems 780 einen oder mehrere Algorithmen beinhalten. Der bzw. die Algorithmen können aus der kinetischen Energie der Elektronen des Teilchenstrahls 715 und/oder einer zu ätzenden oder zu deponierenden Materialzusammensetzung eine Winkeländerung der Kippvorrichtung 830 des Probenstisches 730 und/oder eine Winkeländerung der Schwenkvorrichtung 930 der Säule 720 des SEM 710 bestimmen. Überdies können Algorithmen der Auswerteeinheit 785 die Parameter einer Ablenkvorrichtung ermitteln. Beispiele von Ablenkvorrichtungen für den Elektronenstrahl 715 werden nachfolgend anhand der Fig. 10 und Fig. 11 erläutert. Die Algorithmen der Auswerteeinheit 785 können in Hardware, Software oder einer Kombination hiervon implementiert werden.

[0104] Die Auswerteeinheit 785 kann ferner dafür ausgelegt werden, aus den Messdaten des Detektors 719 eine Fläche und eine Positionierung einer temporären Schutzschicht relativ zu einer zu bearbeitenden Stelle zu ermitteln. Das Anbringen einer temporären Schutzschicht zumindest teilweise um eine lokale Bearbeitungsstelle kann weitgehend verhindern, dass während des Ausführens eines lokalen Bearbeitungsprozesses unbeteiligte Bereiche der Probe 725, etwa Teile des Substrats 110 einer Maske 200 beeinträchtigt oder beschädigt werden. Die Steuerungseinheit 790 des Computersystems 780 steuert sowohl das Abscheiden einer temporären Schutzschicht als auch deren Entfernen, beispielsweise durch Ausführen eines EBIE-Prozesses. In einer alternativen Ausführungsform wird die temporäre Schutzschicht in einem Reinigungsprozess der Probe 725, etwa einem nasschemischen Reinigungsprozess, von der Probe 725 entfernt.

[0105] Das Computersystem 780 und/oder die Auswerteeinheit 785 können einen Speicher, vorzugsweise einen nicht-flüchtigen Speicher beinhalten (in der Fig. 7 nicht dargestellt), der ein oder mehrere Modelle von Reparaturformen für verschiedene Maskentypen speichert. Die Auswerteeinheit 785 kann dafür designt werden, aus den Messdaten des Detektors 717 auf der Basis eines Reparaturmodells eine Re-

paraturform für die Defekte **250** der fotolithographischen Maske **200** zu berechnen.

[0106] Die Auswerteeinheit **785** kann, wie in der **Fig. 7** angegeben, in das Computersystem **780** integriert sein. Es ist aber auch möglich, die Auswerteeinheit **785** als eigenständige Einheit innerhalb oder außerhalb der Vorrichtung **700** auszuführen. Insbesondere kann die Auswerteeinheit **785** dafür ausgelegt werden, einen Teil ihrer Aufgaben mittels einer dedizierten Hardware-Implementierung auszuführen.

[0107] Das Computersystem **780** kann in die Vorrichtung **700** integriert sein oder kann als ein eigenständiges Gerät ausgebildet sein (in der **Fig. 7** nicht gezeigt). Das Computersystem **780** kann in Hardware, Software, Firmware oder einer Kombination ausgeführt werden.

[0108] Das Diagramm **1000** der **Fig. 10** zeigt einen vergrößerten Ausschnitt der Vorrichtung **700** im Bereich des Auftreffpunktes **1022** des Elektronenstrahls **715** auf die fotolithographische Maske **200** der **Fig. 2**. In dem in der **Fig. 10** dargestellten Beispiel ist das Substrat **110** der fotolithographischen Maske **200** mittels einer Dreipunktlagerung auf dem Probentisch **1050** angeordnet. Die Fotomaske **200** wird durch die Wirkung der Gravitation in ihrer Position gehalten. Der Schnitt des Diagramms **1000** zeigt zwei der drei Kugeln **1020** der Dreipunktlagerung.

[0109] Zwischen dem Ausgang der Säule **720** des SEM **710** und der Fotomaske **200** ist eine Ablenkvorrichtung **1050** in die Vorrichtung **700** eingebaut. Die Ablenkvorrichtung **1050** umfasst ein magnetisches Ablenkensystem **1030**, das beispielsweise in Form eines Spulenpaares oder eines oder mehrerer Permanentmagnete ausgeführt sein kann (in der **Fig. 10** nicht gezeigt). In dem in der **Fig. 10** dargestellten Beispiel erzeugt das magnetische Ablenkensystem **1030** ein Magnetfeld **1010**, dessen Feldlinien senkrecht auf der Papierebene stehen und in die Papierebene hinein gerichtet sind. Durch das von dem magnetischen Ablenkensystem **1030** erzeugte Magnetfeld **1010** werden die Elektronen des Elektronenstrahls **715** beim Verlassen der Säule **720** abgelenkt und treffen nach Durchlaufen einer gekrümmten Bahn **1015** in dem Auftreffpunkt **1022** auf die fotolithographische Maske **200**. Beispielsweise erreichen die Elektronen des Elektronenstrahls **715** den Defekt überschüssigen Materials **250**. Der Auftreffpunkt **1022** des Elektronenstrahls **715** auf die Maske **200** ist vom Auftreffpunkt **722** der Vorrichtung **700** der **Fig. 7** verschieden. Zudem trifft der durch das Magnetfeld **1010** des magnetischen Ablenkensystems **1030** abgelenkte Elektronenstrahl **715** unter einem Winkel φ_3 auf die Maske **200**, der kleiner ist als der Auftreffwinkel des Elektronenstrahls **715** der **Fig. 7**. Der durch das magnetische Ablenkensystem **1030** verlängerte Pfad **1015** der

Elektronen wird bei der Fokussierung des Elektronenstrahls **715** berücksichtigt.

[0110] Das magnetische Ablenkensystem **1030** kann ein homogenes oder ein inhomogenes Magnetfeld **1010** generieren. Die Stärke des Magnetfeldes **1010** kann durch die Steuerungseinheit **785** des Computersystems **780** eingestellt werden.

[0111] In dem in der **Fig. 10** wiedergegebenen Beispiel generiert das magnetische Ablenkensystem **1030** ein homogenes Magnetfeld **1010**, dessen Feldlinien senkrecht durch die Papierebene treten. Es ist aber auch möglich, dass das magnetische Ablenkensystem **1030** ein zweites Magnetfeld erzeugt, dessen Feldlinien beispielsweise parallel zum Papierebene verlaufen. Mit Hilfe zweier im Wesentlichen senkrecht aufeinander stehender Magnetfelder kann das magnetische Ablenkensystem **1030** durch Verändern der Feldstärke der beiden Magnetfelder nicht nur den Polarwinkel des Elektronenstrahls **715** einstellen, sondern auch dessen Azimutwinkel. Dadurch wird ermöglicht, dass der Elektronenstrahl **715** verschiedene Seiten eines Pattern-Elements **120** einer fotolithographischen Maske **200** unter dem Auftreffwinkel φ_3 erreichen kann.

[0112] Das magnetische Ablenkensystem **1030** ist in der **Fig. 10** als eine von der Säule **720** des SEM **710** getrennte oder separate Einheit **1050** in die Vorrichtung **700** eingebaut. Es ist aber auch möglich, das magnetische Ablenkensystem **1030** am Ausgang der Säule **720** in das SEM **710** zu integrieren.

[0113] Die **Fig. 11** präsentiert ein zweites Ausführungsbeispiel einer Ablenkvorrichtung **1050**. In dem in der **Fig. 11** wiedergegebenen Beispiel umfasst die Ablenkvorrichtung **1050** ein elektrisches Ablenkensystem **1130**. Das elektrische Ablenkensystem **1130** ist in der **Fig. 11** durch zwei zusätzliche Ablenkplattenpaare **1110** und **1120** realisiert, die vor der elektronenoptischen Objektivlinse **1150** des SEM **710** in dessen Säule **720** eingebaut sind. Das erste Ablenkplattenpaar **1110** lenkt den Elektronenstrahl **715** von der Achse **1160** oder der elektronenoptischen Achse **1160** des SEM **710** ab. Das zweite Ablenkplattenpaar **1120** wird so ausgelegt und angeordnet, dass der abgelenkte Elektronenstrahl **1115** im Wesentlichen das Zentrum der elektronenoptischen Objektivlinse **1150** passiert. Durch diese Strahlführung wird verhindert, dass der abgelenkte Elektronenstrahl **1115** durch die elektronenoptische Objektivlinse **1150** signifikante Abbildungsfehler erleidet.

[0114] Der **Fig. 11** ist zu entnehmen, dass der durch das elektrische Ablenkensystem **1130** ausgelenkte Elektronenstrahl **1115** unter einem Winkel φ_4 auf die Probe **725** auftrifft, der gegenüber dem Auftreffwinkel der **Fig. 7** deutlich verringert ist. Zudem trifft der ausgelenkte Elektronenstrahl **1115** an einer Stelle

1122 auf der Oberfläche **815** der Probe **725** auf, die verschieden ist von dem Auftreffpunkt **722** des Elektronenstrahls in der **Fig. 7**. Durch Variieren der elektrischen Spannungen, die an die Ablenkplattenpaare **1110** und **1120** des elektrischen Ablenkensystems **1130** angelegt werden, kann der Auftreffwinkel φ_4 auf die Oberfläche **815** der Probe **725** eingestellt werden. Die Steuereinrichtung **790** kann das elektrische Ablenkensystem **1130** steuern. Die Auswerteeinheit **785** kann auf Basis der für einen Defekt ermittelten Reparaturform die Einstellungen des elektrischen Ablenkensystems **1130** ermitteln.

[0115] In dem in der **Fig. 11** dargestellten Beispiel ist das elektrische Ablenkensystem **1130** implementiert, den Elektronenstrahl **715** in eine Richtung bezüglich der elektronenoptischen Achse **1160** auszulenken. Natürlich ist es auch möglich, das elektrische Ablenkensystem **1130** so auszulegen, dass dieses den das Ablenkensystem **1130** passierenden Elektronenstrahl **715** in zwei verschiedene Richtungen bezüglich der elektronenoptischen Achse **1160** des SEM **710** auslenken kann.

[0116] Ferner ist es möglich, ein magnetisches Ablenkensystem **1030** und ein elektrisches Ablenkensystem **1130** in einer Ablenkvorrichtung **1050** zu kombinieren. Darüber hinaus kann eine Kippvorrichtung **830** in Kombination mit einer Ablenkvorrichtung **1050** genutzt werden. Überdies ist es möglich, eine Schwenkvorrichtung **930** mit einer Ablenkvorrichtung **1050** zu kombinieren.

[0117] Die **Fig. 12** und **Fig. 13** illustrieren wie die in den **Fig. 4** und **Fig. 5** erläuterten Schwierigkeiten beim lokalen Bearbeiten einer Probe **725**, beispielsweise der Fotomaske **150** durch ein Verringern des mittleren Auftreffwinkels des zeitlich veränderlichen Teilchenstrahls **715** auf die Oberfläche **815** der Probe **725** zum großen Teil beseitigt werden können. Das obere Teilbild **1205** der **Fig. 12** veranschaulicht das Auftreffen des Elektronenstrahls **410** auf die fotolithographische Maske **150**, wobei der Auftreffwinkel des Elektronenstrahls **410** um einen Winkel φ im Vergleich zur **Fig. 2** verringert wurde. Möglichkeiten zur Verringerung des Auftreffwinkels ($90^\circ - \varphi$) sind oben im Kontext der **Fig. 7** bis **Fig. 11** erläutert. Das untere Teilbild **1255** der **Fig. 12** präsentiert - ähnlich wie die **Fig. 4** - die Intensitätsverteilung des Elektronenstrahls **410** in dessen Fokus **420**. Wie in der **Fig. 12** veranschaulicht, kann durch das Verringern des mittleren Auftreffwinkels ($90^\circ - \varphi$) des Elektronenstrahls **410** auf die Oberfläche **115** der fotolithographischen Maske **150** der Elektronenstrahl **410** im Brennpunkt auf einen kleinen Fleckdurchmesser **450** fokussiert werden, ohne dass der dadurch verursachte große Öffnungswinkel β von dem Pattern-Element **120** der Fotomaske **150** in nennenswerter Weise abgeschattet wird.

[0118] Die **Fig. 13** präsentiert Wechselwirkungsbereiche des Elektronenstrahls **410** beim Bearbeiten der Seitenwand **170** oder der Kante **160** der fotolithographischen Maske **150**, wobei der mittlere Auftreffwinkel des Elektronenstrahls **410** auf die Oberfläche **115**, **125**, **170** der Fotomaske **150**, wie in der **Fig. 12**, um den Winkel φ verringert wurde. Beim Bearbeiten des Substrats **110** der Maske **150** wird auf die Ausführungen der **Fig. 5** verwiesen. Anders als in der **Fig. 5** wird beim Bearbeiten der Kante **160** oder der Seitenwand **170** mit verringertem Auftreffwinkel ($90^\circ - \varphi$), der Wechselwirkungsbereich **1450** kaum mehr deformiert. Dies bedeutet beispielsweise, dass die Kante **160** oder die Seitenwand **170** mittels eines EBIE-Prozesses geätzt werden können, ohne dass der Flankenwinkel α der Seitenwand **170** durch den lokalen EBIE-Prozess signifikant geändert wird. Überdies wird die Oberfläche **115** des Substrats **110** während des Ausführens des lokalen Ätzprozesses nicht merklich angegriffen.

[0119] Das Diagramm **1400** der **Fig. 14** präsentiert das Korrigieren eines Defekts fehlenden Materials durch das Abscheiden von Material **1420** entlang der Seitenwand **170** des Pattern-Elements **120** auf das Substrat **110** der fotolithographischen Maske **150**. Anders als beim Ausführen des in der **Fig. 6** erläuterten Depositionsprozesses wurde vor Prozessbeginn der mittlere Auftreffwinkel ($90^\circ - \varphi$) des Teilchenstrahls **410** auf die Oberfläche **115**, **125**, **170** der Fotomaske **150** - wie in den **Fig. 12** und **Fig. 13** - verringert. Der **Fig. 14** ist zu entnehmen, dass das Depoat **1420** mit einer Kante **1460** oder eine Seitenwand **1470** abgeschieden wird, die etwas von dem vom Design der Fotomaske **150** vorgegebenen Winkel von 90° abweicht. Die Abweichung ist jedoch klein, verglichen mit dem Flankenwinkel des im Rahmen der Diskussion der **Fig. 6** erläuterten EBID-Prozesses. Zudem sind die Krümmungsradien **1480** und **1485** nicht signifikant größer als eines defektfreien Pattern-Elements **120** der Fotomaske **150**. Überdies deponiert der in der **Fig. 14** erläuterte Abscheidprozess im Wesentlichen kein Material **1420** auf der Oberfläche **115** des Substrats **110** der fotolithographischen Maske **150**.

[0120] Das Diagramm **1590** der **Fig. 15** zeigt einen Ausschnitt **1505** einer elektronenmikroskopischen Aufnahme einer fotolithographischen Maske **1500**. Der Ausschnitt **1505** zeigt eine Kante **1530** eines Pattern-Elements **1520**, das auf einem Substrat **1510** der Maske **1500** angeordnet ist. Das Pattern-Elemente **1520** und damit die Maske **1500** weist einen Defekt fehlenden Pattern-Materials **1550** auf. Der schwarze Balken **1560** gibt die Breite des Scan-Bereichs des Elektronenstrahls **715** an, der zum Reparieren des Defekts **1550** eingesetzt wird. Der Defekt fehlenden Pattern-Materials **1550** wird durch Abscheiden von Material in den defekten Bereich **1550** korrigiert, wobei das deponierte Material optische Eigenschaften

ten aufweist, die dem Material des Pattern-Elements **1520** möglichst nahekommen.

[0121] Das Diagramm **1690** der **Fig. 16** präsentiert eine elektronenmikroskopische Aufnahme des Ausschnitts **1505** der fotolithographischen Maske **1500** nach der Reparatur des Defekts fehlenden Pattern-Materials **1550**. Der Defekt **1550** wurde durch Abscheiden von Material mittels eines EBID-Prozesses repariert. Zum Initiieren des lokalen Elektronenstrahl-induzierten Abscheideprozesses wurde der Elektronenstrahl **410** nicht senkrecht auf die defekte Stelle **1550** gerichtet, sondern schräg von vorne, sodass der mittlere Auftreffwinkel des Elektronenstrahls **715** auf das auf die Oberfläche **115** des Substrats **1510** kleiner als 90° war. Bei der Aufnahme des Ausschnitts **1505** fiel der Elektronenstrahl **410** ebenfalls schräg von vorne auf die fotolithographische Maske **1500** ein. Der reparierte Defekt **1550** ist in der **Fig. 16** mit dem Bezugszeichen **1660** markiert. Die Kante **1530** des Pattern-Elements **1520** zeichnet sich in der **Fig. 16** weniger scharf ab als in der **Fig. 15**.

[0122] Der **Fig. 16** ist zu entnehmen, dass der EBID-Prozess zur Reparatur des Defekts **1550** kaum Material auf dem Substrat **1510** im Bereich **1620** vor der defekten Stelle der fotolithographischen Maske **1500** abgeschieden hat. Die Transmission des Substrats **1510** der Maske **1500** wird deshalb durch den Reparaturprozess nicht beeinträchtigt.

[0123] Aus der **Fig. 16** jedoch klar zu erkennen, dass der Reparaturprozess des Defekts **1550** in signifikantem Umfang Material auf dem Pattern-Element **1520** abgeschieden hat. Dies in der **Fig. 16** aus dem mit dem Bezugszeichen **1650** gekennzeichneten Halo ersichtlich.

[0124] Falls das Pattern-Element **1520** ein Pattern-Element einer binären Fotomaske **1500** ist, wie dies für die in den **Fig. 15** und **Fig. 16** beispielhaft dargestellten Fotomaske **1500** der Fall ist, stört das zusätzliche Absorber-Material des Halos **1650** auf dem Pattern-Element die Funktion der fotolithographischen Maske **1500** nicht.

[0125] Falls das Pattern-Element **1520** hingegen ein Struktur-Element **1520** einer phasenschiebenden Maske ist, würde der durch den Reparaturprozess erzeugte Halo **1650** die reparierte Fotomaske signifikant beeinträchtigen. Um dies zu verhindern, kann das Pattern-Element **1520** im Bereich des Halo **1650** mit einer temporären Schutzschicht abgedeckt werden, bevor der EBID-Prozess zum Reparieren des Defekts fehlenden Pattern-Materials **1550** ausgeführt wird (in der **Fig. 16** nicht dargestellt). Das Abscheiden einer temporären Schutzschicht kann ebenfalls mit Hilfe eines Teilchenstrahlinduzierten Abscheideprozesses ausgeführt werden. Als Material für die temporäre Schutzschicht wird ein Material oder ei-

ne Materialzusammensetzung gewählt, sodass sich die temporäre Schutzschicht zusammen mit dem darauf befindlichen zur Defektreparatur abgeschiedenen Materials in einfacher Weise von der reparierten fotolithographischen Maske **1500** entfernt werden kann. Das Entfernen einer temporären Schutzschicht kann durch Ausführen eines EBIE-Prozesses mit der Vorrichtung **700** erfolgen. Alternativ kann eine Schutzschicht beispielsweise im Rahmen eines Reinigungsprozesses der fotolithographischen Maske **1500** erfolgen, etwa durch eine nasschemische Reinigung.

[0126] Schließlich präsentiert das Flussdiagramm **1700** der **Fig. 17** wesentliche Schritte des Verfahrens zum Bearbeiten einer fotolithographischen Maske **150**, **200**, **1500** in kompakter Form. Das Verfahren beginnt bei Schritt **1710**. Im nächsten Schritt **1720** wird zumindest ein Präkursor-Gas bereitgestellt. Ein oder mehrere Präkursor-Gase können in einem der Vorratsbehälter **740**, **750**, **760** der Vorrichtung **700** gespeichert sein und mittels eines Gasleitungssystems **745**, **755**, **765** am Ort des Auftreffens des Elektronenstrahls **410**, **710** auf eine Probe **725** geleitet werden. Sodann wird bei Schritt **1730** eine lokale Abscheidereaktion und/oder eine lokale Ätzreaktion auf der fotolithographischen Maske **150**, **200**, **1500** durch Einwirken eines zeitlich veränderlichen Teilchenstrahls **410**, **710** auf das Präkursor-Gas ausgeführt. Bei Schritt **1740** wird ein mittlerer Auftreffwinkel zwischen dem zeitlich veränderlichen Teilchenstrahl **410**, **710** und einer Oberfläche **115** der fotolithographischen Maske **150**, **200**, **1500** während zumindest eines Teils des Ausführens der lokalen Abscheidereaktion und/oder der lokalen Ätzreaktion verringert. Das Verfahren endet bei Schritt **1750**.

ZITATE ENTHALTEN IN DER BESCHREIBUNG

Diese Liste der vom Anmelder aufgeführten Dokumente wurde automatisiert erzeugt und ist ausschließlich zur besseren Information des Lesers aufgenommen. Die Liste ist nicht Bestandteil der deutschen Patent- bzw. Gebrauchsmusteranmeldung. Das DPMA übernimmt keinerlei Haftung für etwaige Fehler oder Auslassungen.

Zitierte Patentliteratur

- US 2012/0217590 A1 [0006]
- US 2014/0170776 A1 [0006]
- US 9530674 B2 [0006]
- US 5656811 [0006]
- US 2012/0235055 A1 [0006]

Patentansprüche

1. Vorrichtung (700) zum Bearbeiten einer fotolithographischen Maske (150, 200, 1500), aufweisend:

- a. zumindest einen zeitlich veränderlichen Teilchenstrahl (410, 715), der für eine lokale Abscheidereaktion und/oder eine lokale Ätzreaktion auf der fotolithographischen Maske (150, 200, 1500) ausgebildet ist;
- b. zumindest ein erstes Mittel (740, 750, 760) zum Bereitstellen zumindest eines Präkursor-Gases, wobei das Präkursor Gas ausgebildet ist, mit dem Teilchenstrahl (410, 715) bei der lokalen Abscheidereaktion und/oder der lokalen Ätzreaktion zusammenzuwirken; und
- c. zumindest ein zweites Mittel (830, 930, 1050), das einen mittleren Auftreffwinkel (φ) zwischen dem zeitlich veränderlichen Teilchenstrahl (410, 715) und einer Oberfläche (115) der fotolithographischen Maske (150, 200, 1500) verringert.

2. Vorrichtung (700) nach dem vorhergehenden Anspruch, wobei das zweite Mittel (830, 930, 1050) zumindest ein Element aus der Gruppe umfasst:

- eine Kippvorrichtung (830) zum Verkippen der fotolithographischen Maske relativ (150, 200, 1500) zum Teilchenstrahl (410, 715);
- eine Schwenkvorrichtung (930) einer Strahlquelle (710) zum Verkippen des Teilchenstrahls (410, 715) relativ zur fotolithographischen Maske (150, 200, 1500); und
- zumindest eine Ablenkvorrichtung (1050) für Teilchen des Teilchenstrahls (410, 715) zum Verringern des mittleren Auftreffwinkels (φ) des Teilchenstrahls (410, 715) auf die fotolithographische Maske (150, 200, 1500).

3. Vorrichtung (700) nach dem vorhergehenden Anspruch, wobei die Ablenkvorrichtung (1050) zumindest ein Element aus der Gruppe umfasst: ein elektrisches Ablenksystem (1130) und ein magnetisches Ablenksystem (1030).

4. Vorrichtung (700) nach Anspruch 2 oder 3, wobei die zumindest eine Ablenkvorrichtung (1050) Teil der Strahlquelle (710) des Teilchenstrahls (410, 715) ist.

5. Vorrichtung (700) nach Anspruch 2 oder 3, wobei die zumindest eine Ablenkvorrichtung (1050) nicht Teil der Strahlquelle (710) des Teilchenstrahls (410, 715) ist.

6. Vorrichtung (700) nach einem der Ansprüche 3-5, wobei das elektrische Ablenksystem (1130) zumindest ein Ablenkplattenpaar (1110, 1120) umfasst.

7. Vorrichtung (700) nach einem der Ansprüche 3-6, wobei das magnetische Ablenksystem (1030) zumindest eine Spulenordnung umfasst.

8. Vorrichtung (700) nach einem der Ansprüche 2-7, wobei die Kippvorrichtung (830) einen um zumindest zwei Achsen drehbaren Probenstisch (730) für die fotolithographische Maske (150, 200, 1500) umfasst, und wobei die zwei Achsen in einer Ebene der fotolithographischen Maske (150, 200, 1500) liegen und nicht parallel sind.

9. Vorrichtung (700) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei das zweite Mittel (830, 930, 1050) den mittleren Auftreffwinkel zwischen dem zeitlich veränderlichen Teilchenstrahl (410, 715) und der Oberfläche (115) der fotolithographischen Maske (830, 930, 1050) um $> 5^\circ$, bevorzugt $> 10^\circ$, mehr bevorzugt $> 20^\circ$, und am meisten bevorzugt $> 30^\circ$ verringert.

10. Vorrichtung (700) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei der Teilchenstrahl (410, 716) am Auftreffpunkt (722, 1022, 1122) auf der fotolithographischen Maske (150, 200, 1500) einen Fokusedurchmesser von 0,1 nm bis 1000 nm, bevorzugt, 0,2 nm bis 200 nm, mehr bevorzugt von 0,4 nm bis 50 nm, und am meisten bevorzugt von 0,5 nm bis 20 nm aufweist.

11. Vorrichtung (700) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei der Teilchenstrahl (410, 715) einen Öffnungswinkel von 0,1 mrad bis 1000 mrad, bevorzugt von 0,2 mrad bis 700 mrad, mehr bevorzugt von 0,5 mrad bis 500 mrad, und am meisten bevorzugt von 1 mrad bis 200 mrad aufweist.

12. Vorrichtung (700) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, ferner aufweisend: eine Auswerteeinheit (785), die ausgebildet ist, Scan-Daten einer zu bearbeitenden Stelle der fotolithographischen Maske (150, 200, 1500) zu analysieren.

13. Vorrichtung (700) nach dem vorhergehenden Anspruch, wobei die Auswerteeinheit (785) ferner ausgebildet ist, aus den analysierten Scan-Daten zumindest eine Veränderung des mittleren Auftreffwinkels (φ) des Teilchenstrahls (410, 715) auf die fotolithographische Maske (150, 200, 1500) zu bestimmen.

14. Vorrichtung (700) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, ferner aufweisend eine Steuerungseinrichtung (790), die ausgebildet ist, das zweite Mittel (830, 930, 1050) zum Verändern des mittleren Auftreffwinkels des Teilchenstrahls (410, 715) auf die Oberfläche (115) der fotolithographischen Maske (150, 200, 1500) zu steuern.

15. Verfahren (1700) zum Bearbeiten einer fotolithographischen Maske (150, 200, 1500), das Verfahren die Schritte aufweisend:

- a. Bereitstellen (1720) zumindest eines Präkursor-Gases;

- b. Ausführen (1730) einer lokalen Abscheidereaktion und/oder einer lokalen Ätzreaktion auf der fotolithographischen Maske (150, 200, 1500) durch Einwirken eines zeitlich veränderlichen Teilchenstrahls (410, 715) auf das Präkursor-Gas; und
- c. Verringern (1740) eines mittleren Auftreffwinkels (φ) zwischen dem zeitlich veränderlichen Teilchenstrahl (410, 715) und einer Oberfläche (115) der fotolithographischen Maske (150, 200, 1500) während zumindest eines Teils des Ausführens der lokalen Abscheidereaktion und/oder der lokalen Ätzreaktion.

16. Verfahren (1700) nach dem vorhergehenden Anspruch, ferner den Schritt aufweisend: Analysieren der fotolithographischen Maske (150, 200, 1500) mit dem Teilchenstrahl (410, 715).

17. Verfahren (1700) nach Anspruch 15 oder 16, ferner den Schritt aufweisend: Verändern des Auftreffwinkels (φ) während des Ausführens der lokalen Abscheidereaktion und/oder der lokalen Ätzreaktion.

18. Verfahren (1700) nach einem der Ansprüche 15-17, ferner den Schritt aufweisend:
Unterbrechen der lokalen Abscheidereaktion und/oder der lokalen Ätzreaktion und Analysieren eines erzeugten Teils einer zu erzeugenden Struktur und/oder einer zu ätzenden Stelle mit dem Teilchenstrahl (410, 715).

19. Verfahren (1700) nach einem der Ansprüche 15-18, wobei das Verändern des mittleren Auftreffwinkels (φ) des Teilchenstrahls (410, 715) auf die Oberfläche (115) der fotolithographischen Maske (150, 200, 1500) durch eine Steuerungseinrichtung (690) in automatisierter Form erfolgt.

20. Computerprogramm, das Anweisungen umfasst, die ein Computersystem (780) einer Vorrichtung (700) nach einem der Ansprüche 1 bis 14 veranlassen, die Verfahrensschritte einer der Ansprüche 15 bis 19 auszuführen, wenn das Computersystem (780) das Computerprogramm ausführt.

Es folgen 15 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

Fig. 1

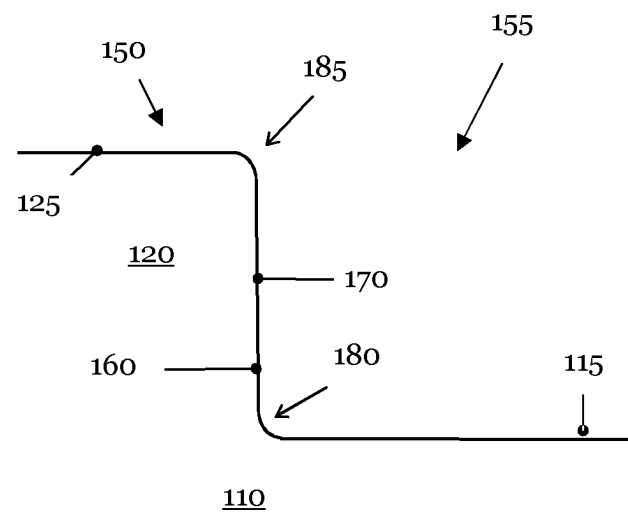
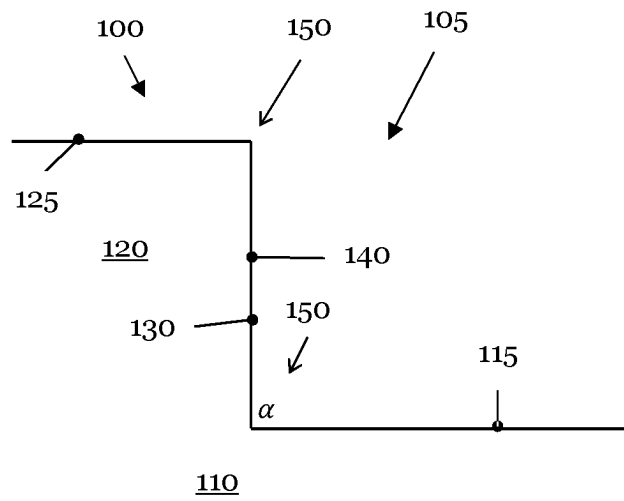


Fig. 2

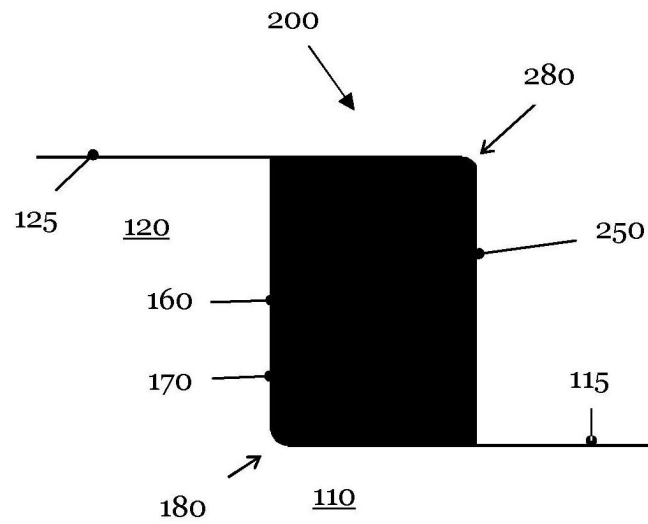


Fig. 3 (Stand der Technik)

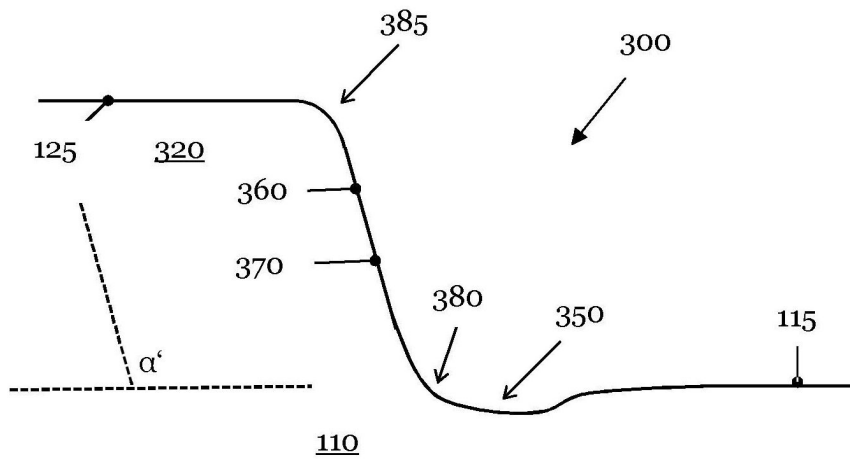


Fig. 4 (Stand der Technik)

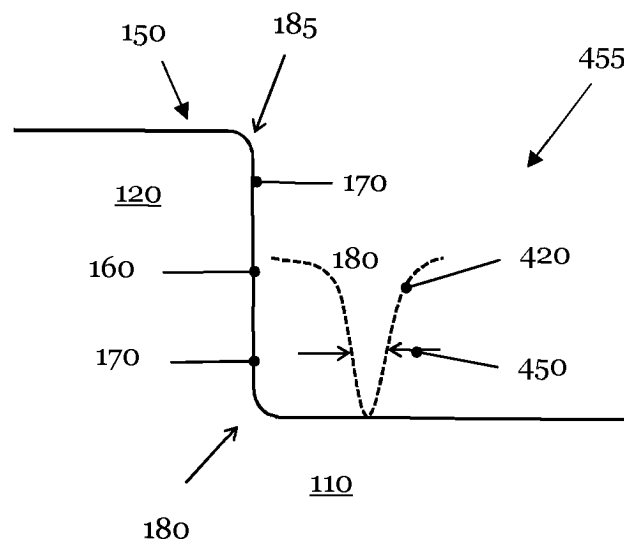
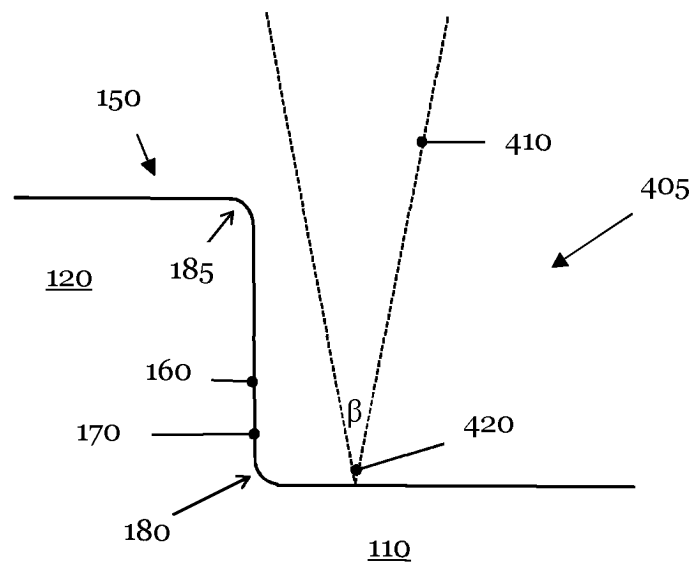


Fig. 5 (Stand der Technik)

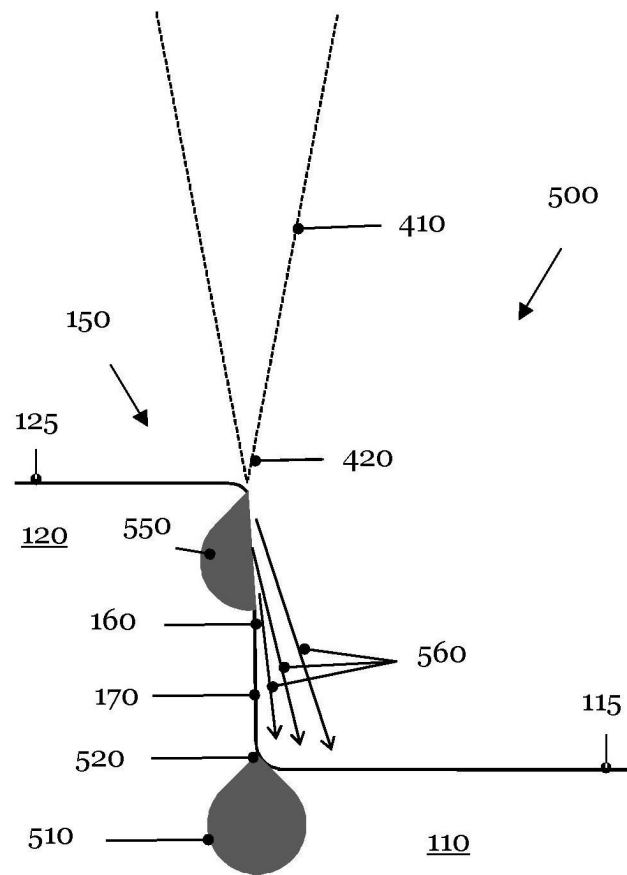


Fig. 6 (Stand der Technik)

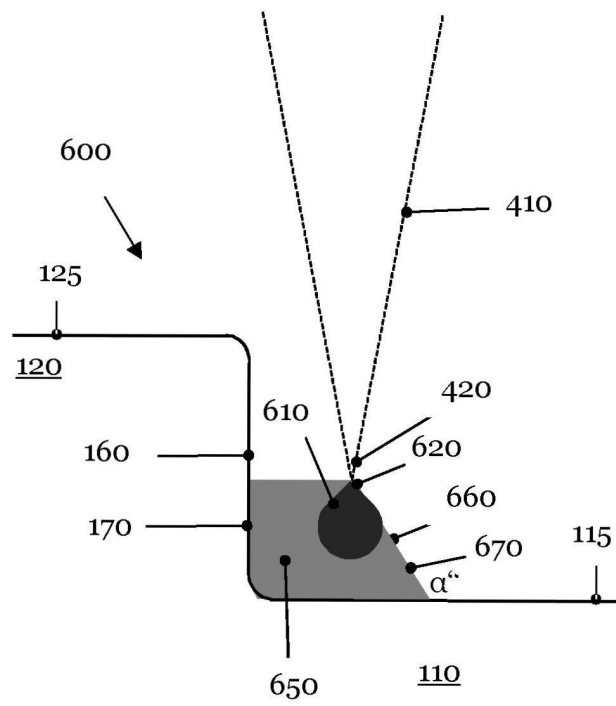


Fig. 7

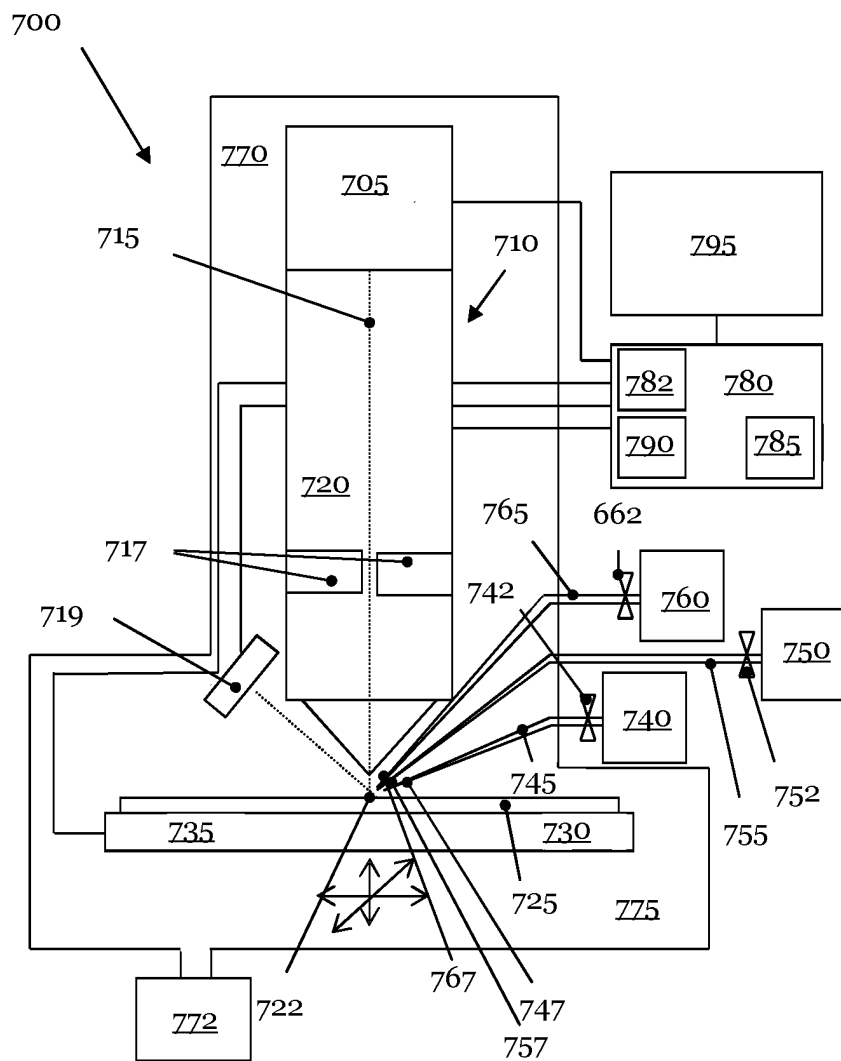


Fig. 8

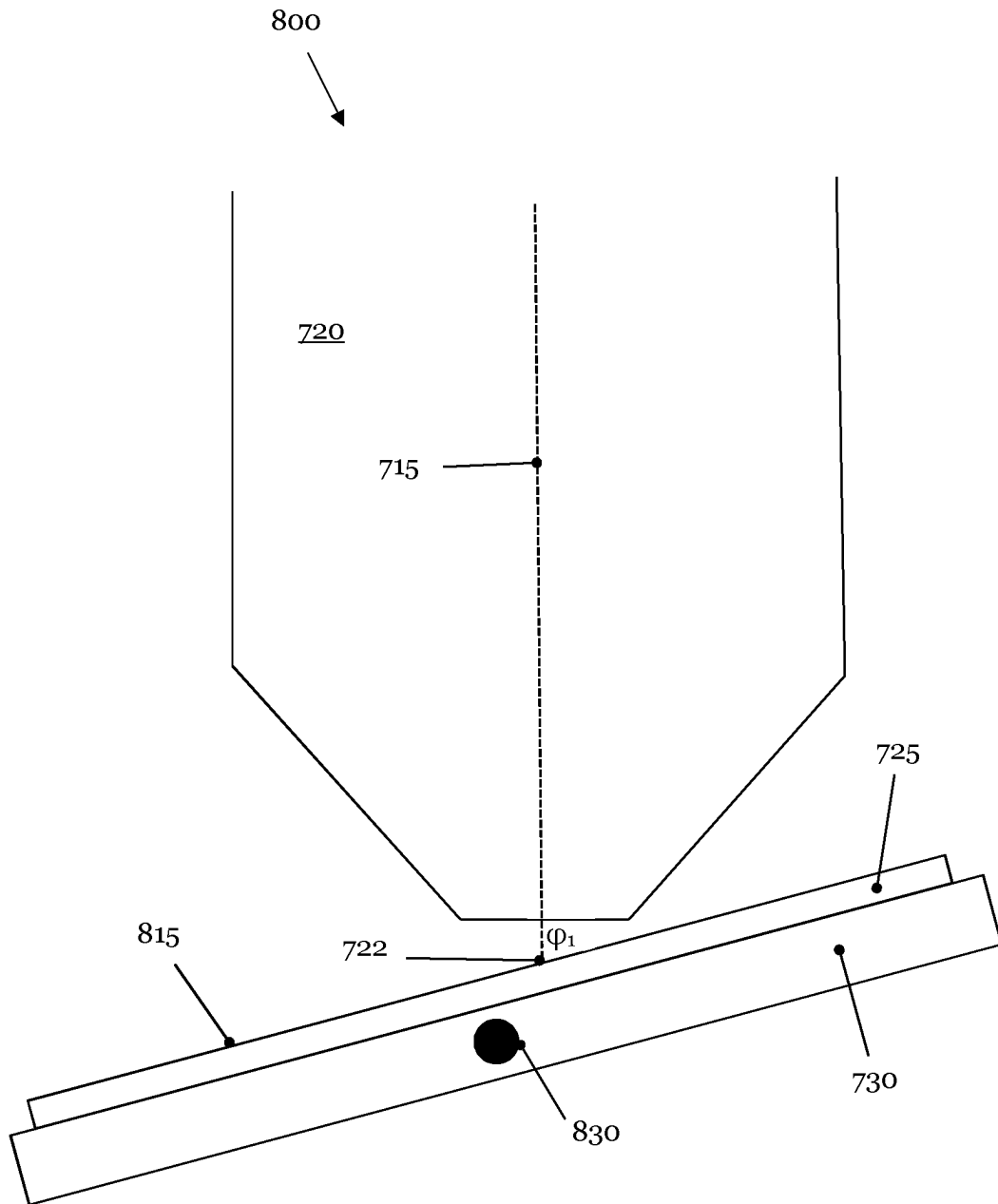


Fig. 9

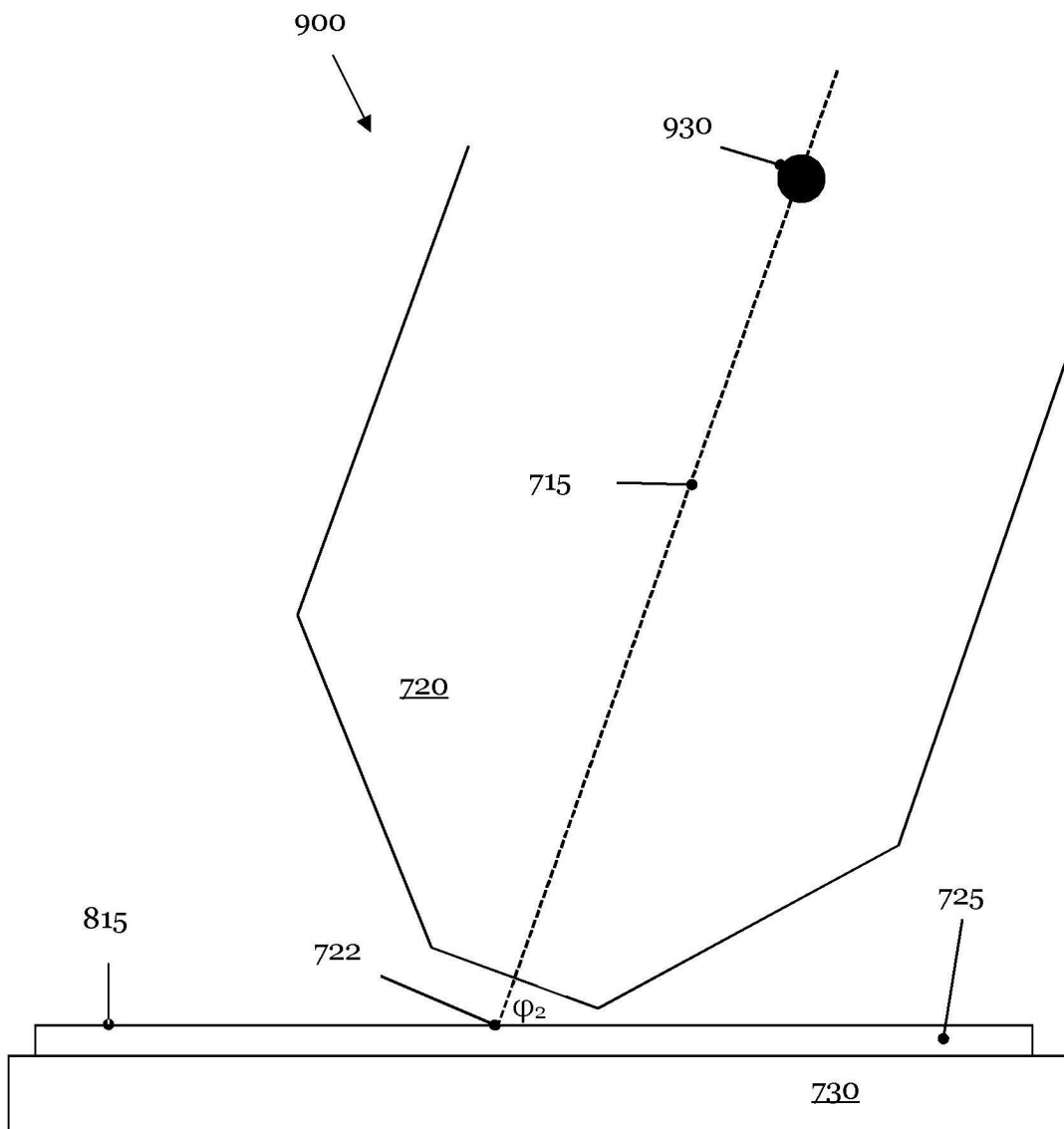


Fig. 10

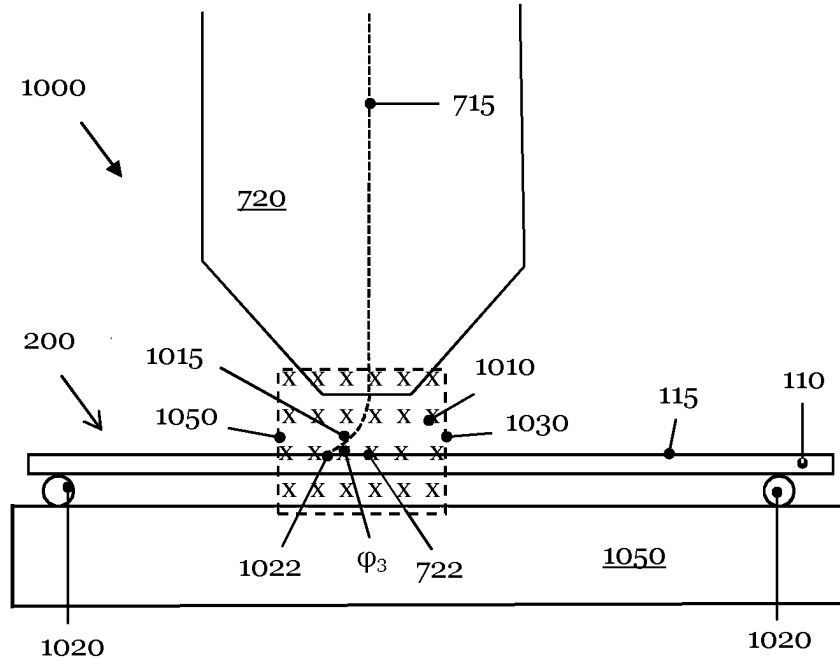


Fig. 11

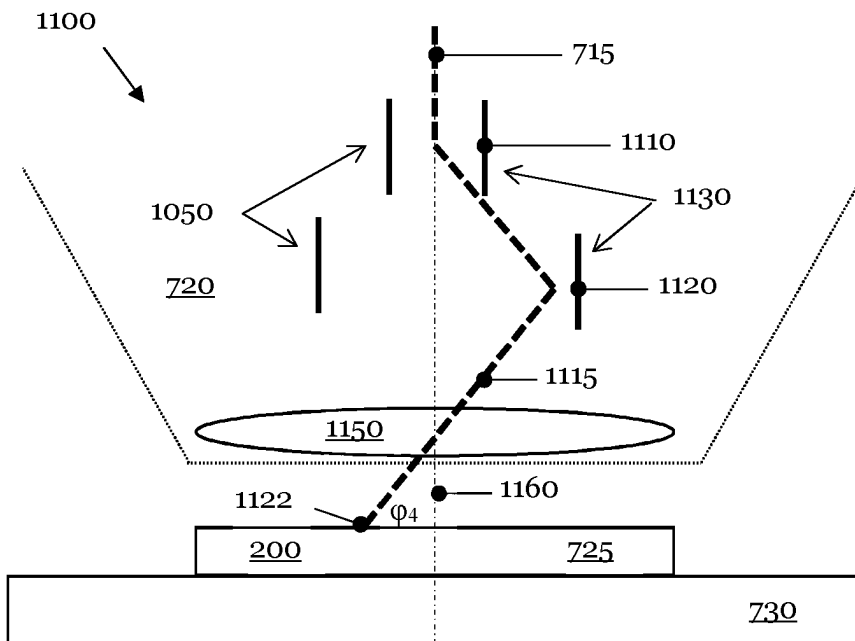


Fig. 12

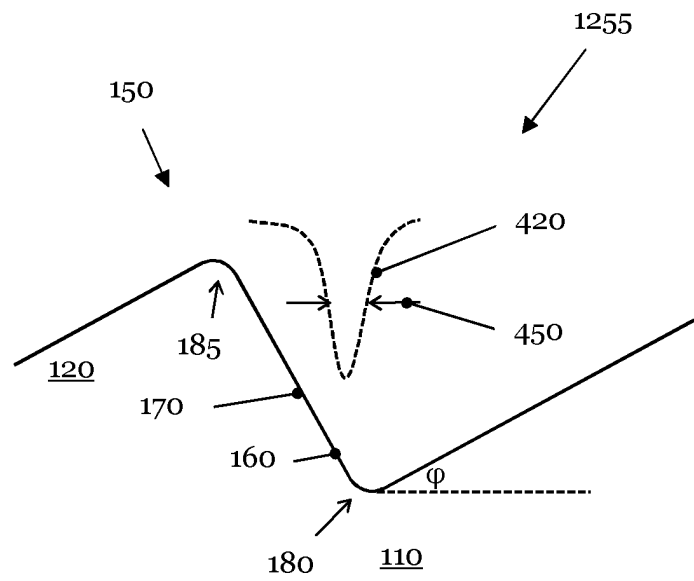
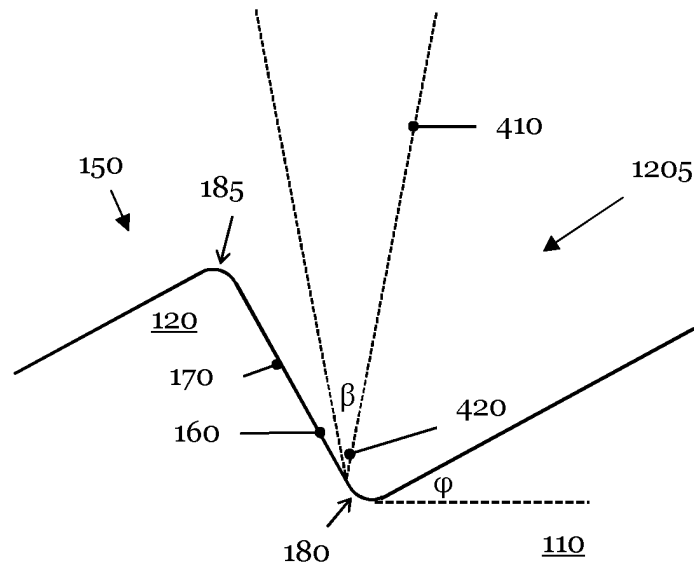


Fig. 13

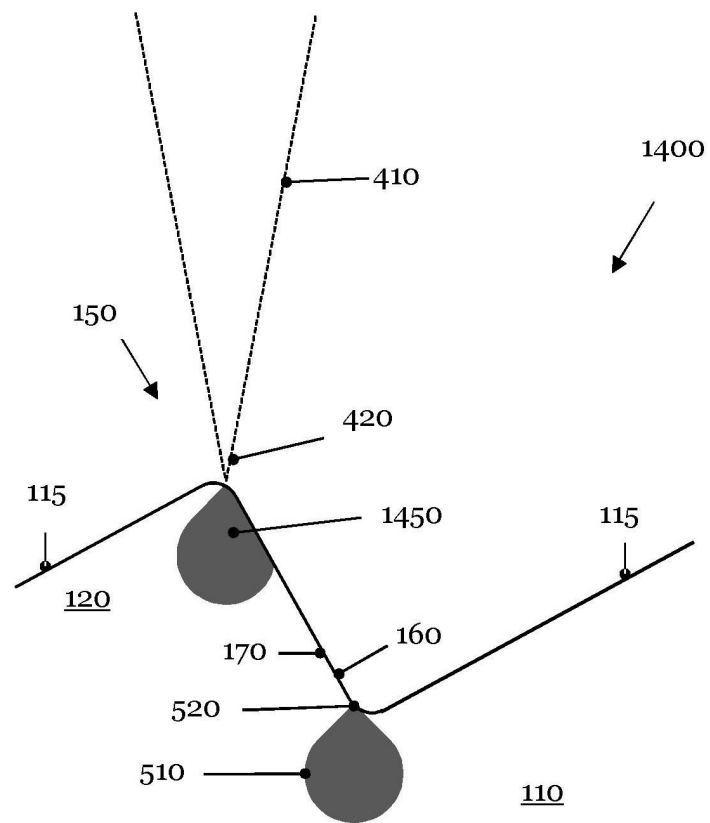


Fig. 14

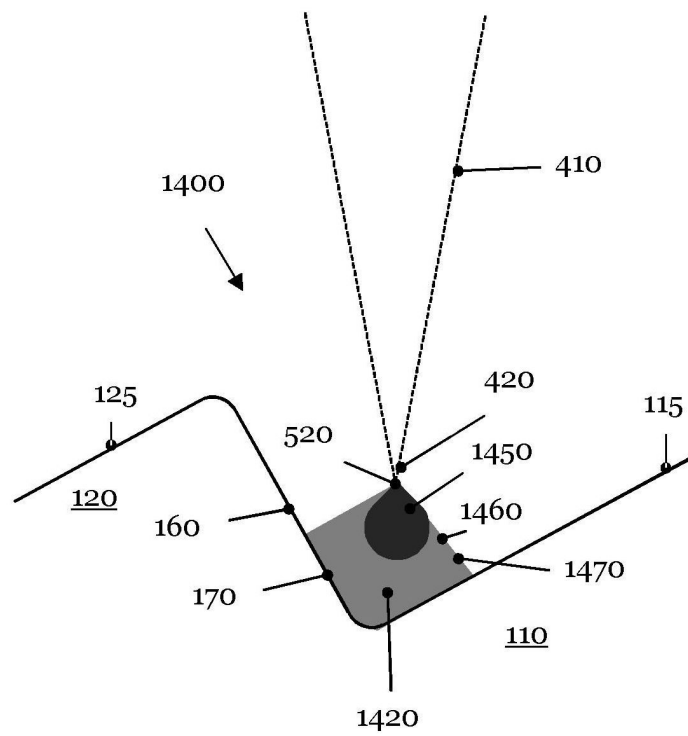


Fig. 15

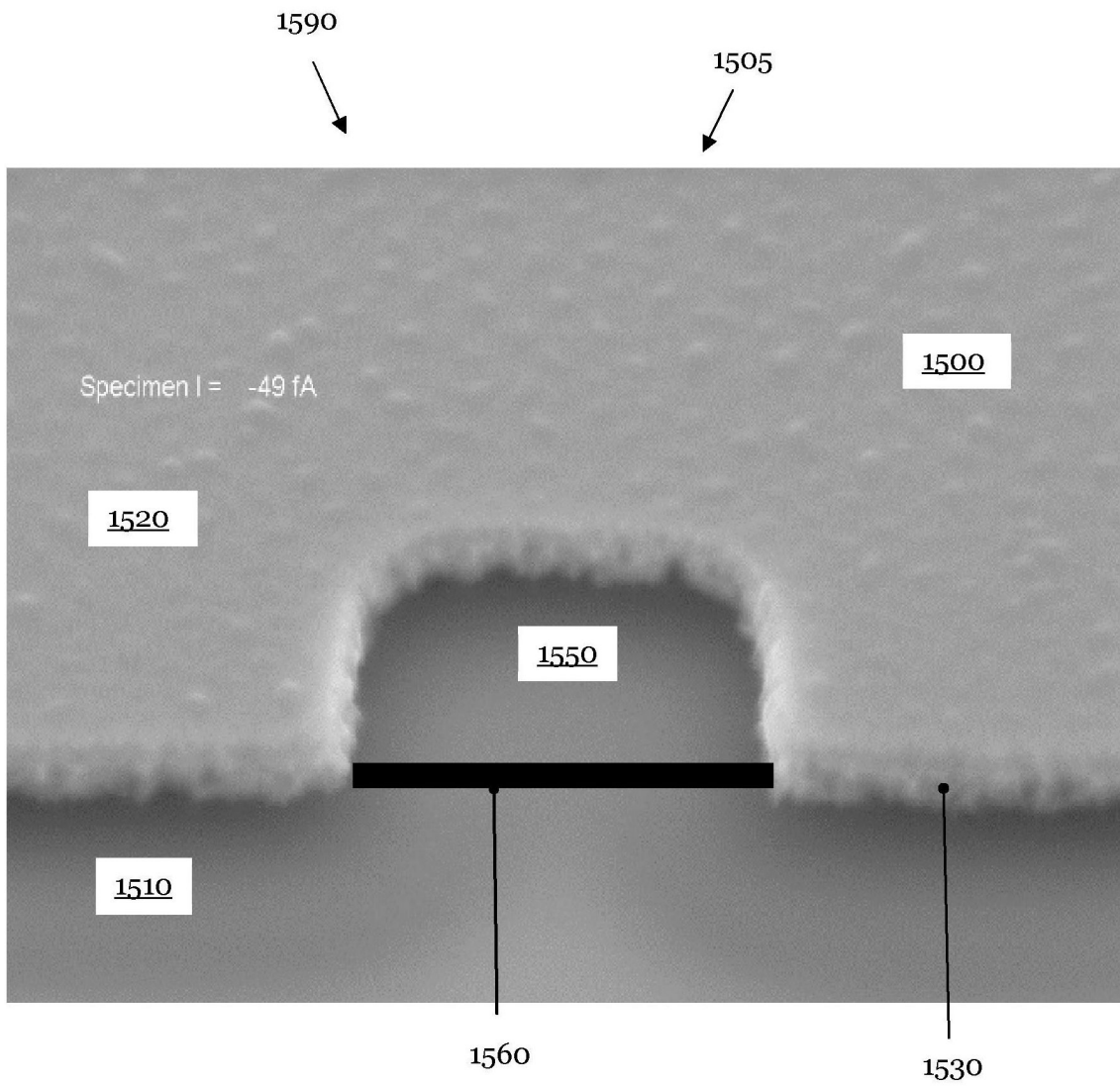


Fig. 16

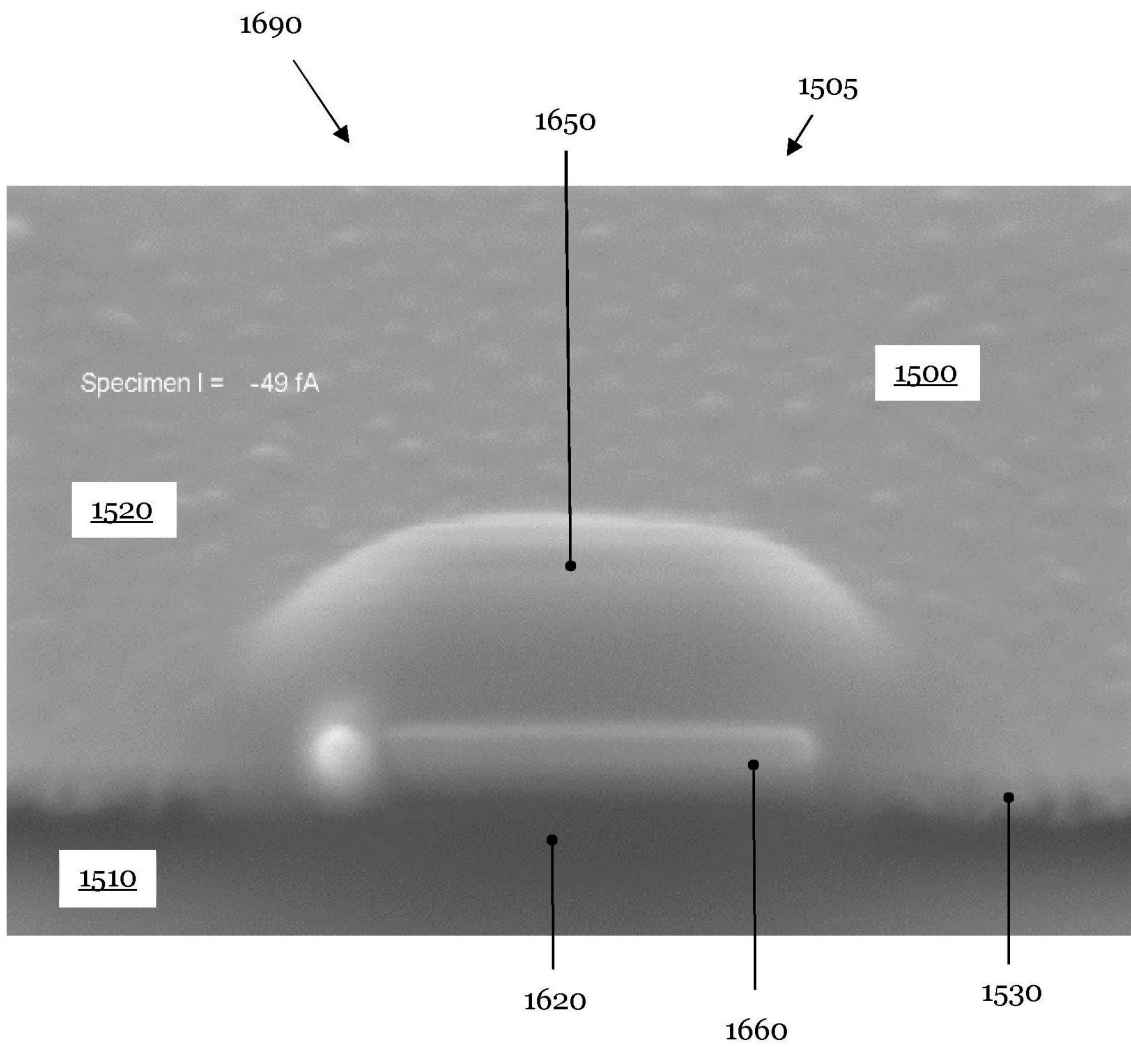


Fig. 17

