



(10) **DE 10 2013 203 995 A1** 2014.09.11

(12) **Offenlegungsschrift**

(21) Aktenzeichen: **10 2013 203 995.6**  
(22) Anmeldetag: **08.03.2013**  
(43) Offenlegungstag: **11.09.2014**

(51) Int Cl.: **H01L 21/027** (2006.01)  
**C23C 16/04** (2006.01)  
**C23F 1/12** (2006.01)

(71) Anmelder:  
**Carl Zeiss SMS GmbH, 07745 Jena, DE**

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

(72) Erfinder:  
**Hofmann, Thorsten, 63110 Rodgau, DE; Bret,**  
**Tristan, 64287 Darmstadt, DE; Spies, Petra,**  
**55130 Mainz, DE; Auth, Nicole, 65462 Ginsheim-**  
**Gustavsburg, DE; Budach, Michael, 63456 Hanau,**  
**DE; Cujas, Dajana, 64342 Seeheim-Jugenheim,**  
**DE**

(56) Ermittelter Stand der Technik:

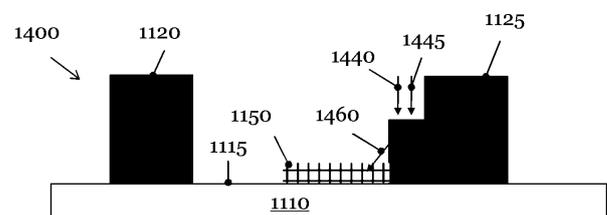
<b>US</b>	<b>2002 / 0 076 495</b>	<b>A1</b>
<b>US</b>	<b>2003 / 0 047 691</b>	<b>A1</b>
<b>US</b>	<b>5 882 823</b>	<b>A</b>
<b>WO</b>	<b>2003/ 003 118</b>	<b>A2</b>

Prüfungsantrag gemäß § 44 PatG ist gestellt.

**Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen**

(54) Bezeichnung: **Verfahren und Vorrichtung zum Schützen eines Substrats während einer Bearbeitung mit einem Teilchenstrahl**

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft ein Verfahren und eine Vorrichtung zum Schützen eines Substrats während einer Bearbeitung mit zumindest einem Teilchenstrahl. Das Verfahren weist die folgenden Schritte auf: (a) Anbringen einer lokal begrenzten Schutzschicht auf dem Substrat; (b) Ätzen des Substrats und/oder einer auf dem Substrat angeordneten Schicht durch den Teilchenstrahl und zumindest ein Gas; und/oder (c) Abscheiden von Material auf dem Substrat durch den Teilchenstrahl und zumindest ein Präkursorgas; und (d) Entfernen der lokal begrenzten Schutzschicht von dem Substrat.



## Beschreibung

### 1. Technisches Gebiet

**[0001]** Die vorliegende Erfindung betrifft ein Verfahren und eine Vorrichtung zum Schützen eines Substrats während einer Bearbeitung mit einem Teilchenstrahl.

### 2. Stand der Technik

**[0002]** Als Folge der wachsenden Integrationsdichte in der Halbleiterindustrie (Moore'sches Gesetz) müssen Photolithographiemasken zunehmend kleinere Strukturen auf Wafern abbilden. Um die auf den Wafer abgebildeten kleinen Strukturabmessungen zu erzeugen, werden zunehmend komplexere Bearbeitungsprozesse benötigt. Diese müssen insbesondere gewährleisten, dass nicht bearbeitetes Halbleitermaterial durch die Bearbeitungsprozesse nicht unbeabsichtigt und/oder unkontrolliert verändert wird.

**[0003]** Auf der Photolithographie-Seite wird dem Trend wachsender Integrationsdichte dadurch Rechnung getragen, indem die Belichtungswellenlänge von Lithographiegeräten zu immer kleineren Wellenlängen verschoben wird. In Lithographiegeräten wird derzeit häufig ein ArF (Argonfluorid) Excimerlaser als Lichtquelle eingesetzt, der bei einer Wellenlänge von etwa 193 nm emittiert.

**[0004]** Gegenwärtig befinden sich Lithographiesysteme in der Entwicklung die elektromagnetische Strahlung im EUV (extremen ultravioletten) Wellenlängenbereich (im Bereich von 10 nm bis 15 nm) verwenden. Diese EUV Lithographiesysteme basieren auf einem völlig neuen Strahlführungskonzept, das ausnahmslos reflektive 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 System bis zum industriellen Einsatzreife zu bringen.

**[0005]** Es ist deshalb zwingend notwendig, herkömmliche Lithographiesysteme weiter zu entwickeln, um damit die Integrationsdichte in der nahen Zukunft weiter zu steigern.

**[0006]** Ein maßgeblicher Anteil an der Abbildung immer kleinerer Strukturen in den auf einem Wafer angeordneten Photolack kommt den photolithographischen Masken oder Belichtungsmasken zu. Mit jeder weiteren Steigerung der Integrationsdichte wird es zunehmend wichtiger, die minimale Strukturgröße der Belichtungsmasken zu verbessern.

**[0007]** Eine Möglichkeit dieser Herausforderung zu begegnen, ist der Einsatz von Molybdän-dotierten Siliziumnitrid- oder Siliziumoxinitrid-Schichten als Absorbermaterial auf dem Substrat einer photolithographischen Maske. Molybdän-dotierte Siliziumnitrid- oder Molybdän-dotierte Siliziumoxinitridschichten werden im Folgenden als MoSi-Schichten bezeichnet.

**[0008]** Die Verwendung einer MoSi-Schicht zur Definition der in den Photolack abzubildenden Strukturelemente ermöglicht es einzustellen, dass ein bestimmter Anteil der auf die MoSi-Schicht einfallenden elektromagnetischen Strahlung durch diese Schicht hindurchtritt. Die Absorption der MoSi-Schicht wird im Wesentlichen durch deren Molybdän-Gehalt bestimmt. Die Phasendifferenz der durch die MoSi-Schicht hindurchtretenden Strahlung relativ zu der durch das transparente Maskensubstrat transmittierten Strahlung wird durch eine Ätzung des Substrats der Maske und/oder durch eine entsprechende Schichtdicke der MoSi-Schicht auf  $180^\circ$  oder  $\pi$  eingestellt. Damit ermöglicht es eine MoSi-Absorberschicht in dem Photolack Strukturen mit größerem Kontrast als binäre Belichtungsmasken abzubilden. Dadurch können kleinere und komplexere Strukturen auf einem Maskensubstrat als mit herkömmlichen binären Absorberschichten auf der Basis von Metallen dargestellt werden. Eine MoSi-Absorberschicht leistet somit einen wesentlichen Beitrag zur Steigerung der Auflösung einer Belichtungsmaske.

**[0009]** Aufgrund der winzigen Strukturgrößen der Absorberelemente und der extremen Anforderungen an Belichtungsmasken, können Fehler während des Maskenherstellungsprozesses nicht ausgeschlossen werden. Der Herstellungsprozess für photolithographische Masken ist hochkomplex und sehr zeitaufwändig und damit kostenintensiv. Deshalb werden Belichtungsmasken repariert, wann immer dies möglich ist.

**[0010]** Ein lokaler Materialabtrag von überschüssigem Material herkömmlicher Absorberschichten von Belichtungsmasken auf der Basis von Metallen, wie etwa Chrom oder Titan, erfolgt üblicherweise durch Ionenstrahl-induziertes (FIB) Sputtern oder Elektronenstrahl-induziertes Ätzen (E-BIE). Diese Prozesse sind beispielsweise in dem Artikel von T. Liang, et al.: „Progress in extreme ultraviolet mask repair using a focused ion beam“, J. Vac. Sci. Technol. B 18(6), 3216 (2000) und in der Patentschrift EP 1 664 924 B1 der Anmelderin beschrieben.

**[0011]** Mit der zunehmenden Verkleinerung der Strukturelemente photolithographischer Masken treten weitere Aspekte der Absorberstrukturelemente photolithographischer Masken in den Fokus, denen bisher nur eine untergeordnete Bedeutung zukam. Beispielsweise kommen der Haltbarkeit der Absor-

berschicht bzw. der Absorberschichten unter chemischer Reinigung und/oder der Bestrahlung mit ultravioletter Strahlung wachsende Bedeutung zu. Der Molybdänanteil der MoSi-Schicht hat auf diese Eigenschaften maßgeblichen Einfluss. Dabei gilt allgemein, dass ein niedrigerer Molybdängehalt zu widerstandsfähigeren Schichten hinsichtlich deren Beständigkeit bezüglich chemischer Reinigung und UV-Bestrahlung führt. Es ist deshalb wünschenswert, den Molybdängehalt von MoSi-Schichten mit der Verkleinerung der Strukturelemente der Absorberschicht ebenfalls zu verringern.

**[0012]** Andererseits hat der Molybdängehalt drastische Auswirkungen auf die Reparatur von Maskenfehlern, die während des Herstellungsprozesses entstanden sind. Das lokale Abtragen überschüssigen MoSi-Absorbermaterials mit Hilfe eines Elektronenstrahls und der derzeit gebräuchlichen Ätzgase wird mit abnehmendem Molybdänanteil der MoSi-Schicht erheblich schwieriger. Dies wird im Folgenden beispielhaft an einem Elektronenstrahl-induzierten Ätzprozess unter Einsatz von Xenondifluorid ( $\text{XeF}_2$ ) als Ätzgas veranschaulicht.

**[0013]** Die **Fig. 1** zeigt einen Ausschnitt aus einem Substrat einer Maske von dem eine rechteckige MoSi-Schicht innerhalb weniger Minuten bis auf das Substrat geätzt wurde. Die MoSi-Schicht weist dabei einen derzeit gebräuchlichen Molybdängehalt im einstelligen Prozentbereich auf. Der Ätzprozess verursacht nur eine moderate Oberflächenrauigkeit des Substrats (dunkle Fläche) der photolithographischen Maske im Bereich der abgetragenen MoSi-Schicht. Die Fläche des Maskensubstrats außerhalb des Ätzprozesses weist keine merkliche Änderung auf.

**[0014]** Die **Fig. 2** zeigt den Ausschnitt aus dem Substrat der Maske der **Fig. 1** nach dem Ätzen einer MoSi-Schicht, die einen im Vergleich zur **Fig. 1** in etwa halbierten Molybdänanteil aufwies. Der Ätzvorgang zum Entfernen der MoSi-Schicht mit geringem Molybdängehalt dauerte ein Vielfaches länger als für die MoSi-Schicht der **Fig. 1**. Der lang andauernde Ätzprozess erzeugt eine erhöhte Rauigkeit des Substrats um die MoSi-Schicht herum. Dies ist an der hellen Halo um die Grundfläche der MoSi-Schicht erkennbar. Überdies verursacht der Ätzprozess erhebliche Schäden des Maskensubstrats im Bereich der Grundfläche der MoSi-Schicht, die sich durch die dunklen Flecken in diesem Bereich zu erkennen geben. Die durch den Ätzprozess verursachten Substratschäden lassen die weitere Verwendung der Belichtungsmaske fraglich erscheinen.

**[0015]** Neben dem Molybdänanteil der MoSi-Schicht hängt deren Ätzverhalten auch ganz wesentlich vom Stickstoffanteil des MoSi-Materialsystems ab. Ein höherer Stickstoffgehalt der MoSi-Schicht erschwert

den Abtrag überschüssigen MoSi-Materials wesentlich.

**[0016]** Der vorliegenden Erfindung liegt daher das Problem zu Grunde, Verfahren und eine Vorrichtung zum Schützen eines Substrats anzugeben, während das Substrat und/oder eine auf dem Substrat angeordnete Schicht mit einem Teilchenstrahl bearbeitet wird, die die oben genannten Nachteile und Einschränkungen zumindest zum Teil vermeiden.

### 3. Zusammenfassung der Erfindung

**[0017]** Gemäß einem Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung wird dieses Problem durch ein Verfahren nach Anspruch 1 gelöst. In einer Ausführungsform weist das Verfahren zum Schützen eines Substrats während einer Bearbeitung mit zumindest einem Teilchenstrahl die folgenden Schritte auf: (a) Anbringen einer lokal begrenzten Schutzschicht auf dem Substrat; (b) Ätzen des Substrats und/oder einer auf dem Substrat angeordneten Schicht durch den Teilchenstrahl und zumindest ein Gas; und/oder (c) Abscheiden von Material auf dem Substrat durch den Teilchenstrahl und zumindest ein Präkursorgas; und (d) Entfernen der lokal begrenzten Schutzschicht von dem Substrat.

**[0018]** Bei Teilchenstrahl-induzierten Bearbeitungsprozessen tritt häufig das bekannte Problem des Riverbedding auf, d.h. es wird unbeabsichtigt Material um den Bereich eines Ätz- oder Sputterprozesses abgetragen. Neben dem Teilchenstrahl hängt das Ausmaß des auftretenden Riverbedding auch von dem bzw. den zum Ätzen verwendeten Gasen ab.

**[0019]** Das Anbringen einer Schutzschicht um das abzutragende Material der MoSi-Schicht herum verhindert, dass ein Ätzprozess unabhängig von dessen Zeitdauer und unabhängig vom eingesetzten Ätzgas das Maskensubstrat lokal schädigen kann. Damit kann das in der **Fig. 2** dargestellte Aufräumen der Oberfläche des Substrats zuverlässig vermieden werden. Ferner verhindert die Schutzschicht ebenfalls das oben angesprochene Riverbedding oder eine lokale Deposition von Material auf dem Substrat während eines Bearbeitungsprozesses.

**[0020]** In einem Aspekt umfasst das Anbringen der lokal begrenzten Schicht: Anbringen der Schutzschicht angrenzend an einen Teil des Substrats oder der Schicht, der bearbeitet werden soll und/oder Anbringen der Schutzschicht in einer Entfernung von der Schicht, innerhalb der Material auf dem Substrat abgeschieden werden soll.

**[0021]** Nach einem weiteren Aspekt umfasst das Anbringen der Schutzschicht: Abscheiden einer Schutzschicht, die eine Ätzselektivität gegenüber dem Substrat von größer 1:1, bevorzugt größer 2:1, bevorzugt

ter größer 3:1 und am meisten bevorzugt größer 5:1 aufweist.

**[0022]** In einem anderen Aspekt umfasst das Anbringen der Schutzschicht das Abscheiden einer Schicht durch einen Elektronenstrahl und zumindest eine volatile Metallverbindung auf dem Substrat.

**[0023]** Bevorzugt umfasst die volatile Metallverbindung zumindest ein Metallcarbonyl-Präkursorgas und ferner umfasst das zumindest eine Metallcarbonyl-Präkursorgas zumindest eine der folgenden Verbindungen: Molybdänhexacarbonyl ( $\text{Mo}(\text{CO})_6$ ), Chromhexacarbonyl ( $\text{Cr}(\text{CO})_6$ ), Vanadiumhexacarbonyl ( $\text{V}(\text{CO})_6$ ), Wolframhexacarbonyl ( $\text{W}(\text{CO})_6$ ), Nickeltetracarbonyl ( $\text{Ni}(\text{CO})_4$ ), Eisenpentacarbonyl ( $\text{Fe}_3(\text{CO})_5$ ), Rutheniumpentacarbonyl ( $\text{Ru}(\text{CO})_5$ ) und Osmiumpentacarbonyl ( $\text{Os}(\text{CO})_5$ ).

**[0024]** Ebenfalls bevorzugt umfasst die zumindest eine volatile Metallverbindung ein Metallfluorid und ferner umfasst ein Metallfluorid zumindest eine der folgenden Verbindungen: Wolframhexafluorid ( $\text{WF}_6$ ), Molybdänhexafluorid ( $\text{MoF}_6$ ), Vanadiumfluorid ( $\text{VF}_2$ ,  $\text{VF}_3$ ,  $\text{VF}_4$ ,  $\text{VF}_5$ ), und/oder Chromfluorid ( $\text{CrF}_2$ ,  $\text{CrF}_3$ ,  $\text{CrF}_4$ ,  $\text{CrF}_5$ ).

**[0025]** In einem anderen Aspekt umfasst die lokal begrenzte Schutzschicht eine Dicke von 0,2 nm–1000 nm, bevorzugt 0,5 nm–500 nm und am meisten bevorzugt von 1 nm–100 nm und/oder weist eine laterale Ausdehnung auf dem Substrat auf von 0,1 nm–5000 nm, bevorzugt 0,1 nm–2000 nm und am meisten bevorzugt von 0,1 nm–500 nm.

**[0026]** Eine lokal begrenzte Schutzschicht bedeutet im Rahmen dieser Anmeldung eine Schutzschicht deren laterale Abmessungen an die Größe einer Bearbeitungsstelle angepasst sind. Eine Bearbeitungsstelle ist ein Defekt auf dem Substrat und/oder ein Defekt der auf dem Substrat angeordneten Schicht, der überschüssiges oder fehlendes Material aufweist. Neben der Größe der Bearbeitungsstelle hängen die lateralen Abmessungen der Schutzschicht von dem verwendeten Teilchenstrahl, dessen Parametern sowie des bzw. der für die Bearbeitung eingesetzten Gase ab.

**[0027]** Gemäß einem weiteren Aspekt umfasst das Abscheiden von Material das Abscheiden von Material auf das Substrat angrenzend an die auf dem Substrat angeordnete Schicht.

**[0028]** In noch einem anderen Aspekt umfasst das zumindest eine Gas zumindest ein Ätzgas. Bevorzugt umfasst das zumindest eine Ätzgas Xenondifluorid ( $\text{XeF}_2$ ), Schwefelhexafluorid ( $\text{SF}_6$ ), Schwefeltetrafluorid ( $\text{SF}_4$ ), Stickstofftrifluorid ( $\text{NF}_3$ ), Phosphortrifluorid ( $\text{PF}_3$ ), Stickstoffsauerstofffluorid ( $\text{NOF}$ ), Molybdänhexafluorid ( $\text{MoF}_6$ ), Fluorwasserstoff ( $\text{HF}$ ),

Triphosphortristickstoffhexafluorid ( $\text{P}_3\text{N}_3\text{F}_6$ ) oder eine Kombination dieser Gase.

**[0029]** Nach einem günstigen Aspekt umfasst das Entfernen der Schutzschicht: Richten eines Elektronenstrahls und zumindest eines zweiten Ätzgases auf die Schutzschicht, wobei das zumindest eine zweite Ätzgas eine Ätzselektivität gegenüber dem Substrat von größer 1:1, bevorzugt größer 2:1, bevorzugter größer 3:1 und am meisten bevorzugt größer 5:1 aufweist.

**[0030]** In noch einem weiteren Aspekt umfasst das Entfernen der Schutzschicht: Richten des Elektronenstrahls und zumindest eines zweiten Ätzgases auf die Schutzschicht, wobei das zumindest eine zweite Ätzgas ein Chlor enthaltendes Gas, ein Brom enthaltendes Gas, ein Jod enthaltendes Gas und/oder ein Gas umfasst, das eine Kombination dieser Halogene enthält. Bevorzugt umfasst das zumindest eine zweite Ätzgas zumindest ein Chlor enthaltenden Gas.

**[0031]** In einer weiteren besonders bevorzugten Ausführungsform erfolgt das Entfernen der Schutzschicht von dem Substrat durch eine nasschemische Reinigung des Substrats.

**[0032]** Nach einem anderen Aspekt umfasst das Substrat ein Substrat einer photolithographischen Maske und/oder die auf dem Substrat angeordnete Schicht umfasst eine Absorberschicht. Bevorzugt umfasst die Absorberschicht  $\text{Mo}_x\text{SiO}_y\text{N}_z$ , wobei  $0 \leq x \leq 0,5$ ,  $0 \leq y \leq 2$  und  $0 \leq z \leq 4/3$  sind.

**[0033]** Das Materialsystem  $\text{Mo}_x\text{SiO}_y\text{N}_z$  umfasst als Grenzfälle vier verschiedene Verbindungen:

- (a) Molybdänsilizid für  $y = z = 0$
- (b) Siliziumnitrid oder Silizium-Stickstoff Schichtsysteme für  $x = y = 0$
- (c) Molybdän-dotiertes Siliziumoxid für  $z = 0$ .
- (d) Molybdän-dotiertes Siliziumnitrid für  $y = 0$ .

**[0034]** Gemäß einem weiteren Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung wird das oben genannte Problem durch ein Verfahren nach Anspruch 18 gelöst. In einer Ausführungsform weist das Verfahren zum Entfernen von Teilen einer Absorberschicht, die auf Teilen einer Oberfläche eines Substrats einer photolithographischen Maske angeordnet ist, wobei die Absorberschicht  $\text{Mo}_x\text{SiO}_y\text{N}_z$  umfasst, und wobei  $0 \leq x \leq 0,5$ ,  $0 \leq y \leq 2$  und  $0 \leq z \leq 4/3$  sind, den Schritt auf: Richten zumindest eines Teilchenstrahls und zumindest eines Gases auf den zumindest einen Teil der Absorberschicht, der entfernt werden soll, wobei das zumindest eine Gas zumindest ein Ätzgas und zumindest ein zweites Gas umfasst oder wobei das zumindest eine Gas zumindest ein Ätzgas und zumindest ein zweites Gas in einer Verbindung umfasst.

**[0035]** In der oben dargestellten Alternative eines Abtragprozesses überschüssigen MoSi-Absorbermaterials wird das Entstehen von Schäden des den Defekt umgebenden Maskensubstrats dadurch verhindert, dass der Ätzprozess durch Zugabe eines zweiten Gases beschleunigt wird oder der Ätzprozess auf dem Substratmaterial verlangsamt wird. Alternativ können beide Ätzraten verlangsamt werden, wobei jedoch die Ätzrate auf dem Substrat deutlich stärker verlangsamt wird als die Ätzrate des Mo-Si-Materials, sodass insgesamt die Auswirkung von Sekundärteilchen auf das Substrat begrenzt wird. Das zweite Gas bzw. dessen Zusammensetzung kann auf die Materialzusammensetzung der jeweiligen MoSi-Schicht abgestimmt werden.

**[0036]** Ein weiterer vorteilhafter Aspekt weist das Ändern eines Verhältnisses von Gasmengenströmen des zumindest einen Ätzgases und des zumindest einen zweiten Gases auf, während einer Zeitspanne des Richtens des zumindest einen Teilchenstrahls und des zumindest einen Gases auf den zumindest einen Teil der Absorberschicht, der entfernt werden soll. Bevorzugt wird die Zusammensetzung des zumindest einen zweiten Gases vor Erreichen einer Schichtgrenze zwischen der Absorberschicht und dem Substrat geändert.

**[0037]** In einem anderen Aspekt umfasst das zumindest eine zweite Gas ein Gas, das Ammoniak bereitstellt. Bevorzugt umfasst das zumindest eine Ammoniak bereitstellende Gas Ammoniak ( $\text{NH}_3$ ), Ammoniumhydroxid ( $\text{NH}_4\text{OH}$ ), Ammoniumcarbonat ( $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ ), Diimin ( $\text{N}_2\text{H}_2$ ), Hydrazin ( $\text{N}_2\text{H}_4$ ), Hydrogennitrat ( $\text{HNO}_3$ ), Ammoniumhydrogencarbonat ( $\text{NH}_4\text{HCO}_3$ ), und/oder Diammoniakcarbonat ( $(\text{NH}_3)_2\text{CO}_3$ ).

**[0038]** Gemäß einem weiteren Aspekt wird das zumindest eine Ätzgas und das zumindest eine Ammoniak bereitstellende Gas in einer Verbindung bereitgestellt und die Verbindung umfasst Trifluoracetamid ( $\text{CF}_2\text{CONH}_2$ ), Triethylamintrihydrofluorid ( $(\text{C}_2\text{H}_5)_3\text{N}\cdot 3\text{HF}$ ), Ammoniumfluorid ( $\text{NH}_4\text{F}$ ), Ammoniumdifluorid ( $\text{NH}_4\text{F}_2$ ), und/oder Tetramminkupfersulfat ( $\text{CuSO}_4\cdot(\text{NH}_3)_4$ ).

**[0039]** Gemäß einem anderen Aspekt umfasst das zumindest eine zweite Gas zumindest Wasserdampf.

**[0040]** In einem vorteilhaften Aspekt umfasst das zumindest eine zweite Gas ein Ammoniak bereitstellendes Gas und Wasserdampf.

**[0041]** Nach einem günstigen Aspekt umfasst das zumindest eine zweite Gas zumindest ein Metallpräkursorgas, und das zumindest eine Metallpräkursorgas umfasst eine der folgenden Verbindungen: Molybdänhexacarbonyl ( $\text{Mo}(\text{CO})_6$ ), Chromhexacarbonyl ( $\text{Cr}(\text{CO})_6$ ), Vanadiumhexacarbonyl ( $\text{V}(\text{CO})_6$ ), Wolf-

ramhexacarbonyl ( $\text{W}(\text{CO})_6$ ), Nickeltetracarbonyl ( $\text{Ni}(\text{CO})_4$ ), Eisenpentacarbonyl ( $\text{Fe}_3(\text{CO})_5$ ), Rutheniumpentacarbonyl ( $\text{Ru}(\text{CO})_5$ ) und/oder Osmiumpentacarbonyl ( $\text{Os}(\text{CO})_5$ ).

**[0042]** In einem vorteilhaften Aspekt umfasst das zumindest eine zweite Gas zumindest ein Metallcarbonyl und Wasserdampf und/oder zumindest ein Ammoniak bereitstellendes Gas.

**[0043]** Nach einem bevorzugten Aspekt umfasst das zumindest eine zweite Gas Sauerstoff, Stickstoff und/oder zumindest eine Stickstoffsauerstoffverbindung. Gemäß einem weiteren Aspekt umfasst das zumindest eine zweite Gas Sauerstoff, Stickstoff und/oder zumindest eine Stickstoffsauerstoffverbindung und ein Ammoniak bereitstellendes Gas. Nach einem anderen Aspekt umfasst das zumindest eine zweite Gas Sauerstoff, Stickstoff und/oder zumindest eine Stickstoffsauerstoffverbindung und Wasserdampf.

**[0044]** In noch einem anderen Aspekt umfasst das Richten des zumindest einen zweiten Gases auf den Teil der Absorberschicht, der entfernt werden soll, das Aktivieren des Sauerstoffs, des Stickstoffs und/oder der zumindest einen Stickstoffsauerstoffverbindung mit einer Aktivierungsquelle.

**[0045]** Stickstoffoxid (NO) Radikale können zu einer Verstärkung der oberflächlichen Oxidation von Siliziumnitrid führen. Dadurch lässt sich die Ätzrate mit Fluor-basierten Reagenzien deutlich beschleunigen (vgl. Kastenmeier et al.: „Chemical dry etching of silicon nitride and silicon dioxide using  $\text{CF}_4/\text{O}_2/\text{N}_2$  gas mixtures“, J. Vac. Sci. Technol. A (14(5), S. 2802–2813, Sep/Aug 1996).

**[0046]** Gemäß einem günstigen Aspekt weist ein Verfahren zum Schützen eines Substrats während einer Bearbeitung mit zumindest einem Teilchenstrahl die folgenden Schritte auf: (a) Anbringen einer lokal begrenzten Schutzschicht auf dem Substrat; (b) Ätzen des Substrats und/oder einer auf dem Substrat angeordneten Schicht durch den Teilchenstrahl und zumindest ein Gas; und/oder (c) Abscheiden von Material auf dem Substrat durch den Teilchenstrahl und zumindest ein Präkursorgas; und (d) Entfernen der lokal begrenzten Schutzschicht von dem Substrat. Ferner umfasst dieses Verfahren das Ausführen zumindest eines Schrittes nach einem der oben angegebenen Aspekte.

**[0047]** Die Kombination aus Anbringen einer lokal begrenzten Schutzschicht und Einsatz eines Gases, das sich aus einem Ätzgas und einem zweiten Gas zusammensetzt, macht es möglich, durch das Einstellen von zwei unabhängigen Parametern einerseits das einen Defekt umgebende Maskensubstrat und andererseits die Fläche des Substrats unterhalb des Defekts vor Beschädigungen durch den Bearbei-

tungsprozess der Absorberschicht zu schützen. Dabei erlaubt das zweite Gas das Optimieren des Ätzprozesses, ohne mögliche Beschädigungen des Substrats um den Defekt in Betracht ziehen zu müssen. Somit kann das zweite Gas, ohne einen Kompromiss eingehen zu müssen, ausschließlich zur Optimierung des Ätzprozesses und zur Vermeidung von Substratschäden unterhalb des Defekts gewählt werden.

**[0048]** In noch einem weiteren Aspekt umfasst das Substrat der photolithographischen Maske ein im ultravioletten Wellenlängenbereich transparentes Material, und/oder umfasst der Teilchenstrahl einen Elektronenstrahl. Neben einem Elektronenstrahl ist ebenfalls ein Ionenstrahl günstig. Bevorzugt sind dabei Ionenstrahlen, die mit Hilfe einer Gasfeld-Ionenquelle (gas field ion source (GFIS)) und einem Edelgas, wie etwa Helium (He), Neon (Ne) Argon (Ar), Krypton (Kr) und/oder Xenon (Xe) erzeugt wurden.

**[0049]** Die Anwendung der oben definierten Verfahren ist nicht auf ein Substrat einer photolithographischen Maske eingeschränkt. Vielmehr können damit alle Halbleitermaterialien während eines Bearbeitungsschritts und/oder während einer Korrektur von lokalen Defekten zuverlässig geschützt werden. Darüber hinaus kann eine lokal begrenzte Schutzschicht generell zum Schützen irgendeines Materials, sei es ein Isolator, ein Halbleiter, ein Metall oder eine metallische Verbindung während eines Teilchenstrahl-induzierten lokalen Bearbeitungsprozesses des Materials eingesetzt werden. Schließlich können die oben diskutierten Verfahren auch zum Beheben von Defekten von reflektiven Masken für den extremen ultravioletten (EUV) Wellenlängenbereich eingesetzt werden.

**[0050]** Ein weiterer Aspekt der vorliegenden Erfindung betrifft eine Vorrichtung zum Schützen eines Substrats während einer Bearbeitung mit zumindest einem Teilchenstrahl, die aufweist: (a) Mittel zum Anbringen einer lokal begrenzten Schutzschicht auf dem Substrat; (b) Mittel zum Ätzen des Substrats und/oder einer auf dem Substrat angeordneten Schicht durch den Teilchenstrahl und zumindest ein Gas; und/oder (c) Mittel zum Abscheiden von Material auf dem Substrat durch den Teilchenstrahl und zumindest ein Präkursorgas; und (d) Mittel zum Entfernen der lokal begrenzten Schutzschicht von dem Substrat.

**[0051]** Nach noch einem anderen Aspekt ist die Vorrichtung ausgebildet, ein Verfahren nach einem der oben angegebenen Aspekte auszuführen.

**[0052]** Gemäß noch einem weiteren Aspekt weist die Vorrichtung ferner Mittel zum Erzeugen eines zweiten Teilchenstrahls auf zum Anregen von Sauerstoff, Stickstoff und/oder einer Stickstoffsauerstoffverbindung.

#### 4. Beschreibung der Zeichnungen

**[0053]** In der folgenden detaillierten Beschreibung werden derzeit bevorzugte Ausführungsbeispiele der Erfindung unter Bezugnahme auf die Zeichnungen beschrieben, wobei

**[0054]** Fig. 1 einen Ausschnitt aus einer Aufsicht auf ein Substrat einer Maske zeigt, von dem eine MoSi-Schicht abgetragen wurde, deren Molybdängehalt im einstelligen Prozentbereich lag;

**[0055]** Fig. 2 einen Ausschnitt aus einer Aufsicht auf ein Substrat einer Belichtungsmaske darstellt, von dem eine MoSi-Schicht geätzt wurde, deren Molybdängehalt etwa halb so groß wie in der Fig. 1 war;

**[0056]** Fig. 3 einen Schnitt durch eine schematische Darstellung einer Vorrichtung zum Korrigieren von Absorberdefekten photolithographischer Masken darstellt;

**[0057]** Fig. 4 eine schematische Aufsicht auf einen Ausschnitt einer Streifenstruktur aus Absorbermaterial zeigt, bei der ein Streifen einen Defekt aufweist, bei dem überschüssiges Absorbermaterial abgelagert wurde;

**[0058]** Fig. 5 schematisch das Anbringen einer lokal begrenzten Schutzschicht für den Defekt der Fig. 4 darstellt;

**[0059]** Fig. 6 schematisch das Ätzen des Defekts der Fig. 5 mit einem Elektronenstrahl und einem Ätzgas wiedergibt;

**[0060]** Fig. 7 schematisch das Ätzen des Defekts der Fig. 5 mit einem Elektronenstrahl, einem Ätzgas und einem Ammoniak bereitstellenden Gas illustriert;

**[0061]** Fig. 8 einen Ausschnitt einer Maske repräsentiert, von der eine rechteckige MoSi-Schicht mit niedrigem Molybdängehalt mit Hilfe eines Elektronenstrahls,  $\text{XeF}_2$  als Ätzgas und Ammoniumhydroxid ( $\text{NH}_4\text{OH}$ ) entfernt wurde;

**[0062]** Fig. 9 schematisch das Ätzen des Defekts der Fig. 5 mit einem Elektronenstrahl, einem Ätzgas, einem Ammoniak bereitstellenden Gas und Wasserdampf veranschaulicht;

**[0063]** Fig. 10 schematisch das Ätzen des Defekts der Fig. 5 mit einem Elektronenstrahl, einem Ätzgas, einem Ammoniak bereitstellenden Gas und Stickstoffmonoxid Radikalen repräsentiert;

**[0064]** Fig. 11 schematisch das Ätzen des Defekts der Fig. 5 mit einem Elektronenstrahl, einem Ätzgas, einem Metallcarbonyl einem Ammoniak bereitstellenden Gas und/oder Wasser wiedergibt;

**[0065]** Fig. 12 die Fig. 7 und Fig. 9 bis Fig. 11 nach Abschluss des Entferns des Defekts der Fig. 5 zeigt;

**[0066]** Fig. 13 schematisch einen Ätzprozess zum Entfernen der lokal begrenzten Schutzschicht der Fig. 12 wiedergibt;

**[0067]** Fig. 14 schematisch den Ausschnitt der Maske der Fig. 13 nach dem Entfernen der Schutzschicht darstellt;

**[0068]** Fig. 15 eine schematische Aufsicht auf einen Ausschnitt einer Streifenstruktur aus Absorbermaterial zeigt, bei der ein Streifen einen Defekt fehlenden Absorbermaterials aufweist;

**[0069]** Fig. 16 einen Schnitt durch eine schematische Darstellung einer photolithographischen Maske während des Aufbringens einer lokal begrenzten Schutzschicht präsentiert;

**[0070]** Fig. 17 den Schnitt durch die Maske der Fig. 16 während eines Abscheidevorgangs von fehlendem Absorbermaterial zeigt;

**[0071]** Fig. 18 den Schnitt durch die Maske der Fig. 17 während des Entferns der lokal begrenzten Schutzschicht; und

**[0072]** Fig. 19 den Schnitt durch die Maske der Fig. 18 nach dem Entfernen der lokal begrenzten Schutzschicht angibt.

#### 5. Detaillierte Beschreibung bevorzugter Ausführungsbeispiele

**[0073]** Im Folgenden werden bevorzugte Ausführungsformen der erfindungsgemäßen Verfahren und der erfindungsgemäßen Vorrichtung genauer erläutert. Diese werden am Beispiel der Bearbeitung von Defekten photolithographischer Masken ausgeführt. Die erfindungsgemäßen Verfahren und die erfindungsgemäße Vorrichtung sind jedoch nicht auf die Anwendung auf photolithographische Masken eingeschränkt. Vielmehr können diese zur Bearbeitung von Halbleitermaterialien während des Herstellungsprozesses und/oder eines Reparaturprozesses eingesetzt werden. Ferner ist es möglich, eine lokal begrenzte Schutzschicht zum Schützen beliebiger Materialien während einer lokalen Bearbeitung mit einem Teilchenstrahl einzusetzen.

**[0074]** Die Fig. 3 zeigt im Schnitt eine schematische Darstellung von bevorzugten Komponenten einer Vorrichtung 1000, die verwendet werden kann, um lokale Defekte einer Absorberstruktur einer Maske zu reparieren und gleichzeitig ein Substrat der Maske vor Schäden während eines Reparaturvorgangs zu bewahren. Die beispielhafte Vorrichtung

1000 der Fig. 3 ist ein modifiziertes Rasterelektronenmikroskop (SEM). Eine Elektronenkanone 1018 erzeugt einen Elektronenstrahl 1027 und die Strahlformenden und Strahl-abbildenden Elemente 1020 und 1025 richten den fokussierten Elektronenstrahl 1027 auf entweder das Substrat 1010 einer Belichtungsmaske 1002 oder auf ein Element der auf der Oberfläche 1015 angeordneten Absorberstruktur (in Fig. 3 nicht dargestellt).

**[0075]** Das Substrat 1010 der Maske 1002 ist auf einem Probenstisch 1005 angeordnet. Der Probenstisch 1005 umfasst eine Verschiebeeinheit – die in der Fig. 3 nicht dargestellt ist – mit deren Hilfe die Maske 1002 in einer Ebene senkrecht zum Elektronenstrahl 1027 verschoben werden kann, so dass der Defekt der Absorberstruktur der Maske 1002 unter dem Elektronenstrahl 1027 zu liegen kommt. Der Probenstisch 1010 kann ferner ein oder mehrere Elemente beinhalten, mittels derer die Temperatur des Substrats 1010 der Maske 1002 auf eine vorgegebene Temperatur eingestellt und kontrolliert werden kann (in der Fig. 3 nicht eingezeichnet).

**[0076]** Die beispielhafte Vorrichtung 1000 in der Fig. 3 verwendet als Teilchenstrahl einen Elektronenstrahl 1027. Ein Elektronenstrahl 1027 kann auf einen kleinen Fleck mit einem Durchmesser < 10 nm auf der Oberfläche 1015 der Maske 1002 fokussiert werden. Die Energie der auf Oberfläche 1015 des Substrats 1010 oder ein Element der Absorberstruktur einfallenden Elektronen kann über einen großen Energiebereich (von einigen eV bis zu etwa 50 keV) variiert werden. Aufgrund ihrer geringen Masse erzeugen die Elektronen beim Auftreffen auf die Oberfläche 1015 des Substrats 1010 keine nennenswerten Schäden der Substratoberfläche 1015.

**[0077]** Die Anwendung der in dieser Anmeldung definierten Verfahren ist nicht auf den Einsatz eines Elektronenstrahls 1027 beschränkt. Vielmehr kann jeder Teilchenstrahl benutzt werden, der in der Lage ist, eine lokale chemische Reaktion eines Präkursor-gases an der Stelle zu induzieren, an der der Teilchenstrahl auf die Maske 1002 auftrifft und ein entsprechendes Gas bereitgestellt wird. Beispiele alternativer Teilchenstrahlen sind: Ionenstrahlen, Atomstrahlen, Molekülstrahlen und/oder Photonenstrahlen.

**[0078]** Es ist ferner möglich, zwei oder mehrere Teilchenstrahlen parallel einzusetzen. In der in der Fig. 3 beispielhaft dargestellten Vorrichtung 1000 ist ein Lasersystem 1080 eingebaut, das einen Laserstrahl 1082 erzeugt. Damit erlaubt die Vorrichtung 1000 gleichzeitig einen Elektronenstrahl 1027 in Kombination mit einem Photonenstrahl 1082 auf die Maske 1002 anzuwenden. Beide Strahlen 1027 und 1082 können kontinuierlich oder in Form von Pulsen bereitgestellt werden. Überdies können die Pulse der

beiden Strahlen **1027** und **1082** gleichzeitig, teilweise überlappend oder intermediär auf den Reaktionsort einwirken. Der Reaktionsort ist die Stelle, an der ein Elektronenstrahl **1027** alleine oder in Verbindung mit dem Laserstrahl **1082** eine lokale chemische Reaktion eines Präkursorgases induziert.

**[0079]** Der Elektronenstrahl **1027** kann zudem durch Scannen über die Oberfläche **1015** zum Aufnehmen eines Bildes der Oberfläche **1015** des Substrats **1010** der Maske **1002** eingesetzt werden. Ein Detektor **1030** für rückgestreute und/oder sekundäre Elektronen, die durch die Elektronen des einfallenden Elektronenstrahls **1027** und/oder des Laserstrahls **1082** erzeugt werden, stellt ein Signal bereit, das proportional zur Zusammensetzung des Materials des Substrats **1110** oder zur Zusammensetzung des Materials der Elemente der Absorberstruktur ist. Aus dem Bild der Oberfläche **1015** des Substrats **1010** können somit die Defekte der Absorberstrukturelemente der Maske **1002** bestimmt werden. Alternativ können Defekte der Absorberstruktur einer Maske **1002** durch Belichten eines Wafers und/oder aus der Aufnahme eines oder mehrerer Luftbilder ermittelt werden, beispielsweise mit Hilfe eines AIMS™.

**[0080]** Ein Computersystem **1040** kann anhand eines Signals des Detektors **1030** aus einem Scan des Elektronenstrahls **1027** und/oder des Laserstrahls **1082** ein Bild der Oberfläche **1015** des Substrats **1010** der Maske **1002** bestimmen. Das Computersystem **1040** kann Algorithmen enthalten, die in Hardware und/oder Software realisiert sind, die es ermöglichen, aus dem Datensignal des Detektors **1030** ein Bild der Oberfläche **1015** des Substrats **1010** der Maske **1002** zu ermitteln. Ein Bildschirm, der mit dem Computersystem **1040** verbunden ist, kann das berechnete Bild darstellen (in der **Fig. 3** nicht gezeigt). Das Computersystem **1040** kann ferner die Signal-daten des Detektors **1030** und/oder das berechnete Bild speichern (ebenfalls in der **Fig. 3** nicht angegeben). Das Computersystem **1040** kann ferner die Elektronenkanone **1018** und die Strahlformenden und Strahl-abbildenden Element **1020** und **1025** ebenso wie das Lasersystem **1080** steuern bzw. regeln. Zudem kann das Computersystem **1040** die Bewegung des Probenstisches **1005** steuern (in der **Fig. 3** nicht veranschaulicht).

**[0081]** Der auf die Oberfläche **1015** des Substrats **1010** der Maske **1002** auftreffende Elektronenstrahl **1027** kann die Substratoberfläche **1015** aufladen. Um den Effekt der Ladungsakkumulation durch den Elektronenstrahl **1027** zu verringern, kann eine Ionenkanone **1035** zum Bestrahlen der Substratoberfläche **1015** mit Ionen niedriger Energie eingesetzt werden. Beispielsweise kann ein Argonionenstrahl mit einer kinetischen Energie von einigen hundert Volt zum Neutralisieren der Substratoberfläche **1015** benutzt

werden. Das Computersystem **1040** kann auch die Ionenstrahlquelle **1035** steuern.

**[0082]** Falls ein fokussierter Ionenstrahl anstelle des Elektronenstrahls **1027** zum Einsatz kommt, kann sich eine positive Ladungsverteilung auf der isolierenden Oberfläche **1015** des Substrats **1010** anhäufen. In diesem Fall kann ein Elektronenstrahl zum Bestrahlen der Substratoberfläche **1015** eingesetzt werden, um die positive Ladungsverteilung auf der Substratoberfläche **1015** zu verkleinern.

**[0083]** Zur Bearbeitung des bzw. der Defekte der auf der Oberfläche **1015** des Substrats **1010** angeordneten Absorberstruktur weist die beispielhafte Vorrichtung **1000** der **Fig. 3** bevorzugt sechs verschiedene Vorratsbehälter für verschiedene Gase oder Präkursorgase auf. Der erste Vorratsbehälter **1050** speichert ein erstes Präkursorgas oder ein Depositionsgas, das im Zusammenwirken mit dem Elektronenstrahl **1027** zum Erzeugen einer Schutzschicht um den Defekt eines Absorberelements benutzt wird. Der zweite Vorratsbehälter **1055** beinhaltet ein Chlor enthaltendes Ätzgas, mit dessen Hilfe die Schutzschicht nach Abschluss des Reparaturprozesses des Absorberdefekts wieder von der Oberfläche **1015** des Substrats **1010** der Maske **1002** entfernt wird.

**[0084]** Der dritte Vorratsbehälter **1060** speichert ein Ätzgas, beispielsweise Xenondifluorid ( $\text{XeF}_2$ ), das zum lokalen Entfernen von überschüssigem Absorbiermaterial eingesetzt wird. Der vierte Speicherbehälter **1065** bevorratet ein Präkursorgas zum lokalen Abscheiden fehlenden Absorbiermaterials auf die Oberfläche **1015** des Substrats **1010** der Belichtungsmaske **1002**. Der fünfte **1070** und der sechste Vorratsbehälter **1075** enthalten zwei weitere verschiedene Gase, die bei Bedarf dem im dritten Behälter **1060** gespeicherten Ätzgases zugemischt werden können. Darüber hinaus erlaubt die Vorrichtung **1000** bei Bedarf weitere Vorratsbehälter und Gaszuführungen zu installieren.

**[0085]** Jeder Vorratsbehälter ist mit einem eigenen Ventil **1051**, **1056**, **1061**, **1066**, **1071**, **1076** ausgestattet, um die Menge der pro Zeiteinheit bereitgestellten Gaspartikel oder den Gasmengenstrom am Ort des Auftreffens des Elektronenstrahls **1027** auf das Substrat **1010** der Maske **1002** zu kontrollieren. Außerdem hat jeder Vorratsbehälter **1050**, **1055**, **1060**, **1065**, **1070**, **1075** seine eigene Gaszuführung **1052**, **1057**, **1062**, **1067**, **1072**, **1077**, die mit einer Düse nahe am Auftreffpunkt des Elektronenstrahls **1027** auf das Substrat **1010** endet. Der Abstand zwischen dem Auftreffpunkt des Elektronenstrahls **1027** auf das Substrat **1010** der Maske **1002** und den Düsen der Gaszuführungen **1052**, **1057**, **1062**, **1067**, **1072**, **1077** liegt im Bereich von einigen Millimetern. Die Vorrichtung **1000** der **Fig. 3** erlaubt jedoch auch das Anbringen von Gaszuführungen deren Abstand

zum Auftreffpunkt des Elektronenstrahls **1027** kleiner als ein Millimeter ist.

**[0086]** In dem in der **Fig. 3** dargestellten Beispiel sind die Ventile **1051, 1056, 1061, 1066, 1071, 1076** in der Nähe der Vorratsbehälter eingebaut. In einer alternativen Ausführungsform können alle oder ein Teil der Ventile **1051, 1056, 1061, 1066, 1071, 1076** in der Nähe der entsprechenden Düse angeordnet werden (in der **Fig. 3** nicht gezeigt). Überdies können die Gase von zwei oder mehreren Vorratsbehältern mittels einer gemeinsamen Gaszuführung bereitgestellt werden; dies ist ebenfalls in der **Fig. 3** nicht veranschaulicht.

**[0087]** Jeder der Vorratsbehälter kann sein eigenes Element zur individuellen Temperatureinstellung und Kontrolle aufweisen. Die Temperatureinstellung ermöglicht sowohl eine Kühlung als auch eine Heizung für jedes Gas. Zusätzlich kann jede Gaszuführung **1052, 1057, 1062, 1067, 1072, 1077** ebenfalls ein eigenes Element zur Einstellung und zur Überwachung der Bereitstellungstemperatur jedes Gases am Reaktionsort aufweisen (in der **Fig. 3** ebenfalls nicht gezeigt).

**[0088]** Die Vorrichtung **1000** der **Fig. 3** weist ein Pumpensystem auf, um das erforderliche Vakuum zu erzeugen und aufrechtzuerhalten. Der Druck in der Vakuumkammer **1007** beträgt vor Beginn eines Bearbeitungsprozesses typischerweise etwa  $10^{-5}$  Pa bis  $2 \cdot 10^{-4}$  Pa. Der lokale Druck an Reaktionsort kann typischerweise bis auf einen Bereich um 10 Pa ansteigen.

**[0089]** Ein wichtiger Teil des Gasführungssystems ist die in **Fig. 3** schematisch dargestellte Absaugvorrichtung **1085**. Die Absaugvorrichtung **1085** in Kombination mit der Pumpe **1087** macht es möglich, dass die bei der Zerlegung eines Präkursorgas entstehenden Fragmente oder Bestandteile, die nicht für die lokale chemische Reaktion benötigt werden – wie beispielsweise Kohlenstoffmonoxid, das bei der Elektronenstrahlinduzierten Spaltung von Metallcarbonylen entsteht – im Wesentlichen am Ort des Entstehens aus der Vakuumkammer **1007** der Vorrichtung **1000** abzusaugen. Da die nicht benötigten Gasbestandteile lokal an der Stelle des Auftreffens des Elektronenstrahls **1027** und/oder des Laserstrahls **1082** auf das Substrat **1010** aus der Vakuumkammer **1007** der Vorrichtung **1000** abgepumpt werden, bevor sie sich in dieser verteilen und absetzen können, wird eine Kontamination der Vakuumkammer **1007** verhindert.

**[0090]** Zur Initialisierung der Ätzreaktion wird in der beispielhaften Vorrichtung **1000** der **Fig. 3** vorzugsweise ausschließlich ein fokussierter Elektronenstrahl **1027** verwendet. Die Beschleunigungsspannung der Elektronen liegt in dem Bereich von 0,

01 keV bis 50 keV. Die Stromstärke des eingesetzten Elektronenstrahls variiert in einem Intervall zwischen 1 pA und 1 nA. Das Lasersystem **1082** stellt mit dem Laserstrahl **1082** einen zusätzlichen und/oder alternativen Energieübertragungsmechanismus bereit. Dieser kann beispielsweise das Präkursorgas oder nach der Zerlegung des Präkursorgases entstehende Bestandteile oder Fragmente selektiv anregen, um dadurch die lokalen Reparaturprozesse von Elementen der Absorberstruktur wirksam zu unterstützen.

**[0091]** Die **Fig. 4** zeigt schematisch einen Ausschnitt eines Substrats **1110** einer Belichtungsmaske **1100**. Auf einer Oberfläche **1115** des Substrats **1110** ist eine Streifenstruktur **1120, 1125** aus Absorbermaterial angebracht. Der linke Streifen **1325** weist einen Extension-Defekt **1130** aus überschüssigem Absorbermaterial auf. Die punktierte Linie **1135** zeigt die Schnittlinie des in der **Fig. 5** dargestellten Schnitts oder des Querschnitts durch den Ausschnitt der Belichtungsmaske **1100** der **Fig. 4**.

**[0092]** In dem in der **Fig. 5** dargestellten Beispiel weist der Defekt **1130** zufällig die gleiche Höhe wie das Absorberelement **1125** aus. Dies ist jedoch keine Voraussetzung für die Reparatur von Extensions-Defekten der Absorberstruktur **1120, 1125** der Maske **1100**. Vielmehr kann der nachfolgend beschriebene Reparaturprozess Defekte korrigieren, die niedriger oder höher als die Absorberstrukturelemente **1120, 1125** sind.

**[0093]** In einem ersten Schritt wird eine Schutzschicht **1150** auf die Oberfläche **1115** des Substrats **1110** um den Defekt **1130** herum abgeschieden. Dies geschieht durch das Fokussieren eines Elektronenstrahls **1140** auf die Oberfläche **1115** des Substrats **1110** der Maske **1100**. Der Elektronenstrahl **1140** wird über den Teil der Oberfläche **1115** gerastet, auf die die lokal begrenzte Schutzschicht **1150** aufgebracht werden soll. Parallel mit dem Elektronenstrahl **1140** wird lokal ein Präkursorgas bereitgestellt. Es kann grundsätzlich jedes Depositions-Präkursorgas verwendet werden. Volatile Metallverbindungen sind bevorzugt, da damit lokal begrenzte Schutzschichten **1150** abgeschieden werden können, die nach dem Bearbeitungsprozess wieder leicht und rückstandsfrei vom Substrat entfernt werden können. Aus der Vielzahl volatiler Metallverbindungen sind wiederum Metallcarbonyle günstig.

**[0094]** Eine Schutzschicht **1150** sollte gleichzeitig drei wesentliche Forderungen erfüllen: Sie sollte sich ohne großen apparativen Aufwand in definierter Form auf das Maskensubstrat **1110** aufbringen lassen. Sie muss den Bearbeitungsprozessen der MoSi-Absorberschicht im Wesentlichen widerstehen können. Schließlich sollte sich die Schutzschicht **1150** wiederum im Wesentlichen rückstandsfrei vom Substrat

**1110** einer Belichtungsmaske **1100** entfernen lassen. Dabei bedeutet der Ausdruck im Wesentlichen hier wie auch an anderen Stellen der Beschreibung, eine die Funktionsfähigkeit der Maske nicht beeinträchtigende Änderung.

**[0095]** Wie bereits oben angesprochen, eignen sich Metallcarbonyle **1145** besonders gut zum Abscheiden einer Schutzschicht **1150**. Bisher konnten die besten Ergebnisse mit dem Metallcarbonyl-Präkursorgas Molybdänhexacarbonyl ( $\text{Mo}(\text{CO})_6$ ) erzielt werden. Andere Metallcarbonyle wie beispielsweise Chromhexacarbonyl ( $\text{Cr}(\text{CO})_6$ ) wurden ebenfalls erfolgreich eingesetzt.

**[0096]** Am Ort der chemischen Reaktion, d.h. an der Stelle, an der der Elektronenstrahl **1140** auf die Oberfläche des Substrats auftritt, spaltet die Energieübertragende Wirkung des Elektronenstrahls **1140** die Kohlenstoffmonoxid (CO)-Liganden vom zentralen Metallatom ab. Ein Teil der CO Moleküle wird von der Absaugvorrichtung **1085** vom Reaktionsort entfernt. Das Metallatom eines Präkurgasmoleküls scheidet ggf. mit einem oder mehreren CO Molekülen am Reaktionsort auf der Oberfläche **1115** des Substrats **1110** der Maske **1100** ein Deponat ab und baut dadurch die Schutzschicht **1150** auf.

**[0097]** Die Parameter des Elektronenstrahls **1140** während des Abscheidenvorgangs hängen vom verwendeten Präkursorgas ab. Für das Beispiel des Präkursorgases  $\text{Mo}(\text{CO})_6$  werden gute Resultate mit einer kinetischen Energie der Elektronen im Bereich von 0,2 keV bis 5,0 keV und einer Stromstärke zwischen 0,5 pA und 100 pA erzielt. An den Fokus des Elektronenstrahls werden zum Aufbringen der Schutzschicht keine besonderen Anforderungen gestellt.

**[0098]** Molybdänhexacarbonyl wird in einem Gasstrom von 0,01 sccm bis 5 sccm (standard cubic centimeter per minute), der durch das Ventil **1058** eingestellt und kontrolliert wird, durch die Gaszuführung **1052** an den Reaktionsort gebracht. Alternativ kann die am Reaktionsort bereitgestellte Gasmenge über die Temperatur von  $\text{Mo}(\text{CO})_6$  bzw. allgemeiner von Metallcarbonylen und damit über den Druck gesteuert bzw. geregelt werden.

**[0099]** Die Dicke der abzuscheidenden Schutzschicht **1150** hängt neben dem für die Schutzschicht **1150** verwendeten Material auch vom nachfolgenden Bearbeitungsprozess ab, gegen den die Schutzschicht **1150** die Oberfläche **1115** des Substrats schützen muss. In dem Beispiel einer aus  $\text{Mo}(\text{CO})_6$  abgeschiedenen Schutzschicht **1150** sollte für eine Bearbeitung des Defekts **1130** mittels eines Elektronenstrahls deren Dicke zum Schutz gegenüber einem nachfolgenden Abtrag- bzw. Ätzprozess zwischen 1 nm und 5 nm dick sein. Für einen Abscheide-

vorgang von Absorbermaterial sind die Anforderungen an die Schutzschicht geringer. Hier reicht es aus, wenn die Schicht frei von Nadellöchern (Pinholes) ist, so dass eine Schichtdicke im Bereich von 1 nm ausreichend ist.

**[0100]** Die Größe und Form der Schutzschicht **1150** kann aus den Prozessbedingungen des nachfolgenden Bearbeitungsvorgangs abgeleitet werden und durch das Rastern des Elektronenstrahls **1140** bei gleichzeitigem Vorhandensein des Metallcarbonyl-Präkursorgases **1145** über die bestimmte Oberfläche **1115** des Substrats **1110** aufgebaut werden.

**[0101]** Die Schutzschicht **1150** kann zwei oder mehrere Lagen aufweisen. Dabei kann die unterste Schicht, die mit der Oberfläche **1115** des Substrats **1110** in Verbindung steht, eine definierte Haftung an das Substrat **1110** vermitteln. Die zweite oder die weiteren höheren Schichten der lokal begrenzten Schutzschicht **1150** können einen definierten Widerstand gegenüber dem nachfolgenden benachbarten Bearbeitungsprozess vermitteln. Alternativ kann die Zusammensetzung der Schutzschicht **1150** über deren Dicke oder Tiefe verändert werden. Zu diesem Zweck kann neben dem Metallcarbonyl-Präkursorgas aus dem Vorratsbehälter ein zweites Präkursorgas aus beispielsweise dem sechsten Vorratsbehälter **1075** lokal am Reaktionsort angeliefert werden.

**[0102]** Die Fig. 6 illustriert einen beispielhaften Abtragvorgang **1200** überschüssigen Materials des Defekts **1130** mit Hilfe eines Elektronenstrahls **1240** und eines Ätzgases **1245**. Im Beispiel der Fig. 6 sind die Elemente der Absorberstruktur **1120**, **1125** ebenso wie der Defekt **1130** aus  $\text{Mo}_x\text{SiO}_y\text{N}_z$ , mit:  $0 \leq x \leq 0,5$ ,  $0 \leq y \leq 2$ ,  $0 \leq z \leq 4/3$ ; dieses Materialsystem wird im Folgenden mit MoSi abgekürzt. Der Einsatz eines Elektronenstrahls **1240** hat den Vorteil, dass ein Teilchenstrahl zum Anbringen der Schutzschicht **1150** und dem Abtragen des überschüssigen MoSi-Materials eingesetzt werden kann.

**[0103]** Als Ätzgas **1245** kann beispielsweise Xenondifluorid ( $\text{XeF}_2$ ) eingesetzt werden. Andere Beispiele möglicher Ätzgase sind: Schwefelhexafluorid ( $\text{SF}_6$ ), Schwefeltetrafluorid ( $\text{SF}_4$ ), Stickstofftrifluorid ( $\text{NF}_3$ ), Phosphortrifluorid ( $\text{PF}_3$ ), Wolframhexafluorid ( $\text{WF}_6$ ), Fluorwasserstoff (HF), Stickstoffsauerstofffluorid (NOF), Triphosphorstickstoffhexafluorid ( $\text{P}_3\text{N}_3\text{F}_6$ ) oder eine Kombination dieser Ätzgase. Ferner ist es möglich, die Ätzchemie auf andere Halogene zu erweitern, wie etwa Chlor ( $\text{Cl}_2$ ), Brom ( $\text{Br}_2$ ), Jod ( $\text{I}_2$ ) oder deren Verbindungen, beispielsweise Iodchlorid (ICl) oder Chlorwasserstoff (HCl).

**[0104]** Bei MoSi-Schichten, deren Molybdängehalt gering ist, gestaltet sich ein Elektronenstrahl-induzierter Ätzprozess schwierig. Falls zudem noch das MoSi-Material einen großen Stickstoffanteil aufweist,

wird mit den oben angegebenen Ätzgasen **1245** und einem Elektronenstrahl **1240** nur eine sehr geringe Ätzrate erreicht. Die Sekundärelektronen **1260** wirken über eine lange Zeitspanne auf die Schutzschicht **1150** und können zu deren Beschädigung führen.

**[0105]** Ein wichtiger Parameter eines Ätzprozesses kennzeichnend ist die Ätzselektivität. Die Ätzselektivität ist definiert als das Verhältnis der Ätzrate eines ersten Materials, im Allgemeinen das Material, das geätzt werden soll, zur Ätzrate eines zweiten Materials, üblicherweise das Material, das nicht geätzt werden soll. Je größer dieses Verhältnis desto selektiver ist der Ätzprozess und umso einfacher ist es, geforderte Ätzergebnisse reproduzierbar zu erreichen. Auf den Ätzprozess der **Fig. 6** übertragen bedeutet dies, eine große Ätzselektivität würde vorliegen, wenn der Ätzprozess das Material der MoSi-Schicht **1130** mit einer sehr viel größeren Rate als das Substrat **1110** der Maske **1100** ätzen würde. Dann würde die Kombination aus Elektronenstrahl **1240** und Ätzgas **1245** den Defekt **1130** mit großer Rate abtragen und der Prozess würde beim Erreichen der Schichtgrenze zur Oberfläche **1115** des Substrats **1110** sehr viel langsamer werden bzw. idealerweise sogar zum Stillstand kommen.

**[0106]** Im Beispiel der **Fig. 6** liegt die Ätzselektivität im Bereich von 1:7. Dies bedeutet, der Elektronenstrahl **1240** und das Ätzgas **1245** ätzen das Substrat **1110** der Maske **1100** sehr viel schneller als das MoSi-Material des Defekts **1130**. Daraus ergeben sich zumindest zwei Konsequenzen. Ohne die Schutzschicht **1150** würden schon der Beitrag der vorwärts gestreuten Elektronen **1260** zu einem Schaden im Substrat **1110** der Maske **1100** führen, der in der gleichen Größenordnung liegt wie die Dicke der abzutragenden Absorberschicht. Die Schutzschicht **1150** verhindert diesen Ätzprozess wirksam.

**[0107]** Die derzeit standardmäßig zum Abtragen von MoSi-Material eingesetzten Ätzgase bauen im Laufe des langwierigen Ätzprozesses eine Art Kraterlandschaft an der geätzten Oberfläche des Defekts auf. Dies ist in der **Fig. 6** durch das Bezugszeichen **1242** angegeben. Beim Erreichen der Schichtgrenze zwischen Defekt **1130** und dem darunterliegenden Substrat bleibt entweder ein Teil des Defekts **1130** stehen, wenn der Ätzprozess gestoppt wird sobald der tiefste Krater des Defekts die Substratoberfläche **1115** erreicht hat oder der Ätzprozess bildet die Kraterlandschaft verstärkt in das Maskensubstrat **1110** ab, wenn der Ätzprozess erst nach dem vollständigen Entfernen des Defekts **1130** beendet wird.

**[0108]** Die **Fig. 2** zeigt das Ergebnis des Ätzprozesses der **Fig. 6** für eine rechteckige MoSi-Schicht mit geringem Molybdängehalt. Der Ätzprozess **1200** der **Fig. 6** hat die Rauigkeit **1242** des

Defekts **1130** in das Maskensubstrat **1110** unterhalb der MoSi-Schicht übertragen.

**[0109]** Durch Zugabe von Ammoniak bereitstellenden Gasen kann die Kraterbildung oder die Rauigkeit **1242** beim Ätzen von MoSi-Schichten signifikant verringert werden. Dies ist in der **Fig. 7** veranschaulicht. Ein Ammoniak bereitstellendes Gas oder eine Kombination verschiedener Ammoniak bereitstellender Gase können beispielsweise im fünften oder sechsten Vorratsbehälter **1070** und/oder **1075** durch dessen Ventile **1071** und/oder **1076** kontrolliert mittels der Gaszuführungen **1072**, **1077** an den Reaktionsort angeliefert werden.

**[0110]** Neben Ammoniak ( $\text{NH}_3$ ) können auch Salmiakgeist ( $\text{NH}_4\text{OH}$ ) und/oder Riechsalz ( $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ ) oder ähnliche Substanzen wie etwa Ammoniakcarbonat ( $(\text{NH}_3)_2\text{CO}_3$ ), Ammoniumhydrogencarbonat ( $\text{NH}_4\text{HCO}_3$ ), Diimin ( $\text{N}_2\text{H}_2$ ), Hydrazin ( $\text{N}_2\text{H}_4$ ), Hydrogencarbonat ( $\text{HNO}_3$ ) als Ammoniak bereitstellende Gase eingesetzt werden. Diese beschleunigen zum einen das Ätzen des MoSi-Absorbermaterials des Defekts **1130** leicht und verlangsamen andererseits den Ätzprozess des Substrats **1110** der Maske **1100**. Bei typischen Prozessparametern des in der **Fig. 7** dargestellten Ätzprozesses beträgt die Verlangsamung in etwa einen Faktor 2 und die Beschleunigung erreicht ungefähr 40 %. Damit verbessert sich die Ätzselektivität insgesamt von ungefähr 1:7 im Ätzprozess **1200** der **Fig. 6** auf nunmehr 1:2,5. Damit liegt die Ätzselektivität aber immer noch im inversen Regime. Das bedeutet, der Elektronenstrahl **1440** und die Kombination der Präkursor gases **1445** ätzen das Substrat **1110** noch immer schneller als das MoSi-Material des Defekts **1130**.

**[0111]** Durch das in der **Fig. 7** dargestellte glatte Ätzverhalten des Defekts **1130** führt eine Kombination der Gase **1445** aus einem Ätzgas **1245** ( $\text{XeF}_2$  im Beispiel der **Fig. 6**) und zumindest einem Ammoniak bereitstellenden Gas in Verbindung mit der im Kontext der **Fig. 3** diskutierten Detektion rückgestreuter und/oder Sekundärelektronen zum Entfernen des beispielhaften Defekts **1130** innerhalb einer vorgegebenen Spezifikation.

**[0112]** Das Verhältnis der Gasmengenströme von Ätzgas **1245** und Ammoniak bereitstellendem Gas kann während des Ätzprozesses **1400** variiert werden. Damit kann zum einen eine sich mit der Tiefe des Defekts **1130** ändernde Zusammensetzung des MoSi-Materials Rechnung getragen werden. Zum anderen kann damit die Ätzrate des Defekts **1130** und die Rauigkeit der Substratoberfläche **1115** im Bereich des zu entfernenden Defekts **1130** optimiert werden.

**[0113]** Die **Fig. 8** zeigt die Wirkung der Zugabe eines Ammoniak bereitstellenden Gases beim Abtragen einer MoSi-Schicht mit geringem Molybdänan-

teil. In dem in der **Fig. 8** dargestellten Ergebnis eines Ätzprozesses **1400** wurde dem Ätzgas  $\text{XeF}_2$  Ammoniumhydroxid ( $\text{NH}_4\text{OH}$ ) zugemischt. In dem beispielhaften Korrekturprozess der **Fig. 8** lag die Energie des Elektronenstrahls **1440** zwischen 0,1 keV und 5, 0 keV. Die Gasmengenströme von  $\text{XeF}_2$  und  $\text{NH}_4\text{OH}$  waren im Bereich von 0,05 sccm bis 1 sccm bzw. von 0,01 sccm bis 1 sccm.

**[0114]** In einer abgewandelten Prozessführung werden die Gase **1445**, d.h. das Ätzgas **1245** und das Ammoniak bereitstellende Gas in einer chemischen Verbindung, d.h. in einem Gasmolekül an den Reaktionsort geliefert. Dafür können beispielsweise die Verbindungen Trifluoracetamin ( $\text{CF}_2\text{CONH}_2$ ), Triethylamintrihydrofluorid ( $(\text{C}_2\text{H}_5)_3\text{N}\cdot 3\text{HF}$ ), Ammoniumfluorid ( $\text{NH}_4\text{F}$ ), Ammoniumdifluorid ( $\text{NH}_4\text{F}_2$ ) und/oder Tetraminkurpfersulfat ( $\text{CuSO}_4\cdot(\text{NH}_3)_4$ ) eingesetzt werden. Durch den Einsatz eines Präkursorgas, das gleichzeitig ein Ätzgas und ein Ammoniak bereitstellendes Gas umfasst, wird dessen Bevorratung erleichtert. Darüber hinaus wird die Gaszuführung und Kontrolle erleichtert, da anstatt einer Mischung mehrerer Gase nur noch ein einziges Gas benötigt wird.

**[0115]** In dem in der **Fig. 7** dargestellten Ätzprozess **1400** kann die Ätzselektivität gesteigert werden, wenn neben dem Ätzgas **1245** und einem Ammoniak bereitstellenden Gas zusätzlich Wasser oder Wasserdampf am Reaktionsort angeliefert wird. Der dadurch zustande kommende Ätzprozess **1600** ist schematisch in der **Fig. 9** veranschaulicht. Die Zugabe von Wasser zu der Gasmischung **1645** führt einerseits zu einer schärferen Kante des MoSi-Absorberlements **1125** entlang des zu entfernenden Defekts **1130**. Andererseits verbessert Wasserdampf erheblich die Ätzselektivität, von etwa 1:2,5 (dem Ätzprozess **1300** der **Fig. 7**) bis etwa 1,7:1. Damit verlässt der in der **Fig. 9** dargestellte Ätzprozess den inversen Bereich. Die Steigerung der Ätzselektivität wird durch eine Verlangsamung der Ätzrate erreicht. Die Ätzrate der MoSi-Schicht des Defekts **1130** verringert sich um ungefähr einen Faktor 2, wohingegen die Ätzrate des Maskensubstrats **1115** um etwa eine Größenordnung bezüglich des Ätzprozesses **1400** der **Fig. 7** verlangsamt wird.

**[0116]** Damit kann der Ätzprozess **1600** der **Fig. 9**, dessen zweites Gas **1645** eine Kombination aus drei Substanzen aufweist (Ätzgas **1245**, Ammoniak bereitstellendes Gas und Wasser) zumindest prinzipiell auf die Schutzschicht **1150** verzichten. Aufgrund der ausgeprägten Neigung von Ammoniak unterstützter Prozesse zu Riverbedding ist es allerdings günstig, insbesondere dann, wenn das MoSi-Material des Defekts **1130** eine geringe Molybdänkonzentration und/oder einen hohen Stickstoffanteil aufweist, im Ätzprozess **1600** der **Fig. 9** nicht auf die Schutzschicht **1150** zu verzichten.

**[0117]** In einer weiteren Abwandlung des Ätzprozesses der **Fig. 7** wird anstelle von Wasser, Stickstoffmonoxid (NO) dem Ätzgas **1245** zugemischt. Der in der **Fig. 11** dargestellte Ätzprozess **1700** verwendet als zweites Gas **1745** eine Mischung mit den Bestandteilen: Ätzgas **1245** und NO. Mit Hilfe des Elektronenstrahls **1740** und/oder mittels des Laserstrahls **1082** des Lasersystems **1080** werden am Reaktionsort die NO-Radikale angeregt. Wie bereits im dritten Teil der Beschreibung ausgeführt, vergrößern NO-Radikale die Ätzrate von Siliziumnitrid erheblich, ohne die Silizium-Sauerstoff-Verbindungen des Quarzsubstrats **1110** der Maske **1100** anzugreifen. Damit lässt sich die Selektivität des Ätzprozesses **1700** der **Fig. 10** nochmals gegenüber dem Ätzprozess **1600** der **Fig. 9** steigern. Dadurch kann beim Ätzprozess **1700** der **Fig. 11** prinzipiell auf die Schutzschicht **1150** verzichtet werden.

**[0118]** In einem modifizierten Ätzprozess wird der Gasmischung **1745** neben dem Ätzgas **1245** und Stickstoffmonoxid zusätzlich ein Ammoniak bereitstellendes Gas zugemischt. Die NO-Radikale können wiederum, wie im vorhergehenden Abschnitt beschrieben, angeregt werden. Ob der modifizierte Ätzprozess ohne die Schutzschicht **1150** ausgeführt werden kann, hängt von den Details der Zusammensetzung des zu entfernenden MoSi-Materials ab.

**[0119]** In einer weiteren modifizierten Prozessführung des Ätzprozesses **1700** der **Fig. 10** werden anstelle von Stickstoffmonoxid Stickstoff ( $\text{N}_2$ ) und Sauerstoff ( $\text{O}_2$ ) am Reaktionsort bereitgestellt. Wiederum durch Bestrahlung mit Hilfe des Elektronenstrahls **1740** und/oder mittels des Laserstrahls **1082** des Lasersystems **1080** werden am Reaktionsort Stickstoff und Sauerstoff angeregt, so dass diese Elemente vorzugsweise zu NO reagieren. Der weitere Ablauf des Ätzprozesses erfolgt dann wie im vorhergehenden Abschnitt erläutert.

**[0120]** Wie bereits im Zusammenhang mit der **Fig. 2** erläutert, verringert sich die Ätzrate einer MoSi-Schicht mit abnehmendem Molybdänanteil und damit die Selektivität des Ätzprozesses bezüglich des Substrats **1110** drastisch. Durch Zugabe eines Metallcarbonyls als Präkursorgas kann der Mangel an Metallatomen während eines Ätzprozesses ausgeglichen werden. Die **Fig. 11** repräsentiert einen Ätzprozess **1800**, bei dem die Gasmischung **1845** neben einem Ätzgas ( $\text{XeF}_2$  im vorliegenden Fall) ein Metallcarbonyl aufweist.

**[0121]** Besonders gute Resultate, d.h. eine deutliche Beschleunigung der Ätzrate des Defekts **1130** und damit der Steigerung der Ätzselektivität konnten mit Hilfe der Metallcarbonyle Chromhexacarbonyl ( $\text{Cr}(\text{CO})_6$ ) und Molybdänhexacarbonyl ( $\text{Mo}(\text{CO})_6$ ) erzielt werden. Der Einsatz anderer Metallcarbonyle ist jedoch ebenfalls möglich. Ferner kann eine Kombi-

nation aus zwei oder mehreren Metallcarbonylen in der Gasmischung **1845** verwendet werden. Generell lässt sich die Ätzrate durch Erhöhung des Gasmen- genstroms des bzw. der Metallcarbonyle steigern. Dabei ist allerdings zu berücksichtigen, dass Metallcarbonyle Depositionsgase sind. Dies bedeutet, dass ab einem bestimmten Gasmen- genstrom des bzw. der Metallcarbonyle die Ätzrate zu sinken beginnt, da der Abscheideanteil den Anteil der Steigerung der Ätzrate zu überwiegen beginnt.

**[0122]** Das Verhältnis der Gasmen- genströme des Ätzgases und des bzw. der Metallcarbonyle kann während des Ätzprozesses an die Zusammenset- zung des MoSi-Materials des Defekts angepasst werden, um so die Ätzrate zu optimieren. Die aktuelle Zusammensetzung des geätzten Materials wird da- bei mit dem Detektor **1030** der Vorrichtung **1000** der **Fig. 3** aus der Energieverteilung der rückgestreuten und/oder sekundären Elektronen ermittelt.

**[0123]** Die Beschleunigung der Ätzrate durch Zu- gabe eines oder mehrerer Metallcarbonyle zu der Ätzgasmischung **1845** führt allerdings nicht zu einer Verringerung der Rauigkeit **1242** der geätzten Ober- fläche. Durch Zumischen von Wasser bzw. Was- serdampf und/oder eines Ammoniak bereitstellenden Gases kann die Rauigkeit der geätzten Oberfläche drastisch reduziert werden.

**[0124]** Wie oben erläutert, geht die Verringerung der Rauigkeit mit einer Verlangsamung des Ätzprozesses einher. Somit sind die Verhältnisse der Gasmen- genströme von Ätzgas und Metallcarbonyl einerseits und von Ätzgas und Wasser und/oder Ammoniak bereitstellendem Gas andererseits in Abhängigkeit der Zusammensetzung des MoSi-Materials des De- fekts **1130** zu optimieren. Im Extremfall kommt bei falscher Dimensionierung der Verhältnisse der Gas- mengenströme der Ätzprozess zum Erliegen. Sind die Gasmen- genströme des bzw. der Metallcarbonyle und von Wasser bzw. des Ammoniak bereitstellen- den Gases relativ zum Gasmen- genstrom des Ätzga- ses zu hoch, überwiegt die Depositionswirkung des Metallcarbonyls die Ätzwirkung des Ätzgases.

**[0125]** Ähnlich wie bereits oben im Zusammenhang mit der Bereitstellung eines Ätzgases und eines zwei- ten Gases in einer Verbindung diskutiert, ist es auch möglich, eine Ätzgas und ein Metallatom zur Be- schleunigung des Ätzprozesses in einer einzigen gasförmigen Verbindung bereitzustellen. Als beispiel- hafte Verbindungen werden genannt: Molybdänhe- xafluorid ( $\text{MoF}_6$ ), Chromtetrafluorid ( $\text{CrF}_4$ ) und Wolf- ramhexafluorid ( $\text{WF}_6$ ). Darüber hinaus können weite- re Metallfluorid-Verbindungen zu diesem Zweck ein- gesetzt werden. Schließlich ist es auch möglich, an- dere Metallhalogen-Verbindungen zu nutzen, um ne- ben einer Fluor-basierten Ätzchemie eine Ätzchemie auf der Basis der weiteren Halogene bereitzustellen.

**[0126]** Der vorteilhafte Aspekt der Kombination ei- nes Ätzgases und eines Metallatoms in einer Verbind- ung ist die Vereinfachung der Vorrichtung **1000** der **Fig. 3** hinsichtlich der Speicherung der entsprechen- den Präkursorgase. Ferner ermöglicht die Kombina- tion in einer Verbindung eine einfachere Prozessfüh- rung.

**[0127]** In einer modifizierten Prozessführung zur Er- höhung des Metallgehalts während eines Ätzprozesse einer MoSi-Schicht mit niedrigem Molybdänanteil wird das bzw. die Metallcarbonyle nicht der Gasmi- schung während des Ätzprozesses zugemischt. Viel- mehr wird vor dem eigentlichen Ätzprozess eine dün- ne Metallschicht aus einem oder mehreren Metallcarbonylen auf dem Defekt **1130** abgeschieden. Wäh- rend des Ätzprozesses liefert die Metallschicht die dem MoSi-Material fehlenden Metallatome.

**[0128]** Die Zugabe von Metallcarbonylen zu einer Gasmischung erhöht auch die Ätzrate des Quarzsub- strats **1110**. Deshalb liegt ein wichtiger Vorteil des Ab- scheidens einer dünnen Metallschicht auf dem Defekt **1130** in der guten Lokalisierung der Metallatome wäh- rend des Ätzprozesses, sodass ein Kompromiss in der Ätzselektivität vermieden werden kann. Aus die- sem Grund kann bei dieser Prozessführung auf die Schutzfunktion der Schutzschicht verzichtet werden.

**[0129]** Nachteilig bei dieser Prozessführung ist hin- gegen, dass die lokale Bereitstellung von Metallato- men aus dem Metallvorrat der dünnen Schicht im Laufe des Ätzprozesses des Defekts **1130** und somit auch die Ätzrate abnehmen. Der Nachteil kann durch Ausführen des Prozesses in mehreren Schritten kom- pensiert werden, d.h. indem in regelmäßigen Abstän- den erneut eine dünne Metallschicht abgeschieden wird.

**[0130]** Nach Abschluss eines der in den **Fig. 7**, **Fig. 9**, **Fig. 10** oder **Fig. 11** dargestellten Ätzprozesse **1400**, **1600**, **1700** oder **1800** weist ein Schnitt **1900** durch die Maske **1100** eine Schutzschicht **1955** auf. Letztere kann durch die Einwirkung von Sekun- därteilchen **1460**, **1660**, **1760** oder **1860** und/oder der Mischungen aus Ätzgas und zweitem Gas **1445**, **1645**, **1745** oder **1845** Schäden verglichen mit der Schutzschicht **1150** aufweisen. In der **Fig. 12** ist dies schematisch durch eine teilweise abgetragene Schutzschicht **1955** veranschaulicht. Andererseits ist der Defekt **1130** durch einen der Ätzprozesse **1400**, **1600**, **1700**, **1800** von der Maske **1100** entfernt worden, im Wesentlichen ohne die Oberfläche **1115** des Substrats **1110** an der Stelle des Defekts aufzurauen.

**[0131]** Die **Fig. 13** zeigt schematisch das Entfer- nen einer nach Abschluss eines Ätzprozesses **1400**, **1600**, **1700**, **1800** verbliebenen Schutzschicht **1955** der **Fig. 13**. Die Schutzschicht **1150**, **1955** wird durch einen Ätzprozess **2000** mittels eines Elektro-

nenstrahls **2040** und eines Ätzgases **2045** von der Oberfläche **1115** des Substrats **1110** entfernt. Generell sind zum Entfernen der Schutzschicht **1150**, **1955** Ätzprozesse günstig, die eine hohe Selektivität zum Substrat **1110** aufweisen. Insofern sind Fluor-basierte Ätzgase nicht wünschenswert. Zum Entfernen der Schutzschicht **1150**, **1955** haben sich Ätzgase auf der Basis der übrigen Halogene bewährt, d.h. Chlor-, Brom- und/oder Jod-basierte Ätzgase, insbesondere haben sich Chlor-basierte Ätzgase **2045** als günstig erwiesen. In dem Ätzprozess der **Fig. 13** wird Nitrosylchlorid (NOCl) als Ätzgas **2045** verwendet. Mit Hilfe von NOCl kann die Schutzschicht **1955**, die aus einem Metallcarbonyl abgeschieden wurde, selektiv gegenüber dem Substrat **1110** der Maske **1100** entfernt werden.

**[0132]** Die aus einem oder mehreren Metallcarbonylen abgeschiedene Schutzschicht **1150**, **1955** weist überdies die günstige Eigenschaft auf, dass sie mit gängigen Maskenreinigungsprozessen rückstandsfrei von der Oberfläche **1115** des Substrats **1110** entfernt werden kann. Damit kann der in der **Fig. 13** veranschaulichte Ätzprozess **2000** eingespart werden. Die Schutzschicht **1150**, **1955** wird einfach im Rahmen eines der notwendigen Maskenreinigungsschritte entfernt.

**[0133]** Die **Fig. 14** repräsentiert den Ausschnitt **2100** der Maske **1100** nach Abschluss des Entfernen der Schutzschicht **1150**, **1955**. Der beschriebene Reparaturprozess hat den Defekt **1130** überschüssigen MoSi-Materials abgetragen, ohne die Oberfläche **1115** des Substrats **1110** im Wesentlichen zu beschädigen.

**[0134]** Die **Fig. 15** zeigt schematisch einen Ausschnitt eines Substrats **2210** einer photolithographischen Maske **2200**. Auf der Oberfläche **2215** des Substrats **2210** ist eine Streifenstruktur **2220**, **2225** aus MoSi-Absorbermaterial angebracht. Der rechte Streifen **2220** weist einen Defekt **2230** fehlenden Absorbermaterials auf. Die punktierte Linie **2235** zeigt die Schnittlinie des in der **Fig. 16** dargestellten Schnitts durch den Ausschnitt der Belichtungsmaske **2200** der **Fig. 16**.

**[0135]** Wie in der **Fig. 16** schematisch veranschaulicht, wird vor der Reparatur des Defekts **2230** eine Schutzschicht **2350** auf die Oberfläche **2215** des Substrats **2210** der Maske **2200** abgeschieden. Die Schutzschicht **2350** wird mittels eines Elektronenstrahls **2340** und eines oder mehrerer Metallcarbonyle oder anderer volatiler Metallverbindungen als Präkursorgas **2345** abgeschieden. Neben Metallcarbonylen können beispielsweise auch Wolframfluorid ( $WF_6$ ), Molybdänfluorid ( $MoF_6$ ) oder andere Metallfluoridverbindungen eingesetzt werden.

**[0136]** Details des Anbringens einer Schutzschicht **2350** sind bereits bei der Beschreibung der **Fig. 5** ausgeführt. Die Besonderheit der Schutzschicht **2350** im Vergleich mit der Schutzschicht **1150** der **Fig. 5** liegt lediglich darin, dass die Schutzschicht **2350** im Bereich des Schnitts nicht an das Absorberelement **2220** angrenzend angeordnet ist, sondern vielmehr um die Grundfläche des Defekts **2230** von diesem entfernt angebracht wird.

**[0137]** Die **Fig. 17** stellt schematisch den Abscheideprozess **2400** zur Korrektur des Defekts **2230** dar. Das Abscheiden des durch den Defekt **2230** fehlenden Absorbermaterials erfolgt durch das Anliefern eines oder mehrerer Metallcarbonyle **2445** am Defektort bzw. der Bearbeitungsstelle oder dem Reaktionsort sowie durch eine Elektronenstrahl-induzierte lokale chemische Reaktion des bzw. der Metallcarbonyle **2445** durch den Elektronenstrahl **2440**. Der Elektronenstrahl **2440** spaltet das bzw. die Metallcarbonyle **2445**. Ein Teil der abgespaltenen CO-Liganden oder allgemein der nichtmetallischen Bestandteile wird durch die Absaugvorrichtung **1085** vom Reaktionsort abgepumpt und das Metallzentralatom des Metallcarbonyl oder das Metallatom der Metallfluoridverbindung wird zusammen mit anderen Fragmenten auf die Grundfläche des Defekts **2230** abgelagert. Dadurch baut sich in wiederholten Scans des Elektronenstrahls **2440** über der Grundfläche des Defekts **2230** eine Schicht **2470** absorbierenden Materials auf.

**[0138]** Ähnlich wie in den Ätzprozessen der **Fig. 6**, **Fig. 7** und **Fig. 9** bis **Fig. 11** erzeugt der Elektronenstrahl **2440** Sekundärelektronen oder allgemeiner Sekundärteilchen **2460**. Diese werden zum Teil auf die Schutzschicht **2350** auftreffen und können die auf der Schutzschicht vorhandenen Metallcarbonylpartikel zerlegen und aus den Metallatomen und weiteren Fragmenten eine dünne Schicht **2480** auf der Schutzschicht **2350** abscheiden.

**[0139]** Ein bevorzugtes Metallcarbonyl zur Reparatur des Defekts **2230** ist Chromhexacarbonyl ( $Cr(CO)_6$ ). Eine Schicht absorbierenden Materials kann ebenfalls durch andere Metallcarbonyle oder durch volatile oder flüchtige Metallverbindungen aufgebaut werden, beispielsweise die oben erwähnten Metallfluoridverbindungen. Im Gegensatz zu der Schutzschicht **2350** soll die Absorberschicht **2470** möglichst gut auf der Oberfläche **2215** des Substrats **2210** der Maske **2200** haften, damit diese weder durch Reinigungsprozesse noch durch die Bestrahlung mit ultravioletter Strahlung beschädigt wird und sich vom Substrat **2210** ablöst.

**[0140]** Die kinetische Energie der einfallenden Elektronen liegt während des in der **Fig. 17** dargestellten Abscheideprozesses im Bereich von 0,1 keV bis 5,0 keV. Günstige Strahlströme umfassen einen Be-

reich von 0,5 pA bis 100 pA. Der Gasmengenstrom des bzw. Metallcarbonyls reicht von 0,01 sccm bis 5 sccm. Die Wiederholzeit sowie die Verweilzeit des Elektronenstrahls müssen geeignet gewählt werden, so dass die Ätzrate optimiert wird.

**[0141]** Die **Fig. 19** repräsentiert schematisch die abgeschiedene Absorberschicht **2555** und die dünne Absorberschicht **2590** auf der Schutzschicht **2450** nach Beendigung des Abscheidvorgangs zur Reparatur des Defekts **2230**. Im letzten Prozessschritt wird die Schutzschicht **2450** in einem Ätzprozess **2500** wieder von der Oberfläche **2215** des Substrats **2210** entfernt. Der Ätzprozess erfolgt, wie bereits im Kontext der **Fig. 13** erläutert, mit einem Elektronenstrahl-induzierten Ätzprozess, dessen Spezifika sind oben im Kontext der Diskussion der **Fig. 13** erläutert. Ähnlich wie in der **Fig. 13** wird im Ätzprozess **2500** der **Fig. 18** Nitrosylchlorid (NOCl) als Ätzgas **2545** eingesetzt.

**[0142]** Analog zu der Schutzschicht **1150** der **Fig. 5** kann die Schutzschicht **2350** der **Fig. 18** rückstandsfrei mit üblichen Reinigungsprozessen für photolithographische Masken vom Substrat **2210** der Maske **2200** abgelöst werden.

**[0143]** Die **Fig. 19** zeigt schließlich den Ausschnitt der Maske **2200** nach Abschluss des Entfernens der Schutzschicht **2350**. Der erläuterte Korrekturprozess hat den Defekt **2350** fehlenden MoSi-Materials beseitigt, ohne die Oberfläche **2215** des Substrats **2210** der Maske **2200** im Wesentlichen zu beschädigen.

**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**

- EP 1664924 B1 [0010]

**Zitierte Nicht-Patentliteratur**

- Kastenmeier et al.: „Chemical dry etching of silicon nitride and silicon dioxide using CF<sub>4</sub>/O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> gas mixtures“, J. Vac. Sci. Technol. A (14(5), S. 2802–2813, Sep/Aug 1996 [0045]

## Patentansprüche

1. Verfahren zum Schützen eines Substrats während einer Bearbeitung mit zumindest einem Teilchenstrahl, das Verfahren die folgenden Schritte aufweisend:

- a. Anbringen einer lokal begrenzten Schutzschicht auf dem Substrat;
  - b. Ätzen des Substrats und/oder einer auf dem Substrat angeordneten Schicht durch den Teilchenstrahl und zumindest ein Gas;
- und/oder
- c. Abscheiden von Material auf dem Substrat durch den Teilchenstrahl und zumindest ein Präkursorgas; und
  - d. Entfernen der lokal begrenzten Schutzschicht von dem Substrat.

2. Verfahren nach Anspruch 1, wobei das Anbringen der lokal begrenzten Schicht umfasst: Anbringen der Schutzschicht angrenzend an einen Teil des Substrats oder der Schicht, der bearbeitet werden soll und/oder Anbringen der Schutzschicht in einer Entfernung von der Schicht, innerhalb der Material auf dem Substrat abgeschieden werden soll.

3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, wobei das Anbringen der Schutzschicht umfasst: Abscheiden einer Schutzschicht, die eine Ätzselektivität gegenüber dem Substrat von größer 1:1, bevorzugt größer 2:1, bevorzugter größer 3:1 und am meisten bevorzugt größer 5:1 aufweist.

4. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei das Anbringen der Schutzschicht umfasst: Abscheiden zumindest einer Metall-enthaltenden Schicht durch einen Elektronenstrahl und zumindest eine volatile Metallverbindung auf das Substrat.

5. Verfahren nach Anspruch 4, wobei die zumindest eine volatile Metallverbindung zumindest ein Metallcarbonyl-Präkursorgas umfasst und wobei das zumindest eine Metallcarbonyl-Präkursorgas zumindest eine der folgenden Verbindungen umfasst: Molybdänhexacarbonyl ( $\text{Mo}(\text{CO})_6$ ), Chromhexacarbonyl ( $\text{Cr}(\text{CO})_6$ ), Vanadiumhexacarbonyl ( $\text{V}(\text{CO})_6$ ), Wolframhexacarbonyl ( $\text{W}(\text{CO})_6$ ), Nickeltetracarbonyl ( $\text{Ni}(\text{CO})_4$ ), Eisenpentacarbonyl ( $\text{Fe}_3(\text{CO})_5$ ), Rutheniumpentacarbonyl ( $\text{Ru}(\text{CO})_5$ ) und Osmiumpentacarbonyl ( $\text{Os}(\text{CO})_5$ ).

6. Verfahren nach Anspruch 4, wobei die zumindest eine volatile Metallverbindung ein Metallfluorid umfasst, und wobei ein Metallfluorid zumindest eine der folgenden Verbindungen umfasst: Wolframhexafluorid ( $\text{WF}_6$ ), Molybdänhexafluorid ( $\text{MoF}_6$ ), Vanadiumfluorid ( $\text{VF}_2$ ,  $\text{VF}_3$ ,  $\text{VF}_4$ ,  $\text{VF}_5$ ), und/oder Chromfluorid ( $\text{CrF}_2$ ,  $\text{CrF}_3$ ,  $\text{CrF}_4$ ,  $\text{CrF}_5$ ).

7. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die lokal begrenzte Schutzschicht eine Dicke von 0,2 nm–1000 nm, bevorzugt 0,5 nm–500 nm und am meisten bevorzugt von 1 nm–100 nm umfasst und/oder eine laterale Ausdehnung auf dem Substrat von 1 nm–5000 nm, bevorzugt 2 nm–2000 nm und am meisten bevorzugt von 5 nm–500 nm aufweist.

8. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei das Abscheiden von Material auf dem Substrat umfasst: Abscheiden von Material auf das Substrat angrenzend an die auf dem Substrat angeordnete Schicht.

9. Verfahren nach einem der Ansprüche 1–7, wobei das zumindest eine Gas zumindest ein Ätzgas umfasst.

10. Verfahren nach Anspruch 9, wobei das zumindest eine Ätzgas Xenondifluorid ( $\text{XeF}_2$ ), Schwefelhexafluorid ( $\text{SF}_6$ ), Schwefeltetrafluorid ( $\text{SF}_4$ ), Stickstofftrifluorid ( $\text{NF}_3$ ), Phosphortrifluorid ( $\text{PF}_3$ ), Wolframhexafluorid ( $\text{WF}_6$ ), Molybdänhexafluorid ( $\text{MoF}_6$ ), Fluorwasserstoff (HF), Stickstoffsauerstofffluorid (NOF), Triphosphortristickstoffhexafluorid ( $\text{P}_3\text{N}_3\text{F}_6$ ) oder eine Kombination dieser Gase umfasst.

11. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei das Entfernen der Schutzschicht umfasst: Richten des Elektronenstrahls und zumindest eines zweiten Ätzgases auf die Schutzschicht, wobei das zumindest eine zweite Ätzgas eine Ätzselektivität gegenüber dem Substrat von größer 2:1, bevorzugt größer 3:1, bevorzugter größer 5:1 und am meisten bevorzugt größer 10:1 aufweist.

12. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei das Entfernen der Schutzschicht umfasst: Richten des Elektronenstrahls und zumindest eines zweiten Ätzgases auf die Schutzschicht, wobei das zumindest eine zweite Ätzgas ein Chlor enthaltendes Gas, ein Brom enthaltendes GAs, ein Jod enthaltendes Gas und/oder ein Gas umfasst, das eine Kombination dieser Halogene enthält.

13. Verfahren nach Anspruch 12, wobei das zumindest eine zweite Ätzgas zumindest ein Chlor enthaltendes Gas umfasst.

14. Verfahren nach einem der Ansprüche 1–10, wobei das Entfernen der Schutzschicht von dem Substrat durch eine nasschemische Reinigung des Substrats erfolgt.

15. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei das Substrat ein Substrat einer photolithographischen Maske umfasst und/oder die auf dem Substrat angeordnete Schicht eine Absorberschicht umfasst.

16. Verfahren nach Anspruch 15, wobei die Absorberschicht  $\text{Mo}_x\text{SiO}_y\text{N}_z$  umfasst, wobei  $0 \leq x \leq 0,5$ ,  $0 \leq y \leq 2$  und  $0 \leq z \leq 4/3$  sind.

17. Verfahren zum Entfernen von Teilen einer Absorberschicht, die auf Teilen einer Oberfläche eines Substrats einer photolithographischen Maske angeordnet ist, wobei die Absorberschicht  $\text{Mo}_x\text{SiO}_y\text{N}_z$  umfasst, und wobei  $0 \leq x \leq 0,5$ ,  $0 \leq y \leq 2$  und  $0 \leq z \leq 4/3$  sind, das Verfahren den Schritt aufweisend: Richten zumindest eines Teilchenstrahls und zumindest eines Gases auf den zumindest einen Teil der Absorberschicht, der entfernt werden soll, wobei das zumindest eine Gas zumindest ein Ätzgas und zumindest ein zweites Gas umfasst oder wobei das zumindest eine Gas zumindest ein Ätzgas und zumindest ein zweites Gas in einer Verbindung umfasst.

18. Verfahren nach Anspruch 17, ferner den Schritt aufweisend: Ändern eines Verhältnisses von Gas-mengenströmen des zumindest einen Ätzgases und des zumindest einen zweiten Gases während einer Zeitspanne des Richtens des zumindest einen Teilchenstrahls auf den zumindest einen Teil der Absorberschicht, der entfernt werden soll.

19. Verfahren nach Anspruch 17 oder 18, ferner den Schritt aufweisend: Ändern der Zusammensetzung des zumindest einen zweiten Gases vor Erreichen einer Schichtgrenze zwischen der Absorberschicht und dem Substrat.

20. Verfahren nach einem der Ansprüche 17–19, wobei das zumindest eine zweite Gas ein Gas umfasst, das Ammoniak bereitstellt.

21. Verfahren nach Anspruch 20, wobei das zumindest eine Ammoniak bereitstellende Gas Ammoniak ( $\text{NH}_3$ ), Ammoniumhydroxid ( $\text{NH}_4\text{OH}$ ), Ammoniumcarbonat ( $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ ), Diimin ( $\text{N}_2\text{H}_2$ ), Hydrazin ( $\text{N}_2\text{H}_4$ ), Hydrogennitrat ( $\text{HNO}_3$ ), Ammoniumhydrogencarbonat ( $\text{NH}_4\text{HCO}_3$ ), und/oder Diammoniumcarbonat ( $(\text{NH}_3)_2\text{CO}_3$ ) umfasst.

22. Verfahren nach Anspruch 20, wobei das zumindest eine Ätzgas und das zumindest eine Ammoniak bereitstellende Gas in einer Verbindung bereitgestellt wird und wobei die Verbindung Trifluoracetamid ( $\text{CF}_2\text{CONH}_2$ ), Triethylamintrihydrofluorid ( $(\text{C}_2\text{H}_5)_3\text{N}\cdot 3\text{HF}$ ), Ammoniumfluorid ( $\text{NH}_4\text{F}$ ), Ammoniumdifluorid ( $\text{NH}_4\text{F}_2$ ), und/oder Tetramminkupfersulfat ( $\text{CuSO}_4\cdot(\text{NH}_3)_4$ ) umfasst.

23. Verfahren nach Anspruch 17, wobei das zumindest eine zweite Gas zumindest Wasserdampf umfasst.

24. Verfahren nach Anspruch 23, wobei das zumindest eine zweite Gas zumindest ein Ammoniak bereitstellendes Gas und Wasserdampf umfasst.

25. Verfahren nach einem der Ansprüche 17–19, wobei das zumindest eine zweite Gas ein Metallpräkursorgas umfasst, und wobei das zumindest eine Metallpräkursorgas zumindest eine der folgenden Verbindungen umfasst: Molybdänhexacarbonyl ( $\text{Mo}(\text{CO})_6$ ), Chromhexacarbonyl ( $\text{Cr}(\text{CO})_6$ ), Vanadiumhexacarbonyl ( $\text{V}(\text{CO})_6$ ), Wolframhexacarbonyl ( $\text{W}(\text{CO})_6$ ), Nickeltetracarbonyl ( $\text{Ni}(\text{CO})_4$ ), Eisenpentacarbonyl ( $\text{Fe}_3(\text{CO})_5$ ), Rutheniumpentacarbonyl ( $\text{Ru}(\text{CO})_5$ ) und Osmiumpentacarbonyl ( $\text{Os}(\text{CO})_5$ ).

26. Verfahren nach Anspruch 25, wobei das zumindest eine zweite Gas zumindest ein Metallcarbonyl und Wasser und/oder zumindest ein Ammoniak bereitstellendes Gas umfasst.

27. Verfahren nach einem der Ansprüche 17–19, wobei das zumindest eine zweite Gas Sauerstoff, Stickstoff und/oder zumindest eine Stickstoffsauerstoffverbindung umfasst.

28. Verfahren nach Anspruch 27, wobei das zumindest eine zweite Gas Sauerstoff, Stickstoff und/oder zumindest eine Stickstoffsauerstoffverbindung und ein Ammoniak bereitstellendes Gas umfasst.

29. Verfahren nach Anspruch 27, wobei das zumindest eine zweite Gas Sauerstoff, Stickstoff und/oder zumindest eine Stickstoffsauerstoffverbindung und Wasserdampf umfasst.

30. Verfahren nach Anspruch 27, wobei das Richten des zumindest einen zweiten Gases auf den Teil der Absorberschicht, der entfernt werden soll, umfasst: Aktivieren des Sauerstoffs, des Stickstoffs und/oder der zumindest einen Stickstoffsauerstoffverbindung mit einer Aktivierungsquelle.

31. Verfahren nach einem der Ansprüche 1–16, weiterhin aufweisend Ausführen zumindest eines Schrittes nach einem der Ansprüche 17–30.

32. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei das Substrat der photolithographischen Maske ein im ultravioletten Wellenlängenbereich transparentes Material umfasst, und/oder wobei der Teilchenstrahl einen Elektronenstrahl umfasst.

33. Vorrichtung zum Schützen eines Substrats während einer Bearbeitung mit zumindest einem Teilchenstrahl, aufweisend:

- Mittel zum Anbringen einer lokal begrenzten Schutzschicht auf dem Substrat;
- Mittel zum Ätzen des Substrats und/oder einer auf dem Substrat angeordneten Schicht durch den Teilchenstrahl und zumindest ein Gas; und/oder
- Mittel zum Abscheiden von Material auf dem Substrat durch den Teilchenstrahl und zumindest ein Präkursorgas; und

c. Mittel zum Entfernen der lokal begrenzten Schutzschicht von dem Substrat.

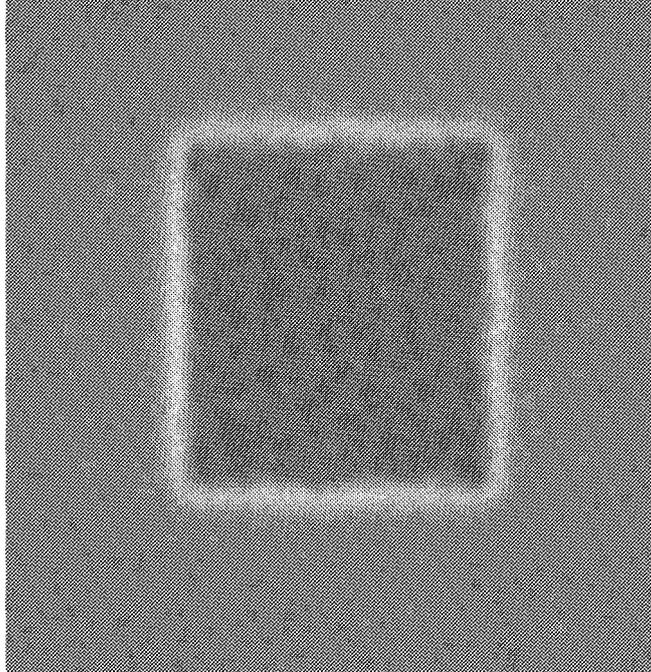
34. Vorrichtung nach Anspruch 33, wobei die Vorrichtung ferner ausgebildet ist, ein Verfahren nach einem der Ansprüche 1–33 auszuführen.

35. Vorrichtung nach Anspruch 33, ferner aufweisend Mittel zum Erzeugen eines zweiten Teilchenstrahls zum Anregen von Sauerstoff, Stickstoff und/oder einer Stickstoffsauerstoffverbindung.

Es folgen 8 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

**Fig. 1 (Stand der Technik)**



**Fig. 2 (Stand der Technik)**

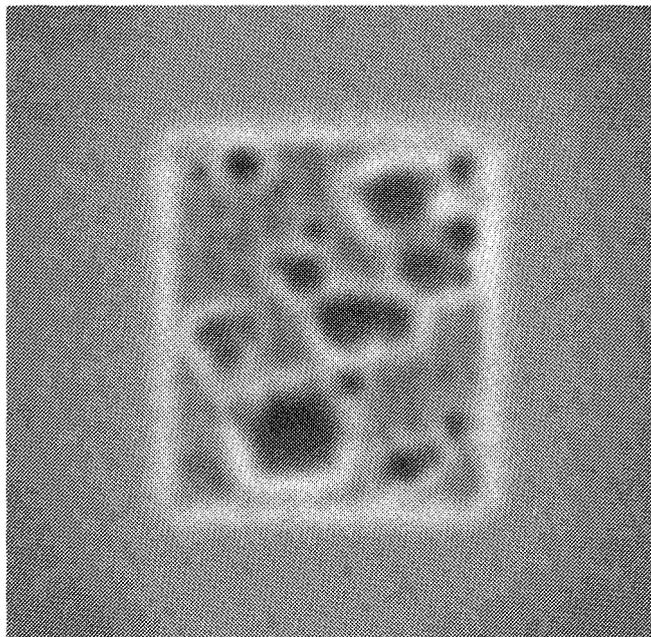


Fig. 3

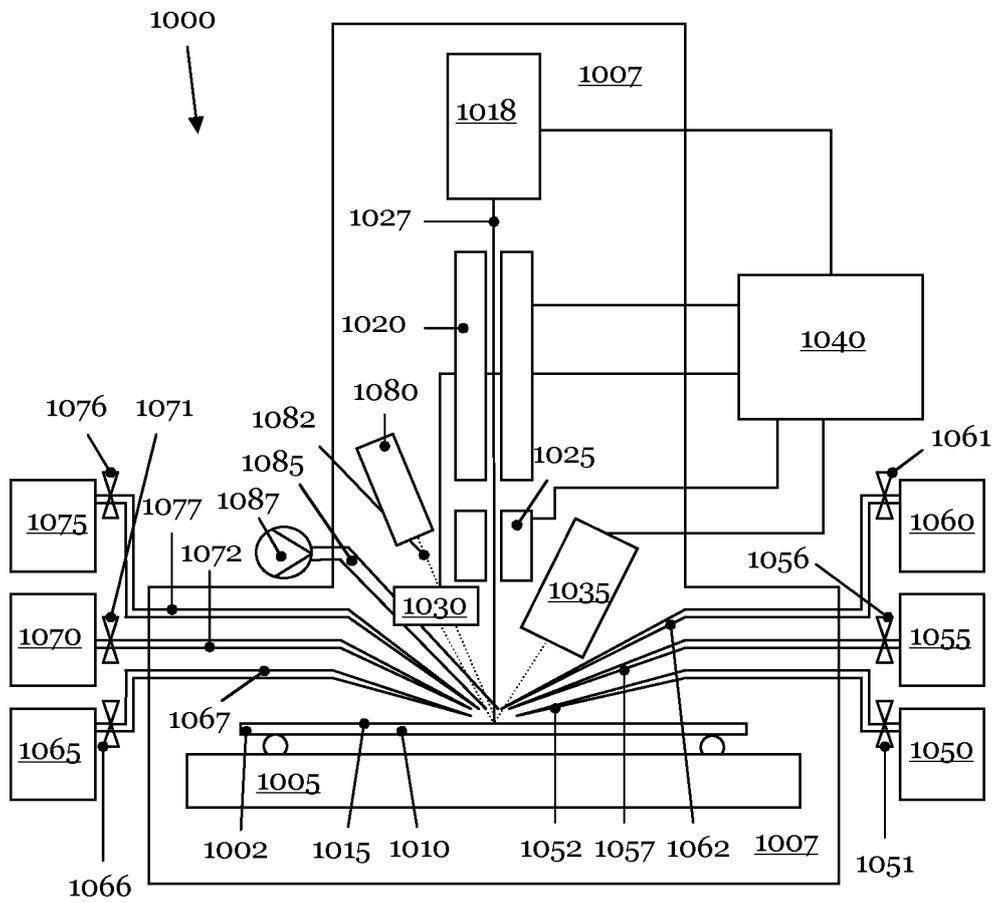


Fig. 4

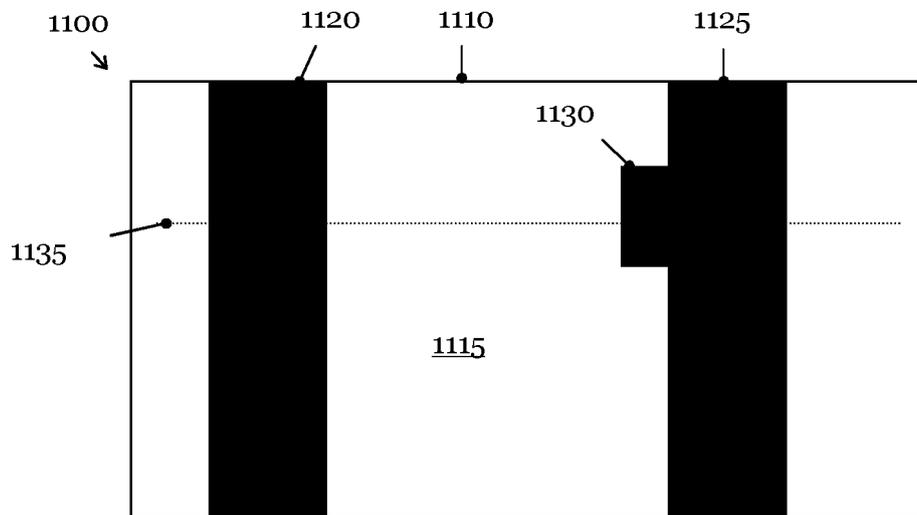


Fig. 5

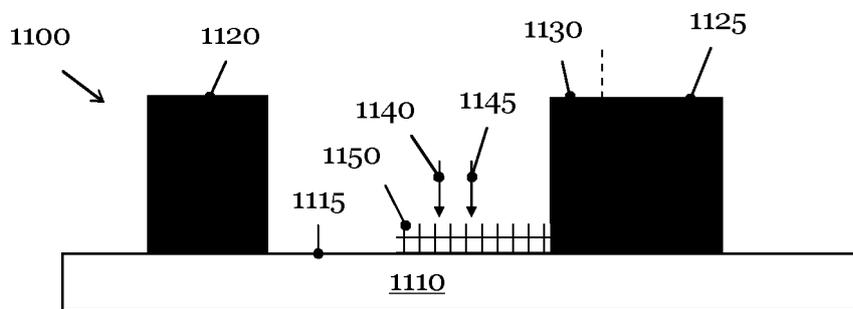
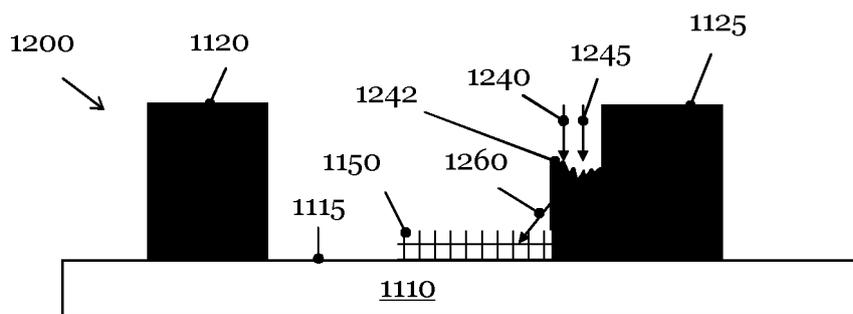
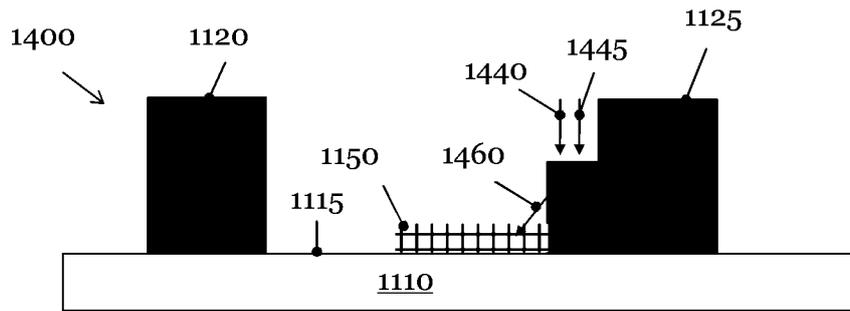


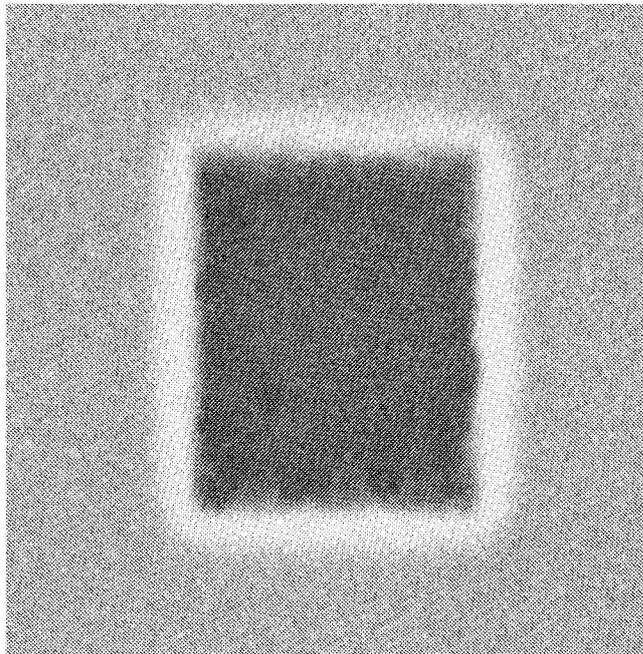
Fig. 6



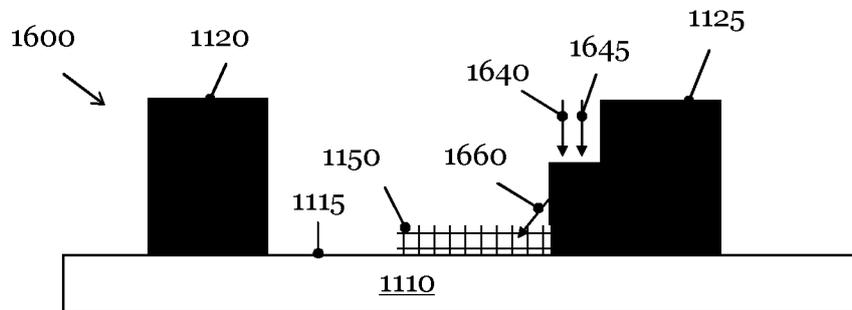
**Fig. 7**



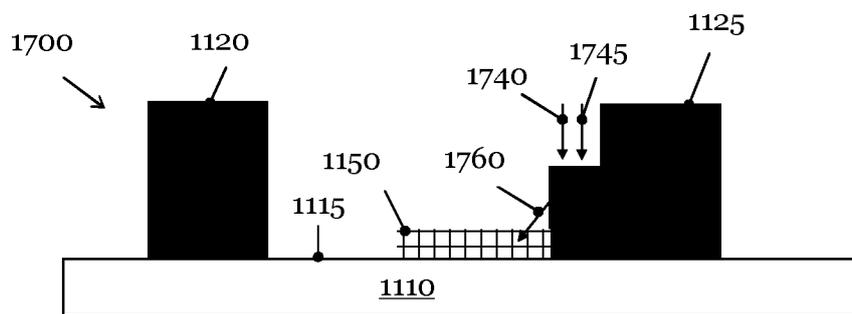
**Fig. 8**



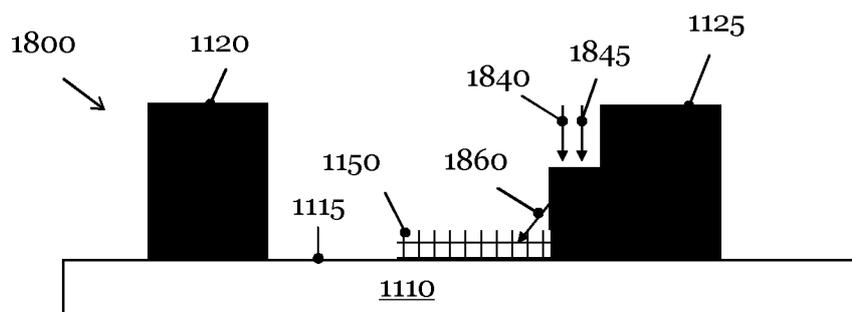
**Fig. 9**



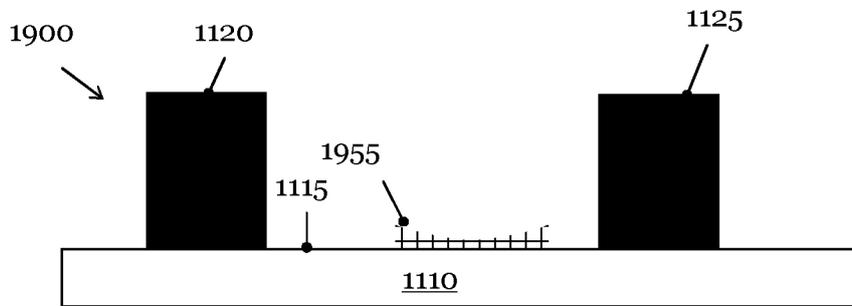
**Fig. 10**



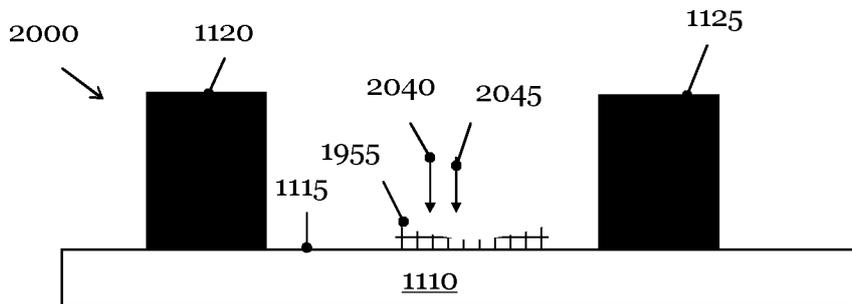
**Fig. 11**



**Fig. 12**



**Fig. 13**



**Fig. 14**

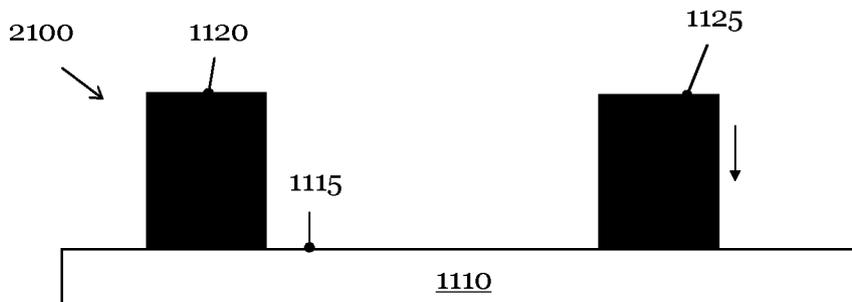


Fig. 15

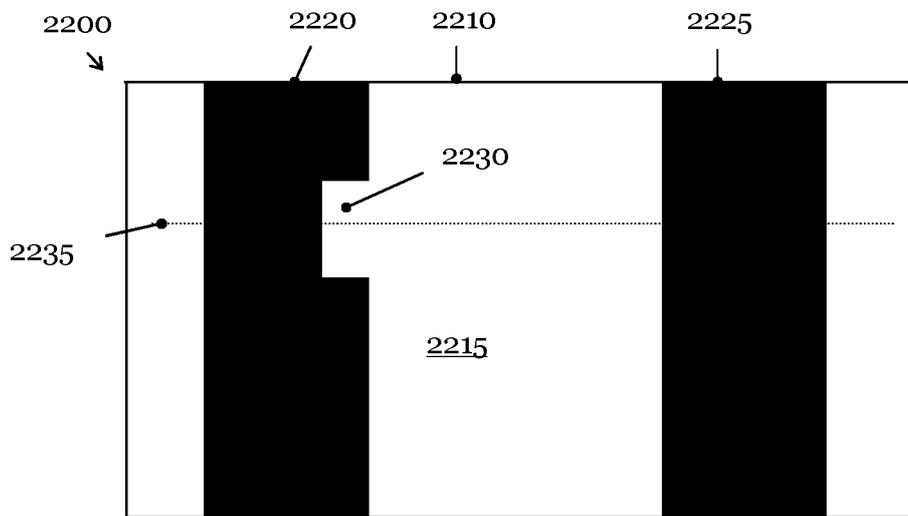


Fig. 16

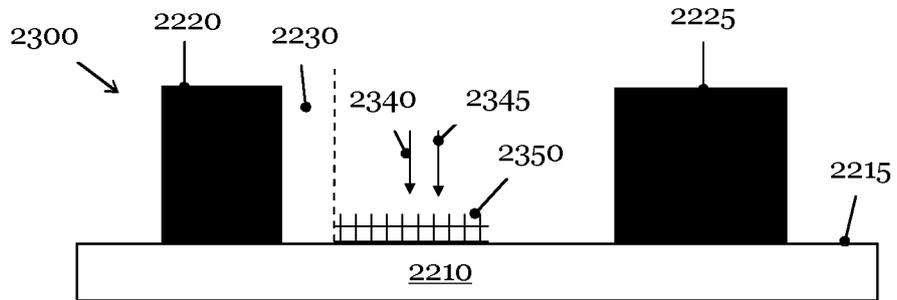
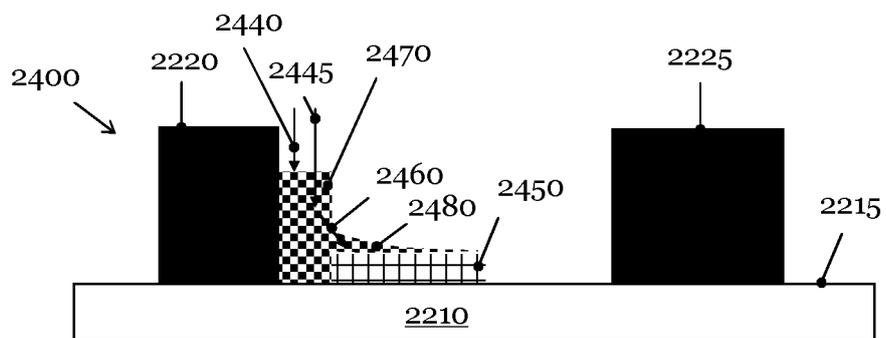
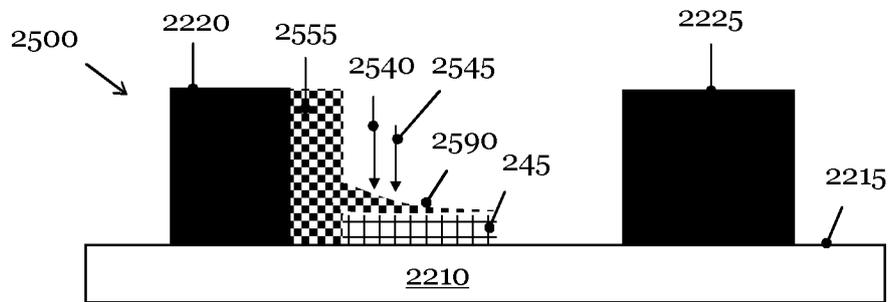


Fig. 17



**Fig. 18**



**Fig. 19**

