



(10) **DE 10 2017 205 629 A1** 2018.10.04

(12)

Offenlegungsschrift

(21) Aktenzeichen: **10 2017 205 629.0**

(22) Anmeldetag: **03.04.2017**

(43) Offenlegungstag: **04.10.2018**

(51) Int Cl.: **G03F 1/72 (2012.01)**

G03F 7/20 (2006.01)

G01B 11/24 (2006.01)

G01Q 90/00 (2010.01)

G01N 21/88 (2006.01)

C23C 16/452 (2006.01)

(71) Anmelder:

Carl Zeiss SMT GmbH, 73447 Oberkochen, DE

(74) Vertreter:

**BARDEHLE PAGENBERG Partnerschaft mbB
Patentanwälte, Rechtsanwälte, 81675 München,
DE**

(72) Erfinder:

**Steigerwald, Hendrik, 56220 Urmitz, DE; Capelli,
Renzo, 83278 Traunstein, DE**

(56) Ermittelte Stand der Technik:

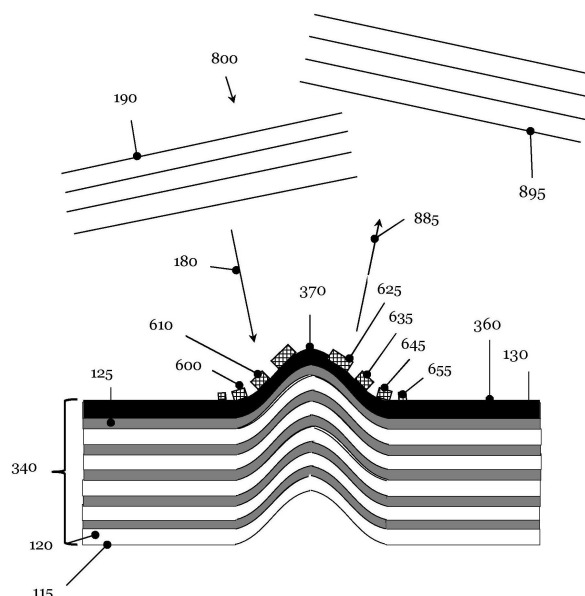
DE	10 2007 028 172	B3
DE	10 2011 079 382	A1
DE	10 2013 203 995	A1
US	7 459 242	B2
US	2014 / 0 072 903	A1

Prüfungsantrag gemäß § 44 PatG ist gestellt.

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen.

(54) Bezeichnung: **Verfahren und Vorrichtung zum Reparieren von Defekten einer photolithographischen Maske für den EUV-Bereich**

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft ein Verfahren und eine Vorrichtung (1400) zum Reparieren zumindest eines Defekts (220, 320, 420, 1020, 1120) einer photolithographischen Maske (1000, 1100) für den extrem ultravioletten (EUV) Wellenlängenbereich, wobei das Verfahren die Schritte aufweist: (a) Bestimmen des zumindest einen Defekts (220, 320, 420, 1020, 1120); und (b) Ermitteln einer Reparaturform (600) für den zumindest einen Defekt (220, 320, 420, 1020, 1120); (c) wobei die Reparaturform (600) beugungsbasiert ist, um eine Phasenstörung (595) durch den zumindest einen Defekt (220, 320, 420, 1020, 1120) zu berücksichtigen.



Beschreibung

Technisches Gebiet

[0001] Die vorliegende Erfindung betrifft das Reparieren von Defekten einer photolithographischen Maske für den extrem ultravioletten (EUV)-Bereich.

Stand der Technik

[0002] Als Folge der wachsenden Integrationsdichte in der Halbleiterindustrie müssen Photolithographiemasken zunehmend kleinere Strukturen auf Wafer abbilden. Um diesem Trend Rechnung zu tragen, wird die Belichtungswellenlänge von Lithographiegeräten zu immer kleineren Wellenlängen verschoben. Zukünftige Lithographiesysteme werden wahrscheinlich mit Wellenlängen im extrem ultravioletten (EUV) Bereich arbeiten (vorzugsweise aber nicht notwendigerweise im Bereich von 6 nm bis 15 nm). Der EUV-Wellenlängenbereich stellt enorme Anforderungen an die Präzision optischer Elemente im Strahlengang der zukünftigen Lithographiesysteme. Die optischen Elemente und damit auch die photolithographischen Masken werden aller Voraussicht nach reflektierende optische Elemente sein, da der Realteil der Brechzahl der derzeit bekannten Materialien im EUV-Bereich im Wesentlichen gleich eins ist.

[0003] EUV-Spiegel weisen ein Substrat mit geringer thermischer Ausdehnung auf. Auf das Substrat wird eine Mehrschichtstruktur (englisch Multilayer) aus beispielsweise etwa 20 bis etwa 60 Doppelschichten aus Silizium (Si) und Molybdän (Mo) oder anderen geeigneten Materialien aufgebracht, die als dielektrischer Spiegel wirken. Die europäische Patentschrift EP 1829 052 B1 offenbart ein mögliches Ausführungsbeispiel eines solchen reflektierenden Mehrschichtsystems für den EUV-Wellenlängenbereich.

[0004] EUV-Photolithographiemasken oder einfach EUV-Masken weisen auf der Mehrschichtstruktur zusätzlich eine Absorberstruktur oder ein Absorber-Pattern auf. In den Bereichen der EUV-Maske, die mit Elementen der Absorberstruktur bedeckt sind, werden einfallende EUV-Photonen absorbiert oder zumindest nicht so reflektiert wie in anderen Bereichen.

[0005] EUV-Masken - oder allgemein Photomasken - sind Projektionsvorlagen deren wichtigste Anwendung die Photolithographie zur Herstellung von Halbleiterbauelementen, insbesondere von integrierten Schaltungen ist. Photomasken müssen weitestgehend fehlerfrei sein, da sich ein Fehler der Maske bei jeder Belichtung auf jedem Wafer reproduzieren würde. Deshalb werden an die Materialien der optischen Elemente für den EUV-Bereich, insbesondere die Photomasken höchste Anforderungen hinsichtlich der Planarität, der Reinheit, der Temperatursta-

bilität, der Reflektionskonstanz und der Fehlerfreiheit gestellt.

[0006] Bei einer Photomaske ist es wichtig, dass die Elemente des Absorber-Patterns auf der Photomaske exakt die vom Design des Halbleiterbauelements vorgegebenen Strukturelemente in den Photoresist auf dem Wafer abbilden. Die Sollgröße der von dem Absorber-Pattern in dem Photoresist erzeugten Strukturelemente wird Kritische Dimension (CD, Critical Dimension) genannt. Diese Größe bzw. deren Variation ist eine zentrale Kenngröße für die Qualität einer Photomaske. Fehlerfreiheit bei Photomasken bedeutet in diesem Kontext, dass die Maske bei Belichtung mit der aktinischen Wellenlänge eine Sollgröße innerhalb eines vorgegebenen Fehlerintervalls auf einen Wafer abbildet, d.h. die CD darf nur innerhalb des vorgegebenen Fehlerintervalls variieren. Ist diese Bedingung erfüllt, weist die Photomaske keine auf einem Wafer sichtbaren oder druckbaren Defekte (englisch printable defects) auf.

[0007] Derzeit können keine Substrate und/oder Mehrschichtstrukturen für Photomasken für den EUV-Wellenlängenbereich hergestellt werden, die frei von druckbaren Defekten oder Fehlern sind. Die in dieser Anmeldung behandelten Defekte haben ihren Ursprung in kleinen lokalen Unebenheiten des Maskensubstrats (< 10 nm Abweichung von einer vorgegebenen Dicke), die sich durch die Mehrschichtstruktur hindurch fortpflanzen können. Ferner sind lokale Defekte innerhalb der Mehrschichtstruktur oder Partikel auf dem Substrat oder innerhalb der Mehrschichtstruktur Ursache für Störungen der Funktion der Mehrschichtstruktur als Spiegel. Diese Defekte werden im Folgenden - wie im Fachgebiet üblich - vergrabene Defekte oder Defekte der Mehrschichtstruktur genannt. Es gibt zurzeit verschiedene Konzepte, die Auswirkung druckbarer Defekte von EUV-Masken, die von Defekten der Mehrschichtstruktur verursacht werden, zu vermeiden oder zumindest abzuschwächen.

[0008] So kann nach der Untersuchung der Defekte eines Maskenrohlings, d.h. eines Substrats mit aufgebrachtener Mehrschichtstruktur, das Absorber-Pattern so auf dem Maskenrohling angeordnet werden, dass die Elemente des Absorber-Patterns, die druckbaren Defekte im Wesentlichen überdecken. Der Artikel „EUV multilayer defect compensation (MDC) by absorber pattern modification - From theory to wafer validation“, der Autoren L. Peng, P. Hu, M. Satake, V. Tolani, D. Peng, Y. Li und D. Chen, in Photomask Technology 2011, herausgegeben von W. Maurer, F.E. Abboud, Proc. of SPIE Vol. 8166, 81662E-1 - 81662E-15 beschreibt ein Simulationstool, mit dessen Hilfe sehr schnell die bestmögliche Anordnung eines Absorber-Patterns auf einen defektbehafteten Maskenrohling bestimmt werden kann.

[0009] Eine wichtige Konsequenz von druckbaren Defekten eines Maskenrohlings ist eine lokale Abnahme der optischen Intensität, in dem von der Photomaske erzeugten Luftbild. Dadurch werden bei Photomasken, die Bilder der den Defekt umgebenden Elemente des Absorber-Patterns gestört. Um die Auswirkung eines Defekts eines Maskenrohlings auf ein Absorber-Pattern einer photolithographischen Maske zu verringern, wird lokal ein Teil der Elemente des Absorber-Patterns um einen druckbaren Defekt entfernt. Dadurch wird die optische Intensität im Bereich des Defekts angehoben bzw. zumindest teilweise wiederhergestellt. Diese sogenannte kompensierende Reparatur (englisch: compensational repair) wird beispielsweise in der Publikation „Compensation for EUV multilayer defects within arbitrary layouts by absorber pattern modification“ der Autoren L. Pang, C. Clifford, D. Peng, Y. Li, D. Chen, M. Satake, V. Tolani und L. He, in „Extreme Ultraviolet Lithography“, herausgegeben von B.M. La Fontaine, P.P. Naulleau, Proc. of SPIE Vol. 7969, 79691E-1-79691E-14 erläutert. Die zur Defekt-Kompensation notwendigen Veränderungen des Absorber-Patterns zum Kompensieren von lokalen Vertiefungen (englisch: pits) oder Erhöhungen (englisch: bumps) eines Maskenrohlings werden mit Hilfe eines Simulations-Tools bestimmt.

[0010] Die WO 2016 / 037 851 beschreibt das Einteilen von Defekten von Maskenrohlingen in zwei Klassen, wobei die Defekte der ersten Klasse durch Elemente des Absorber-Pattern überdeckt werden und die Defekte der zweiten Klasse durch die oben erwähnte kompensierende Reparatur beseitigt werden.

[0011] Der Artikel „The door opener for EUV mask repair“ der Autoren M. Waiblinger, R. Jonckheere, T. Bret, D. van den Heuvel, C. Baur und G. Baralia, in „Photomask and Next Generation Lithography Mask Technology XIX“, herausgegeben von K. Kato, Proc. of SPIE, Vol. 84441, 84410F1 - 84410F-10, 2012 beschreibt sowohl das Reparieren von Defekten des Absorber-Patterns als auch der Mehrschichtstruktur von EUV-Masken, wobei die zuletzt genannten Defekte mit Hilfe der kompensierenden Reparaturtechnik kompensiert werden.

[0012] Ferner beschreibt die WO 2011 / 161243 das Kompensieren von Defekten von EUV-Masken durch das Erzeugen lokaler Änderungen in der Mehrschichtstruktur einer EUV-Maske mit Hilfe eines Elektronenstrahls.

[0013] Darüber hinaus beschreibt die WO 2013 / 010 976 das Korrigieren von vergrabenen Defekten von EUV-Masken, wobei die Defekte durch den kombinierten Einsatz einer ultravioletten Strahlungsquelle, eines Rastersondenmikroskops und eines Rasterteilchenmikroskops lokalisiert werden.

[0014] Überdies verwendet ein weiteres Verfahren ultrakurze Laserpulse zur lokalen Verdichtung des Substratmaterials einer Photomaske oder eines Maskenrohlings zum Kompensieren von Defekten von EUV-Masken. Die WO 2015 / 144 700 beschreibt das Einbringen von Pixeln in ein Substrat einer EUV-Maske durch die Rückseite des Substrats, d.h. der Seite des Maskensubstrats, das der Mehrschichtstruktur gegenüberliegt.

[0015] Schließlich beschreiben die Autoren G. McIntyre, E. Gallagher, T. Robinson, A.C. Smith, M. Lawliss, J. LeClaire, R. Bozak, R. White und M. Archuleta in dem Artikel „Through-focus EUV multilayer defect repair with nanomachining“, in „Extreme Ultraviolet (EUV) Lithography IV“, herausgegeben von P.P. Naulleau, Proc. of SPIE, Vol. 8679, 86791I-1-86791I-4, dass durch eine Kompensation der durch lokale Erhebungen (bumps) oder Vertiefungen (pits) induzierten Phasenstörungen der Mehrschichtstruktur durch lokales Entfernen eines Teils des Defekts (im Falle einer lokalen Erhebung) oder lokales Abscheiden von Material auf den Defekt, der in Form einer lokalen Vertiefung vorliegt, der Phasenfehler dieser Defekte kompensiert werden kann.

[0016] Trotz der Vielzahl der eingesetzten Defektkorrekturmethode können vergrabene Defekte oder Defekte der Mehrschichtstruktur häufig noch immer nicht mit der erforderlichen Qualität repariert werden. Defekte der Mehrschichtstruktur stellen derzeit ein Haupthindernis für den Einsatz von EUV-Wellenlängen in der Photolithographie dar.

[0017] Der vorliegenden Erfindung liegt daher das Problem zu Grunde, ein Verfahren und eine Vorrichtung anzugeben, die das Reparieren von Defekten einer photolithographischen Maske für den extrem ultravioletten Wellenlängenbereich verbessert.

Zusammenfassung der Erfindung

[0018] Gemäß einem Aspekt der vorliegenden Erfindung wird dieses Problem durch ein Verfahren nach Anspruch 1 gelöst. In einer Ausführungsform umfasst das Verfahren zum Reparieren zumindest eines Defekts einer photolithographischen Maske für den extrem ultravioletten (EUV) Wellenlängenbereich die Schritte: (a) Bestimmen des zumindest einen Defekts; und (b) Ermitteln einer Reparaturform für den zumindest einen Defekt; (c) wobei die Reparaturform beugungsbasiert ist, um eine Phasenstörung durch den zumindest einen Defekt zu berücksichtigen.

[0019] Indem die Reparaturform das Prinzip der optischen Beugung ausnutzt, eröffnet sie der Defektkorrektur von EUV-Masken neue Möglichkeiten in der Präzision mit der Defekte der Mehrschichtstruktur von EUV-Masken korrigiert werden können. Die Reparaturform kann individuell an die Form des be-

stimmten Defekts angepasst werden. Dadurch kann eine bestmögliche Korrektur von Defekten der Vielschichtstruktur von EUV-Photomasken erreicht werden. Mit einem erfindungsgemäßen Verfahren können sowohl absorbierende als auch phasenschiebende EUV-Masken repariert werden. Überdies ist es ein besonderer Vorteil einer erfindungsgemäßen Defektreparatur, dass die Mehrschichtspiegelstruktur, die den Defekt enthält, während des Reparaturprozesses nicht geändert wird. Eine fehlgeschlagene Reparatur eines Defekts kann deshalb in einfacher Weise korrigiert werden.

[0020] Das Bestimmen des zumindest einen Defekts kann zumindest einen der folgenden Schritte umfassen: Analysieren des zumindest einen Defekts mit einem Rastersondenmikroskop, Analysieren des zumindest eines Defekts mit einem Teilchenstrahl, Erzeugen eines Luftbildes des zumindest einen Defekts bei einer aktinischen Wellenlänge der photolithographischen Maske, Erzeugen von Luftbildern eines Fokusstapels des zumindest einen Defekts bei der aktinischen Wellenlänge der photolithographischen Maske, und Belichten eines Wafers mit der photolithographischen Maske.

[0021] Ein Teilchenstrahl kann einen Elektronenstrahl, einen Ionenstrahl, einen Atomstrahl, einen Molekülstrahl und/oder einen Photonenstrahl umfassen.

[0022] Das Ermitteln der Reparaturform kann umfassen: Rekonstruieren der Phasenstörung des zumindest einen Defekts aus dem Fokusstapel von Luftbildern des zumindest einen Defekts.

[0023] Bei schwierig zu detektierenden Defekten kann der kombinierte Einsatz von zwei oder mehr Metrologie-Tools sinnvoll sein. Beispielsweise kann ein Rastersondenmikroskop eingesetzt werden, um die Oberflächenkontur eines Defekts einer Mehrschichtstruktur zu analysieren und ein AIMS™ (Aerial Image Metrology System), um den Verlauf des Defekts innerhalb der Mehrschichtstruktur und damit die von ihm in der Mehrschichtstruktur verursachte Phasenänderung oder Phasenstörung zu untersuchen. Die Art eines Defekts der Mehrschichtstruktur einer EUV-Maske zeigt sich beispielsweise in der Messung der Breite einer abzubildenden Linie beim Durchstimmen des Fokus eines AIMS™ oder eines Belichtungssystems von einer Unterfokussierung zu einer Überfokussierung.

[0024] Das Ermitteln der Reparaturform kann umfassen: Bestimmen einer abbildenden Struktur zum Abscheiden auf zumindest einem Teil des zumindest einen Defekts, wobei die abbildende Struktur zumindest einen ersten Bereich aufweist, der für elektromagnetische Strahlung bei einer aktinischen Wellenlänge transparent ist und zumindest einen zweiten Bereich aufweist, der eine Phase der elektromagneti-

schen Strahlung bei der aktinischen Wellenlänge ändert und/oder die elektromagnetische Strahlung der aktinischen Wellenlänge zumindest teilweise absorbiert.

[0025] Ein Defekt einer Mehrschichtstruktur einer EUV-Maske wirkt wie eine Linse, die die reflektierte Strahlung durch Ablenken aus der vorgegebenen Reflexionsrichtung umverteilt und dadurch typischerweise sowohl die Phase als auch die Amplitude der elektromagnetischen Strahlung, die im Bereich des Defekts reflektiert wird, stört. Eine Reparaturform des hier definierten Verfahrens umfasst eine abbildende Struktur, die die Linsenwirkung des Defekts im Wesentlichen kompensiert und damit in ihrer Wirkung aufhebt. Die abbildende Struktur kann als Hologramm eines endlich fernen Punktes ausgefasst werden, das durch Überlagerung einer Kugelwelle mit einer Kugel- oder einer Planwelle als Referenzwelle in einer lichtempfindlichen Schicht aufgezeichnet werden kann (vgl. Bergmann Schäfer: „Optik“, Kap. 10.2.4, 10. Auflage, de Gruyter). Dies ist die Basis für eine Berechnung der ersten und der zweiten Elemente einer abbildenden Struktur.

[0026] Die kombinierende Wirkung der abbildenden Struktur und dem Defekt sorgt dafür, dass der Bereich des Defekts die bei der aktinischen Wellenlänge einfallende Strahlung in gleicher Weise reflektiert wie ein Bereich der Mehrschichtstruktur, der keinen Defekt aufweist. Beim Auslegen oder beim Design der abbildenden Struktur wird berücksichtigt, dass die elektromagnetische Strahlung der aktinischen Wellenlänge, die abbildende Struktur zweimal durchläuft. Ferner wird beim Design der abbildenden Struktur berücksichtigt, dass die elektromagnetische Strahlung unter einem Winkel (vorzugsweise 6° bis 8°) gegen die Senkrechte auf die Mehrschichtstruktur einer EUV-Maske einfällt. Falls ein Teil eines Defekts der Mehrschichtstruktur von einem Element der Absorberstruktur oder des Absorber-Pattern überdeckt wird, wird dies beim Design der abbildenden Struktur ebenfalls in die Rechnung miteinbezogen. Alternativ kann ein Teil des Absorber-Patterns verändert werden, um den Defekt der Mehrschichtstruktur besser reparieren zu können. Insbesondere kann ein Teil des Absorber-Patterns entfernt werden.

[0027] Der Ausdruck „in Wesentlichen“ bedeutet hier wie auch an anderen Stellen der Beschreibung die Angabe einer Größe innerhalb ihrer messtechnischen Grenzen beim Verwenden von Messinstrumenten gemäß dem Stand der Technik.

[0028] Das Bestimmen der abbildenden Struktur kann umfassen: Bestimmen des zumindest einen ersten Bereichs und des zumindest einen zweiten Bereichs, so dass eine Phase einer elektromagnetischen Welle bei der aktinischen Wellenlänge, die auf die abbildende Struktur trifft, nach deren Refle-

xion durch den defekten Bereich einer Mehrschichtspiegelstruktur und erneutem Durchtritt durch die abbildende Struktur im Wesentlichen keine Phasenstörung aufweist, verglichen mit einer elektromagnetischen Welle, die von einem defektfreien Bereich der Mehrschichtstruktur reflektiert wird.

[0029] Das Auslegen der abbildenden Struktur auf einen individuellen Defekt, der eine detektierte Oberflächenkontur aufweist, erfolgt typischerweise mit Hilfe eines Computersystems. Dabei ist es möglich, den Aufwand der Defektreparatur auf jeden Defekt individuell abzustimmen.

[0030] Das Ermitteln der Reparaturform kann ferner den Schritt umfassen: Bestimmen einer Brennweite der abbildenden Struktur aus einem Krümmungsradius einer Oberflächenkontur des zumindest einen Defekts.

[0031] Die Oberflächenkontur eines Defekts einer Mehrschichtstruktur einer EUV-Maske kann sehr unterschiedlich sein. So können beispielsweise Defekte in Form einer lokalen Erhebung lateral ausgedehnt oder eher lokal begrenzt sein. Die Höhe eines Defekts der Mehrschichtstruktur kann von Null oder nahe Null bis in den zweistelligen Nanometerbereich reichen. Durch Bestimmen einer individuell angepassten Reparaturform können alle diese Defekte repariert werden.

[0032] Für die abbildende Struktur kann ein Material gewählt werden, dessen $\beta/\delta < 1$, bevorzugt $< 0,7$, mehr bevorzugt kleiner $< 0,5$, und am meisten bevorzugt $< 0,3$ bei der aktinischen Wellenlänge ist, wobei δ die Abweichung des Realteils der komplexen Brechzahl von 1 bezeichnet und β den Imaginärteil der komplexen Brechzahl des Materials der abbildenden Struktur bezeichnet.

[0033] Eine abbildende Struktur kann prinzipiell in zwei extremen Ausprägungen ausgeführt werden. Das Material für den zumindest einen zweiten Bereich kann zum einen als bei der aktinischen Wellenlänge transparent ausgewählt werden oder kann als bei der aktinischen Wellenlänge maximal absorbierend gewählt werden. Der Einsatz einer abbildenden Struktur, die vollständig oder zumindest überwiegend auf einer Phasenverschiebung des zumindest einen zweiten Elements beruht, hat den Vorteil, dass die abbildende Struktur den Amplitudenstörungen des Defekts nicht noch weitere Amplitudenverluste, die durch die abbildende Struktur verursacht werden, hinzufügt. Derzeit sind jedoch keine Materialien bekannt, die bei Wellenlängen im EUV-Bereich transparent sind. Bei den im Rahmen dieser Anmeldung diskutierten abbildenden Strukturen bewirkt der zumindest eine zweite Bereich eine nicht zu vernachlässigende Absorption der einfallenden Strahlung. Trotzdem ist es günstig, ein Material für den

zumindest einen zweiten Bereich der abbildenden Struktur auszuwählen, dessen Absorption bei der aktinischen Wellenlänge im Vergleich zu anderen geeigneten Materialien niedrig ist.

[0034] Das hier definierte Verfahren zum Korrigieren von Phasenfehlern reflektierender Photomasken kann generell zum Kompensieren von transmissiven optischen Elementen eingesetzt werden, die lokale Phasenstörungen aufweisen. Dazu wird ein Material gewählt, das bei der Wellenlänge, bei der das optische Element arbeitet, transparent ist und die abbildende Struktur weist im Wesentlichen eine Phasenschiebung auf. Bei der Auslegung der abbildenden Struktur ist darauf zu achten, dass die optische Strahlung nur einmal durch die abbildende Struktur hindurchtritt.

[0035] Die abbildende Struktur kann eine Fresnelsche Zonenplatte umfassen.

[0036] Fresnelsche Zonenplatten sind Ringgitter, die wie optische Gitter allgemein, das Prinzip der optischen Beugung ausnutzen. Fresnelsche Zonenplatten oder einfach Zonenplatten weisen abwechselnd Zonen auf, die für Licht transparent sind und die Licht in der Phase um 180° verschieben und/oder die Licht absorbieren. Die Breite einer Zone wird so gewählt, dass Licht, das durch die Zonenplatte tritt und auf einen Punkt ablenkt wird, eine Phasendifferenz $\leq 180^\circ$ aufweist. In einer Amplitudenzonenplatte werden entweder die geraden Beugungsordnungen (d.h. die 2., 4., 6., usw. Beugungsordnung) oder die ungeraden Beugungsordnungen (d.h. 1., 3., 5., usw. Beugungsordnung) in den entsprechenden Zonen der Zonenplatte absorbiert. In Phasenzonenplatten erfährt die optische Strahlung in den entsprechenden Zonen eine Phasenverschiebung um 180° oder π und interferiert im Brennpunkt der Zonenplatte konstruktiv mit den um π in der Phase verschobenen Beugungsordnungen der anderen Zonen. Liegt der Brennpunkt einer Zonenplatte auf der optischen Achse, so weist die Fresnelsche Zonenplatte eine konzentrische Ringstruktur auf, wobei der Abstand der Zonen mit wachsendem Abstand von der optischen Achse geringer wird.

[0037] Die Fresnelsche Zonenplatte kann zumindest vier Zonen, bevorzugt zumindest sechs Zonen, mehr bevorzugt zumindest acht Zonen, und am meisten bevorzugt zumindest zehn Zonen umfassen.

[0038] Die Abbildungsqualität einer Fresnelschen Zonenplatte steigt mit wachsender Zonenzahl. Andererseits wächst mit zunehmender Zonenzahl der Aufwand zum Ermitteln der entsprechenden Reparaturform und insbesondere der Aufwand zum Abscheiden der Zonenplatte auf einem Defekt.

[0039] Das Ermitteln der Reparaturform kann ferner umfassen: Bestimmen einer Änderung eines Teils eines Absorber-Patterns, der dem zumindest einen Defekt benachbart ist, zum zumindest teilweisen Korrigieren der durch den zumindest einen Defekt verursachten Amplitudenstörung. Das Ermitteln der Reparaturform kann ferner umfassen: Berücksichtigen der durch die Reparaturform erzeugten Amplitudenänderung beim Bestimmen der Änderung des Teils des Absorber-Patterns. Die Änderung eines Teils des Absorber-Patterns kann ein Entfernen eines Teils des Absorber-Patterns umfassen, der dem zumindest einen Defekt benachbart ist.

[0040] Indem eine Reparaturform eine Phasenstörung eines Defekts mit Hilfe einer individuell auf den Defekt abgestimmten abbildenden Struktur korrigiert und eine Amplitudenstörung des Defekts durch eine abgestimmte kompensierende Korrektur beseitigt, ermöglicht die in dieser Anmeldung beschriebene Reparatur eine umfassende Kompensation der Defekte der Mehrschichtstruktur. Nach der Defektkorrektur ist der von einem Belichtungssystem nutzbare Fokusbereich im Wesentlichen nicht eingeschränkt. Beim Ermitteln der Änderung des Absorber-Patterns in der Nähe des Defekts wird die Wirkung der abbildenden Struktur auf die Amplitudenstörung des Defekts berücksichtigt.

[0041] Die Reparaturform kann die abbildende Struktur und ein Ändern eines Teils des Absorber-Patterns umfassen. Das Ändern eines Teils des Absorber-Patterns kann das Entfernen eines Teils des Absorber-Patterns umfassen, der dem zumindest einen Defekt benachbart ist.

[0042] Zum Reparieren des Phasenanteils eines Defekts der Mehrschichtstruktur umfasst die Reparaturform eine abbildende Struktur, die auf dem Prinzip der optischen Beugung basiert. Um neben dem Phasenanteil von Defekten auch deren Amplitudenanteil oder deren Amplitudenstörung zu reparieren, umfasst die Reparaturform eine kompensierende Korrektur der Amplitudenstörung dieser Defekte. Beim Ermitteln der kompensierenden Korrektur ist es günstig, die von der Reparaturform bzw. der abbildenden Struktur der Reparaturform verursachte Amplitudenänderung der im Bereich des Defekts reflektierten Strahlung mit zu berücksichtigen.

[0043] Das Ermitteln der Reparaturform kann ferner den Schritt aufweisen: Simulieren des Entfernens eines Teils des Absorber-Patterns, der dem zumindest einen Defekt benachbart ist, vor dem Ermitteln der Reparaturform.

[0044] Zum Ermitteln einer optimalen Reparaturform kann es sinnvoll sein, einen Teil des Absorber-Patterns, der dem Defekt benachbart ist, vor der Defektreparatur zu entfernen. Das Entfernen eines Teils

des Absorber-Patterns eröffnet einen neuen Freiheitsgrad bei der Defektreparatur. Auf der Basis des neuen, geänderten Absorber-Patterns wird dann eine abbildende Struktur und eine Änderung des neuen Absorber-Patterns ermittelt, die zusammen die Reparaturform bilden und den Defekt bestmöglich reparieren.

[0045] Die Reparaturform kann eine abbildende Struktur und die Änderung des Absorber-Patterns umfassen, wobei die Änderung das Entfernen eines Teils des Absorber-Patterns aufweist oder die Änderung das Abscheiden eines Teils des Absorber-Patterns aufweist.

[0046] Wie oben ausgeführt, kann ein Reparaturprozess in einem ersten Schritt das Entfernen eines Teils des Absorber-Patterns umfassen, der dem zu reparierenden Defekt benachbart ist. Die zugehörige Reparaturform umfasst in diesem Fall drei Punkte: eine abbildende Struktur, ein Entfernen eines Teils des Absorber-Patterns und ein Abscheiden eines neuen Teils des Absorber-Patterns auf zumindest einen Teil der Mehrschichtstruktur, von dem zuvor das ursprüngliche Absorber-Pattern entfernt wurde.

[0047] Das Verfahren zum Reparieren zumindest eines Defekts einer photolithographischen Maske für den extrem ultravioletten Wellenlängenbereich kann ferner den Schritt aufweisen: Erzeugen der Reparaturform durch Abscheiden der abbildenden Struktur auf zumindest einem Teil des zumindest einen Defekts mittels eines ersten Teilchenstrahls und eines ersten Depositionsgases.

[0048] Falls kein Teil des Defekts von dem Absorber-Pattern überdeckt wird, ist es bevorzugt, die abbildende Struktur im Wesentlichen zentral auf dem Defekt anzubringen. Wenn jedoch ein Teil des Defekts der Mehrschichtstruktur von dem Absorber-Pattern überdeckt wird, wird die abbildende Struktur so ausgelegt, dass sie den nicht überdeckten und damit wirksamen Teil des Defekts korrigiert. Alternativ kann der Teil des Absorber-Patterns, der den Defekt der Mehrschichtstruktur abschattet, vor dem Ermitteln der Reparaturform entfernt werden. Dies kann zunächst in der Simulation vor dem Ermitteln der Reparaturform erfolgen, so dass die Reparaturform für eine bestmögliche Reparatur des Defekts bestimmt werden kann. Vor dem Anbringen der ermittelten Reparaturform auf den Defekt wird dann der in der Simulation entfernte Teil des Absorber-Patterns tatsächlich entfernt.

[0049] Der erste Teilchenstrahl kann einen Elektronenstrahl umfassen und/oder das erste Depositionsgas kann ein Metallcarbonyl umfassen. Das Metallcarbonyl kann ein Molybdäncarbonyl umfassen. Ferner kann das Depositionsgas ein Niob-Präkursorgas umfassen.

[0050] Aus Tabellen (beispielsweise: <http://henke.lbl.gov/optical.constants/>) können die optischen Eigenschaften der verschiedenen Elemente des Periodensystems, die zum Anbringen der Reparaturform auf einen Defekt einer Mehrschichtstruktur einer EUV-Maske in Frage kommen, entnommen werden.

[0051] Das Verfahren zum Reparieren zumindest eines Defekts einer photolithographischen Maske für den extrem ultravioletten Wellenlängenbereich kann ferner den Schritt aufweisen: Entfernen eines Teils des Absorber-Patterns, der dem zumindest einen Defekt benachbart ist, mittels eines zweiten Teilchenstrahls und eines Ätzgases. Der zweite Teilchenstrahl kann einen Elektronenstrahl umfassen und das Ätzgas kann Xenondifluorid (XeF₂) umfassen.

[0052] Das Verfahren zum Reparieren zumindest eines Defekts einer photolithographischen Maske für den extrem ultravioletten Wellenlängenbereich kann ferner den Schritt aufweisen: Abscheiden eines Teils des Absorber-Patterns mittels des zweiten Teilchenstrahls und eines zweiten Depositionsgases. Das zweite Depositionsgas kann ein Metallcarbonyl umfassen, wie etwa ein Tantalcarbonyl.

[0053] Wie oben ausgeführt, kann ein Reparaturprozess des Defektes das Entfernen eines Teils des Absorber-Patterns umfassen. Zum Korrigieren einer Amplitudenstörung des Defekts kann ein nachträgliches Anbringen eines Teils der entfernten Absorberstruktur günstig sein. In einer alternativen Ausführungsform umfasst das Ermitteln einer Reparaturform für einen Defekt das gleichzeitige Bestimmen einer abbildenden Struktur und ein ggf. notwendiges Ändern eines Teils des Absorber-Patterns.

[0054] Ein Computerprogramm kann Anweisungen aufweisen, die, wenn sie von einem Computersystem ausgeführt werden, das Computersystem veranlassen, die Verfahrensschritte eines der oben beschriebenen Aspekte auszuführen.

[0055] Gemäß einem weiteren Aspekt wird das Problem der vorliegenden Erfindung durch eine Vorrichtung nach Anspruch 17 gelöst. In einer Ausführungsform weist die Vorrichtung zum Reparieren zumindest eines Defekts einer photolithographischen Maske für den extrem ultravioletten (EUV) Wellenlängenbereich auf: (a) Mittel zum Bestimmen des zumindest eines Defekts; (b) Mitteln zum Ermitteln einer Reparaturform für den zumindest einen Defekt, wobei die Reparaturform beugungsbasiert ist, um eine Phasenstörung durch den zumindest einen Defekt zu berücksichtigen; und (c) Mittel zum Erzeugen der Reparaturform durch Abscheiden einer abbildenden Struktur auf zumindest einem Teil des zumindest einen Defekts.

[0056] Das Mittel zum Bestimmen des zumindest eines Defekts kann ein Messinstrument aus der Gruppe umfassen: ein Rastersondenmikroskop, ein Rasterteilchenmikroskop, ein Lasersystem, ein AIMS™ (Aerial Image Metrology System) und ein photolithographisches Belichtungssystem.

[0057] Überdies kann das Mittel zum Erzeugen der Reparaturform Mittel zum Bereitstellen eines ersten Teilchenstrahls und zum Bereitstellen eines ersten Depositionsgases umfassen.

[0058] Schließlich kann die Vorrichtung zum Reparieren zumindest eines Defekts einer photolithographischen Maske für den EUV-Wellenlängenbereich ferner aufweisen: Mittel zum Ändern eines Teils eines Absorber-Patterns, wobei das Mittel zum Ändern eines Teils des Absorber-Patterns umfasst: Mittel zum Bereitstellen eines zweiten Teilchenstrahls, eines zweiten Depositionsgases und eines Ätzgases.

Figurenliste

[0059] In der folgenden detaillierten Beschreibung werden derzeit bevorzugte Ausführungsbeispiele der Erfindung unter Bezugnahme auf die Zeichnungen beschrieben, wobei

Fig. 1 schematisch einen Querschnitt eines Ausschnitts einer Photomaske für den extrem ultravioletten (EUV) Wellenlängenbereich zeigt;

Fig. 2 schematisch einen Querschnitt durch einen Ausschnitt eines Maskenrohlings repräsentiert, bei dem das Substrat eine lokale Vertiefung (bit) aufweist;

Fig. 3 schematisch einen Querschnitt durch einen Ausschnitt eines Maskenrohlings aufweist, dessen Substrat eine lokale Ausbeulung (bump) aufweist;

Fig. 4 schematisch einen Querschnitt durch einen vergrabenen Defekt wiedergibt, der seine Form während der Ausbreitung in der Mehrschichtstruktur ändert;

Fig. 5 schematisch eine auf die Mehrschichtstruktur der **Fig. 3** einlaufende und eine von der Mehrschichtstruktur reflektierte Phasenfront illustriert;

Fig. 6 ein Beispiel einer Reparaturform in Form einer abbildenden Struktur wiedergibt, wobei die abbildende Struktur in Form einer Fresnelschen Zonenplatte ausgeführt ist;

Fig. 7 die Änderung des Beugungswirkungsgrades einer Zonenplatte beim Übergang von einer Phasenzonenplatte zu einer Amplitudenzonenplatte darstellt;

Fig. 8 die **Fig. 5** nach dem Anbringen einer Reparaturform auf den Defekt veranschaulicht, wo-

bei die Reparaturform eine abbildende Struktur in Form einer Fresnelschen Zonenplatte aufweist;

Fig. 9 einen simulierten Intensitätsverlauf reflektierter optischer Strahlung über einen Defekt einer Mehrschichtstruktur wiedergibt, der von einer Mehrschichtstruktur einer EUV-Maske reflektiert wird, wobei die Mehrschichtstruktur einen Defekt in Form einer lokalen Erhöhung aufweist und den Intensitätsverlauf eines reparierten Defekts zeigt, wobei der Defekt durch Abscheiden einer für den Defekt ermittelten Reparaturform auf dem Defekt repariert wurde;

Fig. 10 eine Reparaturform zum Korrigieren der Phasenstörung und der Amplitudenstörung eines Defekts einer Mehrschichtstruktur einer EUV-Maske präsentiert;

Fig. 11 einen Defekt zeigt, der zum Teil von einem Absorber-Pattern überdeckt wird;

Fig. 12 den Defekt der **Fig. 11** darstellt, nachdem ein Teil des Absorber-Patterns um den Defekt herum entfernt wurde, um den Defekt freizu legen;

Fig. 13 den Ausschnitt der **Fig. 12** repräsentiert, nachdem der Defekt repariert wurde;

Fig. 14 schematisch eine Vorrichtung zeigt, mit der die hier beschriebenen Verfahren ausgeführt werden können; und

Fig. 15 ein Flussdiagramm eines Verfahrens zum Reparieren eines Defekts einer EUV-Maske angibt.

Detaillierte Beschreibung bevorzugter Ausführungsbeispiele

[0060] Im Folgenden werden derzeit bevorzugte Ausführungsformen eines erfindungsgemäßen Verfahrens und einer erfindungsgemäßen Vorrichtung anhand der Reparatur von Mehrschichtdefekten absorbierender photolithographischer Masken für den extrem ultravioletten (EUV) Wellenlängenbereich genauer erläutert. Das erfindungsgemäße Verfahren zum Reparieren von Defekten einer Photomaske ist jedoch nicht auf die im Folgenden diskutierten Beispiele beschränkt. Vielmehr kann dieses in gleicher Weise zum Reparieren von Defekten der verschiedenen Arten von EUV-Masken eingesetzt werden, insbesondere von phasenschiebenden EUV-Masken. Darüber hinaus kann das erfindungsgemäße Verfahren generell zum Korrigieren von lokalen Phasenstörungen in transmissiven optischen Elementen verwendet werden.

[0061] Die **Fig. 1** zeigt einen schematischen Schnitt durch einen Ausschnitt einer absorbierenden EUV-Maske **100** für eine Belichtungswellenlänge im Bereich von 13,5 nm. Die EUV-Maske **100** weist ein

Substrat **110** aus einem Material mit niedrigem thermischen Ausdehnungskoeffizienten auf, wie beispielsweise Quarz. Andere Dielektrika, Glasmaterialien oder halbleitende Materialien können ebenfalls als Substrate für EUV-Masken eingesetzt werden, wie etwa ZERODUR®, ULE® oder CLEARCERAM®. Die Rückseite **117** des Substrats **110** der EUV Maske **100** dient zum Halten des Substrats **110** während der Herstellung der EUV Maske **100** und während ihres Betriebs. Auf der Rückseite **117** des Substrats **110** kann eine dünne elektrisch leitfähige Schicht zum Halten des Substrats **110** aufgebracht werden (in der **Fig. 1** nicht gezeigt).

[0062] Auf die Vorderseite **115** des Substrats **110** wird ein Mehrschichtfilm oder eine Mehrschichtstruktur **140** abgeschieden, die 20 bis 80 Paare alternierender Molybdän- (Mo) **120** und Silizium- (Si) Schichten **125** umfasst, die im Folgenden auch als MoSi-Schichten bezeichnet werden. Die Dicke der Mo-Schichten **120** beträgt 4,15 nm und die Si-Schichten **125** weisen eine Dicke von 2,80 nm auf. Um die Mehrschichtstruktur **140** zu schützen, wird eine Deckschicht **130** beispielsweise aus Siliziumdioxid, typischerweise mit einer Dicke von vorzugsweise 7 nm auf der obersten Silizium-Schicht **125** aufgebracht. Andere Materialien wie beispielsweise Ruthenium (Ru) können ebenfalls zum Bilden einer Deckschicht **130** eingesetzt werden. Anstelle von Molybdän können in die MoSi-Schichten Schichten aus anderen Elementen mit hoher Nukleonenzahl, wie etwa Kobalt (Co), Nickel (Ni), Wolfram (W), Rhenium (Re) oder Iridium (Ir) verwendet werden. Das Abscheiden der Mehrschichtstruktur **140** kann beispielsweise durch Ionenstrahl-Abscheiden (IBD, ion beam deposition) erfolgen.

[0063] Das Substrat **110**, die Mehrschichtstruktur **140** und die Deckschicht **130** werden im Folgenden Maskenrohling **150** genannt. Es ist jedoch auch möglich, eine Struktur als Maskenrohling zu bezeichnen, die alle Schichten einer EUV-Maske aufweist, allerdings ohne eine Strukturierung der ganzflächigen Absorberschicht **160**.

[0064] Um aus dem Maskenrohling **150** eine EUV-Maske **100** herzustellen, wird auf der Deckschicht **130** eine Pufferschicht **135** abgeschieden. Mögliche Pufferschichtmaterialien sind Quarz (SiO₂), Silizium-Sauerstoff-Nitrid (SiON), Ru, Chrom (Cr) und/oder Chromnitrid (CrN). Auf der Pufferschicht **135** wird eine Absorptionsschicht **160** abgeschieden. Für die Absorptionsschicht **160** geeignete Materialien sind unter anderem Cr, Titanitrid (TiN) und/oder Tantalnitrid (TaN). Auf der Absorptionsschicht **160** kann eine Antireflexionsschicht **165** aufgebracht werden, beispielsweise aus Tantaloxynitrid (TaON).

[0065] Die Absorptionsschicht **160** wird beispielsweise mit Hilfe eines Elektronenstrahls oder eines La-

serstrahls strukturiert, so dass aus der ganzflächigen Absorptionsschicht **160** ein Absorber-Pattern **170** erzeugt wird. Die Pufferschicht **135** dient dem Schutz der Mehrschichtstruktur **140** während des Strukturierens der Absorberschicht **160**.

[0066] Die EUV-Photonen **180** treffen auf die EUV-Maske **100** mit der Phasenfront **190**. In den Bereichen des Absorber-Patterns **170** werden die einfallenden EUV-Photonen **180** absorbiert und in den Bereichen, die frei von Elementen des Absorber-Patterns **170** sind, wird zumindest die Mehrzahl der EUV-Photonen **180** von der Mehrschichtstruktur **140** reflektiert. Die Phasenfront **190** symbolisiert die von der Mehrschichtstruktur **140** reflektierte auslaufende elektromagnetische Welle.

[0067] Die Mehrschichtstruktur **140** ist so auszulegen, dass die Schichtdicken beispielsweise einer Molybdän- und einer Silizium-Schicht für die auf die Mehrschichtstruktur einfallenden EUV-Photonen **180** unter dem vorgegebenen Einfallswinkel einer optischen Dicke von $\lambda/2$ der aktinischen Wellenlänge entsprechen. Eine Abweichung von dieser Bedingung führt zu einer lokalen Verletzung der Bragg'schen Reflexionsbedingung und damit einer Änderung der lokal reflektierten EUV-Strahlung. Aufgrund der sehr kleinen Wellenlängen stellt der EUV-Bereich extreme Anforderungen an die Homogenität der einzelnen Schichten der Mehrschichtstruktur **140** sowie an deren Oberflächenrauigkeit über die Fläche der EUV-Maske **100** hinweg. Während des Herstellungsprozesses der Mehrschichtstruktur **140** kann es deshalb - wie bereits oben angesprochen - zu Abweichungen der realen Schichtdicken einzelner Schichten von einer vorgegebenen Schichtdicke kommen. Ferner können sich kleine lokale Unebenheiten des Substrats **110** der EUV-Maske **100** durch die Mehrschichtstruktur **140** hindurch fortpflanzen.

[0068] Die **Fig. 1** stellt eine ideale EUV-Maske **100** dar. Das Diagramm **200** der **Fig. 2** veranschaulicht schematisch einen Maskenrohling **250**, dessen Substrat **210** einen lokalen Defekt **220** in Form einer lokalen Vertiefung (englisch: pit) aufweist. Die lokale Vertiefung kann beispielsweise beim Polieren der Vorderseite **115** des Substrats **210** entstanden sein. In dem in der **Fig. 2** veranschaulichten Beispiel pflanzt sich der Defekt **220** im Wesentlichen in unveränderter Form durch die Mehrschichtstruktur **240** hindurch fort. Zum Zwecke der Veranschaulichung sind die Defekte **220** und **320** in ihren Höhenabmessungen übertrieben dargestellt.

[0069] Ferner können beim Polieren der Oberfläche **115** des Substrats **210** kleinste Kratzer entstehen (in der **Fig. 2** nicht dargestellt). Wie bereits im einleitenden Teil angesprochen, können beim Abscheiden der Mehrschichtstruktur **240** Partikel auf der Oberfläche **115** des Substrats **210** überwachsen werden oder es

können Partikel in die Mehrschichtstruktur **240** eingebaut werden (in der **Fig. 2** ebenfalls nicht gezeigt).

[0070] Die Defekte des Maskenrohlings **250** können ihren Ausgangspunkt im Substrat **210**, an der Vorderseite oder der Oberfläche **115** des Substrats **210**, in der Mehrschichtstruktur **240** und/oder an der Oberfläche **260** des Maskenrohlings **250** haben (in der **Fig. 2** nicht gezeigt). Defekte **220**, die an der Vorderseite **115** des Substrats **210** existent sind, können - anders als in der **Fig. 2** dargestellt - während der Ausbreitung in der Mehrschichtstruktur **240** sowohl ihre lateralen Abmessungen als auch ihre Höhe ändern (vgl. die nachfolgende **Fig. 4**). Dies kann in beide Richtungen geschehen, d.h. ein Defekt kann in der Mehrschichtstruktur **240** wachsen oder schrumpfen und/oder kann seine Form ändern. Defekte eines Maskenrohlings **250**, die ihren Ursprung nicht ausschließlich auf der Oberfläche **260** der Deckschicht **130** haben, werden im Folgenden auch als vergrabene Defekte bezeichnet.

[0071] Wie bereits oben erwähnt, können verschiedene weitere Defekttypen in einem Maskenrohling **250** vorhanden sein. Neben Vertiefungen **220** des Substrats **210** können lokale Ausbeulungen (englisch: bumps) auf der Oberfläche **115** des Substrats **210** auftreten. Diese können beispielsweise als Folge eines Polierprozesses der Oberfläche **115** des Substrats **210** entstehen.

[0072] Das Beispiel der **Fig. 3** repräsentiert einen Schnitt durch den lokalen Defekt **320**, der die Form einer Ausbeulung der Vorderseite **115** des Substrats **230** aufweist. Der lokale Defekt **320** pflanzt sich ähnlich wie in der **Fig. 2** im Wesentlichen unverändert durch die Mehrschichtstruktur **340** hindurch fort. In den Beispielen der **Fig. 2** und **Fig. 3** weisen die Defekte **220** und **320** eine Rotationssymmetrie auf und die Oberflächenkonturen **270**, **370** können in erster Näherung durch ein Gauß-förmiges Profil beschrieben werden. Aufgrund der finalen Schritte des Herstellungsverfahrens der Maskensubstrate **210**, **310** weisen Maskensubstrate häufig Defekte auf, die diese Symmetrie besitzen. Es ist jedoch nicht notwendig, dass die Defekte der Maskenrohlinge **250**, **350** diese Form aufweisen, damit diese mit Hilfe des in dieser Anmeldung beschriebenen Verfahrens repariert werden können.

[0073] Es ist aufwändig, Defekte der Mehrschichtstruktur **240** zu detektieren, die sich an der Oberfläche **260** nicht abzeichnen, aber trotzdem zu sichtbaren Fehlern beim Belichten einer EUV-Maske führen. Das Diagramm **400** der **Fig. 4** zeigt schematisch einen Schnitt durch einen Ausschnitt eines Maskenrohlings **450**, dessen Substrat **410** an der Oberfläche **115** eine lokale Ausbeulung **420** aufweist. Der lokale Defekt **420** breitet sich in der Mehrschichtstruktur **440** aus. Die Ausbreitung **470** führt in dem Beispiel der

Fig. 4 zu einer allmählichen Abschwächung der Höhe des Defekts **420**, die gleichzeitig mit einer Vergrößerung seiner lateralen Abmessungen einhergeht. Die letzten Schichten **120**, **125** der Mehrschichtstruktur **440** sind im Wesentlichen eben. Auf der Deckschicht **130** kann im Bereich des Defekts **420** keine Erhebung bestimmt werden.

[0074] Das Diagramm **500** der **Fig. 5** veranschaulicht eines der Probleme, die der Defekt **320** bzw. dessen Verlauf **380** in der Mehrschichtstruktur **340** hervorruft. Die einfallenden EUV-Photonen **180** erzeugen eine ebene einlaufende Phasenfront **190**. Anders als die ideale EUV-Maske **100** der **Fig. 1** erzeugen die EUV-Photonen **585**, die im Bereich des Defekts **320** bzw. der Kontur **380**, die der Defekt **320** in der Mehrschichtstruktur **340** generiert, von der Mehrschichtstruktur **340** reflektiert werden, eine gestörte Phasenfront **595**. Ähnliche Defekte in der Phasenfront der auslaufenden elektromagnetischen Wellen erzeugen die Defekte **220** und **420** der **Fig. 2** und **Fig. 4**. Die gestörte Phasenfront **595** verringert den von einem Belichtungssystem nutzbaren Fokusbereich oder macht Einsatz einer EUV-Maske, die einen der Defekte **270**, **370** und/oder **420** aufweist gänzlich unmöglich.

[0075] Die **Fig. 6** zeigt schematisch eine Reparaturform **600**, die eine abbildende Struktur **610** in Form einer Fresnelschen Zonenplatte **605** aufweist. In dem Beispiel der **Fig. 6** bilden die Zonen **620**, **630**, **640**, **650** und **660** den ersten Bereich **670** der abbildenden Struktur **610**. Die ungeradzahlig Beugungsordnungen der Zonen **620**, **630**, **640**, **650**, **660** sind für EUV-Photonen **180** transparent, so dass die EUV-Photonen **180** in den Zonen **620**, **630**, **640**, **650** und **660** der Zonenplatte **605** keine Abschwächung erfahren. Die durch die transparenten Zonen **620**, **630**, **640**, **650** und **660** tretenden EUV-Photonen **180** werden jedoch beim Durchtritt durch die entsprechende Zone gebeugt. Die Zonen **625**, **635**, **645** und **655** der Zonenplatte **605** der abbildenden Struktur **610** für die geraden Beugungsordnungen weisen ein Material und eine Dicke des Materials auf, so dass auf die Zonen **625**, **635**, **645**, **665** auftreffende EUV-Photonen **180** beim Durchtritt durch diese Zonen im Wesentlichen eine Phasenänderung von π erfahren. Für eine Optimierung des Wirkungsgrades der Zonenplatte **605** ist es günstig, wenn die Absorption der Zonen **625**, **635**, **645**, **655** möglich gering ist. Derzeit gibt es jedoch kein Material, das bei einer Dicke, die zu einer Phasenverschiebung von 180° in den Zonen **625**, **635**, **645** und **655** mit gerader Beugungsordnung führt, eine vernachlässigbare Absorption aufweist. Bei dem in der **Fig. 6** dargestellten Beispiel einer abbildenden Struktur **610** handelt es sich somit um eine Kombination aus einer Amplitudenzonenplatte und einer Phasenzonenplatte.

[0076] Die **Fig. 7** präsentiert die Beugungseffizienz oder den Beugungswirkungsgrad in der ersten Beugungsordnung η_1 einer Zonenplatte als Funktion der Phasenverschiebung Φ zwischen benachbarten Zonen der Zonenplatte. Die Kurvenschar wird durch die Größe $k = \beta/\delta$ parametrisiert. Dabei beschreibt β den Imaginärteil der komplexen Brechzahl und δ steht für die Abweichung des Realteils der komplexen Brechzahl von 1 ($n = n - i\beta = 1 - \delta - i\beta$). Das Diagramm der **Fig. 7** ist dem Buch Bergmann Schäfer „Optik“, Kap. 10.2, S. 1015, 10. Auflage, de Gruyter entnommen. Es zeigt, dass Phasenzonenplatten, für die gilt: $k = \beta = 0$, eine deutlich größere Beugungseffizienz aufweisen als Amplitudenzonenplatten ($k > 1$). Bei der Defektreparatur ist es deshalb das Bestreben ein Material für die Zonenplatte **605** der abbildenden Struktur **610** der Reparaturform **600** auszuwählen, dessen Absorptionskoeffizient bei der aktinischen Wellenlänge der EUV-Maske möglichst klein ist, um den Beugungswirkungsgrad der Zonenplatte **605** zu maximieren. Derzeit bevorzugte Materialien zum Herstellen einer Zonenplatte **605** sind beispielsweise Molybdän (Mo) und/oder Niob (Nb).

[0077] Wieder mit Bezug auf die **Fig. 6** weist die Zonenplatte **605** in dem Beispiel der **Fig. 6** neun Zonen **620** bis **660** auf. Für nicht zu große Zonenzahlen n ist der Radius r_n der n -ten Zone für den Einfall einer ebenen Welle auf die Zonenplatte **610** gegeben durch

$$r_n = \sqrt{n \cdot \lambda \cdot f} \quad (\text{vgl. Hecht Zajac, „Optics“, S. 376, Addison Wesley}).$$

Dies bedeutet, bei vorgegebener Wellenlänge bestimmen die Radien der einzelnen Zonen die Brennweite der Konvexlinse, die die abbildende Struktur **610** in Form der Zonenplatte **605** bildet. Für typische Defektmaße mit Höhen oder Vertiefungen im Bereich von einigen Nanometern und lateralen Abmessungen der Defekte **220**, **320** und **420** im zweistelligen Nanometerbereich weist eine Reparaturform **600**, die eine abbildende Struktur **610** in Form der Zonenplatte **605** aufweist, für zehn Zonen eine laterale Abmessung im dreistelligen Nanometerbereich auf. Simulationsergebnisse zeigen, dass eine Zonenplatte **605** mit zehn Zonen einen Fokussierungseffekt für die hindurchtretenden EUV-Photonen aufweist, der ausreichend ist, den Phasenanteil eines typischen Defekts **220**, **320**, **420** der Mehrschichtstruktur **240**, **340**, **440** zu kompensieren.

[0078] Das Diagramm **800** der **Fig. 8** zeigt die Mehrschichtstruktur **340** des Maskenrohrlings **350** der **Fig. 3**. Über den Defekt **370** ist eine Reparaturform **600** in Form einer Zonenplatte **610** abgeschieden worden, d.h. in dem Beispiel der **Fig. 8** weist die abbildende Struktur **610** eine Fresnelsche Zonenplatte **605** auf. Das Abscheiden der Reparaturform **600** wie auch das Ermitteln der Reparaturform **600** kann mit Hilfe der in der **Fig. 14** präsentierten Apparatur erfolgen. Als Material wurde in dem in der **Fig. 8** dargestellten Beispiel Molybdän verwendet. Wie bereits oben ausgeführt, wurde die Dicke der einzelnen Zo-

nen so gewählt, dass die EUV-Photonen bei deren Durchtritt durch die Zonen **625**, **635**, **645** und **655** eine Phasenänderung von 180° oder π erfahren. Wie aus der **Fig. 8** ersichtlich ist, kompensiert die Reparaturform **600**, die eine abbildende Struktur **610** in Form der Zonenplatte **605** aufweist, die durch den Defekt **320** verursachte Phasenstörung. Die Phasenfront **895** der auslaufenden EUV-Photonen **885** weist im Wesentlichen die Form der Phasenfront **190** der einfallenden EUV-Photonen **180** auf.

[0079] Durch Bestimmen entsprechender abbildender Strukturen in Form individuell designter Zonenplatten können die Defekte **220** und **420** der Mehrschichtstrukturen **240** und **440** ebenfalls repariert werden.

[0080] Für die Phasenstörungen der Defekte **220** und **420** der Mehrschichtstrukturen **240**, **440** der Maskenrohlinge **250** und **450** können individuell auf den jeweiligen Defekt abgestimmte abbildende Strukturen in Form von Zonenplatten bestimmt werden. Durch Abscheiden der entsprechenden abbildenden Strukturen als Reparaturform auf dem jeweiligen Defekt **220** und **420**, kann die Verschiebung der Phase dieser Defekte kompensiert werden.

[0081] Der in dieser Anmeldung beschriebene Reparaturprozess hat den großen Vorteil, dass die Mehrschichtstruktur **240**, **340**, **440** einer EUV-Maske nicht verändert werden muss. Ein teilweises Entfernen der Deckschicht **130** von der Oberfläche der Mehrschichtstruktur **240**, **340**, **440** kann bewirken, dass Teile der Mehrschichtstruktur **230**, **340**, **440** während des Reparaturprozesses in unbeabsichtigter Weise verändert werden können, die einen weiteren Einsatz der reparierten EUV-Maske ausschließen. Bei einem hier beschriebenen Reparaturprozess kann dies nicht passieren. Sollten beim Ermitteln der Reparaturform **600** und/oder beim Abscheiden der ermittelten Reparaturform **600** auf den Defekt **220**, **320**, **420** Probleme auftreten, muss im schlimmsten Fall die Reparaturform **600** wieder von der Mehrschichtstruktur **240**, **340**, **440** entfernt werden. Bei diesem Prozess ist die Mehrschichtstruktur **240**, **340**, **440** durch die unbeschädigte Deckschicht **130** geschützt.

[0082] Die Symmetrie der abbildenden Struktur **610** in Form einer Zonenplatte **605** folgt aus der Symmetrie der Defekte **220**, **320**, **420**. Dies bedeutet jedoch nicht, dass die hier diskutierten Verfahren zum Korrigieren von Defekten der Mehrschichtstruktur **240**, **340**, **440** von EUV-Masken auf die hier beschriebenen rotationsymmetrischen Defekte **220**, **320** und **420** oder die rotationssymmetrischen Defekte **220**, **320** mit einer Gauß-förmigen Oberflächenkontur **290**, **390** beschränkt sind. Vielmehr kann eine Reparaturform **600** eine abbildende Struktur **610** umfassen, die ausgelegt ist, eine Phasenstörung eines Defekts

mit einer beliebigen Oberflächenkontur zu reparieren. Die abbildende Struktur **610** kann aus der Überlagerung einer auf die abbildende Struktur **610** einlaufenden ebenen elektromagnetischen Welle und einer vom Fokus der abbildenden Struktur ausgehenden elektromagnetischen Welle mit Hilfe der Simulation bestimmt werden

[0083] Das Diagramm der **Fig. 9** zeigt mit der Kurve **910** einen Schnitt durch das Intensitätsprofil eines simulierten Luftbildes einer EUV-Maske. Die Mehrschichtstruktur der EUV-Maske weist einen Defekt in Form einer lokalen Erhebung (bump) mit einer Höhe von 5 nm und einer Gauß-förmigen Oberflächenkontur mit einer Breite von 20 nm bei einem Abfall auf e^{-2} auf. Der Kurve **910** ist zu entnehmen, dass der Defekt zu einer Reduktion der normierten reflektierten optischen Intensität von etwa 1,0 etwa 0,7 führt.

[0084] Die Kurve **920** repräsentiert das Intensitätsprofil eines simulierten Luftbildes nach der Reparatur des Defekts. Zur Reparatur des Defekts wurde eine Reparaturform **600** bestimmt, die eine abbildende Struktur **610** in Form einer Fresnelschen Zonenplatte **605** aufweist. Die Zonenplatte **605** der Reparaturform **600** zum Reparieren des Defekts der **Fig. 9** weist 16 Zonen auf. Im zweiten Schritt wurde die reflektierte optische Intensitätsverteilung im Bereich des reparierten Defekts simuliert. In der Simulation des reparierten Defekts wurden die optischen Eigenschaften von Molybdän zugrunde gelegt. Die Variation der optischen Intensitätsverteilung über den reparierten Defekt hinweg ist geringer als 0,1.

[0085] Neben einer Verringerung der Variation der optischen Intensität über den Defekt hinweg um etwa einen Faktor drei, konnte zusätzlich die optische Intensität im Bereich des Defekts verglichen mit der Kurve **910** geringfügig angehoben werden. Die Variation des optischen Intensitätsverlaufs über den Defekt hinweg kann weiter verbessert werden, indem die Anzahl der Zonen der Zonenplatte **605** erhöht wird.

[0086] Wie bereits ausgeführt, hat die abbildende Struktur **610** der Reparaturform **600** die Variation der optischen Intensität über den Defekt hinweg deutlich verringert. Allerdings ist das Niveau der aus dem Bereich des Defekts reflektierten optischen Intensität insgesamt abgesunken. Durch eine kompensierende Reparatur des Absorber-Patterns kann die Verringerung der reflektierten optischen Intensität korrigiert werden.

[0087] Die **Fig. 10** zeigt eine Aufsicht auf einen Ausschnitt aus einer EUV-Maske **1000**. Auf der Oberfläche der Mehrschichtstruktur **1040** der EUV-Maske **1000** sind drei Elemente eines Absorber-Patterns **1070** in Form von Streifen aufgebracht. Zwischen dem mittleren und dem rechten Streifen weist die EUV-Maske **1000** den Defekt **1020** auf. Um den De-

fekt **1020** zu reparieren, wird in einem ersten Schritt eine Reparaturform **600** für den Defekt **1020** ermittelt. Die Reparaturform umfasst eine abbildende Struktur **1010** in Form einer Fresnelschen Zonenplatte **1005**. Die abbildende Struktur **1010** der **Fig. 10** ist ausgelegt, um die von dem Defekt **1020** hervorgerufene Phasenstörung zu reparieren. Zusätzlich umfasst die Reparaturform **600** der **Fig. 10** die beiden Änderungen **1030** und **1040** des Absorber-Patterns **1070**. Die beiden Änderungen **1030** und **1040** des Absorber-Patterns **1070** beinhalten das Entfernen von Teilen des Absorber-Patterns **1070** zum Korrigieren der Amplitudenstörung des Defekts **1020**. Das Ausmaß der Änderungen **1030** und **1040** wird im Rahmen der Ermittlung der Reparaturform **600** bestimmt. Beim Bestimmen der Änderungen **1030** und **1040** des Absorber-Patterns **1070** wird die Intensitätsänderung, die von der abbildenden Struktur **1010**, d.h. den zweiten Bereichen **680** der Zonenplatte **1005**, verursacht wird, berücksichtigt. In dem in der **Fig. 10** dargestellten Beispiel beinhaltet die Reparaturform **600** die abbildende Struktur **1010** und die Änderungen **1030** und **1040** des Absorber-Patterns **1070**.

[0088] In einem zweiten Schritt wird die Reparaturform **600** auf der EUV-Maske **1000** erzeugt, indem zunächst die Teile des Absorber-Patterns **1070** mittels eines Teilchenstrahl-induzierten Ätzverfahrens entfernt werden, die die Änderungen **1030** und **1040** erfordern. Ein Teilchenstrahl-induziertes Ätzverfahren kann beispielsweise mit Hilfe eines Elektronenstrahls und Xenondifluorid (XeF_2) als Ätzgas ausgeführt werden. Sodann wird mit Hilfe eines Elektronenstrahl-assistierten Abscheideverfahrens die abbildende Struktur **1010** auf dem Defekt **1020** deponiert. Anstelle eines Elektronenstrahls kann zum Ändern des Absorber-Patterns **1070** und zum Abscheiden der abbildenden Struktur **1010** auch ein Ionenstrahl und/oder ein Photonenstrahl eingesetzt werden. Ein Elektronenstrahl weist den Vorteil auf, dass bei großer Effizienz des ausgeführten Prozesses keine oder nur sehr geringe Schäden an der EUV-Maske **1000** durch den Reparaturprozess des Defekts **1020** erzeugt werden.

[0089] Die **Fig. 11** zeigt eine Aufsicht auf einen Ausschnitt einer EUV-Maske **1100**. Auf der Oberfläche von deren Mehrschichtstruktur **1140** ist wiederum ein Absorber-Pattern **1070** aufgebracht. Der Ausschnitt der **Fig. 11** präsentiert drei Streifen des Absorber-Patterns **1070**. In der Nähe des mittleren Streifens weist die Mehrschichtstruktur **1140** einen Defekt **1120** auf, der teilweise durch das Absorber-Pattern **1070** überdeckt wird.

[0090] In einer ersten Alternative wird für den sichtbaren und damit in jedem Fall wirksamen Teil des Defekts eine Reparaturform **600** ermittelt. Die Reparaturform **600** kann zusätzlich ein Entfernen von Teilen des Absorber-Patterns **1070**, um den Defekt **1120**

herum, beinhalten. Die Reparaturform **600** wird dann, wie im Kontext der Diskussion der **Fig. 10** beschrieben, auf dem Defekt **1120** erzeugt.

[0091] Dieses Vorgehen weist jedoch zwei Nachteile auf. Zum einen muss der an der Oberfläche sichtbare Teil des Defekts nicht mit seiner Wirkung innerhalb der Mehrschichtstruktur **1140** übereinstimmen. Zum anderen kann durch ein Entfernen von Teilen des Absorber-Patterns **1070** in der Nähe des Defekts **1120** die Wirkung des Defekts in unbeabsichtigter Weise verstärkt werden.

[0092] Die **Fig. 12** und **Fig. 13** beschreiben deshalb eine zweite Art der Korrektur des Defekts **1120**. Wie in der **Fig. 12** dargestellt, wird in einem ersten Schritt ein Teil **1250** der Absorber-Struktur **1070** um den Defekt **1120** herum entfernt. Dies kann durch einen Teilchenstrahl-induzierten Ätzprozess erfolgen. Wie bereits im Kontext der **Fig. 10** erwähnt, kann beispielsweise das Entfernen des Teils **1250** des Absorber-Patterns **1070** mit Hilfe eines Elektronenstrahls und des Ätzgases Xenondifluorid (XeF_2) erfolgen.

[0093] Für den nun freigelegten Defekt **1120** wird eine Reparaturform **600** bestimmt, die das Ermitteln einer abbildenden Struktur **1210** in Form einer Fresnelschen Zonenplatte **1205** umfasst. In einem nächsten Schritt werden sodann Änderungen **1270** und **1280** des Absorber-Patterns **1070** bestimmt, die zum einen die Amplitudenstörung des Defekts **1120** reparieren und die Absorption der zweiten Bereiche **680** der abbildenden Struktur **1210** berücksichtigen und zum anderen die durch das Entfernen des Teils **1250** des Absorber-Patterns **1070** bewirkte Änderung der im Bereich des Defekts **1120** reflektierten Strahlung minimieren. In dem in der **Fig. 13** dargestellten Beispiel beinhaltet die Reparaturform **600** die abbildende Struktur **1210** und die Änderungen **1270** und **1280** des Absorber-Patterns **1070**. Das Abscheiden der Teile **1270** und **1280** des Absorber-Patterns **1070** kann beispielsweise mit Hilfe eines Teilchenstrahl-induzierten Depositionsprozess erfolgen. Ein Teilchenstrahl-induzierter Depositionsprozess kann etwa mit einem Elektronenstrahl und einem Metallcarbonyl, beispielsweise mit einem Chromcarbonyl oder einem Titancarbonyl ausgeführt werden.

[0094] Die **Fig. 14** zeigt schematisch im Schnitt einige Komponenten einer Vorrichtung **1400** die zum Ausführen der oben erläuterten Verfahrensschritte eingesetzt werden kann. Das in der **Fig. 14** dargestellte Beispiel präsentiert eine Kombination aus einem Rasterteilchenmikroskop **1405** in Form eines Rasterelektronenmikroskops (SEM) **1405** und einem Rastersondenmikroskop **1440** in Form eines Rasterkraftmikroskops **1440**. Wie bereits oben ausgeführt, hat ein Elektronenstrahl als Teilchenstrahl hat den Vorteil, dass dieser eine EUV-Maske **1410** im Wesentlichen nicht oder nur in geringem Umfang schä-

digen kann. Es sind jedoch auch andere geladene Teilchenstrahlen möglich, etwa ein Ionenstrahl eines FIB (Focused Ion Beam) Systems (in der **Fig. 14** nicht dargestellt).

[0095] Das SEM **1405** umfasst als wesentliche Komponenten eine Teilchenkanone **1415** und eine Säule **1418**, in der die Elektronenoptik oder Strahloptik **1420** angeordnet ist. Die Elektronenkanone **1415** erzeugt einen Elektronenstrahl **1422** und die Elektronen- oder Strahloptik **1420** bündelt den Elektronenstrahl **1422** und richtet ihn am Ausgang der Säule **1418** auf die EUV-Maske **1410**, die mit den EUV-Masken **1000** und **1100** der **Fig. 10** bis **Fig. 13** identisch sein kann.

[0096] Die EUV-Maske **1410** wird auf einem Probenstisch **1425** angeordnet. Wie in der **Fig. 14** durch die Pfeile symbolisiert, kann der Probenstisch **1425** in drei Raumrichtungen relativ zum Elektronenstrahl **1422** des SEM **1405** bewegt werden.

[0097] Die Vorrichtung **1400** beinhaltet einen Detektor **1428** zum Nachweisen der von dem einfallenden Elektronenstrahl **1422** am Messpunkt **1430** erzeugten Sekundärelektronen oder rückgestreuten Elektronen. Der Detektor **1428** wird von der Steuereinrichtung **1485** gesteuert. Ferner empfängt die Steuereinrichtung **1485** der Vorrichtung **1400** die Messdaten des Detektors **1428**. Die Steuereinrichtung **1485** kann aus den Messdaten Bilder erzeugen, die auf einem Monitor **1490** dargestellt werden. Die Vorrichtung kann zusätzlich einen Detektor zum Detektieren der vom einfallenden Elektronenstrahl **1422** erzeugten Photonen aufweisen (in der **Fig. 14** nicht dargestellt). Beispielsweise kann dieser Detektor das Energiespektrum der erzeugten Photonen spektral auflösen und somit Rückschlüsse auf die Zusammensetzung der Oberfläche bzw. oberflächennaher Schichten der EUV-Maske **1410** ermöglichen.

[0098] Darüber hinaus kann die Messvorrichtung **1400** eine Ionenquelle umfassen, die niederenergetische Ionen im Bereich des Messpunktes **1430** bereitstellt, die verhindern, dass die EUV-Maske **1410** bzw. deren Oberfläche eine negative Oberflächenladung aufweist (in der **Fig. 14** nicht dargestellt). Mit Hilfe einer Ionenquelle kann eine negative Aufladung der EUV-Maske **1410** lokal und kontrolliert verringert werden und damit eine laterale Ortsauflösung des Elektronenstrahls **1422** verhindert werden.

[0099] Falls die EUV-Maske **1410** eine unerwünschte Verteilung positiver Oberflächenladungen aufweisen sollte, verursacht etwa durch das Handling der EUV-Maske **1410**, kann der Elektronenstrahl **1422** benutzt werden, um die Aufladung der EUV-Maske **1410** zu verringern.

[0100] Der Elektronenstrahl **1422** der Vorrichtung **1400** kann zum Analysieren der Defekte **220**, **320**, **420**, **1020** und **1120** eingesetzt werden. Damit ist der Elektronenstrahl **1422** der Vorrichtung **1400** zum Bestimmen der Defekte **220**, **320**, **420**, **1020**, **1120** geeignet.

[0101] Wie bereits oben ausgeführt, umfasst die beispielhafte Vorrichtung **1400** neben einem SEM **1405** auch ein Rastersondenmikroskop **1440** in Form eines Rasterkraftmikroskops (AFM, atomic force microscope) **1440**. Die **Fig. 14** zeigt einen schematischen Schnitt durch einige wichtige Komponenten eines Rastersondenmikroskops **1440**. Das Rastersondenmikroskop **1440** beinhaltet einen Messkopf **1442**. Der Messkopf **1442** umfasst eine Haltevorrichtung **1445**. Mittels der Haltevorrichtung **1445** ist der Messkopf **1442** am Rahmen der Vorrichtung **1400** befestigt (in der **Fig. 14** nicht gezeigt). An der Haltevorrichtung **1445** des Messkopfes **1442** ist ein Piezo-Aktuator **1447** angebracht, der eine Bewegung des freien Endes des Piezo-Aktuators **1447** in drei Raumrichtungen ermöglicht (in der **Fig. 14** nicht dargestellt). Am freien Ende des Piezo-Aktuators **1447** ist ein Biegebalken **1448** befestigt, der im Folgenden, wie im Fachgebiet üblich, Cantilever **1448** genannt wird. Das den Piezo-Aktuator **1447** entgegengesetzte Ende des Cantilevers **1448** trägt eine Messspitze **1450**. Die Messspitze **1450** kann eine pyramidenförmige Form aufweisen.

[0102] Der Cantilever **1448** und die Messspitze **1450** können einstückig ausgeführt werden. Beispielsweise kann der Cantilever **1448** und die Messspitze **1450** aus einem Metall, wie etwa Wolfram, Kobalt, Iridium, einer Metalllegierung oder aus einem Halbleiter, wie etwa Silizium oder Siliziumnitrid gefertigt werden. Es ist auch möglich, den Cantilever **1448** und die Messspitze **1450** als zwei getrennte Komponenten zu fertigen und anschließend miteinander zu verbinden. Dies kann beispielsweise durch Kleben erfolgen.

[0103] Der Messkopf **1442** kann einen Sensor umfassen, der beim Scannen der Messspitze **1450** über die Oberfläche der EUV-Maske **1410** Messdaten an das Computersystem **1485** der Vorrichtung übermittelt (in der **Fig. 14** nicht dargestellt). Der Sensor kann ein Lichtzeigersystem und/oder einen piezoresistiven Sensor umfassen. Aus diesem Daten kann das Computersystem **1485** ein Bild der Oberfläche der EUV-Maske **1410** ermitteln und auf dem Monitor oder Display **1495** des Computersystems **1485** darstellen.

[0104] Das Computersystem **1485** umfasst eine Schnittstelle **1487**. Über diese Schnittstelle kann das Computersystem **1485** mit einem Detektor eines Lasersystems, einem AIMS™ (Aerial Image Metrology System) und/oder einem Belichtungssystem für photolithographische Masken verbunden werden (in der **Fig. 14** nicht dargestellt). Über die Schnittstel-

le **1487** kann das Computersystem **1485** Messdaten der oben genannten beispielhaften Instrumente erhalten. Insbesondere kann das Computersystem **1485** über die Schnittstelle **1487** Messdaten eines Fokusstapels von Luftbildmessungen oder Messungen, die ein Durchstimmen eines AIMS™ durch den Fokus der EUV-Maske **1410** erhalten. Aus diesen Messdaten kann das Computersystem **1485** die von einem Defekt **220, 320, 420, 1020, 1120** ausgehende Phasenstörung einer von der EUV-Maske **1410** im Bereich des Defekts **220, 320, 420, 1020, 1120** reflektierten Phasenfront **595** rekonstruieren.

[0105] Das Computersystem **1485** umfasst ferner eine Scan-Einheit, die den Elektronenstrahl **1422** über die EUV-Maske **1410** scannt. Die Scan-Einheit steuert Ablenkelemente in der Säule **1418** des SEM **1405**, die in der **Fig. 14** nicht dargestellt sind. Ferner umfasst das Computersystem **185** eine Einstelleinheit um die verschiedenen Parameter des SEM **1405** einzustellen und zu kontrollieren. Von der Einstelleinheit einstellbare Parameter können beispielsweise sein: die Vergrößerung, der Fokus des Elektronenstrahl **1422**, eine oder mehrere Einstellungen des Stigmators, die Strahlverschiebung, die Position der Elektronenquelle und/oder eine oder mehrere Blenden (in der **Fig. 14** nicht dargestellt).

[0106] Die Vorrichtung **1400** zum Bestimmen eines Defekts **220, 320, 420, 1020, 1120** zum Ermitteln einer Reparaturform **600** für den Defekt und zum Erzeugen der Reparaturform **600** auf dem Defekt **220, 320, 420, 1020, 1120** umfasst bevorzugt mehrere verschiedene Vorratsbehälter für verschiedene Gase oder Präkursorgase. In der beispielhaften Vorrichtung **1400** der **Fig. 14** sind drei Vorratsbehälter **1455, 1460** und **1465** dargestellt. Eine Vorrichtung **1400** kann jedoch auch mehr als drei Vorratsbehälter zum Bearbeiten einer EUV-Maske **1410**, d.h. zum Erzeugen einer Reparaturform **600** aufweisen.

[0107] Der erste Vorratsbehälter **1455** speichert ein Präkursorgas oder ein erstes Depositionsgas, das im Zusammenwirken mit dem Elektronenstrahl **1422** des SEM **1405** zum Abscheiden von Material in Form einer abbildenden Struktur **610, 1010, 1210** auf dem Defekt **220, 320, 420, 1020, 1120** der EUV-Maske **1410** benutzt werden kann. Der erste Vorratsbehälter **1455** kann ein Präkursorgas in Form eines Metallcarbonyl aufweisen, beispielsweise Molybdänhexacarbonyl.

[0108] Der zweite Vorratsbehälter **1460** beinhaltet ein Ätzgas, mit dessen Hilfe ein Teil des Absorber-Patterns **1070** von der Oberfläche der Mehrschichtstruktur **240, 340, 440, 1040** und **1140** der EUV-Maske **1410** geätzt werden kann. Beispielsweise kann der zweite Vorratsbehälter **1460** Xenondifluorid (XeF₂) umfassen. Alternative Ätzgase, die in dem Vorratsbehälter **1460** gespeichert werden können, sind bei-

spielsweise ein Halogen oder eine ein Halogen enthaltende Verbindung.

[0109] Der dritte Vorratsbehälter **1465** speichert zweites Depositionsgas, mit dessen Hilfe in einer Teilchenstrahl-induzierten Abscheidereaktion, z.B. unter Zuhilfenahme eines Elektronenstrahls **1422** ein Material als Teil des Absorber-Patterns **1070** auf der Mehrschichtstruktur **240, 340, 440, 1040, 1140** der EUV-Maske **1410** abgeschieden werden kann. Der dritte Vorratsbehälter kann beispielsweise ein Metallcarbonyl, z.B. Chromhexacarbonyl enthalten.

[0110] Jeder Vorratsbehälter **1455, 1460, 1465** ist mit einem eigenen Ventil **1456, 1461, 1466** ausgestattet, um die Menge der pro Zeiteinheit bereitgestellten Gaspartikel oder den Gasmengenstrom am Ort des Auftreffens **1430** des Elektronenstrahls **1422** auf die Oberfläche der EUV-Maske **1410** zu kontrollieren. Außerdem haben die drei Vorratsbehälter **1455, 1460, 1465** eigene Gaszuführungen **1457, 1462** und **1467**, die mit einer Düse **1458, 1463** und **1468** nahe am Auftreffpunkt **1430** des Elektronenstrahls **1422** auf der EUV-Maske **1410** enden. In der in der **Fig. 14** dargestellten beispielhaften Vorrichtung **1400** sind die Ventile **1456, 1461, 1466** in der Nähe der Vorratsbehälter **1455, 1460, 1465** eingebaut. In einer alternativen Ausführungsform können die Ventile **1456, 1461, 1466** in der Nähe der entsprechenden Düse **1458, 1463, 1468** angeordnet werden (in der **Fig. 14** nicht gezeigt). Jeder Vorratsbehälter **1450, 1455, 1460** kann sein eigenes Element zur individuellen Temperatureinstellung und Kontrolle aufweisen. Die Temperatureinstellung ermöglicht sowohl eine Kühlung als auch eine Heizung für jedes Gas. Zusätzlich können die Gaszuführungen **1452, 1457, 1462** ebenfalls jeweils ein eigenes Element zur Einstellung und zur Überwachung der Bereitstellungstemperatur der Gase am Reaktionsort aufweisen (in der **Fig. 14** ebenfalls nicht gezeigt).

[0111] Die Vorrichtung **1400** der **Fig. 4** kann ein Pumpensystem **1470** aufweisen, um das erforderliche Vakuum zu erzeugen und aufrechtzuerhalten. Darüber hinaus kann die Vorrichtung **1400** eine Absaugvorrichtung enthalten (in der **Fig. 14** nicht dargestellt). Die Absaugvorrichtung in Kombination mit dem Pumpensystem **1470** macht es möglich, dass die bei der Zerlegung eines Präkursorgas entstehenden Fragmente oder Bestandteile, die nicht für die lokale chemische Reaktion benötigt werden, im Wesentlichen am Ort des Entstehens aus der Vakuumkammer **1402** der Vorrichtung **1400** abzusaugen. Da die nicht benötigten Gasbestandteile lokal an der Stelle des Auftreffens des Elektronenstrahls **1422** auf die EUV-Maske **1410** aus der Vakuumkammer **1402** der Vorrichtung **1400** abgepumpt werden, bevor sie sich in dieser verteilen und absetzen können, wird eine Kontamination der Vakuumkammer **1402** verhindert.

[0112] Zur Initialisierung einer Ätzreaktion oder eines Abscheideprozesses wird in der beispielhaften Vorrichtung **1400** der **Fig. 14** vorzugsweise ausschließlich ein fokussierter Elektronenstrahl **1422** verwendet.

[0113] Schließlich zeigt die **Fig. 15** ein Flussdiagramm **1500** eines Ausführungsbeispiels des in dieser Anmeldung definierten Verfahrens zum Reparieren von Defekten **220, 320, 420, 1020, 1120** von EUV-Masken **1000, 1100**. Das Verfahren beginnt bei Schritt **1510**. Im ersten Schritt **1520** wird ein Defekt **220, 320, 420, 1020, 1120** bestimmt. Zum Bestimmen des Defekts können die Messinstrumente der Vorrichtung **1400** verwendet werden, d.h. der Elektronenstrahl **1422** des SEM **1405** und/oder die Messspitze **1450** des AFM **1440** können eingesetzt werden. Alternativ oder zusätzlich kann das Computersystem **1485** über die Schnittstelle **1487** Messdaten von weiteren Messgeräten erhalten.

[0114] Bei Schritt **1530** wird eine Reparaturform **600** für den Defekt **220, 320, 420, 1010, 1120** ermittelt, wobei die Reparaturform **600** beugungsbasiert ist, um eine Phasenstörung durch den Defekt zu berücksichtigen. Die Reparaturform **600** kann von dem Computersystem **1485** der Vorrichtung **1400** bestimmt werden. Dazu kann das Computersystem Algorithmen aufweisen, die in Hardware, Firmware, Software oder einer Kombination ausgeführt werden. Die Reparaturform **600** kann eine abbildende Struktur **610, 1010, 1210** und zusätzlich Änderungen **1030, 1040, 1270, 1280** des Absorber-Patterns **1070** umfassen.

[0115] In dem optionalen Schritt **1540** wird die ermittelte Reparaturform **600** durch Abscheiden einer abbildenden Struktur **610, 1010, 1210** auf zumindest einem Teil des zumindest einen Defekts **220, 320, 420, 1020, 1120** erzeugt. Schließlich endet das Verfahren bei Schritt **1550**.

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 1829052 B1 [0003]
- WO 2011/161243 [0012]
- WO 2013/010976 [0013]

Zitierte Nicht-Patentliteratur

- „EUV multilayer defect compensation (MDC) by absorber pattern modification - From theory to wafer validation“, der Autoren L. Peng, P. Hu, M. Satake, V. Tolani, D. Peng, Y. Li und D. Chen, in Photomask Technology 2011 [0008]
- W. Maurer, F.E. Abboud, Proc. of SPIE Vol. 8166, 81662E-1 - 81662E-15 [0008]
- „Compensation for EUV multilayer defects within arbitrary layouts by absorber pattern modification“ der Autoren L. Pang, C. Clifford, D. Peng, Y. Li, D. Chen, M. Satake, V. Tolani und L. He [0009]
- „Extreme Ultraviolet Lithography“, herausgegeben von B.M. La Fontaine, P.P. Naulleau, Proc. of SPIE Vol. 7969, 79691E-1-79691E-14 [0009]
- „The door opener for EUV mask repair“ der Autoren M. Waiblinger, R. Jonckheere, T. Bret, D. van den Heuvel, C. Baur und G. Baralia, in „Photomask and Next Generation Lithography Mask Technology XIX“ [0011]
- K. Kato, Proc. of SPIE, Vol. 84441, 84410F1 - 84410F-10, 2012 [0011]
- G. McIntyre, E. Gallagher, T. Robinson, A.C. Smith, M. Lawliss, J. LeClaire, R. Bozak, R. White und M. Archuletta in dem Artikel „Through-focus EUV multilayer defect repair with nanomachining“, in „Extreme Ultraviolet (EUV) Lithography IV“, herausgegeben von P.P. Naulleau, Proc. of SPIE, Vol. 8679, 86791I-1-86791I-4 [0015]

Patentansprüche

1. Verfahren zum Reparieren zumindest eines Defekts (220, 320, 420, 1020, 1120) einer photolithographischen Maske für den extrem ultravioletten (EUV) Wellenlängenbereich (1000, 1100), das Verfahren die Schritte aufweisend:

- a. Bestimmen des zumindest einen Defekts (220, 320, 420, 1020, 1120); und
- b. Ermitteln einer Reparaturform (600) für den zumindest einen Defekt (220, 320, 420, 1020, 1120);
- c. wobei die Reparaturform (600) beugungsbasiert ist, um eine Phasenstörung (595) durch den zumindest einen Defekt (220, 320, 420, 1020, 1120) zu berücksichtigen.

2. Verfahren nach Anspruch 1, wobei das Bestimmen des zumindest einen Defekts (220, 320, 420, 1020, 1120) zumindest einen der folgenden Schritte umfasst:

Analysieren des zumindest einen Defekts (220, 320, 420, 1020, 1120) mit einem Rastersondenmikroskop (1440), Analysieren des zumindest einen Defekts (220, 320, 420, 1020, 1120) mit einem Teilchenstrahl (1422), Erzeugen eines Luftbildes des zumindest einen Defekts (220, 320, 420, 1020, 1120) bei einer aktinischen Wellenlänge der photolithographischen Maske (1000, 1100), Erzeugen von Luftbildern eines Fokusstapels des zumindest einen Defekts (220, 320, 420, 1020, 1120) bei der aktinischen Wellenlänge der photolithographischen Maske (1000, 1100), und Belichten eines Wafers mit der photolithographischen Maske (1000, 1100).

3. Verfahren nach dem vorhergehenden Anspruch, wobei das Ermitteln der Reparaturform (600) umfasst: Rekonstruieren der Phasenstörung (595) des zumindest einen Defekts (220, 320, 420, 1020, 1120) aus dem Fokusstapel von Luftbildern des zumindest einen Defekts (220, 320, 420, 1020, 1120).

4. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei das Ermitteln der Reparaturform (600) umfasst: Bestimmen einer abbildenden Struktur (610, 1010, 1210) zum Abscheiden auf zumindest einem Teil des zumindest einen Defekts (220, 320, 420, 1020, 1120), wobei die abbildende Struktur (610, 1010, 1210) zumindest einen ersten Bereich (670) aufweist, der für elektromagnetische Strahlung bei einer aktinischen Wellenlänge transparent ist und zumindest einen zweiten Bereich (680) aufweist, der eine Phase der elektromagnetischen Strahlung bei der aktinischen Wellenlänge ändert und/oder die elektromagnetische Strahlung der aktinischen Wellenlänge zumindest teilweise absorbiert.

5. Verfahren nach dem vorhergehenden Anspruch, wobei das Bestimmen der abbildenden Struktur (610, 1010, 1210) umfasst: Bestimmen des zumindest einen ersten Bereichs (670) und des zumindest ei-

nen zweiten Bereichs (680), so dass eine Phase einer elektromagnetischen Welle bei der aktinischen Wellenlänge, die auf die abbildende Struktur (610, 1010, 1210) trifft, nach deren Reflexion durch den defekten Bereich einer Mehrschichtstruktur (240, 340, 440, 1040, 1140) im Wesentlichen keine Phasenstörung aufweist, verglichen mit einer elektromagnetischen Welle, die von einem defektfreien Bereich der Mehrschichtstruktur (240, 340, 440, 1040, 1140) der photolithographischen Maske (1000, 1100) reflektiert wird.

6. Verfahren nach Anspruch 4 oder 5, ferner den Schritt aufweisend: Bestimmen einer Brennweite der abbildenden Struktur (610, 1010, 1210) aus einem Krümmungsradius einer Oberflächenkontur (290, 390) des zumindest einen Defekts (220, 320, 420, 1020, 1120).

7. Verfahren nach einem der Ansprüche 4-6, wobei ein Material für die abbildende Struktur (610, 1010, 1210) gewählt wird, dessen $\beta/\delta < 1$, bevorzugt $< 0,7$, mehr bevorzugt kleiner $< 0,5$, und am meisten bevorzugt $< 0,3$ bei der aktinischen Wellenlänge ist, wobei δ die Abweichung des Realteils der komplexen Brechzahl von 1 bezeichnet und β den Imaginärteil der komplexen Brechzahl des Material bezeichnet.

8. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die abbildende Struktur (610, 1010, 1210) eine Fresnelsche Zonenplatte (605, 1005, 1205) umfasst.

9. Verfahren nach dem vorhergehenden Anspruch, wobei die Fresnelsche Zonenplatte (605, 1005, 1205) zumindest vier Zonen (620, 625, 630, 635), bevorzugt zumindest sechs Zonen (620, 625, 630, 635, 640, 645, 650, 655), mehr bevorzugt zumindest acht Zonen, und am meisten bevorzugt zumindest zehn Zonen umfasst.

10. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei das Ermitteln der Reparaturform (600) ferner umfasst: Bestimmen einer Änderung eines Teils eines Absorber-Patterns (1070), der dem zumindest einen Defekt (220, 320, 420, 1020, 1120) benachbart ist, zum zumindest teilweisen Korrigieren der durch den zumindest einen Defekt (220, 320, 420, 1020, 1120) verursachten Amplitudenstörung.

11. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die Reparaturform (600) die abbildende Struktur (610, 1010, 1210) und eine Änderung (1030, 1040, 1270, 1280) eines Teils des Absorber-Patterns (1070) umfasst.

12. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei das Ermitteln der Reparaturform (600) ferner den Schritt aufweist: Simulieren des Entferns eines Teils des Absorber-Patterns (1070),

der dem zumindest einen Defekt (220, 320, 420, 1020, 1120) benachbart ist, vor dem Ermitteln der Reparaturform (600).

13. Verfahren nach dem vorhergehenden Anspruch, wobei die Reparaturform (600) eine abbildende Struktur (610, 1010, 1210) und die Änderung (1030, 1040, 1270, 1280) des Absorber-Patterns (1070) umfasst und wobei die Änderung (1030, 1040) das Entfernen eines Teils des Absorber-Patterns (1070) aufweist oder wobei die Änderung (1270, 1280) das Abscheiden eines Teils des Absorber-Patterns (1070) aufweist.

14. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, ferner den Schritt aufweisend: Erzeugen der Reparaturform (600) durch Abscheiden der abbildenden Struktur (610, 1010, 1210) auf zumindest einem Teil des zumindest einen Defekts (220, 320, 420, 1020, 1120) mittels eines ersten Teilchenstrahls (1422) und eines ersten Depositionsgases.

15. Verfahren nach dem vorhergehenden Anspruch, wobei der erste Teilchenstrahl (1422) einen Elektronenstrahl (1422) umfasst und/oder das erste Depositionsgas ein Metallcarbonyl umfasst.

16. Computerprogramm, das Anweisungen aufweist, die, wenn sie von einem Computersystem ausgeführt werden, das Computersystem veranlassen, die Verfahrensschritte eines der Ansprüche 1-15 auszuführen.

17. Vorrichtung zum Reparieren zumindest eines Defekts (220, 320, 420, 1020, 1120) einer photolithographischen Maske für den extrem ultravioletten (EUV) Wellenlängenbereich (1000, 1100), aufweisend:

- a. Mittel zum Bestimmen des zumindest einen Defekts (220, 320, 420, 1020, 1120);
- b. Mitteln zum Ermitteln einer Reparaturform (600) für den zumindest einen Defekt (220, 320, 420, 1020, 1120), wobei die Reparaturform (600) beugungsbasiert ist, um eine Phasenstörung (595) durch den zumindest einen Defekt (220, 320, 420, 1020, 1120) zu berücksichtigen; und
- c. Mittel zum Erzeugen der Reparaturform (600) durch Abscheiden einer abbildenden Struktur (610, 1010, 1210) auf zumindest einem Teil des zumindest einen Defekts (220, 320, 420, 1020, 1120).

18. Vorrichtung nach Anspruch 17, wobei das Mittel zum Bestimmen des zumindest einen Defekts (220, 320, 420, 1020, 1120) ein Messinstrument aus der Gruppe umfasst: ein Rastersondenmikroskop (1440), ein Rasterteilchenmikroskop (1405), ein Lasersystem, ein AIMS™ (Aerial Image Metrology System) und ein photolithographisches Belichtungssystem.

19. Vorrichtung nach Anspruch 17 oder 18, wobei das Mittel zum Erzeugen der Reparaturform (600) Mittel zum Bereitstellen eines ersten Teilchenstrahls (1422) und zum Bereitstellen eines ersten Depositionsgases umfasst.

20. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 17-19, ferner aufweisend: Mittel zum Ändern (1030, 1040, 1270, 1280) eines Teils eines Absorber-Patterns (1070), wobei das Mittel zum Ändern eines Teils des Absorber-Patterns (1070) umfasst: Mittel zum Bereitstellen eines zweiten Teilchenstrahls (1422), eines zweiten Depositionsgases und eines Ätzgases.

Es folgen 15 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

Fig. 1

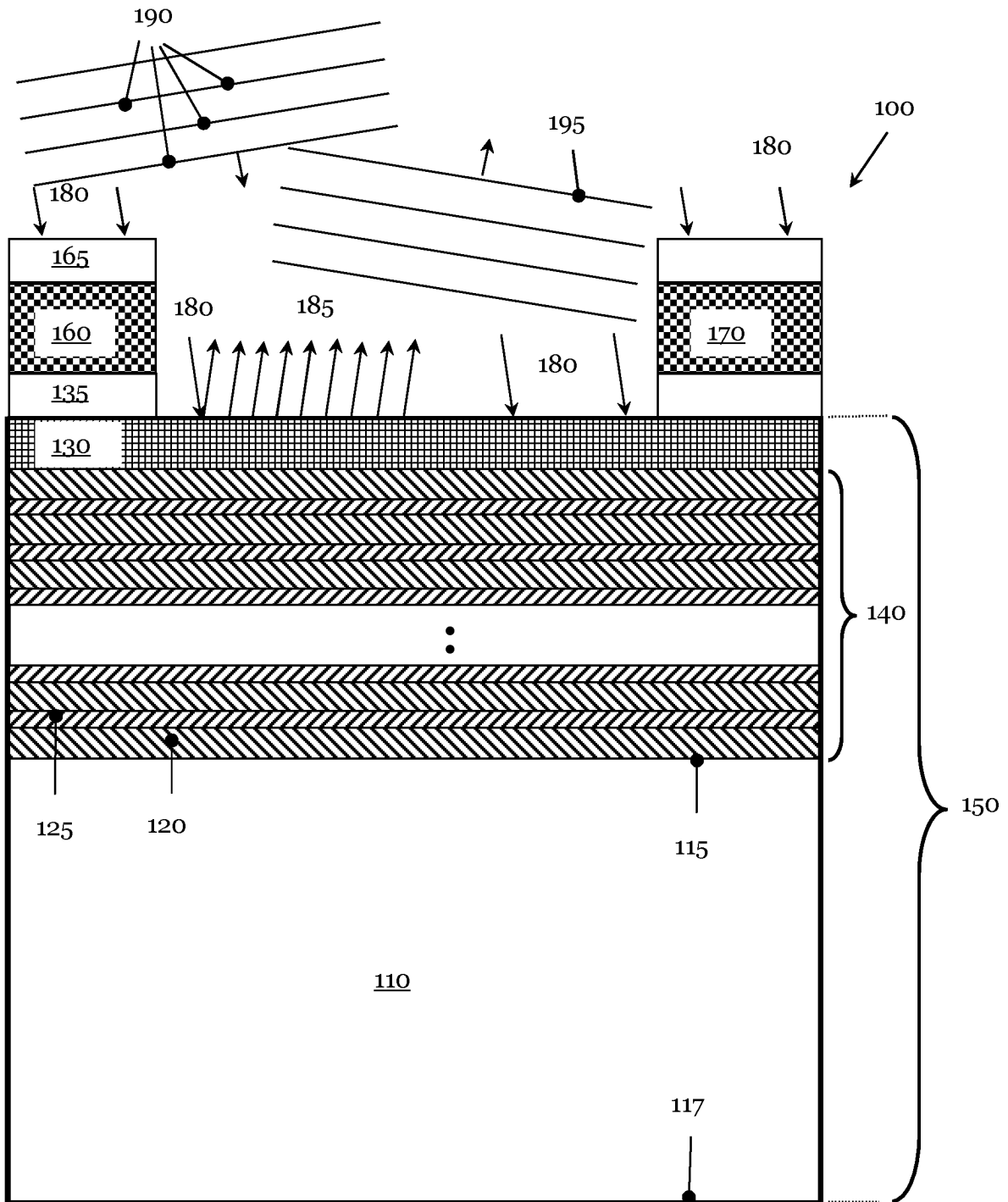


Fig. 2

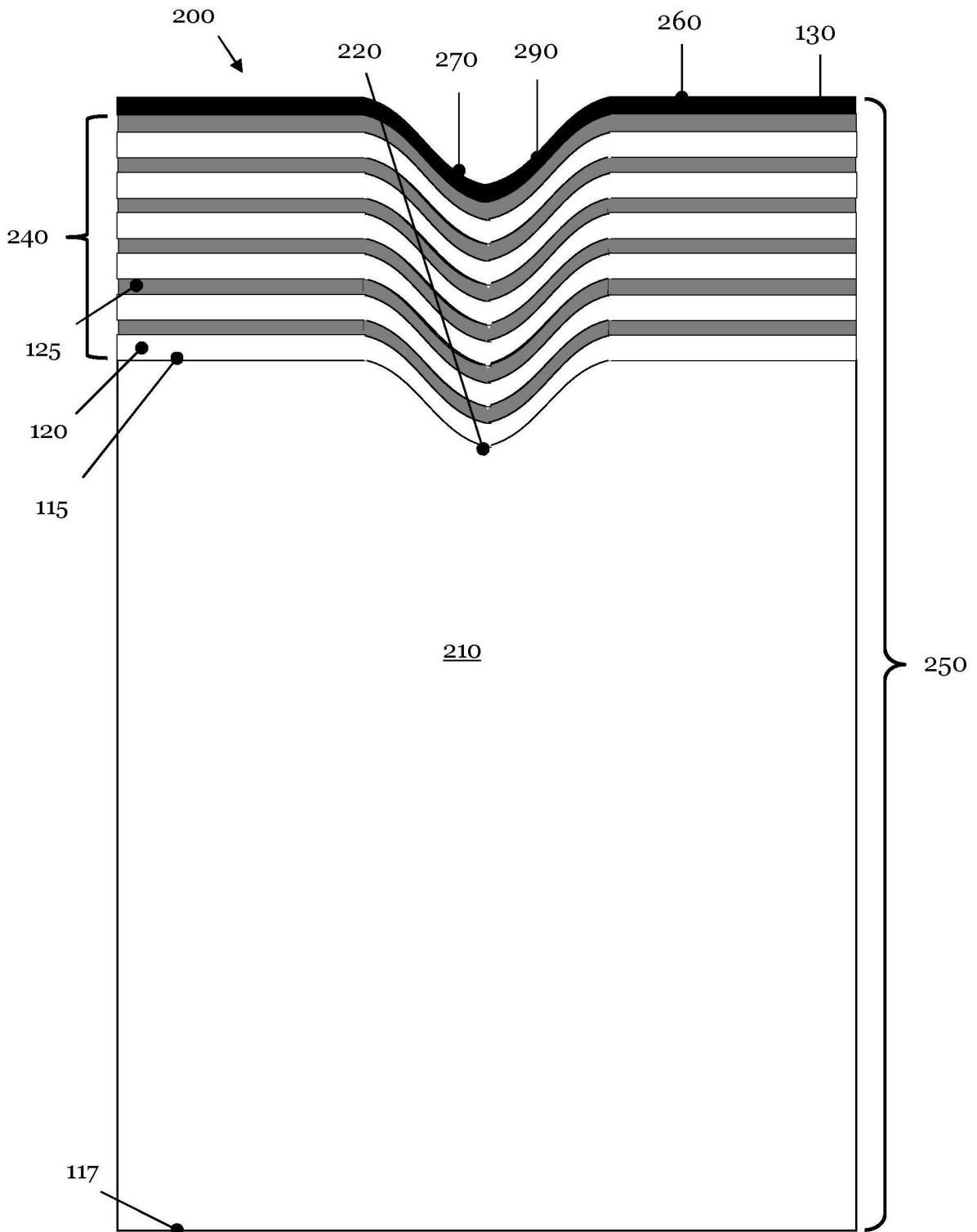


Fig. 3

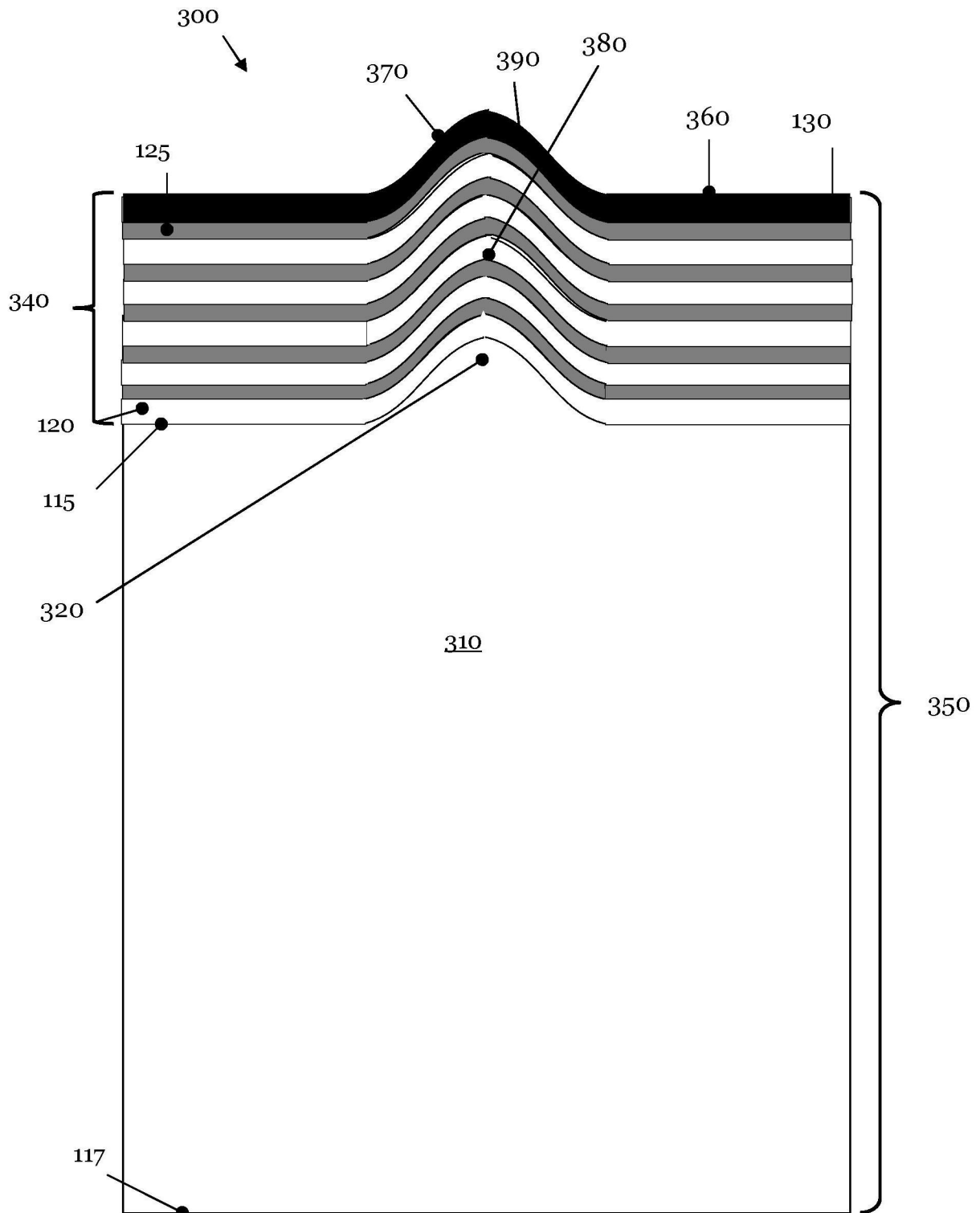


Fig. 4

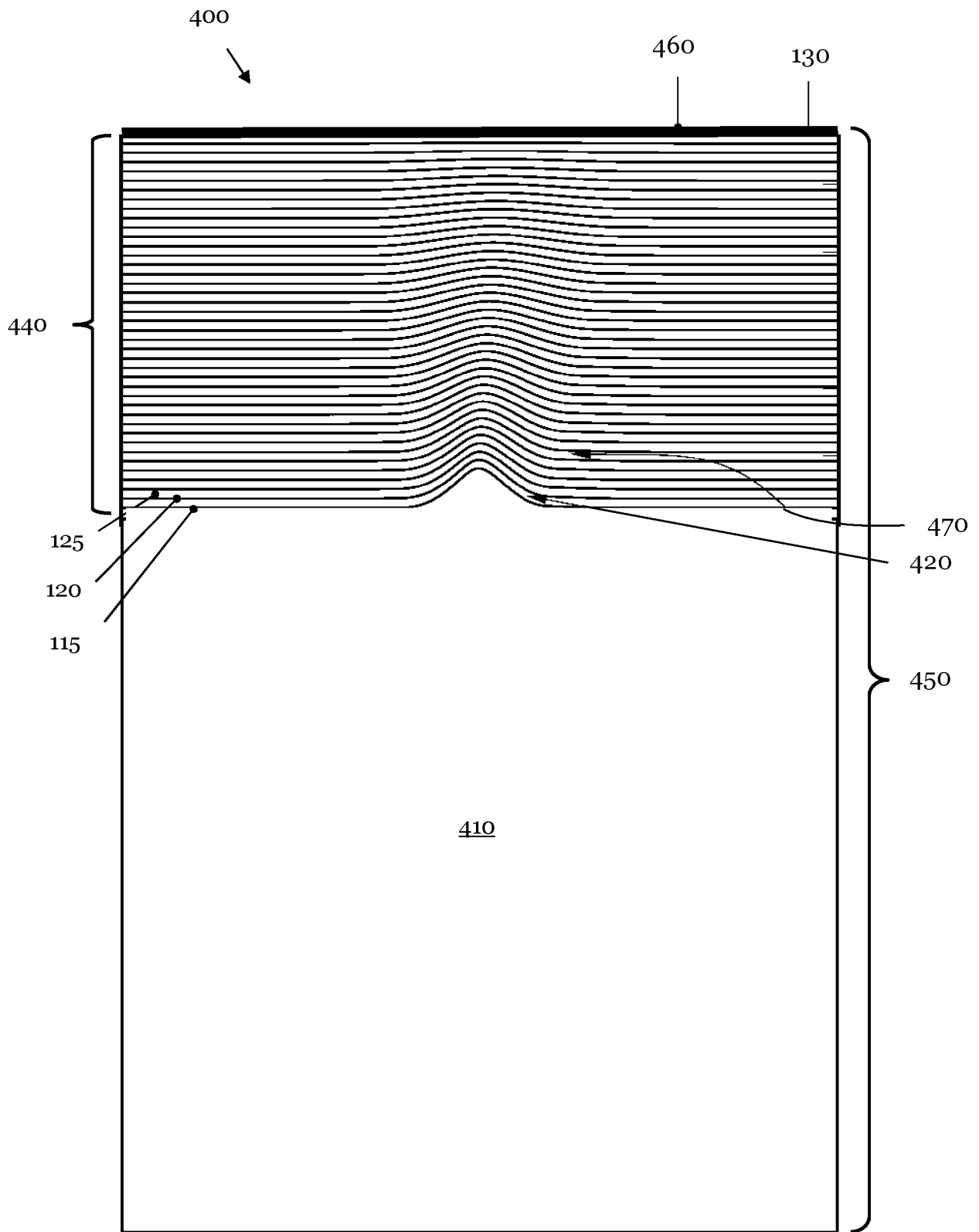


Fig. 5

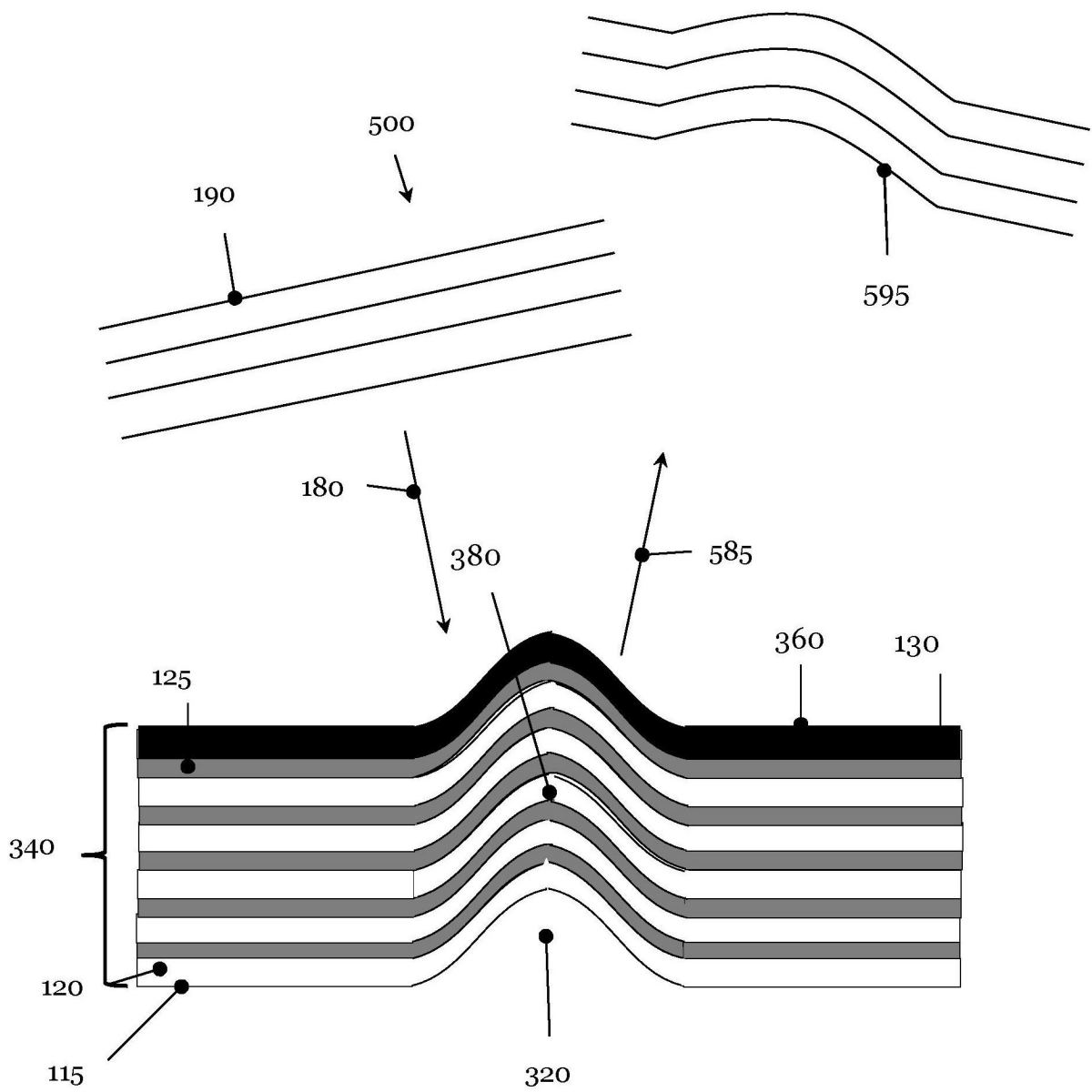


Fig. 6

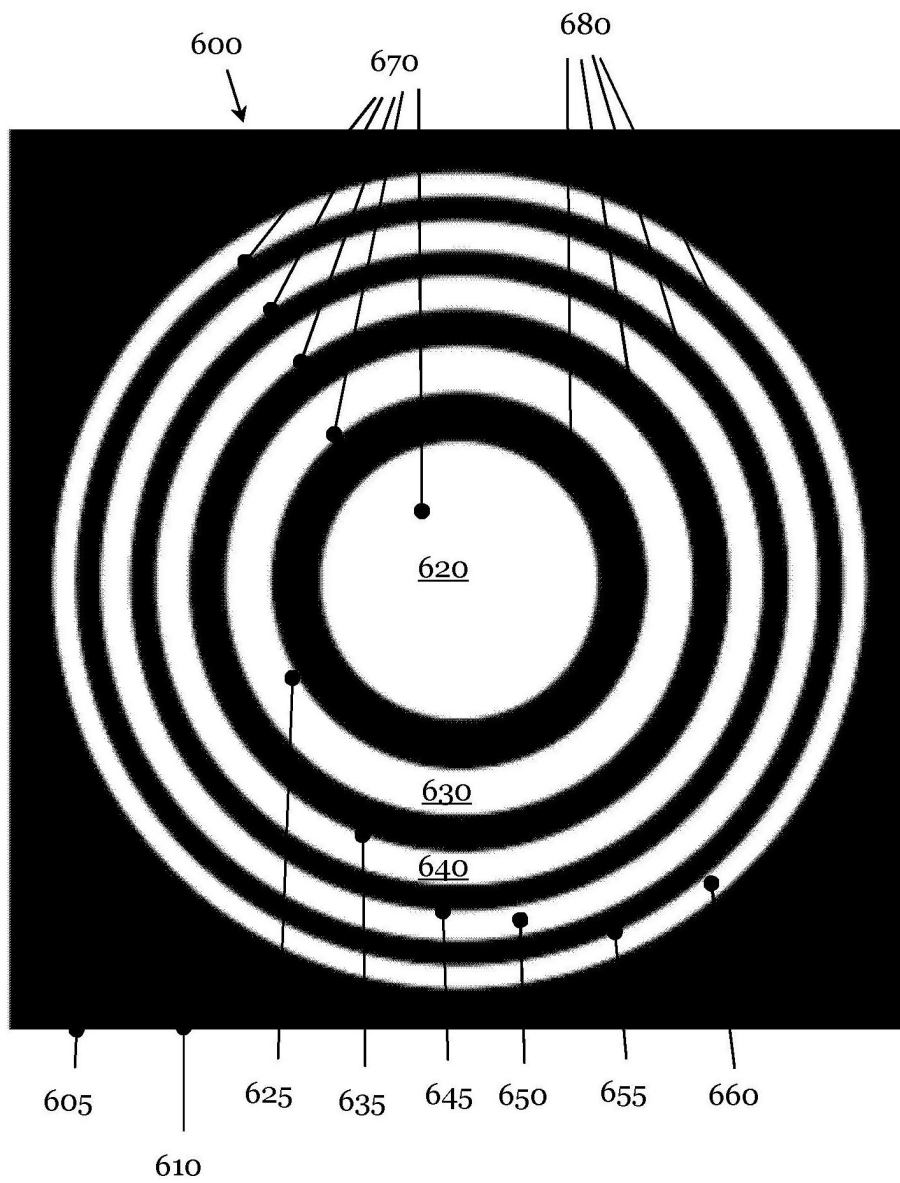


Fig. 7

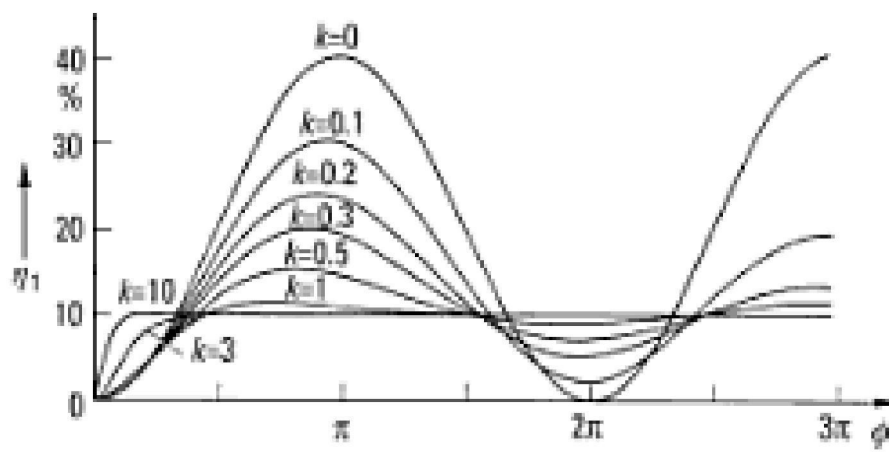


Fig. 8

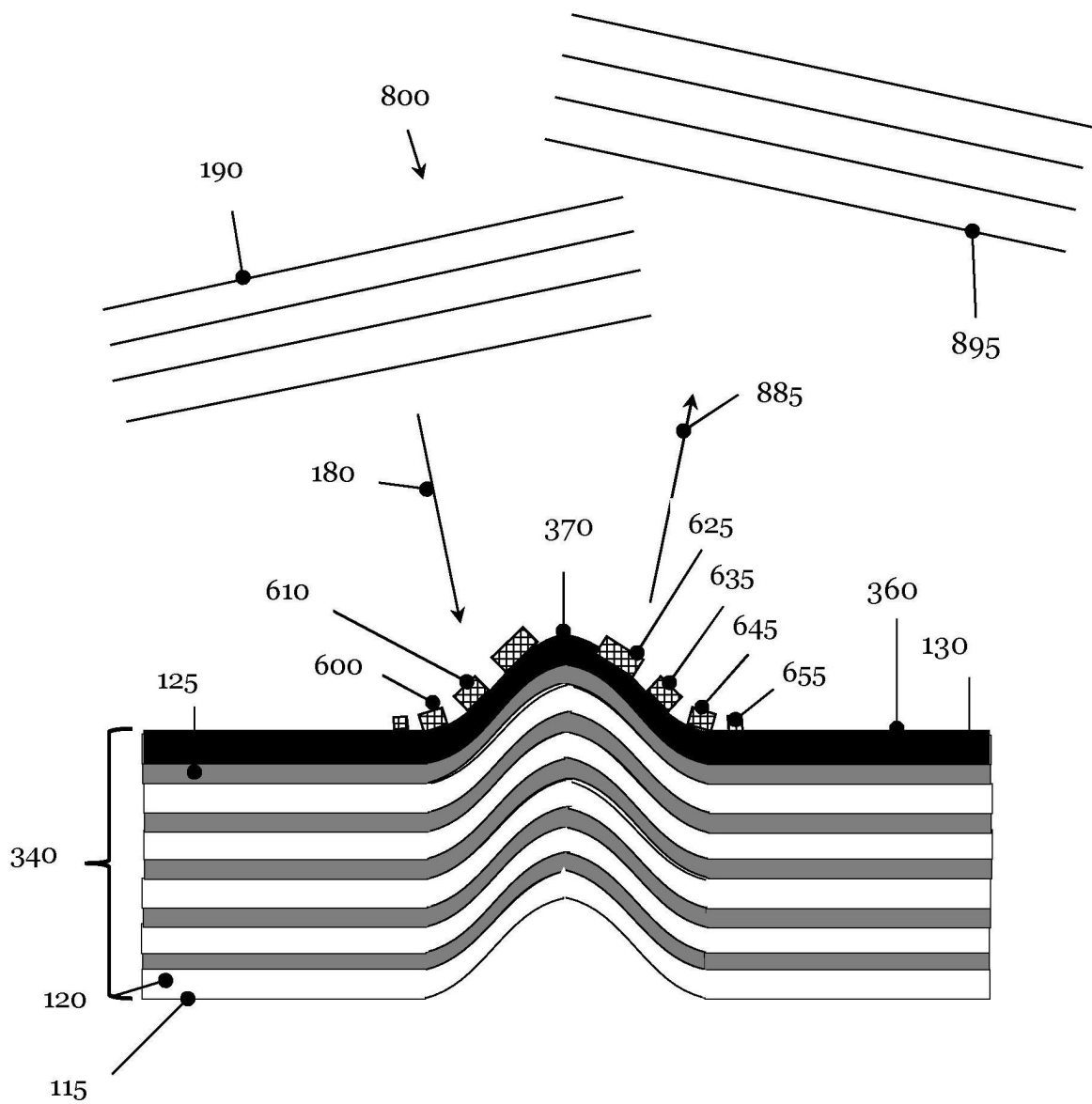


Fig. 9

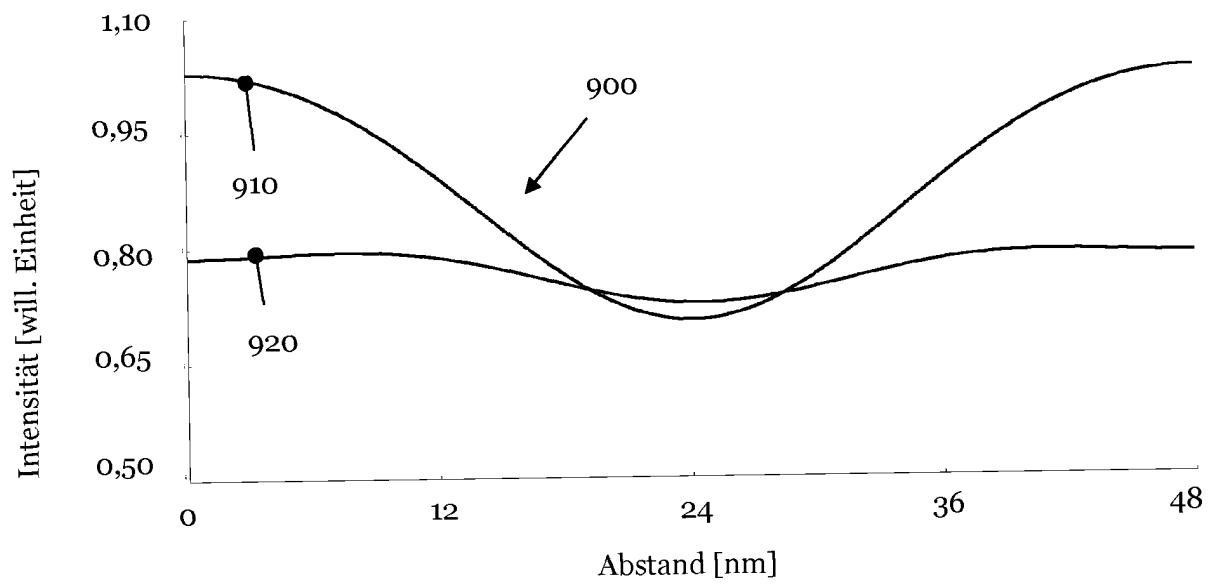


Fig. 10

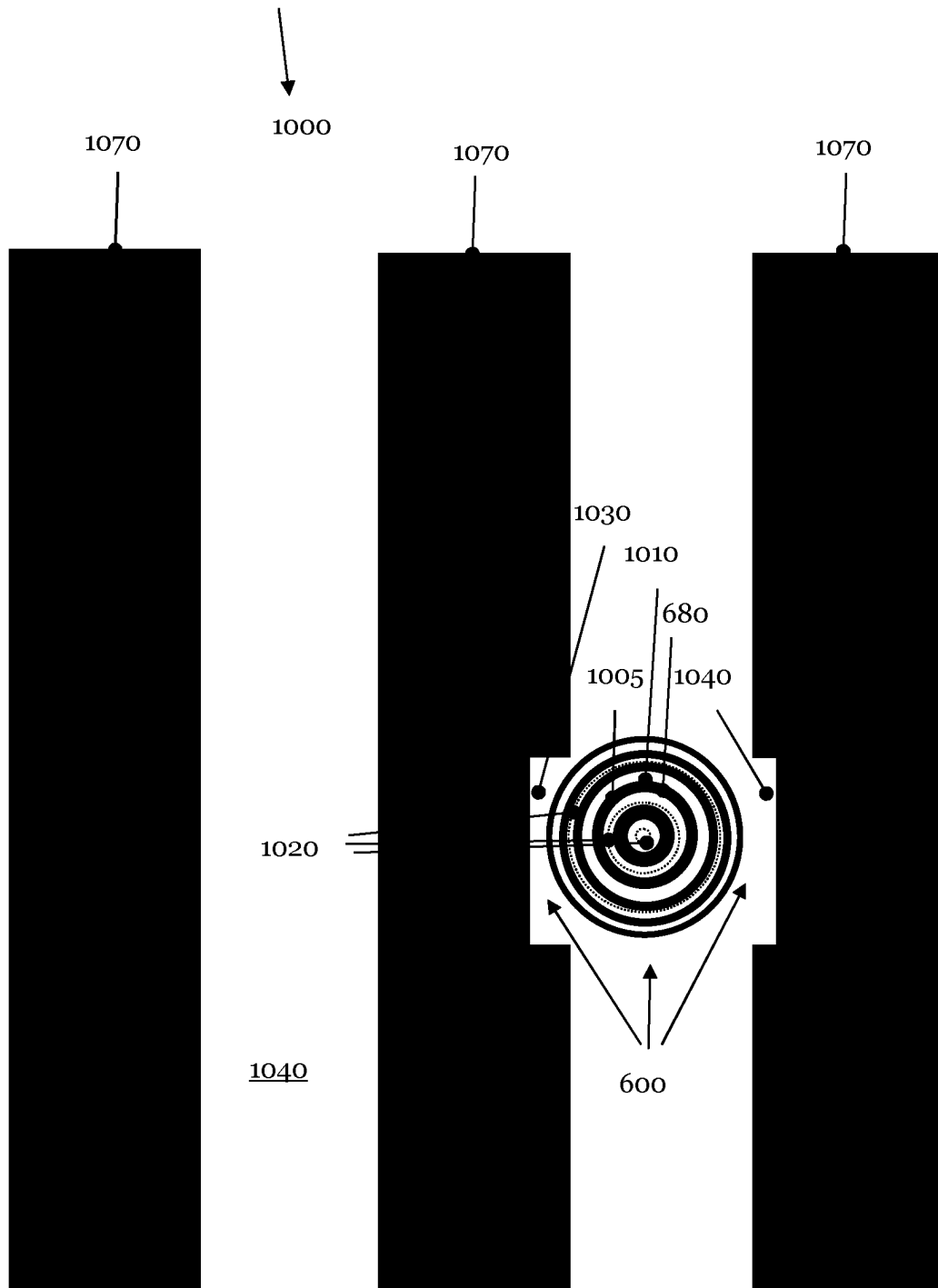


Fig. 11

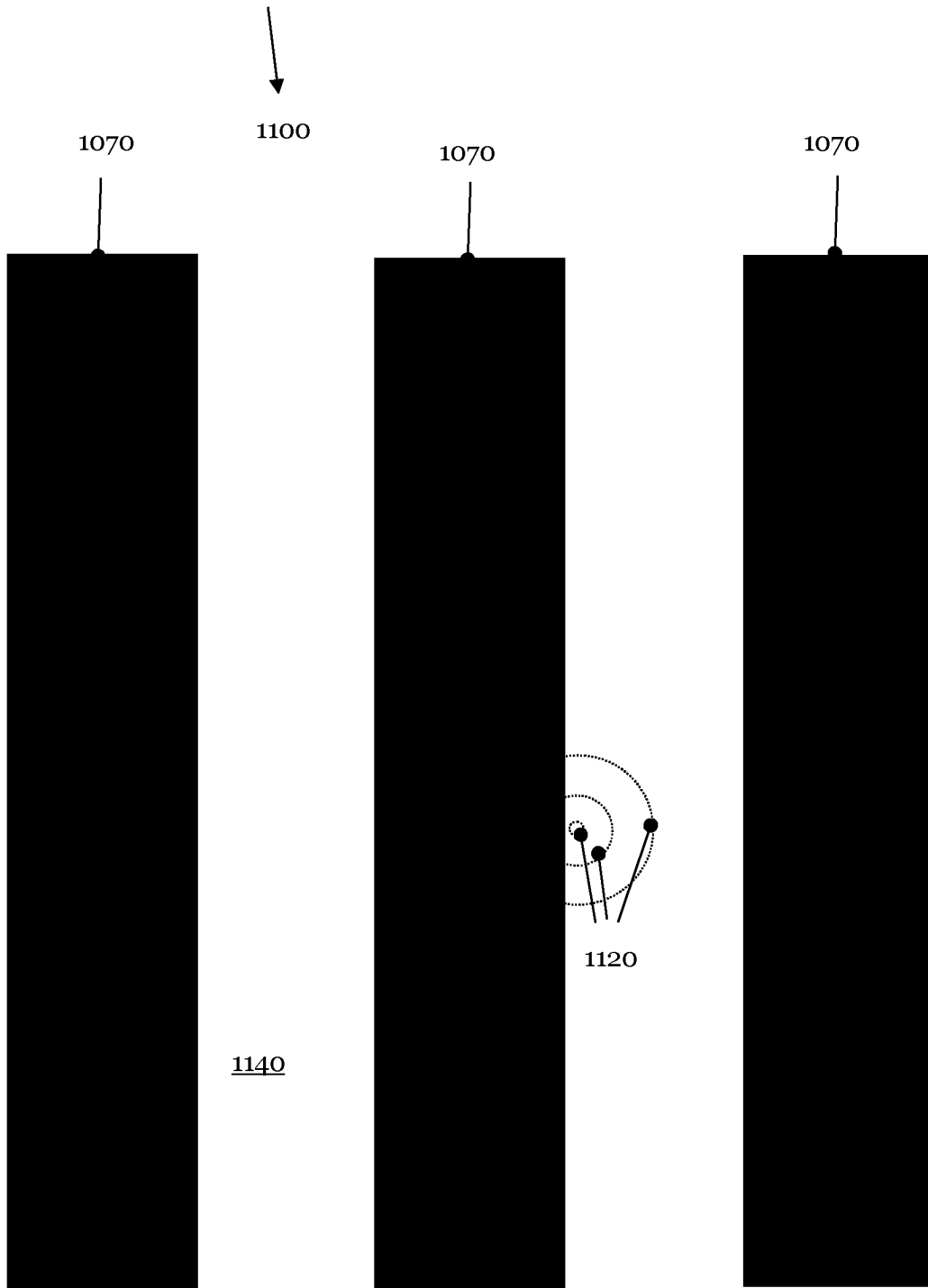


Fig. 12

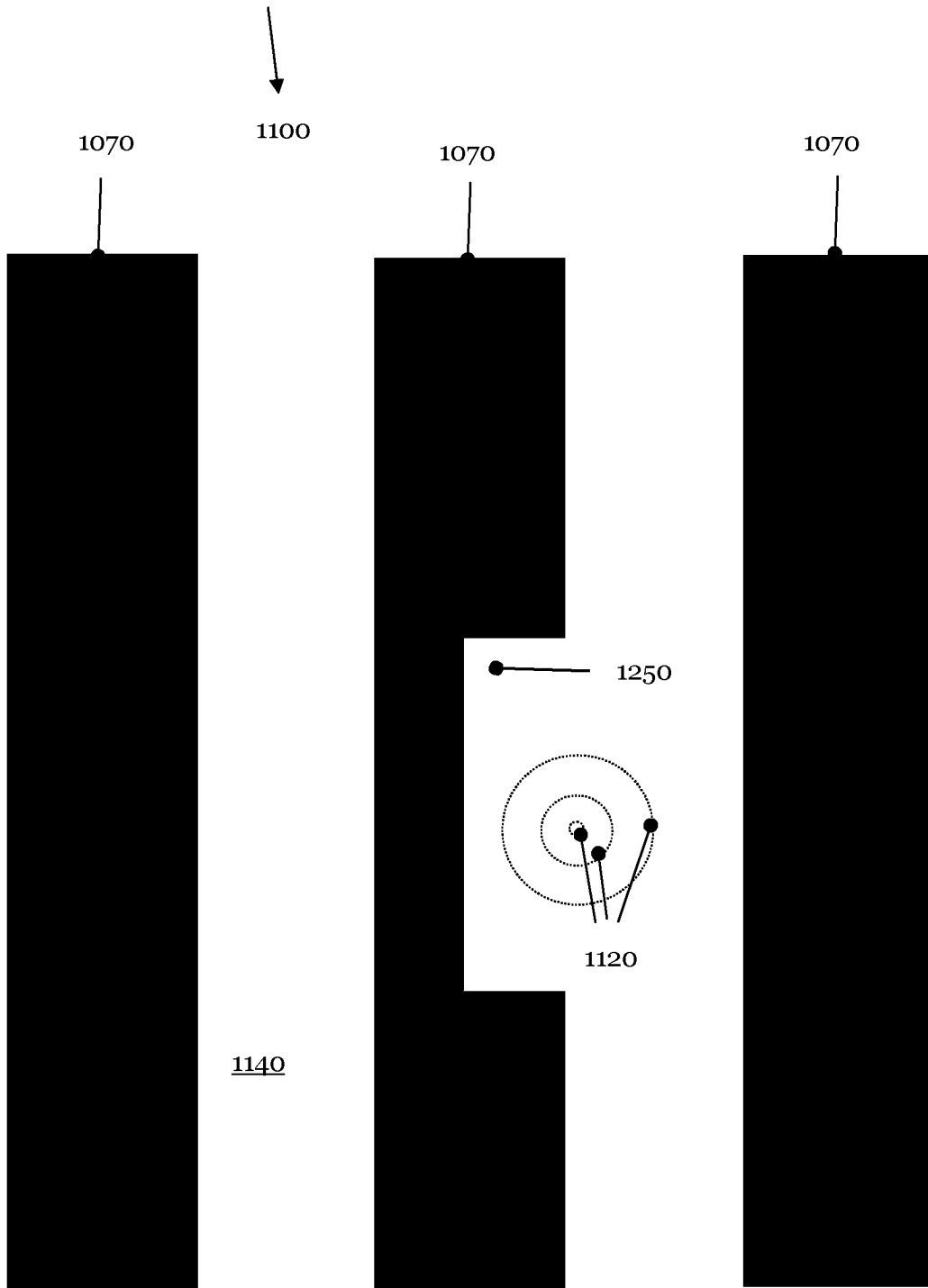


Fig. 13

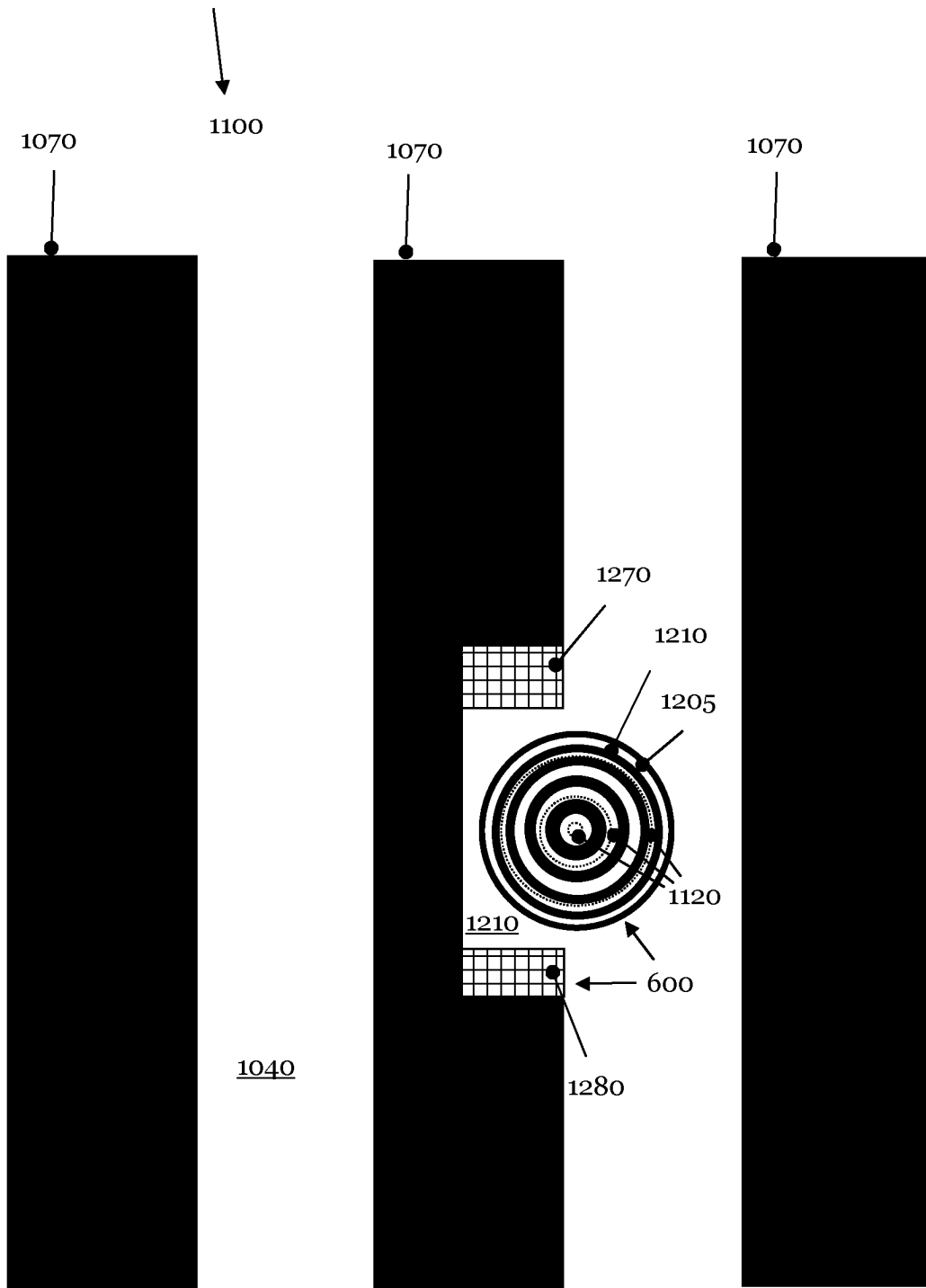


Fig. 14

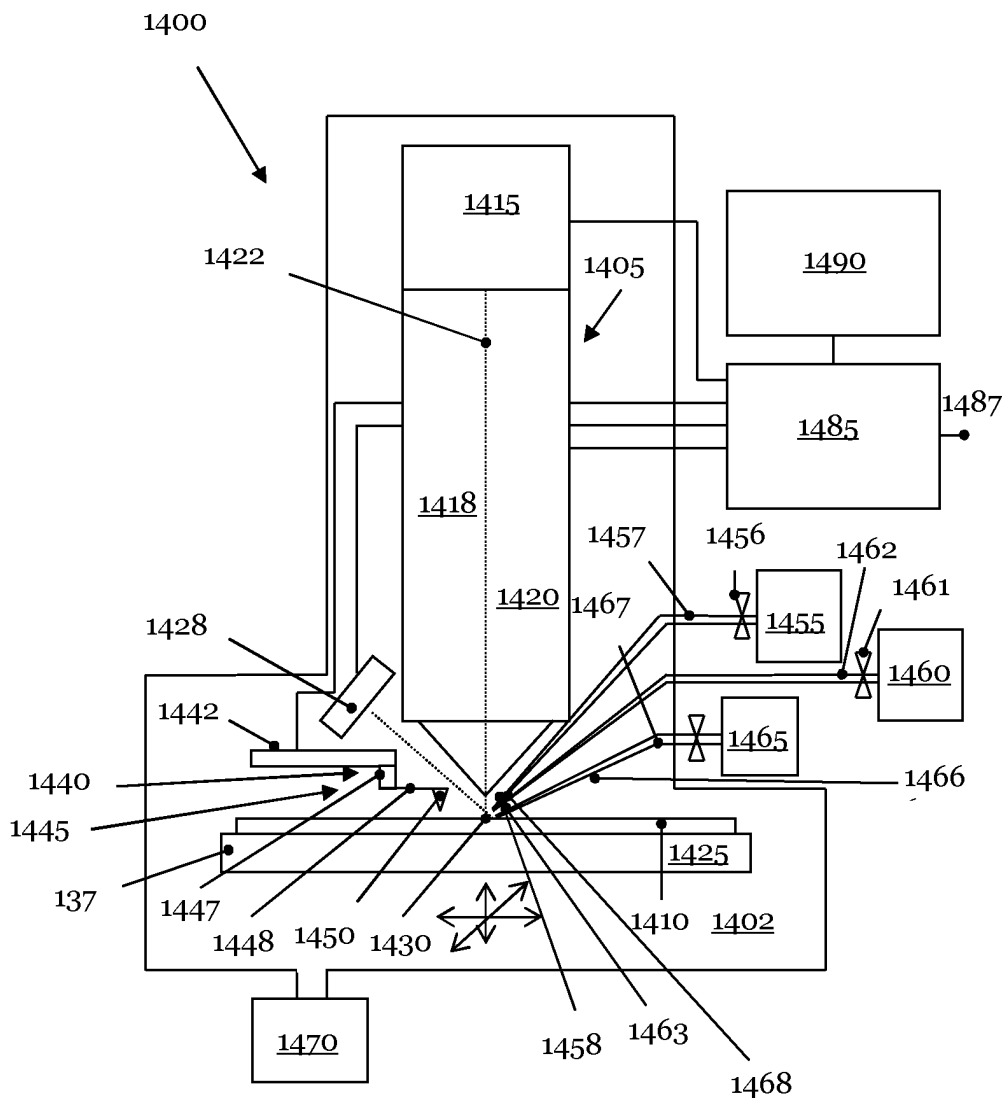


Fig. 15

