



(10) DE 10 2018 202 637 B4 2021.09.23

(12)

Patentschrift

(21) Aktenzeichen: **10 2018 202 637.8**
 (22) Anmelddatag: **21.02.2018**
 (43) Offenlegungstag: **22.08.2019**
 (45) Veröffentlichungstag
 der Patenterteilung: **23.09.2021**

(51) Int Cl.: **G01M 11/02 (2006.01)**
G03F 7/20 (2006.01)
G03F 1/84 (2012.01)

Innerhalb von neun Monaten nach Veröffentlichung der Patenterteilung kann nach § 59 Patentgesetz gegen das Patent Einspruch erhoben werden. Der Einspruch ist schriftlich zu erklären und zu begründen. Innerhalb der Einspruchsfrist ist eine Einspruchsgebühr in Höhe von 200 Euro zu entrichten (§ 6 Patentkostengesetz in Verbindung mit der Anlage zu § 2 Abs. 1 Patentkostengesetz).

(73) Patentinhaber:
Carl Zeiss SMT GmbH, 73447 Oberkochen, DE

(74) Vertreter:
**RAU, SCHNECK & HÜBNER Patentanwälte
 Rechtsanwälte PartGmbB, 90402 Nürnberg, DE**

(72) Erfinder:
**Koch, Markus, Dr., 89231 Neu-Ulm, DE; Hellweg,
 Dirk, Dr., 89129 Langenau, DE; Capelli, Renzo,
 Dr., 89522 Heidenheim, DE; Dietzel, Martin, 89537
 Giengen, DE**

(56) Ermittelter Stand der Technik:

US 2016 / 0 028 936 A1
US 2016 / 0 341 630 A1

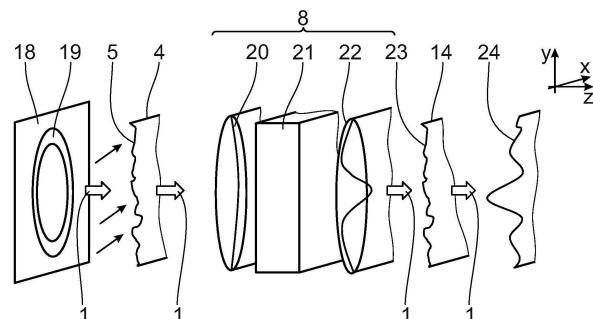
**Actinic Review of EUV Masks – Zeiss;
 D Hellweg; 03.06.2017; ZEISS https://www.zeiss.com/content/dam/smt/downloads/products_and_solutions/photomask-systems/Publications/spie_2017_paper.pdf**

**CLAUS, Rene A. [et al.]: Aberration estimation using EUV mask roughness. In: Extreme ultraviolet (EUV) lithography VI : 23 – 26 February 2015, San Jose, California, United States.
 Bellingham, Wash. : SPIE, 2015 (Proceedings of SPIE; 9422). 942214 (6 S.). – ISBN 978-1-62841-524-7**

(54) Bezeichnung: **Verfahren zur Bestimmung einer Fokuslage einer Lithographie-Maske und Metrologiesystem zur Durchführung eines derartigen Verfahrens**

(57) Hauptanspruch: Verfahren zur Bestimmung einer Fokuslage einer Lithographiemaske (5) umfassend die folgenden Schritte:

- 1.1. Bereitstellen eines optischen Systems (2) mit einer abbildenden Optik (8) zur Abbildung von Lithographiemasken (5)
- 1.2. Bereitstellen einer Lithographiemaske (5) mit mindestens einem Messbereich, der frei von abzubildenden Strukturen ist,
- 1.3. Aufnehmen eines Fokusstapels des mindestens einen Messbereichs der Lithographiemaske (5),
- 1.4. räumlich aufgelöstes Auswerten von 2D-Intensitätsverteilungen (15_{zi}) des aufgenommenen Fokusstapels.



Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Bestimmung einer Fokuslage einer Lithographiemaske. Die Erfindung betrifft außerdem ein Metrologiesystem zur Durchführung eines derartigen Verfahrens.

[0002] Zur Inspektion von Lithographiemasken oder Maskenblanks, das heißt Rohlingen zur Herstellung von Lithographiemasken, müssen diese im Metrologiesystem in ihre Fokuslage gebracht werden. Hierfür wird üblicherweise ein Fokusstapel einer bestimmten Teststruktur auf der Maske aufgenommen. Dies ist jedoch nicht immer möglich. Ein weiterer Nachteil der bekannten Verfahren besteht darin, dass die Ergebnisse oft nicht zuverlässig reproduzierbar sind. Sie können insbesondere von der Teststruktur, dem Beleuchtungssetting und einem mehr oder weniger beliebig vorgebbaren Kontrast-Kriterium abhängen. Außerdem funktionieren die üblichen Verfahren nicht, sofern kohärente Beleuchtungssettings mit einem niedrigen Pupillenfüllgrad zur Beleuchtung der Maske verwendet werden. Ideal wäre ein Verfahren, das direkt die durch den Defokus verursachten Wellenfrontfehler minimiert und somit unabhängig von den verwendeten Strukturen und Beleuchtungseigenschaften ist.

[0003] Aus Claus, Rene A. et al.: „Aberration estimation using EUV mask roughness“, In: Extreme ultraviolet (EUV) lithography VI : 23 – 26 February 2015, San Jose, California, United States. Bellingham, Wash. : SPIE, 2015 (Proceedings of SPIE; 9422). 942214 (6 S.) und Hellweg, Dirk et al.: „Actinic Review of EUV Masks: Performance Data and Status of the AIMS TM EUV System“, 03.06.2017, Carl Zeiss SMT, https://www.zeiss.com/content/dam/smt/downloads/products_and_solutions/photomask-systems/Publications/spie_2017_paper.pdf ist ein Verfahren zur Bestimmung von Aberrationen auf Grundlage von Speckles bekannt. US 2016/0028936 A1 betrifft ein Auto-Fokussystem. US 2016/0341630 A1 betrifft ein Verfahren zur Bestimmung von Verformungen eines Retikels.

[0004] Es ist eine Aufgabe der vorliegenden Erfindung, ein Verfahren zur Bestimmung der Fokuslage einer Lithographiemaske zu verbessern.

[0005] Diese Aufgabe wird durch die Merkmale des Anspruchs 1 gelöst.

[0006] Der Kern der Erfindung besteht darin, die Intensitätsverteilungen der Luftbilder eines Messbereichs, der frei von abzubildenden Strukturen ist, aufzunehmen und auszuwerten.

[0007] Bei dem Messbereich handelt es sich insbesondere um einen rein reflektiven Bereich oder einen ausschließlich absorbierenden Bereich.

[0008] Bei der Lithographiemaske kann es sich insbesondere um ein Maskenblank, das heißt ein Substrat zur Herstellung einer Lithographiemaske, handeln. Derartige Blanks werden im Folgenden ebenfalls als Lithographiemaske bezeichnet.

[0009] Erfindungsgemäß wurde erkannt, dass das Auswerten der Luftbilder eines strukturlosen Messbereichs eine besonders einfache und robuste Ermittlung der Fokuslage der Lithographiemaske ermöglicht.

[0010] Der Fokusstapel umfasst insbesondere mindestens zwei, insbesondere mindestens drei, insbesondere mindestens vier, insbesondere mindestens fünf Aufnahmen des mindestens einen Messbereichs in verschiedenen Messebenen, das heißt mit unterschiedlichem Defokus.

[0011] Erfindungsgemäß wurde erkannt, dass es über eine Specklemuster-Vermessung möglich ist, im Rahmen einer 3D-Luftbildvermessung, die bei einer Lithographiemasken-Vermessung ohnehin regelmäßig erfolgt, einen Abbildungsfehlerbeitrag von einem Maskenstrukturbetrag zum Specklemuster zu separieren. Der Abbildungsfehlerbeitrag kann dann dargestellt werden, so dass hieraus eine Qualifizierung der abbildenden Optik erfolgen kann und insbesondere Rückschlüsse darüber gezogen werden können, inwieweit dieser Abbildungsfehlerbeitrag beispielsweise über eine Nachjustage der abbildenden Optik des Metrologiesystems verringert werden kann. Eine Separierung kann über die Bestimmung einer z-Position eines Schnittpunktes eines Verlaufs der Fokusabhängigkeit des Realteils und des Imaginärteils der jeweiligen Spektralkomponente erfolgen. Mit dem Verfahren können insbesondere Aberrationen bestimmt werden, die über gerade Funktionen beschrieben werden können.

[0012] Die abbildende Optik kann Bestandteil eines Metrologiesystems, insbesondere zur Qualifizierung von Lithographiemasken und von noch unstrukturierten Maskensubstraten, sogenannten Mask Blanks, sein. Mithilfe des Bestimmungsverfahrens lässt sich auch eine Qualifizierung von Mask Blanks, also eine Qualitätsbeurteilung noch unstrukturierter Masken, durchführen.

[0013] Der Defokus-Fehler kann aus einer bekannten Beleuchtungswinkelverteilung (Beleuchtungssetting) bei der Beleuchtung der vermessenen Lithographiemaske sowie einer bekannten Transmissionsfunktion der abbildenden Optik berechnet werden. Bei der Transmissionsfunktion kann es sich um eine Pupillentransmissionsfunktion handeln. Die Pupillentransmissionsfunktion kann eine binäre Funktion sein und den Wert 1 für Ortsfrequenzen innerhalb einer numerischen Apertur der abbildenden Optik und 0 für

Ortsfrequenzen außerhalb dieser numerischen Apertur haben.

[0014] Erfindungsgemäß wurde insbesondere erkannt, dass aus der Auswertung des Speckle-Musters, welches durch die inhärente optische Rauigkeit der Maske hervorgerufen wird, auf einfache Weise die beste Fokuslage der Lithographiemaske ermitteln lässt.

[0015] Gemäß einem Aspekt der Erfindung umfasst das Auswerten der 2D-Intensitätsverteilungen ein Ermitteln des Speckle-Kontrastes. Als Speckle-Kontrast wird insbesondere die Varianz des Luftbildes bezeichnet.

[0016] Gemäß einem weiteren Aspekt der Erfindung umfasst das Auswerten der 2D-Intensitätsverteilungen ein Ermitteln einer Fokuslage, bei welcher der Speckle-Kontrast ein Minimum aufweist. Hierfür kann insbesondere ein Interpolationsverfahren vorgesehen sein.

[0017] Erfindungsgemäß wurde erkannt, dass in der besten Fokuslage der Speckle-Kontrast ein Minimum aufweist.

[0018] Gemäß einem weiteren Aspekt der Erfindung umfasst das Auswerten der 2D-Intensitätsverteilungen folgende Schritte:

- Bestimmen eines Spektrums $S(\bar{v})$ der 2D-Intensitätsverteilungen durch Fouriertransformation der 2D-Intensitätsverteilungen,
- Bestimmen einer Fokusabhängigkeit eines Realteil $RS(z)$ und eines Imaginärteils $IS(z)$ einer Mehrzahl von Spektralkomponenten $S(v_x, v_y)$ des Spektrums $S(v)$ im Frequenzraum,
- Separieren eines Abbildungsfehlerbeitrags **8**, den die abbildende Optik zum Spektrum $S(v)$ liefert,
- Darstellung des Abbildungsfehlerbeitrags **8** als Linearkombination von Zernicke-Polynomen.

[0019] Erfindungsgemäß wurde erkannt, dass sich aus der Analyse der Fokusabhängigkeit des Realteils und des Imaginärteils der Spektralkomponenten des Spektrums der 2D-Intensitätsverteilungen im Frequenzraum ein strukturunabhängiger Abbildungsfehlerbeitrag, den die abbildende Optik zum Spektrum liefert, separieren lässt.

[0020] Gemäß einem weiteren Aspekt der Erfindung umfasst das Darstellen des Abbildungsfehlerbeitrags ein Ermitteln von Zernicke-Koeffizienten Z_n .

[0021] Zum Ermitteln der spiegelsymmetrischen Zernicke-Koeffizienten Z_n kann insbesondere in li-

neares Regressionsverfahren (Least Square Fit) verwendet werden.

[0022] Der Defokus kann insbesondere unmittelbar aus dem vierten Zernicke-Koeffizienten ermittelt werden.

[0023] Vorteilhafterweise umfasst das Auswerten der 2D-Intensitätsverteilungen ausschließlich Fourier-Transformationen und lineare Algebra. Es ist daher besonders einfach implementierbar. Das Verfahren ist insbesondere besonders robust.

[0024] Gemäß einem Aspekt der Erfindung wird zur Beleuchtung des Messbereichs ein spiegelsymmetrisches Beleuchtungssetting verwendet. Hierbei kann es sich insbesondere um ein Beleuchtungssetting handeln, welches später zur Abbildung der Maske in einer Projektionsbelichtungsanlage vorgesehen ist.

[0025] Gemäß einem weiteren Aspekt der Erfindung wird zur Beleuchtung des Messbereichs zumindest partiell kohärente Beleuchtungsstrahlung verwendet.

[0026] Zur Beleuchtung des Messbereichs wird insbesondere ein spiegelsymmetrisches Beleuchtungssetting verwendet. Das Beleuchtungssetting ist insbesondere innerhalb der numerischen Apertur, das heißt $\sigma \leq 1$, spiegelsymmetrisch.

[0027] Gemäß einem weiteren Aspekt der Erfindung wird zur Beleuchtung des Messbereichs kohärente Beleuchtungsstrahlung verwendet. Dies ist bei vielen der bislang bekannten Verfahren zur Bestimmung der Fokuslage nicht möglich.

[0028] Eine weitere Aufgabe der Erfindung besteht darin, ein Metrologiesystem zur Durchführung des vorhergehend beschriebenen Verfahrens bereitzustellen.

[0029] Diese Aufgabe wird durch ein Metrologiesystem mit einer Beleuchtungsoptik zur Beleuchtung des Messbereichs mit Beleuchtungsstrahlung und mit einer abbildenden Optik zur Abbildung des Messbereichs auf eine ortsauf lösende Detektionseinrichtung gelöst.

[0030] Gemäß einem weiteren Aspekt der Erfindung ist eine Recheneinrichtung zum Auswerten der 2D-Intensitätsverteilungen des aufgenommenen Fokusstapels in datenübertragender Weise mit der Detektionseinrichtung verbunden.

[0031] Die Auswertung der aufgenommenen Intensitätsverteilungen kann insbesondere automatisiert erfolgen.

[0032] Weitere Details und Vorteile der Erfindung ergeben sich aus der Beschreibung eines Ausführungsbeispiels anhand der Figuren. Es zeigen:

Fig. 1 stark schematisch in einer Aufsicht mit Blickrichtung senkrecht zu einer Einfallsebene ein Metrologiesystem für die Untersuchung eines Objekts in Form einer Lithographiemaske mit EUV-Beleuchtungs- und Abbildungslicht mit einer Beleuchtungsoptik und einer abbildenden Optik, die jeweils sehr stark schematisch dargestellt sind;

Fig. 2 schematisch eine Propagation des Beleuchtungs- und Abbildungslichts zwischen einer Beleuchtungspupille und einem Luftbild im Bereich einer Bildebene der abbildenden Optik, wobei zudem noch eine Umrechnung des Luftbildes in ein Spektrum eines Specklemusters dargestellt ist;

Fig. 3 eine Abfolge von 2D-Inversitätsverteilungen in verschiedenen Fokus-Messebenen im Bereich der Bildebene (Fokusstapel), wobei diese Abfolge ein 3D-Luftbild repräsentiert, welches mit dem Metrologiesystem gemessen werden kann;

Fig. 4 der Abfolge nach **Fig. 3** zugeordnet eine Abfolge von Spektren eines Specklemusters des 3D-Luftbildes, bestimmt durch Fouriertransformation der 2D-Intensitätsverteilungen nach **Fig. 3**;

Fig. 5 schematische Verläufe eines Realteils und eines Imaginärteils einer ausgewählten Spektralkomponente der Specklemuster-Spektren nach **Fig. 4** in Abhängigkeit von einer Fokusposition (z-Richtung senkrecht zur Bildebene);

Fig. 6 beispielhaft einen ermittelten Abbildungsfehler der abbildenden Optik des Metrologiesystems, dargestellt als frequenzabhängige Aberrationsfunktion, der sich als Ergebnis einer Separation aus bestimmten Werten der Fokusabhängigkeit der Spektralkomponenten nach Art der Spektralkomponenten nach **Fig. 5** ergibt;

Fig. 7 eine Darstellung des Abbildungsfehlerbeitrags nach **Fig. 6** in Form einer Entwicklung nach Zernike-Polynomen.

[0033] Zur Erleichterung der Darstellung von Lagebeziehungen wird nachfolgend ein kartesisches xyz-Koordinatensystem verwendet. Die x-Achse verläuft in der **Fig. 1** senkrecht zur Zeichenebene in diese hinein. Die y-Achse verläuft in der **Fig. 1** nach rechts. Die z-Achse verläuft in der **Fig. 1** nach unten.

[0034] **Fig. 1** zeigt in einer einem Meridionalschnitt entsprechenden Ansicht einen Strahlengang von EUV-Beleuchtungslicht bzw. Abbildungslicht **1** in einem Metrologiesystem **2** für die Untersuchung eines

in einem Objektfeld **3** in einer Objektebene **4** angeordneten Objekts **5** in Form eines Retikels bzw. einer Lithographiemaske oder eines Masken-Blanks mit dem EUV-Beleuchtungslicht **1**. Das Metrologiesystem **2** wird zur Analyse eines dreidimensionalen (3D-) Luftbildes (Aerial Image Metrology System) eingesetzt und dient zur Simulation und Analyse der Auswirkungen von Eigenschaften von Lithographiemasken, sogenannten Retikels, die wiederum bei der Projektionsbelichtung zur Herstellung von Halbleiterbauelementen zum Einsatz kommen, auf die optische Abbildung durch Projektionsoptiken innerhalb einer Projektionsbelichtungsanlage. Derartige Systeme sind aus der WO 2016/012426 A1 (vgl. dort **Fig. 1**), aus der US 2013/0063716 A1 (vgl. dort **Fig. 3**), aus der DE 102 20 815 A1 (vgl. dort **Fig. 9**) und aus der DE 102 20 816 A1 (vgl. dort **Fig. 2**) und aus der US 2013/0083321 A1 bekannt.

[0035] Das Beleuchtungslicht **1** wird am Objekt **5** reflektiert. Eine Einfallsebene des Beleuchtungslichts **1** liegt parallel zur y-z-Ebene.

[0036] Das EUV-Beleuchtungslicht **1** wird von einer EUV-Lichtquelle **6** erzeugt. Bei der Lichtquelle **6** kann es sich um eine Laser-Plasma-Quelle (LPP; laser produced plasma) oder um eine Entladungsquelle (DPP; discharge produced plasma) handeln. Grundsätzlich kann auch eine Synchrotron-basierte Lichtquelle zum Einsatz kommen, z. B. ein Freie-Elektronen-Laser (FEL). Eine Nutzwellenlänge der EUV-Lichtquelle kann im Bereich zwischen 5 nm und 30 nm liegen. Grundsätzlich kann bei einer Variante des Metrologiesystems **2** auch eine Lichtquelle für eine andere Nutzwellenlänge anstelle der Lichtquelle **6** zum Einsatz kommen, beispielsweise eine Lichtquelle für eine Nutzwellenlänge von 193 nm.

[0037] Je nach Ausführung des Metrologiesystems **2** kann dieses für ein reflektierendes oder auch für ein transmittierendes Objekt **5** zum Einsatz kommen. Ein Beispiel für ein transmittierendes Objekt ist eine Phasenmaske.

[0038] Zwischen der Lichtquelle **6** und dem Objekt **5** ist eine Beleuchtungsoptik **7** des Metrologiesystems **2** angeordnet. Die Beleuchtungsoptik **7** dient zur Beleuchtung des zu untersuchenden Objekts **5** mit einer definierten Beleuchtungsintensitätsverteilung über das Objektfeld **3** und gleichzeitig mit einer definierten Beleuchtungswinkelverteilung, mit der die Feldpunkte des Objektfeldes **3** beleuchtet werden.

[0039] Eine numerische Apertur des Beleuchtungs- und Abbildungslichts **1** des Metrologiesystems **2** liegt retikelseitig bei 0,0825. Das Objektfeld **3** hat in der Objektebene **4** eine Erstreckung von 8 µm in der x-Richtung und von 8 µm in der y-Richtung, ist also quadratisch.

[0040] Nach Reflexion am Objekt **5** tritt das Beleuchtungs- bzw. Abbildungslicht **1** in eine abbildende Optik bzw. Projektionsoptik **8** des Metrologiesystems **2** ein, die in der **Fig. 1** ebenfalls schematisch angedeutet ist. Die abbildende Optik **8** dient zur Abbildung des Objekts **5** hin zu einer ortsauf lösenden Detektionseinrichtung **9** des Metrologiesystems **2**. Die Detektionseinrichtung **9** ist z.B. als CCD- oder CMOS-Detektor ausgebildet.

[0041] Die Detektionseinrichtung **9** steht in Signalverbindung mit einer digitalen Recheneinrichtung in Form einer Bildverarbeitungseinrichtung **10**.

[0042] Das Objekt **5** wird von einem nicht dargestellten Objekthalter getragen. Dieser kann über einen Verlagerungsantrieb einerseits parallel zur xy-Ebene und andererseits senkrecht zu dieser Ebene, also in z-Richtung, verlagert werden. Der Verlagerungsantrieb wird, wie auch der gesamte Betrieb des Metrologiesystems **2** von einer zentralen Steuereinrichtung **11** gesteuert, die mit den zu steuernden Komponenten in nicht näher dargestellter Weise in Signalverbindung steht.

[0043] Beispielhaft ist in der **Fig. 1** eine abbildende Komponente **12** der abbildenden Optik **8** dargestellt, bei der es sich um einen Spiegel oder, bei Verwendung von längeren Beleuchtungslicht-Wellenlängen als EUV-Wellenlängen, um eine Linse handeln kann. Die abbildende Komponente **12** steht mit einem Verlagerungsaktor **13** in Wirkverbindung, der wiederum mit der Steuereinrichtung **11** in Signalverbindung steht. Über den Verlagerungsaktor **13** kann die abbildende Komponente **12** unabhängig voneinander in der x-Richtung und/oder in der y-Richtung und/oder in der z-Richtung zur präzisen Justage der abbildenden Komponente **12** verlagert werden. Eine Ortsauflösung dieser Verlagerung kann besser sein als 10 μm und kann insbesondere besser sein als 2 μm .

[0044] Ein Vergrößerungsfaktor der abbildenden Optik **8** ist größer als 500 und liegt beim Ausführungsbeispiel nach **Fig. 1** bei 850. Es ergibt sich eine bildseitige numerische Apertur im Bereich einer Bildebene **14**, in der ein 3D-Luftbild des Objekts **5** entsteht, im Bereich von 1.10^{-4} .

[0045] Unterhalb der Detektionseinrichtung **9** ist in der **Fig. 1** beispielhaft eine Aufsicht auf eine 2D-Intensitätsverteilung **15** in einer Messebene (z.B. $z = 0$) wiedergegeben. Strukturen **16** auf dem Retikel **5** sind als in x-Richtung verlaufende Intensitätsmaxima **17** wiedergegeben.

[0046] **Fig. 2** zeigt schematisch eine Propagation des Beleuchtungs- und Abbildungslichts **1** von einer Pupillenebene **18** der Beleuchtungsoptik **7** bis in den Bereich der Bildebene **14**. Die jeweils betrachteten Größen bzw. Komponenten sind perspektivisch im

xyz-Koordinatensystem angedeutet. In der Pupillenebene **18** liegt eine Pupillen-Intensitätsverteilung **19** des Beleuchtungslichts **1** vor, die auch als Beleuchtungssetting bezeichnet ist. Beispielhaft ist eine ringförmige bzw. annulare Pupillen-Intensitätsverteilung **19** dargestellt. Die Pupillen-Intensitätsverteilung **19** wird mathematisch wiedergegeben als $\sigma(\kappa)$.

[0047] σ ist dabei die Beleuchtungsintensität und κ beschreibt den Ort, an dem diese Beleuchtungsintensität vorliegt, in Pupillenkoordinaten.

[0048] Von der Pupillenebene **18** propagiert das Beleuchtungslicht **1** in die Objektebene **4**, wo das Beleuchtungslicht **1** auf das Objekt **5** fällt, welches eine in der **Fig. 2** übertrieben dargestellte Rauigkeit hat.

Es ergibt sich eine Wellenfront $\frac{4\pi}{\lambda} h(\bar{r}) + \bar{r} \bar{\kappa}$ und eine Feldverteilung des Beleuchtungslichts **1**, die geschrieben werden kann als

$$\varphi(\bar{r}, \bar{\kappa}) \sim \left(1 + i \frac{4\pi}{\lambda} h(\bar{r}) \right) e^{i\bar{r}\bar{\kappa}}$$

[0049] Hierbei bedeuten:

- \bar{r} : Ortskoordinatenvektor mit Koordinaten xy;
- λ : Wellenlänge des Beleuchtungslichts;
- h : Rauigkeit des Objekts (Pfeilhöhe in z-Richtung)

[0050] Nach Reflexion an dem bzw. Durchtritt durch das Objekt **5** propagiert das Beleuchtungslicht **1** durch eine Eintrittspupille **20** der abbildenden Optik **8**, deren abbildende Komponenten in der **Fig. 2** bei **Fig. 21** angedeutet sind, und im Anschluss hieran durch eine Austrittspupille **22**. Im Anschluss hieran wird das Objekt **5** im Bereich der Bildebene **14** in ein Luftbild **23** abgebildet. Eine Fouriertransformation der jeweiligen 2D-Intensitätsverteilung in x- und y-Richtung, also einer „Scheibe“ des Luftbildes **23**, ergibt ein Specklespektrum **24**, also ein Spektrum $S(\bar{v})$ eines Specklemusters des Luftbildes **23**. Für dieses Specklespektrum gilt:

$$S(\bar{v}) \approx -\frac{8\pi}{\lambda} H(\bar{v}) \Theta(\bar{v})$$

[0051] Hierbei gilt:

- \bar{v} : Der Frequenz proportionale Wellenzahl $1/\lambda$, mit Frequenzkoordinaten v_x, v_y ;
- H : Rauigkeitsspektrum, also die Fouriertransformation der Objektrauigkeit h ;
- $\Theta(\bar{v})$: Aberrationsfunktion der Optik, die wiederum definiert ist als:

$$\Theta(\bar{v}) = (\sigma P \otimes P \varphi_e P)(\bar{v}) - (\sigma \varphi_e P \otimes P)(\bar{v})$$

[0052] Hierbei gilt:

- σ Intensitätsverteilung des Beleuchtungssettings in einer Pupillenebene;
- P : Pupillentransmissionsfunktion der Optik, also beispielsweise die Wirkung einer Pupillenbegrenzung durch eine Apertur- und/oder Obskurationsblende;
- φ_e Der gerade Wellenfrontfehler der Optik, also ein durch eine gerade Funktion beschreibbarer Fehlerbeitrag.

[0053] Anhand der **Fig. 3 ff.** wird nachfolgend ein Verfahren zur Bestimmung eines Abbildungsfehlerbeitrages der abbildenden Optik bzw. Abbildungsoptik **8** erläutert. Die in den **Fig. 3**, **Fig. 4** und **Fig. 6** angegebenen Grauwerte sind jeweils ein Maß für den am jeweils betrachteten Ort vorliegende Lichtintensität.

[0054] Zunächst erfolgt ein fokusabhängiges Messen des 3D-Luftbildes **23** der abbildenden Optik **8** als Abfolge von 2D-Intensitätsverteilungen 15_{z1} bis 15_{z7} in verschiedenen Messebenen $z1$ bis $z7$ im Bereich von parallel zur Bildebene **14** ($z3=0$) der Abbildung des Objekts **5**. Abgebildet wird hierbei im Unterschied zur Darstellung nach **Fig. 1** kein strukturiertes Objekt, sondern eine (noch) unstrukturierte Maske, also ein Mask Blank oder ein nicht strukturierter Bereich einer Maske. Das Luftbild, das über die Sequenz der 2D-Intensitätsverteilungen 15_{zi} aufgenommen ist, zeigt eine Ortsverteilung von Speckles, die sich als Resultat einerseits eines Masken(rest)-Strukturbetrages und eines Abbildungsfehlerbeitrages der abbildenden Optik **8** verstehen lassen.

[0055] Anschließend wird das Spektrum $S(v)$ dieses Specklemusters des im vorhergehenden Schritt erfassten 3D-Luftbildes durch Fouriertransformation der 2D-Intensitätsverteilungen 15_{zi} bestimmt. Es ergibt sich eine Abfolge von 2D-Specklespektren 24_{z1} bis 24_{z7} , abhängig von den Frequenzkoordinaten v_x und v_y .

[0056] Die Abfolge der 2D-Intensitätsverteilungen 15_{z1} bis 15_{z7} wird auch als Fokusstapel bezeichnet.

[0057] Anschließend wird für eine Mehrzahl von Spektralkomponenten $S(v_{xi}, v_{yi})$ im Frequenzraum eine Fokusabhängigkeit eines Realteils $RS(z)$ und eines Imaginärteils $IS(z)$ dieser Speckle-Spektralkomponente $S(v_{xi}, v_{yi})$ bestimmt. Dies ist für eine, in der **Fig. 4** durch einen Auswahlpunkt hervorgehobene Spektralkomponente $S(v_{xi}, v_{yi})$ veranschaulicht. Für diese Spektralkomponente S zeigt die **Fig. 5** schematisch einen linear genäherten Verlauf **25** des Realteils

$RS(z)$ dieser Speckle-Spektralkomponente $S(v_{xi}, v_{yi})$ und einen ebenfalls lineal angenäherten Verlauf **26** des Imaginärteils $IS(z)$ dieser Spektralkomponente $S(v_{xi}, v_{yi})$, abhängig von der z -Koordinate, also abhängig von der Fokusposition.

[0058] Für diese z -Abhängigkeiten der Speckle-Spektralkomponente gilt:

$$S(z) \sim H(\Theta_d z + \Theta_{opt})$$

[0059] Hierbei gilt:

- H : Beitrag der Rauhigkeit des Objekts;
- Θ_d : Defokus-Fehler der abbildenden Optik;
- Θ_{opt} : Sonstiger Abbildungsfehlerbeitrag der abbildenden Optik;

[0060] Der Defokus-Fehler Θ_d der abbildenden Optik **8** kann aus dem bekannten Beleuchtungssetting und der bekannten Transmissionfunktion der Optik berechnet werden. Aufgrund der Verläufe **25** und **26** des Realteils RS und des Imaginärteils IS lässt sich aufgrund der obigen Formel der Abbildungsfehlerbeitrag Θ vom Rauhigkeitsbeitrag H trennen und nach unabhängiger Bestimmung des Defokus-Fehlers ergibt sich dann der sonstige Abbildungsfehler Θ_{opt} der abbildenden Optik **8**.

[0061] Zu dieser Separierung kann insbesondere die z -Position des Schnittpunktes zwischen den Verläufen **25**, **26** des Realteils RS und des Imaginärteils IS benutzt werden.

[0062] Der Abbildungsfehlerbeitrag Θ_{opt} lässt sich frequenzabhängig als Entwicklung nach Zernike-Aberrationsfunktionen Θ_n mit Entwicklungskoeffizient z_n schreiben.

$$\Theta_{opt}(\bar{v}) = \frac{1}{\lambda} \sum_n z_n \Theta_n(\bar{v})$$

[0063] Hierbei gilt:

$$\Theta_n(\bar{v}) = 2\pi(\sigma P \otimes Z_n P)(\bar{v}) - (\sigma Z_n P \otimes P)(\bar{v})$$

mit den Zernike-Polynomen $Z_n(\bar{v})$.

[0064] **Fig. 6** zeigt beispielhaft den separierten Abbildungsfehlerbeitrag $\Theta(\bar{v})$. Für das gewählte Beleuchtungssetting hat dieser Abbildungsfehlerbeitrag eine große Ähnlichkeit mit der Zernike-Funktion **Z5**.

[0065] **Fig. 7** zeigt die Abfolge der Koeffizienten z_i der obigen Entwicklungsumgebung für die Zernike-Funk-

tionen **Z4** bis **Z18**. Erwartungsgemäß zeigt sich der Hauptbeitrag beim Koeffizienten z_5 für die Zernike-Funktion **Z5**.

[0066] Insgesamt lässt sich also anhand der bei der Metrologie regelmäßig ohnehin notwendigen Vermessung einer unstrukturierten Stelle der Maske der Abbildungsfehlerbeitrag der abbildenden Optik **8** messen. Dieser Abbildungsfehlerbeitrag kann dann durch Nachjustieren von optischen Komponenten der abbildenden Optik **8** korrigiert werden. Hierzu kann die Steuerungseinrichtung **11** den Verlagerungssaktor **13** zur entsprechenden Verlagerung der abbildenden Komponente **12** ansteuern. Ein derartiges Nachjustieren kann in Betriebspausen des Metrologiesystems **2** oder auch während des Betriebs des Metrologiesystems **2** erfolgen. Das Nachjustieren kann gesteuert oder auch, durch Vergleich zwischen Soll- und Ist-Werten jeweilige Abbildungsfehlerbeiträge, geregelt erfolgen.

[0067] Diese Entwicklung des Abbildungsfehlerbeitrags durch Zernike-Funktionen Z_i stellt ein Beispiel einer Entwicklung des Abbildungsfehlerbeitrags über eine Linearkombination eines Satzes orthogonaler Funktionen dar.

[0068] Der optische Aufbau des Metrologiesystems **2** dient zur möglichst exakten Emulation einer Beleuchtung sowie einer Abbildung im Rahmen einer Projektionsbelichtung des Objekts **5** bei der projektilithographischen Herstellung von Halbleiterbauelementen.

[0069] Zu Details hinsichtlich des fokusabhängigen Messens des 2D-Luftbildes **23** wird verwiesen auf die WO 2016/012426 A1. Auch hinsichtlich Details im Zusammenhang mit der Fouriertransformation wird verwiesen auf die WO 2016/012426 A1 und die dort erwähnten Referenzen.

[0070] Die Entwicklung des Abbildungsfehlerbeitrags $\Theta_{opt}(\vec{v})$ durch die Zernicke-Funktionen Z_i lässt sich direkt zur Ermittlung einer Fokuslage der Lithographiemaske verwenden. Die Fokuslage beziehungsweise der Defokus z ist insbesondere eine Funktion des vierten Zernicke-Koeffizienten Z_4 :

$$z = \frac{4Z_4}{NA^2}$$

[0071] Alternativ hierzu lässt sich der Defokus aus der Varianz der unterschiedlichen Luftbilder des Fokusstapels ermitteln. Die Varianz der Luftbilder des Fokusstapels wird auch als Speckle-Kontrast bezeichnet.

[0072] Die beste Fokuslage kann durch Ermitteln der Position, bei welcher der Speckle-Kontrast ein Mini-

mum aufweist, gefunden werden. Hierfür ist ein Interpolationsverfahren vorgesehen.

[0073] Die vorhergehend beschriebenen Verfahren zur Bestimmung der Fokuslage der Lithographiemaske eignen sich insbesondere für rein reflektive Strukturen, insbesondere Viellagen-Strukturen, insbesondere Masken-Blanks, und rein absorbierende Strukturen. Die Verfahren sind insbesondere unabhängig von speziellen Messstrukturen. Derartige Messstrukturen werden nicht benötigt. Die Verfahren sind darüber hinaus einfach durchführbar und sehr robust. Sie sind insbesondere zuverlässig reproduzierbar. Sie können verwendet werden um die globale Fokuslage einer Maske, räumliche Variationen der Fokuslage z.B. durch eine Biegung der Maske oder Drifts der Fokuslage zu bestimmen und zu korrigieren.

[0074] Grundsätzlich kann das vorhergehend geschilderte Verfahren zur Bestimmung der Fokuslage der Maske auch in einem Projektionsbelichtungssystem zur Abbildung der Maske auf einen Wafer verwendet werden. Es kann insbesondere dazu verwendet werden, die Maskenposition in einem derartigen Projektionsbelichtungssystem zu justieren. Hierdurch kann die Abbildung der Maske auf den Wafer und damit die auf dem Wafer herstellbaren Strukturen und damit der Wafer selbst verbessert werden.

Patentansprüche

1. Verfahren zur Bestimmung einer Fokuslage einer Lithographiemaske (5) umfassend die folgenden Schritte:
 - 1.1. Bereitstellen eines optischen Systems (2) mit einer abbildenden Optik (8) zur Abbildung von Lithographiemasken (5)
 - 1.2. Bereitstellen einer Lithographiemaske (5) mit mindestens einem Messbereich, der frei von abzubildenden Strukturen ist,
 - 1.3. Aufnehmen eines Fokusstapels des mindestens einen Messbereichs der Lithographiemaske (5),
 - 1.4. räumlich aufgelöstes Auswerten von 2D-Intensitätsverteilungen (15_{zi}) des aufgenommenen Fokusstapels.
2. Verfahren gemäß Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Auswerten der 2D-Intensitätsverteilungen (15_{zi}) ein Ermitteln des Speckle-Kontrastes umfasst.
3. Verfahren gemäß Anspruch 2, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Auswerten der 2D-Intensitätsverteilungen (15_{zi}) ein Ermitteln einer Fokuslage (z), bei welcher der Speckle-Kontrast ein Minimum aufweist, umfasst.
4. Verfahren gemäß Anspruch 3, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Ermitteln der Fokuslage, bei

welcher der Speckle-Kontrast ein Minimum aufweist, ein Interpolationsverfahren umfasst.

5. Verfahren gemäß Anspruch 3, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Auswerten der 2D-Intensitätsverteilungen (15_{zi}) folgende Schritte umfasst:

5.1. Bestimmen eines Spektrums $S(\bar{v}, z)$ der 2D-Intensitätsverteilungen (15_{zi}) durch Fouriertransformation der 2D-Intensitätsverteilungen (15_{zi}),

5.2. Bestimmen einer Fokusabhängigkeit eines Realteils $RS(z)$ und eines Imaginärteils $IS(z)$ einer Mehrzahl von Spektralkomponenten $S(v_{xi}, v_{yi})$ des Spektrums $S(\bar{v}, z)$ im Frequenzraum,

5.3. Separieren eines Abbildungsfehlerbeitrags (Θ_{opt}), den die abbildende Optik (8) zum Spektrum $S(\bar{v}, z)$ liefert,

5.4. Darstellen des Abbildungsfehlerbeitrags (Θ_{opt}) als Linearkombination von Zernike-Polynomen $Z_n(\bar{v})$.

6. Verfahren gemäß Anspruch 5, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Darstellen des Abbildungsfehlerbeitrags (Θ_{opt}) als Linearkombination von Zernike-Polynomen ein Ermitteln von Zernike-Koeffizienten Z_n umfasst.

7. Verfahren gemäß Anspruch 6, **dadurch gekennzeichnet**, dass ein lineares Regressionsverfahren (least square fit) zum Ermitteln der symmetrischen Zernike-Koeffizienten Z_n verwendet wird.

8. Verfahren gemäß einem der Ansprüche 5 bis 7, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Fokuslage unmittelbar aus dem vierten Zernike-Koeffizienten Z_4 ermittelt wird.

9. Verfahren gemäß einem der Ansprüche 1 bis 8, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Auswerten ausschließlich Fourier-Transformationen und lineare Algebra umfasst.

10. Verfahren gemäß einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass zur Beleuchtung des Messbereichs ein spiegelsymmetrisches Beleuchtungssetting verwendet wird.

11. Verfahren gemäß einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass zur Beleuchtung des Messbereichs zumindest partiell kohärente Beleuchtungsstrahlung (1) verwendet wird.

12. Verfahren gemäß einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass zur Beleuchtung des Messbereichs kohärente Beleuchtungsstrahlung (1) verwendet wird.

13. Metrologiesystem (2) zur Durchführung eines Verfahrens gemäß einem der Ansprüche 1 bis 12,

mit einer Beleuchtungsoptik (7) zur Beleuchtung des Messbereichs mit Beleuchtungsstrahlung (1) und mit einer abbildenden Optik (8) zur Abbildung des Messbereichs auf eine ortsauflösende Detektionseinrichtung (9).

14. Metrologiesystem (2) gemäß Anspruch 13, **dadurch gekennzeichnet**, dass zum Auswerten der 2D-Intensitätsverteilungen (15_{zi}) des aufgenommenen Fokusstapels eine Recheneinrichtung (10) in datenübertragender Weise mit der Detektionseinrichtung (9) verbunden ist.

Es folgen 5 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

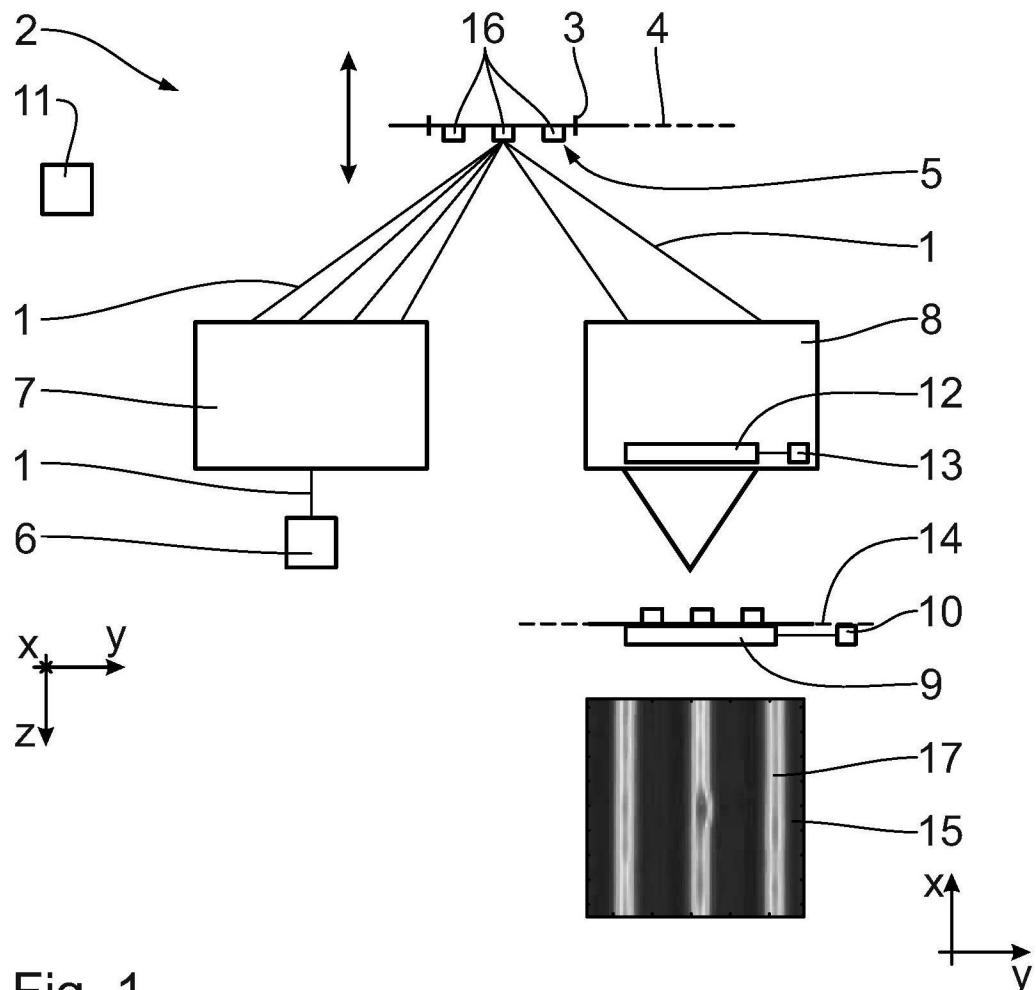


Fig. 1

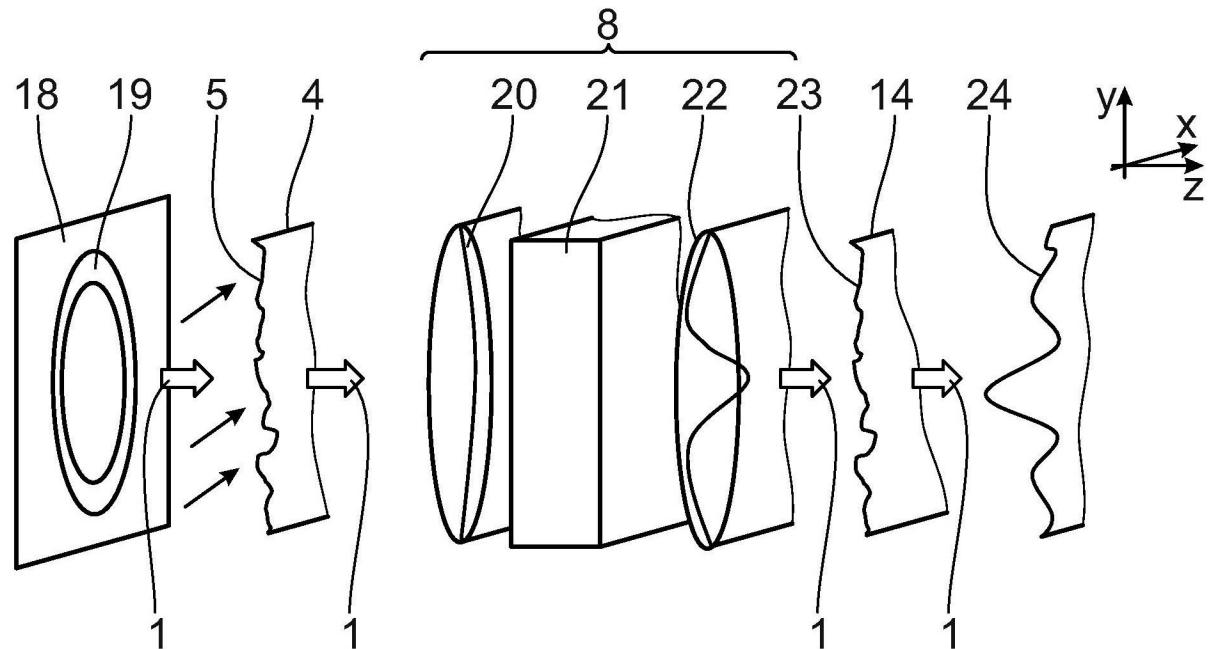


Fig. 2

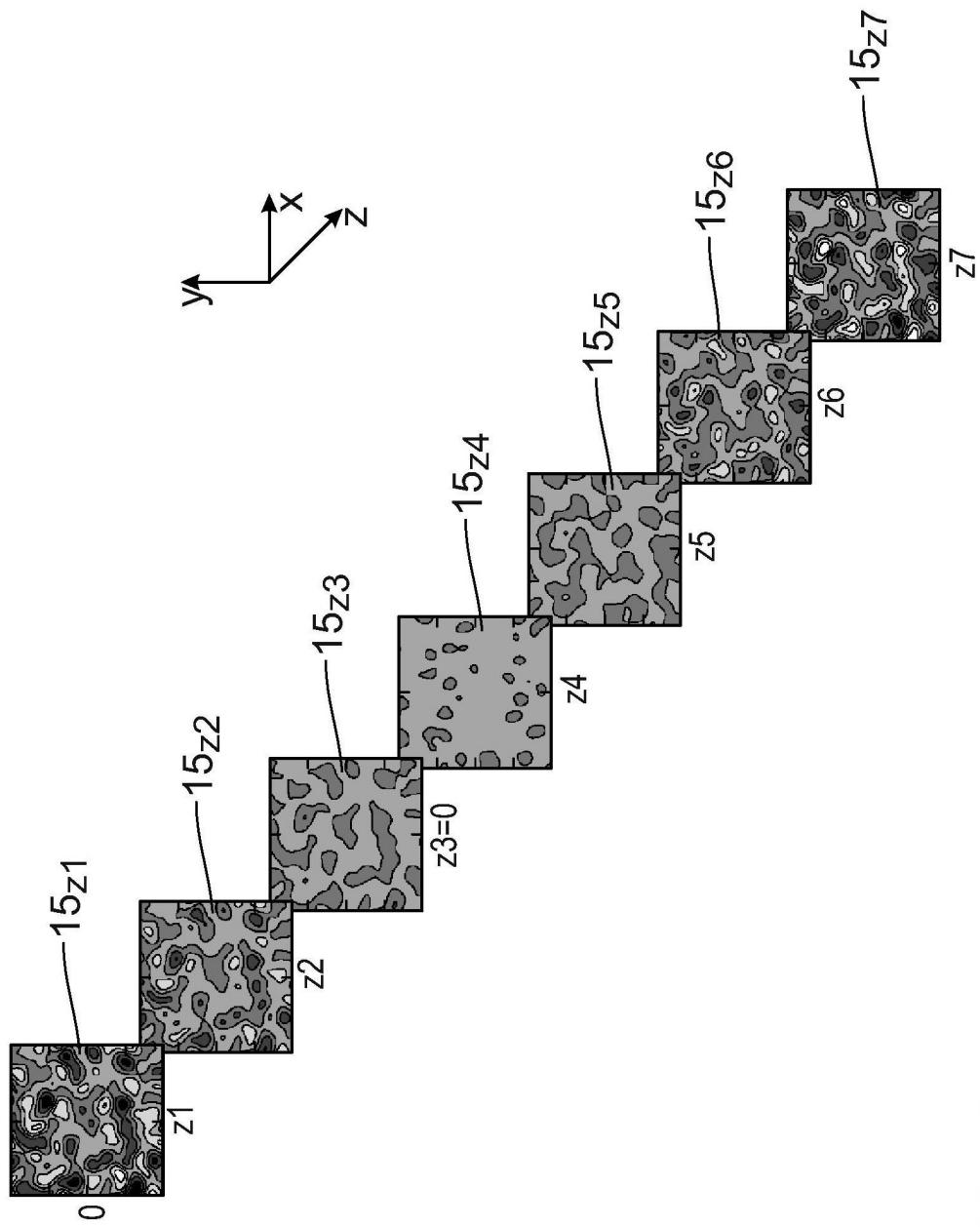


Fig. 3

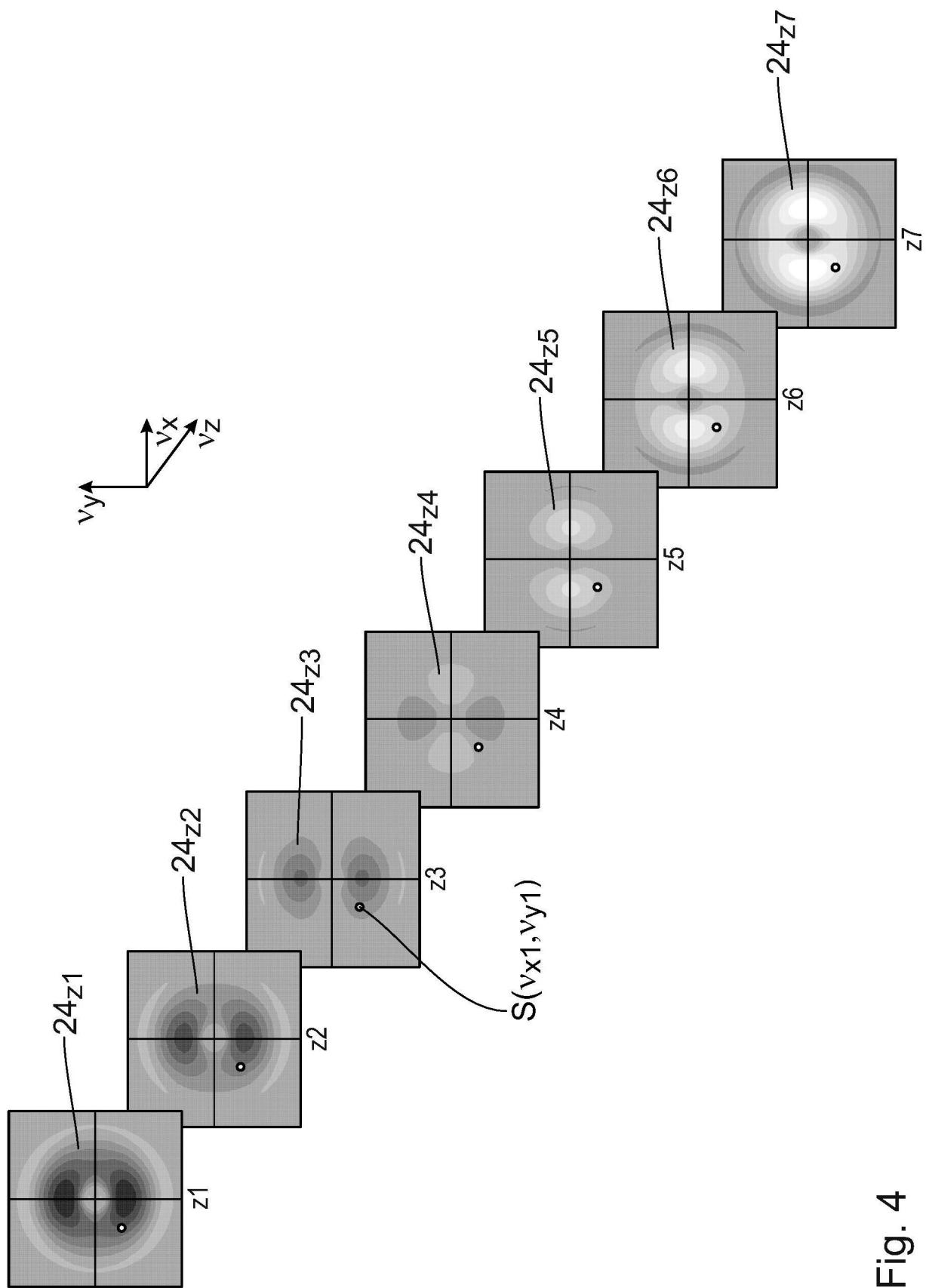


Fig. 4

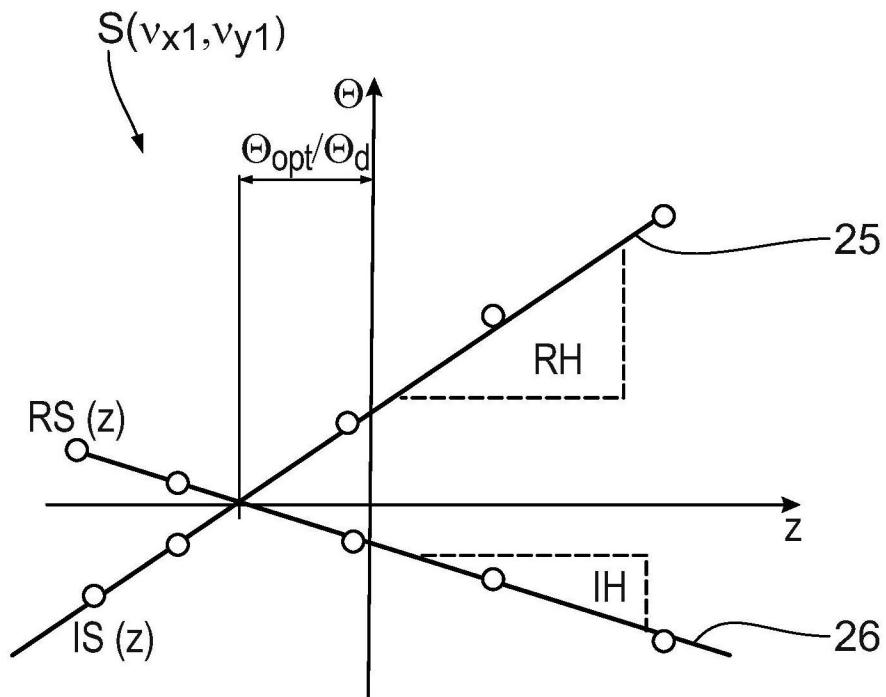


Fig. 5

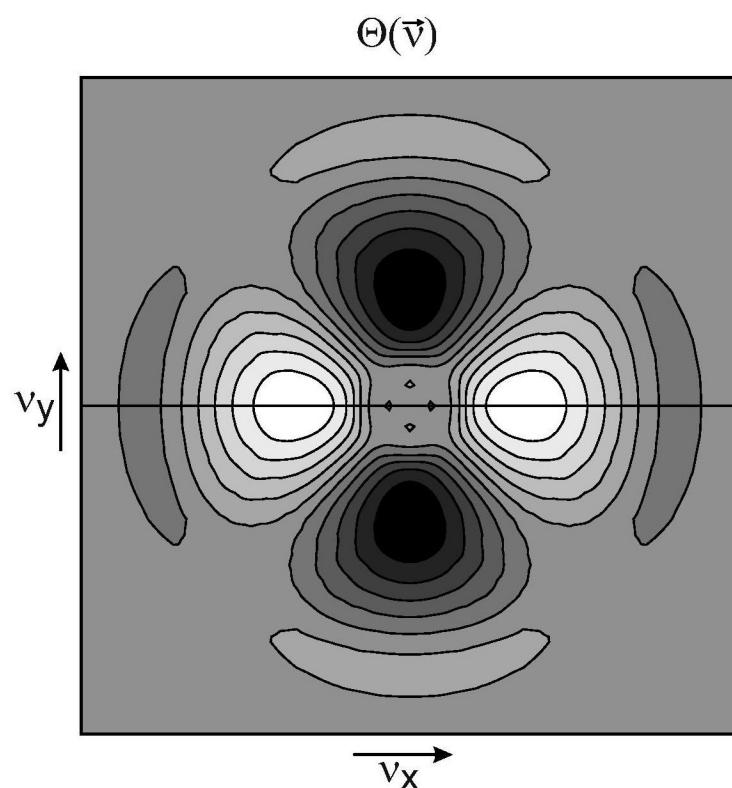


Fig. 6

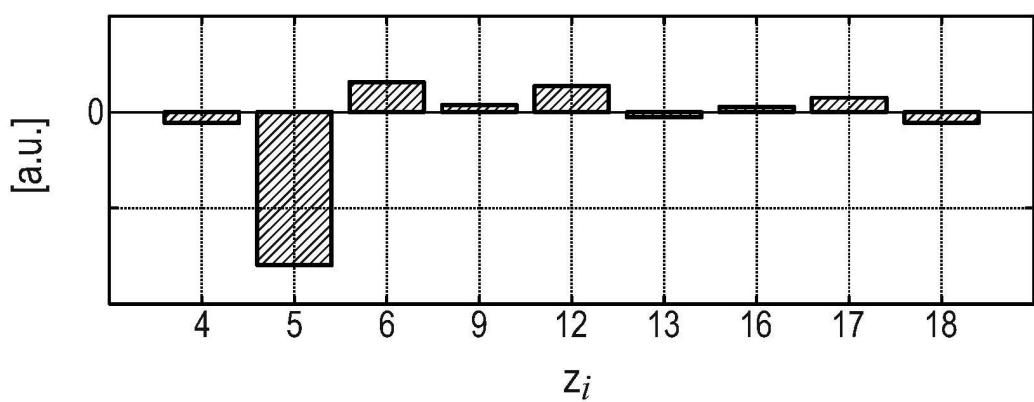


Fig. 7