

(12)

Patentschrift

(21) Anmeldenummer: A 50724/2020
(22) Anmeldetag: 27.08.2020
(45) Veröffentlicht am: 15.08.2021

(51) Int. Cl.: **G02B 27/18** (2006.01)
G01M 11/02 (2006.01)
G01B 11/24 (2006.01)
G01B 11/14 (2006.01)
G02B 3/00 (2006.01)

(30) Priorität:
02.09.2019 NL 2023747 beansprucht.

(56) Entgegenhaltungen:
DE 10348509 A1
US 2009251689 A1
DE 102017118355 A1

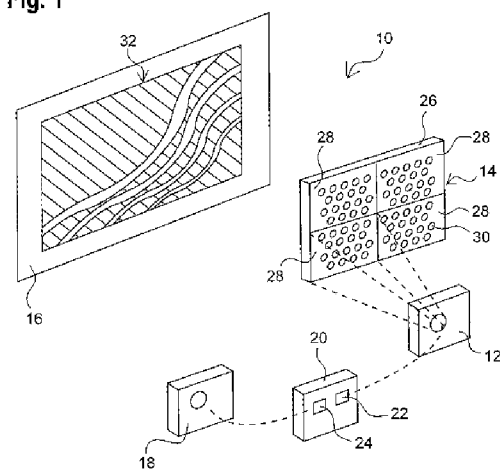
(73) Patentinhaber:
SUSS MICROTEC LITHOGRAPHY GMBH
85748 Garching (DE)

(74) Vertreter:
SONN Patentanwälte OG
1010 Wien (AT)

(54) Verfahren und Testsystem zur Qualitätsbestimmung einer optischen Projektionseinheit

(57) Ein Verfahren zur Bewertung der Qualität einer mehrkanaligen mikro- und/oder subwellenlängenoptischen Projektionseinheit (28) ist offenbart. Das Verfahren umfasst die folgenden Schritte: Wenigstens ein vorgegebener Abschnitt der optischen Projektionseinheit (28) wird so beleuchtet, dass von wenigstens zwei Kanälen des vorgegebenen Abschnitts der mehrkanaligen optischen Projektionseinheit (28) ein Bild erzeugt wird. Anhand der Analyse des Bildes wird wenigstens eine Kenngröße bestimmt, wobei ein Wert der Kenngröße einem charakteristischen Merkmal der Projektionseinheit (28), einem Defekt der Projektionseinheit (28) und/oder einer Defektklasse der Projektionseinheit (28) zugeordnet wird. Die Qualität der Projektionseinheit (28) wird anhand der wenigstens einen Kenngröße bewertet. Des Weiteren sind ein Prüfsystem (10) zur Bewertung der Qualität einer mehrkanaligen mikro- und/oder subwellenlängenoptischen Projektionseinheit (28) sowie ein Computerprogramm offenbart.

Fig. 1



Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Bewertung der Qualität einer mehrkanaligen mikro- und/oder subwellenlängenoptischen Projektionseinheit. Die Erfindung betrifft ferner ein Prüfsystem zur Bewertung der Qualität einer mehrkanaligen mikro- und/oder subwellenlängenoptischen Projektionseinheit sowie ein Computerprogramm zur Ausführung des Verfahrens.

[0002] Mikrooptische Projektionseinheiten und subwellenlängenoptische Projektionseinheiten umfassen typischerweise mehrere mikrooptische Elemente bzw. subwellenlängenoptische Elemente. Die Projektionseinheiten umfassen typischerweise mehrere hundert oder mehrere tausend dieser optischen Elemente, wobei der Durchmesser der einzelnen optischen Elemente typischerweise kleiner als 1 mm (mikrooptische Projektionseinheit), insbesondere kleiner als 1 μm (subwellenlängenoptische Projektionseinheit) ist und in der Größenordnung von mehreren Nanometern liegen kann.

[0003] Im Vergleich zur klassischen Optik können sich die Fertigungstechniken mikrooptischer und/oder subwellenlängenoptischer Einrichtungen stark unterscheiden, da die erforderliche Packungsdichte optisch aktiver Elemente erheblich höher ist.

[0004] Bei der Fertigung der Projektionseinheiten können Abweichungen bei einem oder mehreren Parametern des Fertigungsprozesses auftreten. Zum Beispiel kann die Größe, Krümmung und/oder Position der optischen Elemente aufgrund von Toleranzen und Prozessveränderungen variieren. Insbesondere kann der Abstand zwischen einzelnen optischen Elementen unterschiedlich sein.

[0005] Zudem können im Wafer Nadellöcher vorhanden sein, die dazu führen, dass in Bereichen außerhalb der optischen Elemente Licht durch die Projektionseinheit durchgelassen wird.

[0006] Insgesamt bestehen hohe Anforderungen an die Positionierungsgenauigkeit der einzelnen optischen Elemente der Projektionseinheiten und auch an andere Defekte wie die oben erwähnten Nadellöcher.

[0007] Je nach der Anwendung der Projektionseinheit können Defekte bzw. Fehler jedoch bis zu einem gewissen Grad tolerierbar sein. Somit muss die Qualität der Projektionseinheiten beurteilt bzw. bewertet werden, um zu gewährleisten, dass die jeweiligen Qualitätskriterien von der Projektionseinheit erfüllt werden.

[0008] Die Aufgabe der Erfindung besteht daher darin, ein Verfahren sowie ein System zur Bewertung der Qualität mikro- und/oder subwellenlängenoptischer Projektionseinheiten zu schaffen.

[0009] Die Aufgabe wird erfindungsgemäß durch ein Verfahren zur Bewertung der Qualität einer mehrkanaligen mikro- und/oder subwellenlängenoptischen Projektionseinheit gelöst. Das Verfahren umfasst die folgenden Schritte: Wenigstens ein vorgegebener Abschnitt der mikro- und/oder subwellenlängenoptischen Projektionseinheit wird so beleuchtet, dass von wenigstens zwei Kanälen des vorgegebenen Abschnitts der mehrkanaligen mikro- und/oder subwellenlängenoptischen Projektionseinheit ein Bild erzeugt wird. Das Bild wird aufgenommen und analysiert. Anhand der Analyse des Bildes wird wenigstens eine Kenngröße bestimmt, wobei ein Wert der Kenngröße wenigstens einem charakteristischen Merkmal der Projektionseinheit, wenigstens einem Defekt der Projektionseinheit und/oder wenigstens einer Defektklasse der Projektionseinheit zugeordnet wird. Die Qualität der Projektionseinheit wird anhand der wenigstens einen Kenngröße bewertet.

[0010] Subwellenlängenoptische Elemente, insbesondere Subwellenlängenlinsen, können auch als nanooptische Elemente, insbesondere Nanolinsen, bezeichnet werden.

[0011] Die Erfindung beruht auf der Erkenntnis, dass Defekte der Projektionseinheit in direktem Zusammenhang mit bestimmten Defekten im von der Projektionseinheit erzeugten Bild stehen. Beispielsweise führen Abweichungen bei der Position optisch aktiver Bereiche der Projektionseinheit und Abweichungen von einer gewünschten Krümmung der einzelnen optisch aktiven Bereiche und/oder Nadellöcher im Wafer jeweils zu entsprechend zugehörigen charakteristischen

Defekten im Bild.

[0012] Ferner verursachen unerwünschte Nadellöcher in der Projektionseinheit helle kreisförmige Flecken im Bild; unbeabsichtigte Fehlausrichtungen beim Herstellungsprozess führen zu unscharfen Konturen; mechanische Defekte an Linsen (z.B. Kratzer und/oder Risse) führen zu kreisförmigen schwarzen Ringen und/oder dunklen Flecken; unerwünschte Verunreinigungen im Herstellungsprozess haben dunkle Sprengelungen (dunkle Flecken) zur Folge, z.B. Ungleichmäßigkeiten im Muster.

[0013] Durch Analysieren der Defekte in dem von der Projektionseinheit erzeugten Bild kann die Qualität der Projektionseinheit besonders schnell und bequem bewertet werden, indem Bildverarbeitungstechniken auf das aufgenommene Bild angewendet werden. Aus dem Stand der Technik sind viele verschiedene, gut ausgearbeitete Bildverarbeitungstechniken bekannt.

[0014] Das Bild, das von zumindest dem vorgegebenen Abschnitt der Projektionseinheit erzeugt, aufgenommen und anschließend analysiert wird, kann das gleiche Bild sein, das die Projektionseinheit während ihres bestimmungsgemäßen Gebrauchs erzeugt, oder Teile davon.

[0015] Alternativ oder zusätzlich kann das aufzunehmende und zu analysierende Bild erzeugt werden, indem zumindest der vorgegebene Abschnitt auf die gleiche Weise beleuchtet wird wie während des bestimmungsgemäßen Gebrauchs der Projektionseinheit.

[0016] Die Projektionseinheit ist beispielsweise so eingerichtet, dass sie eine Projektion eines Motivs auf eine Oberfläche schafft, insbesondere eine Oberfläche in einer vorgegebenen Anordnung bezüglich der Projektionseinheit.

[0017] Gemäß einem Aspekt der Erfindung umfasst die wenigstens eine Kenngröße wenigstens eine der folgenden Größen: Schärfe, Dunkelpegel, Gleichmäßigkeit, Helligkeitsschwankungen und lokale Defekte. Es hat sich herausgestellt, dass diese Größen zur Bewertung der Qualität der Projektionseinheit besonders geeignet sind, da sie bestimmten Defekten, die typischerweise während der Fertigung der Projektionseinheit auftreten können, direkt zugeordnet sind.

[0018] Gemäß einem weiteren Aspekt der Erfindung wird die mikrooptische Projektionseinheit auf der Grundlage der wenigstens einen Kenngröße in eine von wenigstens zwei Qualitätsklassen eingeteilt. Somit kann die Projektionseinheit in eine von genau zwei Klassen eingeteilt werden, z.B. „Qualitätsprüfung bestanden“ oder „Qualitätsprüfung nicht bestanden“. Alternativ dazu kann die Projektionseinheit in eine von mehreren Klassen eingeteilt werden, wie etwa „Gütegrad A“, „Gütegrad B“ etc. Jede der Klassen ist bestimmten Qualitätsanforderungen zugeordnet, die erfüllt werden müssen, insbesondere bestimmten Schwellenwerten für eine oder mehrere der Kenngrößen, die erreicht werden müssen.

[0019] Bei einer weiteren Ausführungsform der Erfindung umfasst die Projektionseinheit mehrere mikro- und/oder subwellenlängenoptische Elemente, insbesondere Mikrolinsen und/oder Subwellenlängenlinsen, insbesondere wobei die optischen Elemente eine Größe, eine Krümmung, eine Maskierung und/oder eine Position in der Projektionseinheit aufweisen, wobei die Größe, die Krümmung und/oder die Position wenigstens eines der wenigstens einen charakteristischen Merkmals der Projektionseinheit ist. Abweichungen in der Position der optischen Elemente und/oder Abweichungen von einer gewünschten Krümmung der einzelnen optischen Elemente sind bestimmten Defekten im aufgenommenen Bild zugeordnet. Folglich können Defekte im aufgenommenen Bild mit Defekten der Projektionseinheit und/oder der optischen Elemente in Verbindung gebracht werden, derart, dass die Defekte im aufgenommenen Bild zur Bewertung der Qualität der Projektionseinheit dienen können.

[0020] Allgemein gesprochen ist jedes der optischen Elemente so eingerichtet, dass es Licht in einer vorbestimmten Weise beugt, bricht und/oder leitet. Somit können optische Elemente mit beugenden, brechenden und/oder leitenden Eigenschaften auf derselben Projektionseinheit, insbesondere auf einem gemeinsamen Substrat, implementiert sein.

[0021] Wenigstens einige der optischen Elemente, insbesondere alle optischen Elemente können identisch zueinander ausgeführt sein. Ebenso können wenigstens einige der optischen Ele-

mente, insbesondere alle optischen Elemente verschieden voneinander ausgeführt sein, d.h. die optischen Elemente können sich z.B. hinsichtlich der Größe und/oder Krümmung unterscheiden.

[0022] Die Projektionseinheit kann wenigstens ein zusätzliches mechanisches Merkmal umfassen, z.B. einen Abstandshalter und/oder wenigstens einen Vorsprung. Der Abstandshalter und/oder der wenigstens eine Vorsprung kann bzw. können dazu dienen, während der Verwendung der Projektionseinheit einen Abstand zwischen der Projektionseinheit und einem entsprechenden weiteren Bauteil einzustellen.

[0023] Insbesondere kann ein geometrisches Merkmal des Abstandhalters und/oder des wenigstens einen Vorsprungs eine Kenngröße der Projektionseinheit sein. Zum Beispiel kann eine Höhe, Breite und/oder Tiefe des Abstandhalters und/oder des wenigstens einen Vorsprungs eine Kenngröße der Projektionseinheit sein.

[0024] Insbesondere bilden die optischen Elemente ein Array, wobei das Array einen Abstand zwischen zwei benachbarten optischen Elementen aufweist, der wenigstens eines der wenigstens einen charakteristischen Merkmale der Projektionseinheit ist. Der Abstand kann der Mindestabstand zwischen den einzelnen benachbarten optischen Elementen, der Höchstabstand zwischen den einzelnen benachbarten optischen Elementen und/oder der durchschnittliche Abstand zwischen den einzelnen benachbarten optischen Elementen sein.

[0025] Bei einer weiteren Ausführungsform der Erfindung wird die Qualität der Projektionseinheit während der Herstellung der Projektionseinheit, insbesondere am Ende der Fertigungslinie, bewertet. Vorzugsweise wird die Qualitätsbewertung nach mehreren Zwischenschritten der Herstellung der Projektionseinheit wiederholt. Auf der Grundlage der Bewertung der Qualität während der Herstellung wird die Projektionseinheit eventuell, falls erforderlich, in einer früheren Phase der Herstellung aussortiert, wodurch Fertigungszeit und Fertigungshilfsmittel eingespart werden.

[0026] Gemäß einem weiteren Aspekt der Erfindung werden Herstellungsparameter, insbesondere wenigstens eines der charakteristischen Merkmale, auf der Grundlage der Qualitätsbewertung der Projektionseinheit angepasst. Somit können die Prozessparameter so angepasst werden, dass die Qualität der Projektionseinheit verbessert wird. Mit anderen Worten, etwaigen Fehlern und/oder Abweichungen kann während der Fertigung Rechnung getragen werden, wodurch die Auswirkungen dieser Fertigungsabweichungen abgemildert werden.

[0027] Herstellungsparameter, die angepasst werden können, sind beispielsweise die Basisschichtdicke der Projektionseinheit, die Linsenform und/oder die Linsenkrümmung.

[0028] Vorzugsweise wird das Bild der Projektionseinheit über ein statistisches Verfahren und/oder über ein Maschinenlernmodul analysiert, insbesondere wobei das Maschinenlernmodul ein vortrainiertes künstliches neuronales Netz umfasst. Mit anderen Worten, das Bild kann mit einem rein klassischen, deterministischen Verfahren analysiert werden, das auf klassischen Algorithmen, d.h. Rechenregeln, beruht. Das Bild kann hingegen auch allein über ein Verfahren des maschinellen Lernens oder mittels einer Mischung aus beidem analysiert werden.

[0029] Das Maschinenlernmodul kann mit markierten Trainingsdaten vortrainiert sein, wobei die markierten Trainingsdaten Probenbilder umfassen, die von dem vorgegebenen Abschnitt einer optischen Probenprojektionseinheit erzeugt werden, und wobei die markierten Trainingsdaten die wenigstens eine Kenngröße umfassen, die den jeweiligen Probenbildern und/oder der Qualitätsklasse der jeweiligen Probenprojektionseinheit entspricht. Somit wird das Maschinenlernmodul überwacht vortrainiert.

[0030] Vorzugsweise umfasst das Maschinenlernmodul ein künstliches neuronales Netz, zum Beispiel ein faltendes neuronales Netz (engl. convolutional neural network (CNN)) und/oder ein rekurrentes neuronales Netz (engl. recurrent neural network (RNN)), das so vortrainiert ist, dass es das Bild analysiert, die wenigstens eine Kenngröße bestimmt und/oder die Qualität der Projektionseinheit bewertet.

[0031] Alternativ dazu kann das Maschinenlernmodul halbüberwacht mit teilweise markierten Daten oder unüberwacht vortrainiert werden.

[0032] Gemäß einem weiteren Aspekt der Erfindung wird die wenigstens eine den jeweiligen Probenbildern entsprechende Kenngröße durch Anwendung des statistischen Verfahrens auf die Probenbilder erhalten. Auf diese Weise wird das Probenbild zunächst über den klassischen statistischen Ansatz analysiert, wobei das Ergebnis der statistischen Analyse die Markierung für das jeweilige Bild ergibt.

[0033] Mit anderen Worten, der statistische Ansatz wird für einen begrenzten Satz von Probenbildern durchgeführt. Die Probenbilder und das Ergebnis der statistischen Analyse bilden die Trainingsdaten für das Maschinenlernmodul. Das statistische Verfahren wird also eventuell nur auf diesen begrenzten Trainingssatz angewendet, um das Maschinenlernmodul zu trainieren, während die Qualitätsbewertung während der Herstellung der Projektionseinheit über das Maschinenlernmodul erfolgt.

[0034] Erfindungsgemäß wird die Aufgabe ferner durch ein Prüfsystem zur Bewertung der Qualität einer mehrkanaligen mikro- und/oder subwellenlängenoptischen Projektionseinheit gelöst, das eine Beleuchtungseinheit, eine Bildaufnahmeverrichtung, ein Bildanalysemodul und ein Steuermodul umfasst, wobei das Steuermodul so eingerichtet ist, dass es das Prüfsystem dazu veranlasst, das oben beschriebene Verfahren durchzuführen. Hinsichtlich der Vorteile und Merkmale des Prüfsystems wird auf die vorstehenden Erläuterungen bezüglich des Verfahrens verwiesen, die auch für das Prüfsystem gelten und umgekehrt.

[0035] Gemäß einem Aspekt der Erfindung umfasst das Prüfsystem ein Prüfobjekt, insbesondere wobei das Prüfobjekt eine mehrkanalige mikro- und/oder subwellenlängenoptische Projektionseinheit ist. In der Regel ist das Prüfobjekt ein Substrat, wie ein Wafer, mit einer oder mehreren mehrkanaligen mikro- und/oder subwellenlängenoptischen Projektionseinheiten. Insbesondere kann das Prüfobjekt als eine einzige Projektionseinheit ausgebildet sein.

[0036] Erfindungsgemäß wird die Aufgabe ferner durch ein Computerprogramm gelöst, das Befehle umfasst, die bei Ausführung des Programms von einer Verarbeitungseinheit des Steuermoduls des oben beschriebenen Prüfsystems bewirken, dass das Prüfsystem die Schritte des oben beschriebenen Verfahrens ausführt. Hinsichtlich der Vorteile und Merkmale des Computerprogramms wird auf die vorstehenden Erläuterungen bezüglich des Verfahrens verwiesen, die auch für das Computerprogramm gelten und umgekehrt.

[0037] Darin und im Folgenden werden unter dem Begriff „Befehle“ Befehle in Form von Programmcode und/oder Programmcodemodulen in kompilierter und/oder in unkompilierter Form verstanden, wobei die Befehle in jeder beliebigen Programmiersprache und/oder in Maschinensprache erstellt sein können.

[0038] Die vorstehenden Aspekte und viele der damit einhergehenden Vorteile des beanspruchten Gegenstands werden leichter erkennbar, wenn sie anhand der folgenden ausführlichen Beschreibung in Verbindung mit den beigefügten Zeichnungen besser verständlich werden; darin zeigen:

- [0039]** - Figur 1 schematisch ein erfindungsgemäßes Prüfsystem,
- [0040]** - Figur 2 eine Detailansicht eines von einer erfindungsgemäßen Projektionseinheit erzeugten Bildes,
- [0041]** - Figur 3 ein schematisches Flussdiagramm eines Verfahrens zur Bewertung der Qualität einer erfindungsgemäßen mehrkanaligen mikro- und/oder subwellenlängenoptischen Projektionseinheit,
- [0042]** - Figur 4 bis 6 jeweils Veranschaulichungen einzelner Schritte des Verfahrens aus Figur 3.

[0043] In Figur 1 ist schematisch ein Prüfsystem 10 mit einer Beleuchtungseinheit 12, einem Prüfobjekt 14, einer Projektionsfläche 16 und einer Bildaufnahmeverrichtung 18 gezeigt.

[0044] Das Prüfsystem 10 umfasst ferner eine Steuer- und Analyseeinheit 20 mit einem Steuermodul 22 und einem Bildanalysemodul 24, wobei die Steuer- und Analyseeinheit 20 sowohl mit

der Beleuchtungseinheit 12 als auch mit der Bildaufnahmevorrichtung 18 signalübertragend verbunden ist.

[0045] Das Prüfobjekt 14 ist ein Substrat 26, das mehrere mehrkanalige mikro- und/oder subwellenlängenoptische Projektionseinheiten 28 umfasst. In dem in Figur 1 gezeigten Fall umfasst das Substrat 26 vier Projektionseinheiten 28. Diese Zahl dient jedoch nur zur Veranschaulichung. Das Substrat 26 kann auch eine beliebige andere Anzahl Projektionseinheiten 28 umfassen.

[0046] Insbesondere kann das Prüfobjekt 14 als eine einzige Projektionseinheit 28 aufgebaut sein.

[0047] Die Projektionseinheiten 28 umfassen jeweils mehrere mikro- und/oder subwellenlängenoptische Elemente 30. Die Projektionseinheiten 28 können jeweils zwischen zehn und 1000 optische Elemente 30 umfassen, insbesondere zwischen 30 und 500 optische Elemente 30, zum Beispiel zwischen 50 und 300 optische Elemente 30.

[0048] Ein Durchmesser der einzelnen optischen Elemente 30 kann bei mikrooptischen Projektionseinheiten 28 kleiner als 1 mm bzw. bei subwellenlängenoptischen Projektionseinheiten 28 kleiner als 1 µm sein und kann in der Größenordnung von mehreren Nanometern liegen.

[0049] Ein Bereich zwischen den optischen Elementen 30 ist lichtundurchlässig, so dass Licht die Projektionseinheiten nur durch die optischen Elemente 30 durchtreten kann.

[0050] Allgemein ausgedrückt ist jedes der optischen Elemente 30 so eingerichtet, dass es Licht in einer vordefinierten Weise bricht, beugt und/oder leitet. Mit anderen Worten, jedes der optischen Elemente 30 stellt einen Kanal der mehrkanaligen Projektionseinheit 28 bereit.

[0051] Genauer gesagt haben die optischen Elemente 30 jeweils eine vorgegebene Größe, eine vorgegebene Krümmung und/oder sind so mit einer Maskierung versehen, dass die gewünschten optischen Eigenschaften der einzelnen optischen Elemente 30 erzielt werden.

[0052] Die optischen Elemente 30 können eine Maskierung aufweisen, die zur Schaffung einer Projektion eines Motivs auf eine Oberfläche eingerichtet ist. Der Ort der Oberfläche bezüglich der Projektionseinheit 28 ist bekannt. Beispielsweise ist die Projektionseinheit 28 in einer Tür eines Autos montiert, und die optischen Elemente 30 weisen eine Maskierung auf, so dass eine Projektion eines Emblems des Autoherstellers auf den Fahrbahnbelag neben dem Auto erzeugt wird, wenn die Projektionseinheit 28 beleuchtet wird.

[0053] Dabei können zumindest einige der optischen Elemente 30, insbesondere alle optischen Elemente 30, identisch zueinander ausgebildet sein. Ebenso können zumindest einige der optischen Elemente 30, insbesondere alle optischen Elemente 30, verschieden voneinander ausgebildet sein, d.h. sich z.B. in der Größe, Krümmung und/oder Maskierung unterscheiden.

[0054] Die optischen Elemente 30 sind je nach dem bestimmten Anwendungsgebiet der Projektionseinheit 28 in einer vorbestimmten Weise in der jeweiligen Projektionseinheit 28 angeordnet.

[0055] Genauer gesagt sind die optischen Elemente 30 so angeordnet, dass hinter der Projektionseinheit 28 ein gewünschtes Bild 32 entsteht, wenn die Projektionseinheit 28 beleuchtet wird.

[0056] Die optischen Elemente 30 sind entsprechend einem vorgegebenen Muster über die Fläche der Projektionseinheit 28 verteilt. Dies ist in Figur 1 dargestellt, in der das durch Beleuchten einer der Projektionseinheiten 28 erzeugte Bild 32 auf der Projektionsfläche 16 erfasst wird.

[0057] Mit anderen Worten, die optischen Elemente 30 bilden ein mehrkanaliges mikro- und/oder subwellenlängenoptisches Array, das so eingerichtet ist, dass es ein Bild 32 mit vordefinierten Eigenschaften erzeugt, wenn es beleuchtet wird. Dabei werden die von den einzelnen optischen Elementen 30 erzeugten Bilder - die auch als „Strahlchen“ (engl. beamlets) bezeichnet werden können - überlagert, was zu einer statistischen Mischung der von den einzelnen optischen Elementen 30 erzeugten Bilder führt.

[0058] Alternativ dazu können die optischen Elemente 30 zufällig über die Fläche der entsprechenden Projektionseinheit 28 verteilt sein.

[0059] In Figur 2 ist das erzeugte Bild 32 detaillierter gezeigt. Das Bild 32 enthält dunkle Bereiche 34 und beleuchtete Bereiche 36. Bei dem konkreten Beispiel aus Figur 2 handelt es sich bei den beleuchteten Bereichen 36 um Streifen, die jeweils zwei gerade Abschnitte umfassen, die über einen gekrümmten Abschnitt miteinander verbunden sind.

[0060] Bei der Herstellung der Projektionseinheiten 28 können Abweichungen bei einem oder mehreren Prozessparametern auftreten. Beispielsweise können die Größe, Krümmung und/oder Position der optischen Elemente 30 aufgrund von Toleranzen und Prozessschwankungen variieren. Insbesondere kann der Abstand zwischen einzelnen optischen Elementen 30 variieren.

[0061] Darüber hinaus können Defekte, wie etwa Nadellöcher im Wafer 26, vorhanden sein, die in Bereichen außerhalb der optischen Elemente 30 zur Transmission von Licht durch die Projektionseinheit 28 führen.

[0062] Je nach Anwendung der Projektionseinheit 28 sind derartige Defekte eventuell bis zu einem gewissen Grad tolerierbar. Die Qualität der Projektionseinheiten 28 muss daher beurteilt werden, um zu gewährleisten, dass die entsprechenden Gütekriterien von der Projektionseinheit 28 erfüllt werden.

[0063] Das Prüfsystem 10 ist so eingerichtet, dass es ein Verfahren zur Bewertung der Qualität der Projektionseinheiten 28 durchführt, das im Folgenden unter Bezug auf Figur 3 beschrieben ist.

[0064] Genauer gesagt wird auf einer Zentraleinheit der Steuer- und Analyseeinheit 20 ein Computerprogramm ausgeführt, das das Prüfsystem 10 dazu veranlasst, das nachstehend beschriebene Verfahren durchzuführen.

[0065] Zunächst wird zumindest ein vorgegebener Abschnitt wenigstens einer der Projektionseinheiten 28 von der Beleuchtungseinheit 12 beleuchtet (Schritt S1). Zum Beispiel wird eine der Projektionseinheiten 28 vollständig beleuchtet, während die anderen Projektionseinheiten auf dem Wafer 26 nicht beleuchtet werden.

[0066] Alternativ dazu wird gegebenenfalls nur ein bestimmter Abschnitt einer der Projektionseinheiten 28 beleuchtet, beispielsweise ein Abschnitt mit einer bestimmten Struktur optischer Elemente 30, deren Qualität bewertet werden soll.

[0067] Als Alternative können auch mehrere Projektionseinheiten 28 gleichzeitig beleuchtet werden.

[0068] Ohne Einschränkung der Allgemeinheit wird nachstehend der Fall beschrieben, in dem eine der Projektionseinheiten 28 vollständig beleuchtet wird.

[0069] Aufgrund der Beleuchtung der Projektionseinheit 28 wird von der Projektionseinheit 28 ein Bild erzeugt und auf die Projektionsfläche 16 projiziert. Mit anderen Worten, das Bild 32 wird von der Projektionseinheit 28 erzeugt und auf die Projektionsfläche 16 projiziert.

[0070] Das Bild, das von zumindest dem vorgegebenen Abschnitt der Projektionseinheit 28 erzeugt wird, kann das gleiche Bild oder Teile davon sein, das die Projektionseinheit 28 während ihres bestimmungsgemäßen Gebrauchs erzeugt.

[0071] Alternativ oder zusätzlich kann das Bild erzeugt werden, indem zumindest der vorgegebene Abschnitt der Projektionseinheit 28 in der gleichen Weise beleuchtet wird wie bei der bestimmungsgemäßen Verwendung der Projektionseinheit 28.

[0072] Das von der Projektionseinheit 28 erzeugte Bild wird dann über die Bildaufnahmeverrichtung 18 aufgenommen (Schritt S2). Allgemein gesprochen ist das aufgenommene Bild eine digitale Darstellung des erzeugten Bildes 32, wobei das aufgenommene Bild mehrere Pixel umfasst, die jeweils einen Helligkeitswert und/oder einen Farbwert haben.

[0073] Die Bildaufnahmeverrichtung 18 kann beispielsweise als Kamera, insbesondere als hochauflösende Kamera, ausgeführt sein.

[0074] Es ist auch denkbar, dass die Bildaufnahmeverrichtung 18 in die Projektionsfläche 16 in-

tegriert ist. Die Projektionsfläche 16 kann zum Beispiel lichtempfindliche Elemente umfassen, die zum Aufnehmen des von der Projektionseinheit 28 erzeugten Bildes eingerichtet sind.

[0075] Das aufgenommene Bild wird dann an die Steuer- und Analyseeinheit 20, genauer gesagt an das Bildanalysemodul 24, weitergeleitet und vom Bildanalysemodul 24 analysiert (Schritt S3).

[0076] Das Bildanalysemodul 24 bestimmt dann auf der Grundlage der Analyse des Bildes wenigstens eine Kenngröße des aufgenommenen Bildes (Schritt S4).

[0077] Allgemein gesprochen ist die wenigstens eine Kenngröße der Qualität der Projektionseinheit 28 zugeordnet. Dies ist darin begründet, dass sich Defekte des Wafers 26 und/oder Defekte der optischen Elemente 30 in entsprechenden Defekten im Bild, d.h. Defekten im erzeugten Bild 32, zeigen.

[0078] So führen beispielsweise Abweichungen bei der Position der einzelnen optischen Elemente 30, Abweichungen von einer gewünschten Krümmung der einzelnen optischen Elemente 30 und/oder Nadellöcher im Wafer 26 jeweils zu entsprechend zugeordneten charakteristischen Defekten im Bild.

[0079] Es hat sich herausgestellt, dass es mehrere Bildhauptmerkmale gibt, die sich gut zur Bewertung der Qualität der Projektionseinheit 28 eignen, nämlich Schärfe, Dunkelpiegel und Gleichmäßigkeit, wobei die Gleichmäßigkeit ihrerseits Helligkeitsschwankungen, Hintergrundschwankungen und lokale Defekte umfasst. Eine detailliertere Definition dieser Bildmerkmale folgt weiter unten.

[0080] Dementsprechend kann die wenigstens eine Kenngröße eine oder mehrere der folgenden Größen umfassen: Schärfe, Dunkelpiegel, Gleichmäßigkeit, Helligkeitsschwankungen, Hintergrundschwankungen, lokale Defekte, Krümmung der einzelnen optischen Elemente 30, Mindestabstand zwischen den einzelnen optischen Elementen 30, Höchstabstand zwischen den einzelnen optischen Elementen 30 und/oder durchschnittlicher Abstand zwischen den einzelnen optischen Elementen 30.

[0081] Das Bildanalysemodul 24 ermittelt die wenigstens eine Kenngröße über eine Analyse des Bildes, die auf einem statistischen Verfahren und/oder einem Maschinenlernverfahren beruht.

[0082] Mit anderen Worten, das Bild kann mit einem rein klassischen, deterministischen Verfahren analysiert werden, das auf klassischen Algorithmen, d.h. Rechenregeln, beruht. Andererseits kann das Bild allein mittels eines Verfahrens des maschinellen Lernens analysiert werden oder über eine Mischung aus beiden.

[0083] Der Fall des statistischen Ansatzes wird im Folgenden mit Bezug auf die Figuren 4 bis 6 näher erläutert.

[0084] In Figur 4 sind schematisch die Schritte gezeigt, die zur Bestimmung der Schärfe des Bildes unternommen werden.

[0085] In der ersten Spalte von Figur 4 sind zwei Bilder mit dem gleichen Muster gezeigt. Das Bild in der ersten Zeile ist jedoch scharf, während das Bild in der zweiten Zeile unscharf ist.

[0086] Ein Maß für die Schärfe des Bildes wird durch das folgende Vorgehen erhalten: Zuerst wird eine schnelle Fourier-Transformation des Bildes bestimmt (zweite Spalte in Figur 4). Das Fourier-transformierte Bild wird dann autokorreliert (dritte Spalte), und die inverse schnelle Fourier-Transformation des autokorrelierten Bildes wird bestimmt (vierte Spalte).

[0087] Ein Mittelwert der Intensität, eine normierte Intensität und/oder ein Mittelwert der normierten Intensität des Ergebnisses der inversen Fourier-Transformation wird bzw. werden bestimmt, das ein Maß für die Schärfe des Originalbildes darstellt. Dabei ist ein höherer Mittelwert der Intensität mit einem schärferen Bild verbunden, während ein niedrigerer Mittelwert der Intensität mit einem weniger scharfen Bild verbunden ist.

[0088] Für die Normierung wird beispielsweise der höchste Wert des Bildes in Bezug auf die Bildhöhe, die Bildbreite, den Bildmittelwert und/oder die Bildstandardabweichung normiert.

[0089] In Figur 5 sind die Hauptschritte gezeigt, die unternommen werden, um die Kenngröße „Dunkelpegel“ zu erhalten. Allgemein gesprochen ist der Dunkelpegel ein Maß für die Helligkeit derjenigen Bereiche der Projektionsfläche 16, die nicht beleuchtet werden sollten, d.h. für die Helligkeit der dunklen Bereiche 34.

[0090] Das Bild auf der linken Seite von Figur 5 zeigt das Originalbild, das von der Bildaufnahmeverrichtung 18 aufgenommen wurde.

[0091] Zur Bestimmung des Dunkelpegels wird eine Kontrastschwelle in Bezug auf den Hintergrund und/oder eine Helligkeitsschwelle eingestellt, um die beleuchteten Bereiche 36 von den dunklen Bereichen 34 (Hintergrund) zu unterscheiden, wie im Bild auf der rechten Seite von Figur 5 veranschaulicht ist. Mit anderen Worten, jedes Pixel des aufgenommenen Bildes wird entweder in „beleuchtet“ (gepunkteter Bereich) oder „nicht beleuchtet“ (schraffierter Bereich) kategorisiert.

[0092] Danach wird ein durchschnittlicher Helligkeitspegel der als „nicht beleuchtet“ kategorisierten Pixel, d.h. ein durchschnittlicher Helligkeitspegel und/oder ein durchschnittlicher Kontrast der dunklen Bereiche 34 bestimmt.

[0093] Der Dunkelpegel wird eventuell nur für eine konkrete Region der dunklen Bereiche 34 bestimmt, d.h. für eine so genannte Region von Interesse.

[0094] In Figur 6 ist veranschaulicht, wie die Kenngröße „Gleichmäßigkeit“ bestimmt wird.

[0095] Zunächst werden die Ränder der beleuchteten Bereiche 36 so bestimmt, dass der einzelne beleuchtete Bereich 36 einzeln analysiert werden kann. Das Ergebnis ist auf der linken Seite von Figur 6 gezeigt, wo der oberste streifenförmige beleuchtete Bereich 36 isoliert wurde.

[0096] Dann wird ein Maskenfilter 38 auf den isolierten beleuchteten Bereich 36 aufgebracht, wobei der Maskenfilter eine vorbestimmte Größe und eine vorbestimmte Helligkeitsschwelle hat. Allgemein ausgedrückt bestimmt der Maskenfilter 38 den Grad der Schwankungen des Helligkeitspegels innerhalb der vorbestimmten Größe des Maskenfilters 38. Dabei wird der Maskenfilter 38 nacheinander auf den ganzen beleuchteten Bereich 36 aufgebracht.

[0097] Mit anderen Worten, die Kenngröße „Gleichmäßigkeit“ stellt ein Maß für lokale Helligkeitsschwankungen sowie Hintergrundschwankungen innerhalb der beleuchteten Bereiche 36 und damit ein Maß für lokale Defekte der jeweiligen Projektionseinheit 28 und/oder der jeweiligen optischen Elemente 30 dar.

[0098] Anhand der wenigstens einen ermittelten Kenngröße wird die Projektionseinheit 28 in eine von wenigstens zwei Güteklassenkategorien eingeteilt (Schritt S5).

[0099] Zu diesem Zweck wird für wenigstens eine der Kenngrößen, insbesondere für mehrere oder sämtliche Kenngrößen, wenigstens ein vorbestimmtes Qualitätskriterium festgelegt. Das wenigstens eine vorbestimmte Kriterium umfasst zum Beispiel einen Schwellenwert für die Schärfe des Bildes und/oder einen entsprechenden Schwellenwert für die übrigen Kenngrößen.

[00100] Die Projektionseinheit 28 kann in eine von zwei Klassen eingeteilt werden, nämlich „Qualitätsprüfung bestanden“ und „Qualitätsprüfung nicht bestanden“.

[00101] Beispielsweise wird die betreffende Projektionseinheit 28 in die Klasse „Qualitätsprüfung nicht bestanden“ eingestuft, wenn das wenigstens eine Qualitätskriterium nicht erfüllt ist. Entsprechend wird die betreffende Projektionseinheit 28 in die Klasse „Qualitätsprüfung bestanden“ eingestuft, wenn das wenigstens eine Qualitätskriterium erfüllt ist.

[00102] Selbstverständlich kann es mehr als zwei Güteklassen geben. Die betreffende Projektionseinheit wird zum Beispiel in eine der Klassen „Gütegrad A“, „Gütegrad B“ usw. eingestuft, je nachdem, ob eines oder mehrere der Qualitätskriterien erfüllt ist bzw. sind und je nachdem, welches der Qualitätskriterien erfüllt ist.

[00103] Bei unterschiedlichen Anwendungen der Projektionseinheit 28 können unterschiedliche Anforderungen an die Qualität der Projektionseinheit 28 gestellt sein. So ist zwar eine in die Klasse „Gütegrad C“ eingestufte Projektionseinheit 28 möglicherweise für eine bestimmte An-

wendung, bei der eine hohe Qualität der Projektionseinheit 28 erforderlich ist, nicht geeignet, aber es gibt möglicherweise eine Anwendung, bei der die Klasse "Gütegrad C" ausreichend ist. So muss die Projektionseinheit 28 eventuell nicht ausrangiert werden, sondern kann einfach einer anderen Anwendung zugewiesen werden.

[00104] Vorzugsweise wird die Qualität der Projektionseinheit 28 während der Herstellung der Projektionseinheiten 28 bewertet.

[00105] Insbesondere wird die Qualität der Projektionseinheit 28 am Ende der Fertigung der Projektionseinheit 28, d.h. am Ende der Fertigungslinie, bewertet. Die Prozessparameter für die Fertigungslinie können auf der Grundlage des Ergebnisses der Bewertung angepasst werden.

[00106] Alternativ dazu wird die Qualität der Projektionseinheit 28 nach Zwischenschritten der Herstellung der Projektionseinheit 28 wiederholt bewertet. Auf der Grundlage der Qualitätsbewertung wird die betreffende Projektionseinheit 28 eventuell gegebenenfalls in einer früheren Herstellungsstufe aussortiert, wodurch Fertigungszeit und Fertigungshilfsmittel eingespart werden.

[00107] Wenn die Projektionseinheit 28 aufgrund der Zwischenbewertung der Qualität nicht aussortiert wird, können Fertigungsprozessparameter für die weitere Herstellung angepasst werden.

[00108] Die obigen Erläuterungen beziehen sich darauf, dass die Schritte S3 bis S5 über einen klassischen statistischen Ansatz ausgeführt werden.

[00109] Wie bereits oben erwähnt, können diese Schritte jedoch auch über ein Verfahren des maschinellen Lernens durchgeführt werden.

[00110] Genauer gesagt kann die Steuer- und Analyseeinheit 20 bzw. das Bildanalysemodul 24 ein Maschinenlernmodul umfassen, das zur Durchführung der oben beschriebenen Schritte S3 bis S5 eingerichtet ist.

[00111] Dabei umfasst das Maschinenlernmodul ein künstliches neuronales Netz, beispielsweise ein faltendes neuronales Netz (engl. convolutional neural network (CNN)) und/oder ein rekurrentes neuronales Netz (engl. recurrent neural network (RNN)), das so vortrainiert ist, dass es das Bild analysiert, die wenigstens eine Kenngröße bestimmt, die Qualität der jeweiligen Projektionseinheit 28 bewertet und/oder das Prüfobjekt 14 einer Klasse zuordnet.

[00112] Selbstverständlich kann auch jeder andere geeignete Typ eines neuronalen Netzes zum Einsatz kommen.

[00113] Des Weiteren können der statistische Ansatz und der Ansatz des maschinellen Lernens kombiniert werden.

[00114] Insbesondere kann das Maschinenlernmodul mit Daten vortrainiert werden, die durch die Bewertung der Qualität der Projektionseinheit 28 über den statistischen Ansatz gewonnen werden.

[00115] Genauer gesagt werden mehrere Probenbilder in der oben beschriebenen Weise über den statistischen Ansatz analysiert. Dadurch werden markierte Trainingsdaten gewonnen, die einerseits die Probenbilder und andererseits die wenigstens eine den jeweiligen Probenbildern und/oder der Güteklasse der jeweiligen Probenprojektionseinheit 28 entsprechende Kenngröße umfassen.

[00116] Die markierten Trainingsdaten werden dem Maschinenlernmodul zugeführt. Das Maschinenlernmodul bestimmt die wenigstens eine Kenngröße und/oder kategorisiert das betreffende Bild in eine der Güteklassen.

[00117] Danach werden Gewichtungsfaktoren des Maschinenlernmoduls anhand einer Abweichung der ermittelten wenigstens einen Kenngröße und/oder der ermittelten Güteklasse von einer tatsächlichen Kenngröße und/oder einer tatsächlichen Güteklasse der Projektionseinheit 28, die über den statistischen Ansatz bestimmt wurde, angepasst.

[00118] Zusammenfassend sei gesagt, dass das Prüfsystem 10 so eingerichtet ist, dass es die Qualität einzelner oder mehrerer Projektionseinheiten 28 während der Fertigung der Projektions-

einheiten 28 bewertet. Anhand der Qualitätsbewertung werden die einzelnen Projektionseinheiten 28 über einen statistischen Ansatz, über ein Verfahren des maschinellen Lernens oder über eine Kombination aus beiden in Güteklassen eingeteilt.

[00119] Dementsprechend bietet das Prüfsystem 10 eine Möglichkeit, die Eignung einzelner Projektionseinheiten 28 für Anwendungen zu ermitteln, die bestimmte Qualitätsmerkmale erfordern.

Patentansprüche

1. Verfahren zur Bewertung der Qualität einer mehrkanaligen mikro- und/oder subwellenlängenoptischen Projektionseinheit (28), mit den folgenden Schritten:
 - wenigstens ein vorgegebener Abschnitt der mikro- und/oder subwellenlängenoptischen Projektionseinheit (28) wird so beleuchtet, dass von wenigstens zwei Kanälen des vorgegebenen Abschnitts der mehrkanaligen mikro- und/oder subwellenlängenoptischen Projektionseinheit (28) ein Bild erzeugt wird,
 - das von dem vorgegebenen Abschnitt der Projektionseinheit (28) erzeugte Bild wird aufgenommen,
 - das Bild wird analysiert,
 - anhand der Analyse des Bildes wird wenigstens eine Kenngröße bestimmt, wobei ein Wert der Kenngröße wenigstens einem charakteristischen Merkmal der Projektionseinheit (28), wenigstens einem Defekt der Projektionseinheit (28) und/oder wenigstens einer Defektklasse der Projektionseinheit (28) zugeordnet wird, und
 - die Qualität der Projektionseinheit (28) wird anhand der wenigstens einen Kenngröße bewertet.
2. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass die wenigstens eine Kenngröße wenigstens eines der folgenden umfasst: Schärfe, Dunkelpiegel, Gleichmäßigkeit, Helligkeitsschwankungen und lokale Defekte.
3. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die mikrooptische Projektionseinheit (28) auf der Grundlage der wenigstens einen Kenngröße in eine von wenigstens zwei Qualitätsklassen eingeteilt wird.
4. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Projektionseinheit (28) mehrere mikro- und/oder subwellenlängenoptische Elemente (30), insbesondere Mikrolinsen und/oder Subwellenlängenlinsen, umfasst, insbesondere wobei die optischen Elemente (30) eine Größe, eine Krümmung, eine Maskierung und/oder eine Position in der Projektionseinheit (28) aufweisen, wobei die Größe, die Krümmung und/oder die Position wenigstens eines des wenigstens einen charakteristischen Merkmals der Projektionseinheit (28) ist.
5. Verfahren nach Anspruch 4, **dadurch gekennzeichnet**, dass die optischen Elemente (30) ein Array bilden, wobei das Array einen Abstand zwischen zwei benachbarten optischen Elementen (30) aufweist, der wenigstens eines des wenigstens einen charakteristischen Merkmals der Projektionseinheit (28) ist.
6. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Qualität der Projektionseinheit (28) während der Herstellung der Projektionseinheit (28), insbesondere am Ende der Fertigungslinie, bewertet wird.
7. Verfahren nach Anspruch 6, **dadurch gekennzeichnet**, dass Herstellungsparameter, insbesondere wenigstens eines der charakteristischen Merkmale, auf der Grundlage der Qualitätsbewertung der Projektionseinheit (28) angepasst werden.
8. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Bild der Projektionseinheit (28) über ein statistisches Verfahren und/oder über ein Maschinenlernmodul analysiert wird, insbesondere wobei das Maschinenlernmodul ein vortrainiertes künstliches neuronales Netz umfasst.
9. Verfahren nach Anspruch 8, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Maschinenlernmodul mit markierten Trainingsdaten vortrainiert worden ist, wobei die markierten Trainingsdaten Probenbilder umfassen, die von dem vorgegebenen Abschnitt einer optischen Probenprojektionseinheit erzeugt werden, und wobei die markierten Trainingsdaten die wenigstens eine Kenngröße umfassen, die den jeweiligen Probenbildern und/oder der Qualitätsklasse der jeweiligen Probenprojektionseinheit entspricht.

10. Verfahren nach Anspruch 9, **dadurch gekennzeichnet**, dass die wenigstens eine den jeweiligen Probenbildern entsprechende Kenngröße durch Anwendung des statistischen Verfahrens auf die Probenbilder erhalten wird.
11. Prüfsystem zur Bewertung der Qualität einer mehrkanaligen mikro- und/oder subwellenlängenoptischen Projektionseinheit (28), mit einer Beleuchtungseinheit (12), einer Bildaufnahmeverrichtung (18), einem Bildanalysemodul (24) und einem Steuermodul (22), wobei das Steuermodul (22) so eingerichtet ist, dass es das Prüfsystem (10) dazu veranlasst, das Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche durchzuführen.
12. Prüfsystem nach Anspruch 11, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Prüfsystem (10) ein Prüfobjekt (14) umfasst, insbesondere wobei das Prüfobjekt (14) eine mehrkanalige mikro- und/oder subwellenlängenoptische Projektionseinheit (28) ist.
13. Computerprogramm mit Befehlen, die bei Ausführung des Programms von einer Verarbeitungseinheit des Steuermoduls (22) des Prüfsystems (10) nach Anspruch 11 oder 12 bewirken, dass das Prüfsystem (10) die Schritte des Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 10 ausführt.

Hierzu 3 Blatt Zeichnungen

Fig. 1

1 / 3

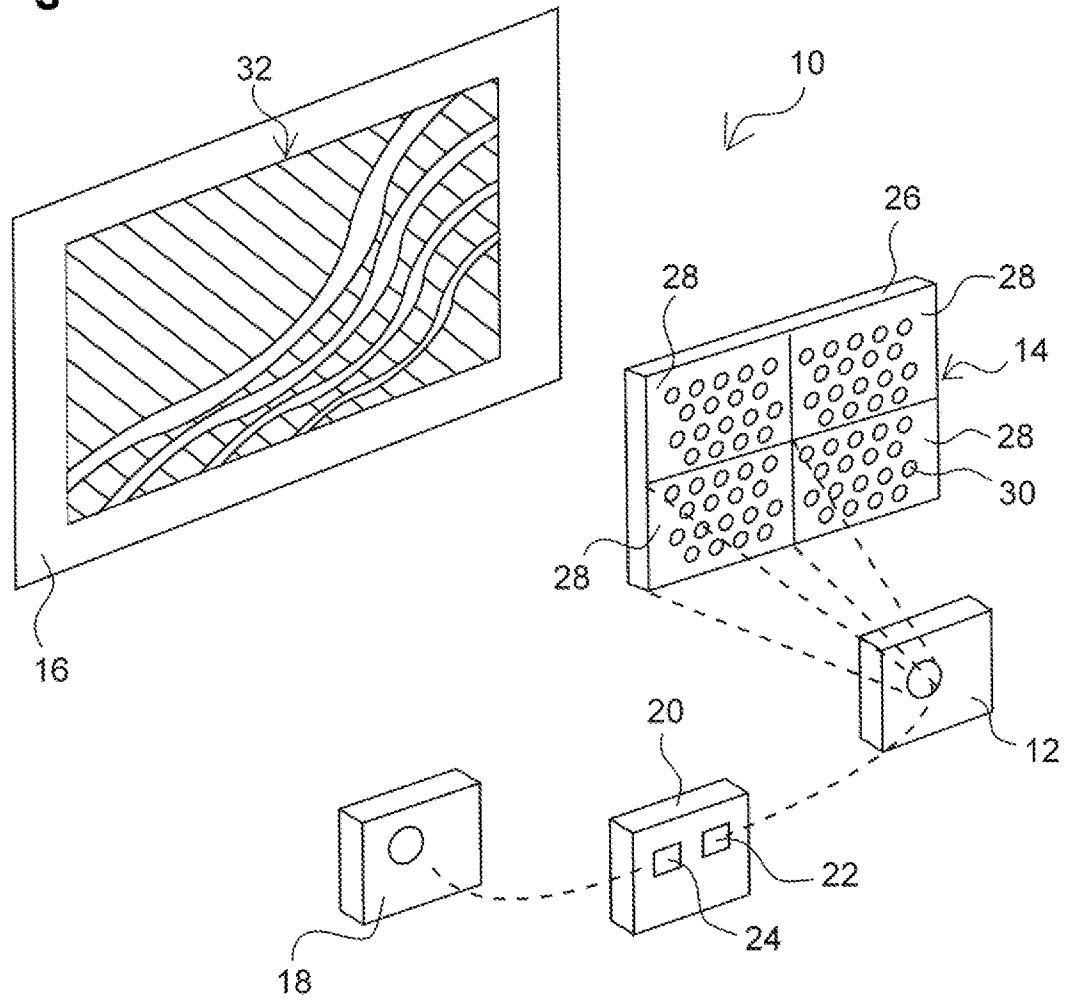
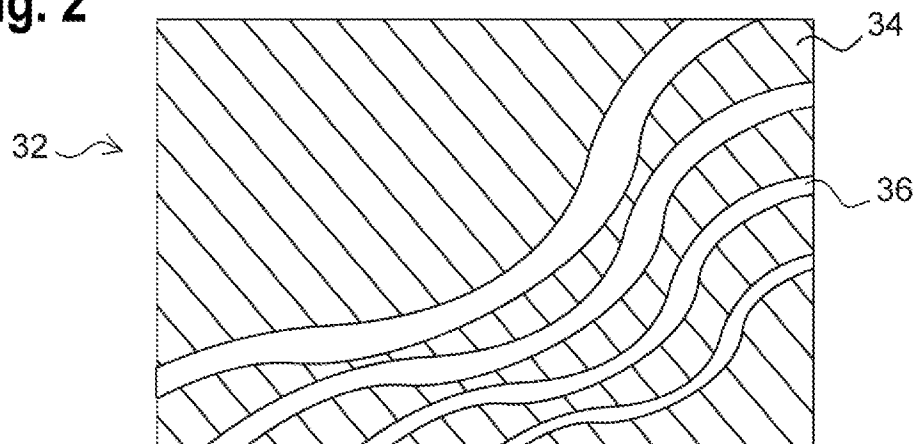


Fig. 2



2 / 3

Fig. 3

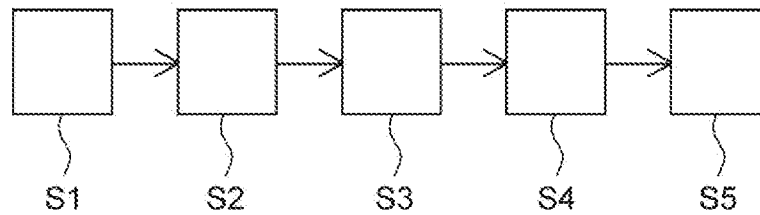
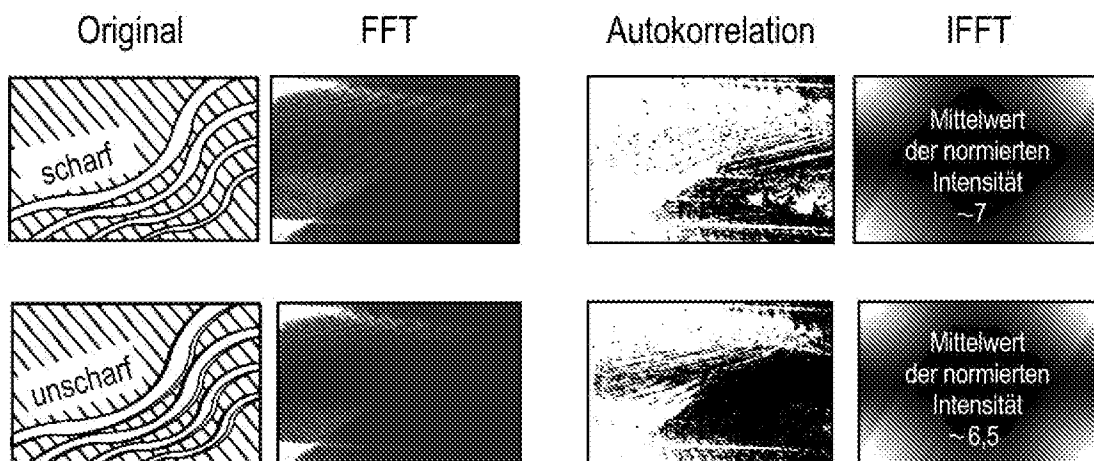


Fig. 4



3 / 3

Fig. 5

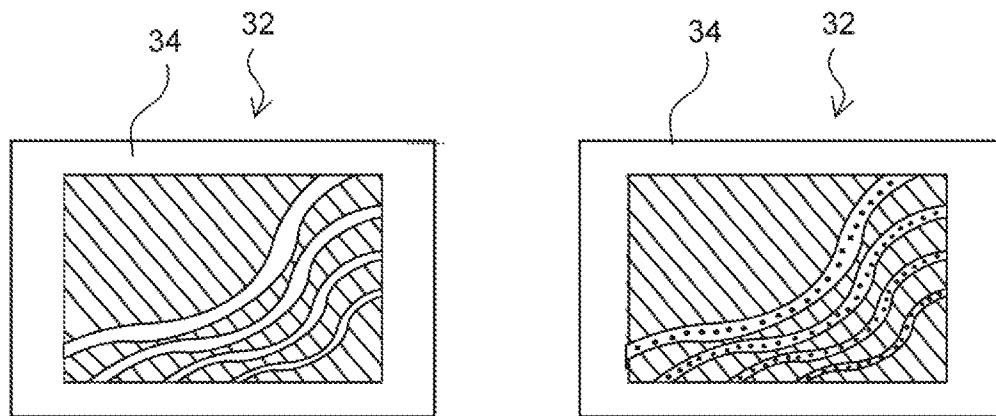


Fig. 6

