



(12) **Offenlegungsschrift**

(21) Aktenzeichen: **10 2022 209 908.7**

(22) Anmeldetag: **21.09.2022**

(43) Offenlegungstag: **21.03.2024**

(51) Int Cl.: **G03F 7/20 (2006.01)**

G02B 5/09 (2006.01)

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

(72) Erfinder:
Endres, Martin, 89551 Königsbronn, DE

(56) Ermittelte Stand der Technik:

DE	103 29 141	A1
US	2006 / 0 132 747	A1
US	2011 / 0 063 596	A1
US	2011 / 0 122 384	A1
US	2012 / 0 075 608	A1
US	2017 / 0 160 643	A1
US	2022 / 0 163 897	A1

FU, NAN [et al.]: EUV lithography: State-of-the-Art Review. J. Microelectron. Manuf, Vol.2, No.2, 2019, S.1-6. DOAJ.org [online]. DOI: 10.33079/jomm.19020202, In: DOAJ

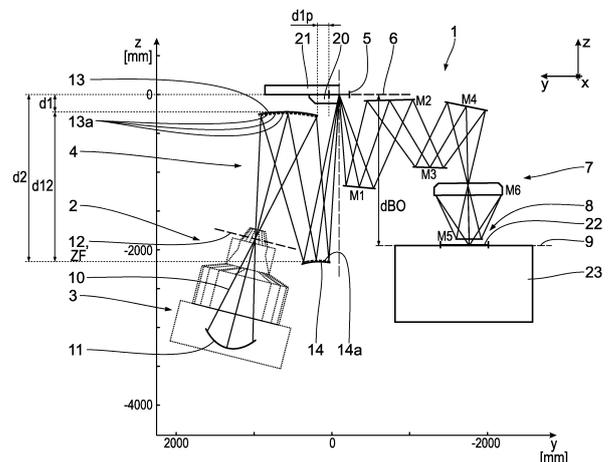
MIYAZAKI, JUNJI [et al.]: EUV lithography technology for high-volume production of semiconductor devices. Journal of Photopolymer Science and Technology, Vol 32, No.2, 2019, S.195-201. J-STAGE [online]. DOI: 10.2494/photopolymer.32.195, In: J-STAGE

Prüfungsantrag gemäß § 44 PatG ist gestellt.

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen.

(54) Bezeichnung: **Facettenspiegel, Beleuchtungsoptik, Anordnung eines Facettenspiegels, Projektionsbelichtungsanlage und Verfahren zur Herstellung eines nanostrukturierten Bauelements**

(57) Zusammenfassung: In einer Projektionsbelichtungsanlage (1) für die Mikrolithographie ist der zweite Facettenspiegel (14) der Beleuchtungsoptik (4) im Bereich der Waferebene (9), insbesondere unterhalb der Waferebene (9), angeordnet.



Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft einen Facettenspiegel für eine Beleuchtungsoptik einer Projektionsbelichtungsanlage. Außerdem betrifft die Erfindung eine Beleuchtungsoptik einer Projektionsbelichtungsanlage. Weiterhin betrifft die Erfindung eine Anordnung eines Facettenspiegels im Strahlengang einer Beleuchtungsoptik und im Strahlengang eines optischen Systems einer Projektionsbelichtungsanlage. Schließlich betrifft die Erfindung ein optisches System für eine Projektionsbelichtungsanlage und eine Projektionsbelichtungsanlage sowie ein Verfahren zur Herstellung eines nanostrukturierten Bauelements.

[0002] Der grundsätzliche Aufbau einer Projektionsbelichtungsanlage, insbesondere einer Beleuchtungsoptik mit einem Wabenkondensator, ist bekannt. Für Details sei exemplarisch auf die WO 2009/100 856 A1 verwiesen.

[0003] Aus der WO 2016/078 818 A1 ist ein optisches Design einer Beleuchtungsoptik bekannt, bei welchem ein Pupillenfacettenspiegel unterhalb der Waferenebene der Projektionsbelichtungsanlage angeordnet ist. Bei diesem Design sind zwei Spiegel für streifenden Einfall im Strahlengang zwischen dem Pupillenfacettenspiegel und dem Objektfeld angeordnet.

[0004] Aus der WO 2019/096 654 A1 ist ein optisches Design einer Beleuchtungsoptik einer Projektionsbelichtungsanlage bekannt, bei welchem ein Kondensatorspiegel unterhalb der Waferenebene angeordnet ist. Der Kondensatorspiegel dient der Abbildung der Pupillenfacetten eines Pupillenfacettenspiegels in das Objektfeld. Der Kondensatorspiegel ist selbst nicht facettiert ausgebildet.

[0005] Aus der DE 10 2014 204 388 A1 sind ebenfalls Designs für eine Beleuchtungsoptik einer Projektionsbelichtungsanlage bekannt. Die Anordnung eines Facettenspiegels unterhalb der Waferenebene ist aus dieser Anmeldung nicht bekannt, insbesondere auch nicht aus der **Fig. 1**, welche insbesondere die Projektionsoptik lediglich schematisch, jedoch offensichtlich nicht detailgetreu zeigt.

[0006] Es ist stets ein Desiderat, derartige Projektionsbelichtungsanlagen, insbesondere deren Optiken, weiterzuentwickeln. Diese Aufgabe wird durch den Gegenstand der unabhängigen Ansprüche der vorliegenden Anmeldung gelöst.

[0007] Gemäß einem Aspekt der Erfindung weist eine Beleuchtungsoptik zur Ausleuchtung eines Objektfeldes in einer Objektebene einer Projektionsbelichtungsanlage einen ersten Facettenspiegel und einen zweiten Facettenspiegel auf, wobei der

Abstand zwischen dem zweiten Facettenspiegel und der Objektebene mindestens 1500 mm, insbesondere mindestens 1800 mm, insbesondere mindestens 2100 mm, insbesondere mindestens 2300 mm beträgt.

[0008] Der Abstand wird hierbei insbesondere in Richtung senkrecht zur Objektebene oder in Richtung des Strahlengangs der Beleuchtungsstrahlung, insbesondere eines auf einen zentralen Objektpunkt auftreffenden Hauptstrahls gemessen. Er ist somit insbesondere ein Maß für den benötigten vertikalen Bauraum der Beleuchtungsoptik.

[0009] Die Angaben zum Abstand können sich insbesondere auf einen minimalen Abstand zwischen dem zweiten Facettenspiegel und der Objektebene beziehen. Sie können sich auch auf einen mittleren Abstand zwischen dem zweiten Facettenspiegel und der Objektebene beziehen. Sie können sich auch auf einen Abstand zwischen einem zentralen Punkt auf dem zweiten Facettenspiegel, insbesondere dessen Reflexionsfläche, insbesondere im geometrischen Flächenschwerpunkt der Reflexionsfläche des zweiten Facettenspiegels, und der Objektebene beziehen.

[0010] Die Bezeichnungen „erster“ und „zweiter“ Facettenspiegel können sich insbesondere auf deren Abfolge im Strahlengang der Beleuchtungsoptik, insbesondere ausgehend von einem Strahlungsquellenmodul hin zum Objektfeld, beziehen. Das Strahlungsquellenmodul ist kein Bestandteil der Beleuchtungsoptik. Es bildet zusammen mit dieser ein Beleuchtungssystem der Projektionsbelichtungsanlage.

[0011] Die Facettenspiegel können jeweils eine Vielzahl von physischen oder virtuellen Einzelfacetten aufweisen. Unter einer physischen Einzelfacette sei eine Einzelfacette verstanden, die durch einen einzigen, monolithischen Spiegel, insbesondere durch einen Spiegel mit einer einfach zusammenhängenden Reflexionsfläche, gebildet ist.

[0012] Unter einer virtuellen Facette sei insbesondere eine Facette verstanden, welche durch eine Kombination einer oder mehrerer Einzelspiegel, insbesondere Mikrospiegel, gebildet ist.

[0013] Die Facetten, insbesondere die Einzelspiegel, insbesondere die Mikrospiegel, können verlagerbar sein. Dies wird auch als Schaltbarkeit der Einzelspiegel, insbesondere der Facetten, bezeichnet. Sie können auch statisch sein. Kombinationen sind ebenfalls möglich.

[0014] Die Facetten, insbesondere die Einzelspiegel, können insbesondere jeweils einen oder zwei Kipp-Freiheitsgrade aufweisen. Weitere Freiheits-

grade, insbesondere eine lineare Verlagerbarkeit der Facetten, insbesondere der Einzelspiegel, ist ebenso möglich.

[0015] Insbesondere im Falle von virtuellen Facetten können die Einzelspiegel derart ausgebildet sein, dass sie eine im Wesentlichen lückenlose Parkettierung einer Fläche ermöglichen. Hierbei kann es sich insbesondere um eine gekrümmte Fläche handeln. Die Anordnung der Einzelspiegel ist bevorzugt auf einer gekrümmten Fläche, um die erforderlichen Schaltwinkel zu reduzieren.

[0016] Die Facetten, insbesondere die Einzelspiegel derselben, können jeweils eine ebene, das heißt plane, oder eine gekrümmte, insbesondere eine konvexe oder konkave, Reflexionsfläche aufweisen. Sie können auch eine unterschiedliche Brechkraft in unterschiedlichen Richtungen aufweisen.

[0017] Es hat sich gezeigt, dass eine Anordnung des zweiten Facettenspiegels in einem großen Abstand zur Objektebene zu einer Vielzahl von Vorteilen führt.

[0018] Exemplarisch sei diesbezüglich die Reduktion der Schaltamplituden genannt. Des Weiteren ermöglicht dieses Detail eine Reduktion der Thermallast auf dem Facettenspiegel sowie insbesondere auf dessen Einzelspiegeln.

[0019] Weiter ermöglicht dieses Detail eine Reduzierung der Einfallswinkel, insbesondere eine engere Faltung des Strahlengangs. Außerdem kann die Komplexität für die Beschichtung der Einzelspiegel reduziert beziehungsweise die Reflektivität derselben erhöht werden.

[0020] Gemäß einem weiteren Aspekt kann die Beleuchtungsoptik derart ausgebildet sein, dass im Strahlengang zwischen dem zweiten Facettenspiegel und dem Objektfeld keine weiteren optischen Bauelemente, insbesondere keine weiteren Spiegel, angeordnet sind. Es ist auch möglich, im Strahlengang zwischen dem zweiten Facettenspiegel und dem Objektfeld ein oder mehrere Blenden oder Obskurations-Elemente, jedoch keine weiteren Spiegel, anzuordnen. Dies ist insbesondere für die Gesamttransmission der Beleuchtungsoptik vorteilhaft, jedoch nicht zwingend erforderlich.

[0021] Gemäß einem Aspekt der Erfindung ist der erste Facettenspiegel in einem ersten Abstand d_1 zur Objektebene angeordnet und der zweite Facettenspiegel in einem Abstand d_2 , wobei gilt: $d_2 : d_1 > 3$, insbesondere $d_2 : d_1 > 4$, insbesondere $d_2 : d_1 > 5$.

[0022] Der Abstand d_{12} vom ersten Facettenspiegel zum zweiten Facettenspiegel in Richtung senkrecht

zur Objektebene oder in Richtung des Strahlengangs kann insbesondere mindestens 60 %, insbesondere mindestens 70 %, insbesondere mindestens 80 % des Abstandes d_2 des zweiten Facettenspiegels zur Objektebene betragen. Es kann insbesondere gelten: $1 \leq d_2 : d_{12} \leq 1,5$, insbesondere $d_2 : d_{12} \leq 1,2$, insbesondere $d_2 : d_{12} \leq 1,1$.

[0023] Durch einen großen Abstand zwischen den beiden Facettenspiegeln lässt sich insbesondere der benötigte Schaltrange, das heißt die Anforderungen an die Verlagerbarkeit der Spiegel des ersten Facettenspiegels, reduzieren.

[0024] Der erste Facettenspiegel ist insbesondere möglichst nahe am Objektfeld angeordnet, ohne jedoch hierbei den Strahlengang der Beleuchtungsoptik zu obskurieren.

[0025] Der zweite Facettenspiegel ist in relativ großer Entfernung zur Objektebene angeordnet. Er kann insbesondere das Bauteil der Beleuchtungsoptik bilden, welches den größten Abstand zur Objektebene aufweist.

[0026] Gemäß einem weiteren Aspekt kann der Abbildungsmaßstab für die Abbildung der ersten Facetten ins Objektfeld höchstens 2, insbesondere höchstens 1,5, insbesondere höchstens 1,3, insbesondere höchstens 1,25, insbesondere höchstens 1,2, insbesondere höchstens 1,15, insbesondere höchstens 1,1, betragen.

[0027] Gemäß einem weiteren Aspekt ist der erste Facettenspiegel gemessen in Richtung parallel zu der Objektebene in einem ersten Abstand d_{1p} zum Objektfeld angeordnet, wobei gilt: $d_2 : d_{1p} > 3$, insbesondere $d_2 : d_{1p} > 5$, insbesondere $d_2 : d_{1p} > 10$.

[0028] Der Abstand d_{1p} kann hierbei den minimalen Abstand des ersten Facettenspiegels zum Objektfeld, insbesondere den Abstand der beiden benachbarten Randbereiche, angeben. Es kann sich auch um den Abstand von einem Flächenschwerpunkt des ersten Facettenspiegels zu einem zentralen Objektfeldpunkt handeln.

[0029] Die Kombination eines geringen Objektfeld-Abstandes des ersten Facettenspiegels in Richtung parallel zur Objektebene und eines wesentlich größeren Abstandes des zweiten Facettenspiegels in Richtung senkrecht zur Objektebene ermöglicht es, die Faltungswinkel auf den Facettenspiegeln zu reduzieren.

[0030] Es ist insbesondere möglich, die Beleuchtungsoptik in einem Raumbereich anzuordnen, dessen laterale Erstreckung, d. h. dessen Erstreckung parallel zur Objektebene, geringer ist als dessen ver-

tikale Erstreckung, d. h. dessen Erstreckung in Richtung senkrecht zur Objektebene.

[0031] Gemäß einem weiteren Aspekt kann die Beleuchtungsoptik genau die beiden Facettenspiegel, jedoch keine weiteren Spiegel, aufweisen. Die Beleuchtungsoptik kann insbesondere als 2-Spiegel-System ausgebildet sein. Hierbei handelt es sich bei den beiden Spiegeln insbesondere um Facettenspiegel mit einer Vielzahl von Einzelspiegeln.

[0032] Es ist insbesondere möglich, aus Beleuchtungssystem der Projektionsbelichtungsanlage derart auszubilden, dass im Strahlengang zwischen dem Strahlungsquellenmodul, insbesondere zwischen einem Zwischenfokus des Strahlungsquellenmoduls, und dem Objektfeld außer den beiden Facettenspiegeln keine weiteren Spiegel angeordnet sind.

[0033] Der Abstand zwischen dem ersten Facettenspiegel und einem Zwischenfokus, insbesondere einem Zwischenfokus des Strahlungsquellenmoduls, kann insbesondere mindestens 1200 mm, insbesondere mindestens 1400 mm, insbesondere mindestens 1500 mm betragen.

[0034] Hierbei kann es sich um den Abstand in Richtung senkrecht zur Objektebene oder um den Abstand entlang des Strahlengangs der Beleuchtungsstrahlung handeln. Es kann sich wiederum um den minimalen Abstand oder einen mittleren Abstand gemäß der vorhergehenden Beschreibung handeln.

[0035] Ein größerer Abstand des ersten Facettenspiegels vom Zwischenfokus der Strahlungsquelle führt zu einer Verringerung der Thermallast des ersten Facettenspiegels.

[0036] Gemäß einem weiteren Aspekt kann der Abstand zwischen dem ersten Facettenspiegel und dem zweiten Facettenspiegel mindestens 1500 mm, insbesondere mindestens 1700 mm, insbesondere mindestens 1900 mm betragen.

[0037] Hierbei kann es sich um den Abstand in Richtung senkrecht zur Objektebene oder um den Abstand entlang des Strahlengangs der Beleuchtungsstrahlung in der Beleuchtungsoptik handeln. Auch hierbei kann es sich um einen minimalen Abstand oder um einen mittleren Abstand gemäß der vorhergehenden Beschreibung handeln. Es kann sich insbesondere um das Minimum eines Abstandes zwischen den beiden Facettenspiegeln gemessen entlang einem Hauptstrahl der Beleuchtungsstrahlung handeln.

[0038] Durch einen großen Abstand zwischen den beiden Facettenspiegeln können die Forderungen

an die Schaltränge, das heißt die Verlagerbarkeit der einzelnen Facetten, insbesondere der Einzelspiegel, insbesondere des ersten Facettenspiegels, reduziert werden.

[0039] Die Beleuchtungsoptik kann eine elliptische, insbesondere nicht-kreisförmige, Austrittspupille aufweisen. Diese kann eine Exzentrizität von mindestens 1,1, insbesondere mindestens 1,2, insbesondere mindestens 1,3, insbesondere mindestens 1,5, insbesondere mindestens 2 aufweisen.

[0040] Die Anordnung der Gesamtheit der Facetten auf dem zweiten Facettenspiegel kann eine kleinste einhüllende elliptische Randkurve aufweisen mit einem Achsverhältnis a/b mindestens von 1,1, insbesondere mindestens 1,3, insbesondere mindestens 1,5, insbesondere mindestens 1,7, insbesondere mindestens 2, insbesondere mindestens 2,5. Dies ist jedoch nicht zwingend notwendig. Eine hiervon abweichende Ausbildung des zweiten Facettenspiegels ist ebenso möglich.

[0041] Gemäß einem weiteren Aspekt weist ein Facettenspiegel für eine Beleuchtungsoptik einer Projektionsbelichtungsanlage, insbesondere ein Pupillenfacettenspiegel, eine Vielzahl n von Facetten auf, wobei die Anzahl n der Facetten mindestens 5000 beträgt, wobei die Facetten eine charakteristische Länge von mindestens 5 mm aufweisen, und wobei die Facetten mindestens zwei Schwenkfreiheitsgrade aufweisen.

[0042] Als charakteristische Länge wird hierbei im Falle einer polygonalen Ausbildung der Facetten insbesondere die größte Seitenlänge der Berandung der Reflexionsfläche der Facetten bezeichnet. Als charakteristische Länge kann auch ein Durchmesser einer Facette bezeichnet werden.

[0043] Die Anzahl der Facetten kann auch mindestens 6000, insbesondere mindestens 7000, insbesondere mindestens 8000 betragen. Sie ist üblicherweise geringer als 100.000, insbesondere geringer als 50.000, insbesondere geringer als 20.000. Sie kann insbesondere geringer als 10.000 sein.

[0044] Die Facetten können auf einem elliptischen Träger angeordnet sein.

[0045] Sie können auf einem gekrümmten Träger angeordnet sein. Der Träger kann eine Oberfläche in Form einer Kugelkalotte oder eines Torusausschnitts aufweisen.

[0046] Der Pupillenfacettenspiegel kann auch statische Pupillenfacetten aufweisen. Die Pupillenfacetten können hexagonal, rund, insbesondere kreisförmig, oder rechteckig, insbesondere quadratisch, ausgebildet sein. Sie können eine Seitenlänge oder

einen Durchmesser von mindestens 5 mm bis 7 mm aufweisen. Sie können auf einem kreisrunden Träger angeordnet sein. Die Anzahl n der Pupillenfacetten kann im Bereich von 1000 bis 4000 liegen. Der Träger kann eine ebene Oberfläche aufweisen.

[0047] Der Pupillenfacettenspiegel kann auch virtuelle Pupillenfacetten aufweisen. Diese können durch eine Mikrospiegeleinheit (Micro Mirror Unit, MMU), welche auch als Mikrospiegelarray bezeichnet wird, ausgebildet sein. Die Mikrospiegel können Kantenlängen im Bereich von 0,5 mm bis 2 mm, insbesondere im Bereich von 0,8 mm bis 1,2 mm aufweisen. Die Spiegelanzahl pro MMU kann 12×12 , 24×24 oder 36×36 betragen. Die Anzahl der Spalten braucht hierbei nicht notwendigerweise der Anzahl an Zeilen zu entsprechen. Beispielsweise können 3×3 , 4×4 , 6×6 , 8×8 Spiegel zu einer Pupillenfacette zusammengeschaltet werden. Aufgrund der flexiblen Schaltbarkeit kann die Größe der virtuellen Pupillenfacetten an die Größe des Plasmabildes angepasst werden. Beispielsweise können 3×3 Plasmabilder auf eine MMU passen. Prinzipiell können die Plasmabilder auf einer MMU auch verschiedene Größen aufweisen.

[0048] Der Pupillenfacettenspiegel kann einen maximalen Durchmesser von mindestens 800 mm, insbesondere mindestens 1000 mm aufweisen. Ein derartig großer Pupillenfacettenspiegel ermöglicht die Nutzung relativ großer Pupillenfacetten bei einer gleichzeitigen Reduzierung des Pupillenfüllgrades.

[0049] Gemäß einem Aspekt der Erfindung kann der zweite Facettenspiegel derart im Strahlengang der Beleuchtungsoptik angeordnet sein, dass ein maximaler Faltwinkel an den Facetten des zweiten Facettenspiegels höchstens 20° , insbesondere höchstens 15° , insbesondere höchstens 10° beträgt.

[0050] Als Faltwinkel wird hierbei insbesondere der doppelte Wert des Einfallswinkels bezeichnet.

[0051] Gemäß einem weiteren Aspekt können die beiden Facettenspiegel derart im Strahlengang der Beleuchtungsoptik angeordnet sein, dass ein maximaler Faltwinkel im Strahlengang der Beleuchtungsoptik, insbesondere zwischen einem Zwischenfokus des Strahlungsquellen-Moduls und dem Objektfeld höchstens 30° , insbesondere höchstens 25° , insbesondere höchstens 20° beträgt.

[0052] Gemäß einem weiteren Aspekt kann der zweite Facettenspiegel im Strahlengang der Beleuchtungsoptik derart angeordnet sein, dass sein Abstand d_2 zur Objektebene und/oder sein Abstand d_{12} zum ersten Facettenspiegel - gemessen jeweils in Richtung senkrecht zur Objektebene oder gemessen in Richtung des Strahlengangs, insbesondere eines Hauptstrahls der Beleuchtungs-

strahlung - mindestens 1500 mm, insbesondere mindestens 1800 mm, insbesondere mindestens 2100 mm, insbesondere mindestens 2300 mm beträgt.

[0053] Hierbei kann insbesondere gelten: $1 > d_{12} : d_2 > 0,8$.

[0054] Es kann insbesondere gelten: $1 \leq d_2 : d_{12} \leq 1,5$, insbesondere $d_2 : d_{12} \leq 1,25$.

[0055] Gemäß einem weiteren Aspekt kann der zweite Facettenspiegel im Strahlengang der Projektionsbelichtungsanlage derart angeordnet sein, dass sämtliche Abstände im Strahlengang benachbarter optischer Elemente kleiner sind als ein Abstand d_2 des zweiten Facettenspiegels zur Objektebene.

[0056] Der Abstand d_2 des zweiten Facettenspiegels zur Objektebene stellt somit den größten Abstand benachbarter optischer Elemente im Strahlengang des optischen Systems der Projektionsbelichtungsanlage dar. Der zweitgrößte Abstand kann durch den Abstand zwischen den beiden Facettenspiegeln gebildet sein.

[0057] Die hieraus ergebenden Vorteile entsprechen den bereits beschriebenen.

[0058] Gemäß einem weiteren Aspekt kann der zweite Facettenspiegel im Strahlengang eines optischen Systems der Projektionsbelichtungsanlage im Bereich neben einem Wafer Tisch, insbesondere im Bereich zwischen einem Strahlungsquellen-Modul und einem Wafer Tisch, angeordnet sein.

[0059] Hierdurch kann der vor Ort vorhandene Bau- raum vorteilhaft genutzt werden.

[0060] Der zweite Facettenspiegel kann insbesondere in einem Bereich unterhalb der Wafer Ebene angeordnet sein. Als Wafer Ebene wird hierbei die Ebene bezeichnet, in welcher zu strukturierende Wafer beim Betrieb der Projektionsbelichtungsanlage geordnet wird.

[0061] Bei einem optischen System für eine Projektionsbelichtungsanlage kann der zweite Facettenspiegel der Beleuchtungsoptik in einem zweiten Abstand zur Objektebene angeordnet sein, welcher mindestens so groß ist wie ein Abstand der Bildebene zur Objektebene.

[0062] Hierbei können die Abstände jeweils in Richtung senkrecht zur Objektebene gemessen werden.

[0063] Der Abstand zwischen dem zweiten Facettenspiegel und der Objektebene kann insbesondere mindestens 0,8-mal, insbesondere mindestens 0,9-mal, insbesondere mindestens 1,05-mal, insbesondere mindestens 1,1-mal, insbesondere mindestens

1,2-mal, insbesondere mindestens 1,3-mal so groß sein wie der Abstand dBO der Bildebene zur Objektebene. Er kann geringer sein als 1,4 dBO.

[0064] Bei der Projektionsoptik kann es sich um eine anamorphotisch abbildende Projektionsoptik handeln. Die Projektionsoptik kann insbesondere Abbildungsmaßstäbe in Scanrichtung und senkrecht hierzu aufweisen, welche sich dem Betrag nach um mindestens 10 %, insbesondere mindestens 50 %, insbesondere mindestens 100 %, insbesondere mindestens 200 %, insbesondere mindestens 400 % unterscheiden. Die Abbildungsmaßstäbe können vorzeichengleich sein. Sie können auch unterschiedliche Vorzeichen aufweisen.

[0065] Die Projektionsoptik kann eine mechanisch zugängliche oder eine mechanisch unzugängliche Eintrittspupille aufweisen.

[0066] Die Projektionsoptik kann eine kreisförmige Austrittspupille aufweisen.

[0067] Eine erfindungsgemäße Projektionsbelichtungsanlage kann eine Beleuchtungsoptik gemäß der vorhergehenden Beschreibung und/oder ein optisches System gemäß der vorhergehenden Beschreibung aufweisen.

[0068] Die Vorteile ergeben sich aus den bereits beschriebenen.

[0069] Eine weitere Aufgabe der Erfindung besteht darin, ein Verfahren zur Herstellung eines mikro- oder nanostrukturierten Bauelements sowie ein entsprechendes Bauelement zu verbessern. Diese Aufgaben werden durch Bereitstellung einer Projektionsbelichtungsanlage gemäß der vorhergehenden Beschreibung gelöst. Die Vorteile ergeben sich aus denen der Projektionsbelichtungsanlage.

[0070] Weitere Details und Vorteile der Erfindung ergeben sich aus der nachfolgenden Beschreibung von Ausführungsbeispielen anhand der Figur.

Fig. 1 zeigt schematisch den Strahlengang einer Projektionsbelichtungsanlage in einem Meridionalschnitt.

[0071] Im Folgenden werden zunächst unter Bezugnahme auf die **Fig. 1** exemplarisch die wesentlichen Bestandteile einer Projektionsbelichtungsanlage 1 für die Mikrolithographie beschrieben. Die Beschreibung des grundsätzlichen Aufbaus der Projektionsbelichtungsanlage 1 sowie deren Bestandteile sei hierbei nicht einschränkend verstanden. Aus dem Stand der Technik sind zahlreiche Abwandlungen und Alternativen des allgemeinen Prinzips bekannt.

[0072] Ein Beleuchtungssystem 2 der Projektionsbelichtungsanlage 1 hat neben einer Strahlungs-

quelle 3 eine Beleuchtungsoptik 4 zur Beleuchtung eines Objektfeldes 5 in einer Objektebene 6. Belichtet wird hierbei ein im Objektfeld 5 angeordnetes Retikel 20. Das Retikel 20 ist von einem Retikelhalter 21 gehalten.

[0073] Das Retikel 20 ist insbesondere in einer Scanrichtung verlagerbar.

[0074] In der **Fig. 1** ist zur Erläuterung ein kartesisches, lokales xyz-Koordinatensystem eingezeichnet. Für das in der **Fig. 1** eingezeichnete Koordinatensystem dient das Retikel 20 als Bezugspunkt. Die Scanrichtung des Retikels 20 entspricht hierbei der y-Richtung. Die z-Richtung verläuft senkrecht zur Objektebene 6.

[0075] Die Projektionsbelichtungsanlage 1 umfasst außerdem eine Projektionsoptik 7. Die Projektionsoptik 7 dient zur Abbildung des Objektfeldes 5 in ein Bildfeld 8 in einer Bildebene 9. Abgebildet wird eine Struktur auf dem Retikel 20 auf eine lichtempfindliche Schicht eines im Bereich des Bildfeldes 8 in der Bildebene 9 angeordneten Wafers 22. Der Wafer 22 wird von einem Waferhalter 23 gehalten. Er ist insbesondere mittels des Waferhalters 23 verlagerbar. Er ist vorzugsweise synchronisiert zum Retikel 20 verlagerbar.

[0076] Der Waferhalter 23 wird auch als Wafertisch bezeichnet.

[0077] Bei der Strahlungsquelle 3 handelt es sich um eine EUV-Strahlungsquelle. Die Strahlungsquelle 3 emittiert insbesondere EUV-Strahlung 10, welche im Folgenden auch als Nutzstrahlung oder Beleuchtungsstrahlung bezeichnet wird. Die Nutzstrahlung hat insbesondere eine Wellenlänge im Bereich von 5 nm und 30 nm. Bei der Strahlungsquelle 3 kann es sich um eine Plasmaquelle handeln. Es kann sich auch um eine synchrotronbasierte Strahlungsquelle handeln.

[0078] Die Beleuchtungsstrahlung 10, die von der Strahlungsquelle 3 ausgeht, wird von einem Kollektor 11 gebündelt.

[0079] Nach dem Kollektor 11 propagiert die Beleuchtungsstrahlung 10 durch eine Zwischenfokusebene 12. Die Zwischenfokusebene 12 kann eine Trennung zwischen dem Strahlungsquellenmodul und der Beleuchtungsoptik darstellen. Das Strahlungsquellenmodul kann neben der Strahlungsquelle 3 den Kollektor 11 aufweisen. Es kann auch weitere Bauelemente aufweisen. Das Strahlungsquellenmodul kann insbesondere ein evakuierbares Gehäuse aufweisen.

[0080] Die Beleuchtungsoptik 4 umfasst einen ersten Facettenspiegel 13. Sofern der erste Facetten-

spiegel 13 in einer Ebene der Beleuchtungsoptik 4 angeordnet ist, die zur Objektebene 6 optisch konjugiert ist, wird dieser auch als Feldfacettenspiegel 13 bezeichnet. Der erste Facettenspiegel 13 umfasst eine Vielzahl von einzelnen ersten Facetten 13a, welche im Folgenden auch als Feldfacetten bezeichnet werden.

[0081] Wie beispielsweise aus der DE 10 2008 009 600 A1 bekannt ist, können die ersten Facetten 13a selbst jeweils aus einer Vielzahl von Einzelspiegeln, insbesondere einer Vielzahl von Mikrosiegeln, zusammengesetzt sein. Der erste Facettenspiegel 13 kann insbesondere als mikroelektromechanisches System (MEMS-System) ausgebildet sein. Für Details wird auf die DE 10 2008 009 600 A1 verwiesen.

[0082] Im Strahlengang der Beleuchtungsoptik 4 ist dem ersten Facettenspiegel 13 nachgeordnet ein zweiter Facettenspiegel 14. Sofern der zweite Facettenspiegel 14 in einer Pupillenebene der Beleuchtungsoptik 4 angeordnet ist, wird dieser auch als Pupillenfaccettenspiegel bezeichnet.

[0083] In diesem Fall wird die Kombination aus den ersten Facettenspiegel 13 und dem zweiten Facettenspiegel 14 auch als Wabenkondensator bezeichnet. Eine derartige Variante ist insbesondere vorteilhaft, sofern die Eintrittspupillenebene der Projektionsoptik 7 vor dem Objektfeld 5 liegt und frei zugänglich ist. Die Facetten 13a des ersten Facettenspiegels 13 sind für flexible Pupillenausleuchtung bei voller Transmission insbesondere schaltbar. Sie können als physische Facetten oder als virtuelle Facetten, die durch Gruppierung von Mikrosiegeln gebildet werden, ausgebildet sein. Sie können das Urbild des im Objektfeld 5, insbesondere auf dem Retikel 20 auszuleuchtenden Feldes approximieren. Auf dem zweiten Facettenspiegel 14 können statische oder schaltbare Facetten 14a zum Einsatz kommen. Diese können als physische Facetten oder als virtuelle Facetten, d. h. durch Gruppierung von Mikrosiegeln, ausgebildet sein.

[0084] Der zweite Facettenspiegel 14 kann auch beabstandet zu einer Pupillenebene der Beleuchtungsoptik 4 angeordnet sein. In diesem Fall wird die Kombination aus dem ersten Facettenspiegel 13 und dem zweiten Facettenspiegel 14 auch als spekulärer Reflektor bezeichnet.

[0085] Dieses Konzept ist insbesondere im Falle einer nicht zugänglichen Eintrittspupillenebene vorteilhaft. Das Konzept des spekulären Reflektors ermöglicht Lichtmischung, Feldformung und flexible Pupillenausleuchtung mit nur zwei Reflexionen bei hoher Transmission.

[0086] Für einen spekulären Reflektor können die Facetten 13a des ersten Facettenspiegels 13 insbesondere als virtuelle Facetten ausgebildet sein.

[0087] Für einen spekulären Reflektor müssen die zweiten Facetten 14a des zweiten Facettenspiegels 14 schaltbar ausgebildet sein. Sie können als physische Facetten oder als virtuelle Facetten ausgebildet sein.

[0088] Der zweite Facettenspiegel 14a umfasst eine Mehrzahl von zweiten Facetten 14a. Die zweiten Facetten 14a werden im Falle eines Pupillenfaccettenspiegels auch als Pupillenfaccetten bezeichnet.

[0089] Die zweiten Facetten 14a können als virtuelle Facetten ausgebildet sein und jeweils aus einer Vielzahl von Einzelsiegeln, insbesondere einer Vielzahl von Mikrosiegeln, zusammengesetzt sein. Der zweite Facettenspiegel 14 kann insbesondere als mikroelektromechanisches System (MEMS-System) ausgebildet sein. Für Details wird auf die DE 10 2008 009 600 A1 verwiesen.

[0090] Die Beleuchtungsoptik 4 bildet somit ein doppelt facettiertes System. Dieses grundlegende Prinzip wird auch als Wabenkondensator (Fly's Eye Integrator) bezeichnet.

[0091] Wie nachfolgend noch näher erläutert wird, kann es vorteilhaft sein, den zweiten Facettenspiegel 14 nicht exakt in einer Ebene, welche zu einer Pupillenebene der Projektionsoptik 7 optisch konjugiert ist, anzuordnen.

[0092] Mit Hilfe des zweiten Facettenspiegels 14 werden die einzelnen ersten Facetten 13a in das Objektfeld 5 abgebildet.

[0093] Die Beleuchtungsoptik 4 und die Projektionsoptik 7 bilden zusammen ein optisches System der Projektionsbelichtungsanlage 1.

[0094] Die Projektionsoptik 7 umfasst eine Mehrzahl von Spiegeln M_i , welche gemäß ihrer Anordnung im Strahlengang der Projektionsbelichtungsanlage 1 durchnummeriert sind.

[0095] Bei dem in der Fig. 1 dargestellten Beispiel umfasst die Projektionsoptik 7 acht Spiegel M_1 bis M_8 . Alternativen mit vier, sechs, zehn, zwölf oder einer anderen Anzahl an Spiegeln M_i sind ebenso möglich.

[0096] Die Projektionsoptik 7 ist insbesondere anamorphotisch ausgebildet. Sie weist insbesondere unterschiedliche Abbildungsmaßstäbe β_x , β_y in x- und y-Richtung auf. Die beiden Abbildungsmaßstäbe β_x , β_y der Projektionsoptik 7 liegen bevorzugt bei $(\beta_x, \beta_y) = (+ 0,25, - 0,125)$. Die Projektionsoptik 7 führt

somit in x-Richtung, das heißt in Richtung senkrecht zur Scanrichtung, zu einer Verkleinerung im Verhältnis 4: 1.

[0097] Die Projektionsoptik 7 führt in y-Richtung, das heißt in Scanrichtung, zu einer Verkleinerung von 8: 1.

[0098] Andere Abbildungsmaßstäbe sind ebenso möglich. Auch vorzeichengleiche Abbildungsmaßstäbe in x- und y-Richtung sind möglich.

[0099] Die Feldfacetten 13a werden jeweils von einer zugeordneten Pupillenfacette 14a zur Ausleuchtung des Objektfeldes 5 auf das Retikel 20 abgebildet.

[0100] Nach Scanintegration ist die Ausleuchtung des Objektfeldes 5 insbesondere möglichst homogen. Sie weist vorzugsweise einen Uniformitätsfehler von weniger als 2 % auf.

[0101] Die Felduniformität kann über eine Überlagerung unterschiedlicher Beleuchtungskanäle erreicht werden.

[0102] Die Pupillenuniformität kann durch eine Umverteilung der Beleuchtungskanäle erreicht werden.

[0103] Durch eine Anordnung der Pupillenfacetten kann geometrisch die Ausleuchtung der Eintrittspupille der Projektionsoptik 7 definiert werden. Durch Auswahl der Beleuchtungskanäle, insbesondere der Teilmenge der Pupillenfacetten, die Licht führen, kann die Intensitätsverteilung in der Eintrittspupille der Projektionsoptik 7 eingestellt werden.

[0104] Die Projektionsoptik 7 kann insbesondere eine homozentrische Eintrittspupille aufweisen. Diese kann zugänglich sein. Sie kann auch unzugänglich sein.

[0105] Wie in der **Fig. 1** exemplarisch dargestellt ist, kann der zweite Facettenspiegel 14 unterhalb der Bildebene 9, welche auch als Wafer-Ebene bezeichnet wird, angeordnet sein. Dies führt zu einer besonders vorteilhaften Nutzung des vorhandenen Bau-raums.

[0106] Eine entsprechende Anordnung des zweiten Facettenspiegels 14 führt insbesondere zu einem besonders großen Abstand zwischen dem zweiten Facettenspiegel 14 und dem Objektfeld 5.

[0107] Der erste Facettenspiegel 13 kann in der Nähe des Objektfeldes 5 angeordnet sein. Hierdurch kann ein besonders großer Abstand zwischen dem ersten Facettenspiegel 13 und dem zweiten Facettenspiegel 14 erreicht werden. Der Abstand zwi-

schen dem ersten Facettenspiegel 13 und dem zweiten Facettenspiegel 14 kann insbesondere 2 m oder mehr betragen.

[0108] Durch die Anordnung des ersten Facettenspiegels 13 in der Nähe des Objektfeldes 5 kann auch der Abstand des ersten Facettenspiegels 13 zu einem Zwischenfokus (ZF) der Strahlungsquelle 3, welcher in der Zwischenfokusebene 12 liegt, vergrößert werden. Hierdurch kann insbesondere die Thermallast auf dem ersten Facettenspiegel 13 reduziert werden.

[0109] Es konnte gezeigt werden, dass sich die Thermallast auf dem zweiten Facettenspiegel 14, durch eine Vergrößerung des Abstandes desselben vom Objektfeld 5 reduzieren lässt.

[0110] Mit steigendem Abstand des zweiten Facettenspiegels 14 vom Retikel 20 steigt auch die Größe der zweiten Facetten 14a. Auch dies führt zu einer reduzierten Thermallast auf den zweiten Facetten 14a.

[0111] Weiter konnte gezeigt werden, dass sich die Anforderungen an die erforderlichen Schaltwinkel für die Facetten 13a, 14a auf dem ersten Facettenspiegel 13 und dem zweiten Facettenspiegel 14 durch Vergrößerung der Abstände zwischen diesen beiden Spiegeln reduzieren lassen.

[0112] Die Anforderungen an die erforderlichen Schaltwinkel für die Facetten 13a, 14a auf dem ersten Facettenspiegel 13 und dem zweiten Facettenspiegel 14 lassen sich auch durch Vergrößerung des Abstandes des zweiten Facettenspiegels 14 vom Objektfeld 5 reduzieren.

[0113] Außerdem wurde erkannt, dass der Schaltwinkelbedarf in Scanrichtung und senkrecht hierzu unterschiedlich sein kann. Die Schaltamplituden der Einzelspiegel des ersten Facettenspiegels 13 und/oder des zweiten Facettenspiegels 14 können in Richtung senkrecht zur Scanrichtung größer sein als in Richtung parallel zur Scanrichtung.

[0114] Ein Wabenkondensator kann für eine homozentrisch und divergent zu beleuchtende Projektionsoptik 7 kleinere Schaltwinkel haben.

[0115] Auch durch Nutzung einer kollimierten Beleuchtung können die Schaltwinkel Anforderungen für die Spiegel des ersten Facettenspiegels 13 reduziert werden.

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

- WO 2009/100856 A1 [0002]
- WO 2016/078818 A1 [0003]
- WO 2019/096654 A1 [0004]
- DE 102014204388 A1 [0005]
- DE 102008009600 A1 [0081, 0089]

Patentansprüche

1. Beleuchtungsoptik (4) zur Ausleuchtung eines Objektfeldes (5) in einer Objektebene (6) einer Projektionsbelichtungsanlage (1) umfassend

- 1.1. einen ersten Facettenspiegel (13) und
- 1.2. einen zweiten Facettenspiegel (14),
- 1.3. wobei ein Abstand (d_2) zwischen dem zweiten Facettenspiegel (14) und der Objektebene (6) mindestens 1500 mm beträgt, und
- 1.4. wobei im Strahlengang der Beleuchtungsoptik (4) zwischen dem zweiten Facettenspiegel (14) und dem Objektfeld (5) keine weiteren Spiegel angeordnet sind.

2. Beleuchtungsoptik (4) gemäß Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass der zweite Facettenspiegel (14) in einem ersten Abstand (d_{12}) zum ersten Facettenspiegel (13) angeordnet ist und dass der zweite Facettenspiegel (14) in einem zweiten Abstand (d_2) zur Objektebene (6) angeordnet ist, wobei gilt: $1 \leq d_2 : d_{12} \leq 1,5$.

3. Beleuchtungsoptik (4) gemäß einem der Ansprüche 1 bis 2, **dadurch gekennzeichnet**, dass der erste Facettenspiegel (13) gemessen in Richtung parallel zu einer Objektebene (6) in einem ersten Abstand (d_{lp}) zum Objektfeld (5) angeordnet ist und dass der zweite Facettenspiegel (14) gemessen in Richtung senkrecht zur Objektebene (6) in einem zweiten Abstand (d_2) zum Objektfeld (5) angeordnet ist, wobei gilt: $d_2 : d_{lp} > 3$.

4. Beleuchtungsoptik (4) gemäß einem der Ansprüche 1 bis 3, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Facetten (13a) des ersten Facettenspiegels (13) von den Facetten (14a) des zweiten Facettenspiegels (14) mit einem Abbildungsmaßstab von höchstens 2 ins Objektfeld (5) abgebildet werden.

5. Beleuchtungsoptik (4) insbesondere gemäß einem der Ansprüche 1 bis 4 für eine Projektionsbelichtungsanlage (1), **dadurch gekennzeichnet**, dass sie genau zwei Facettenspiegel (13, 14) und keine weiteren Spiegel aufweist.

6. Beleuchtungsoptik (4) insbesondere gemäß einem der Ansprüche 1 bis 5 für eine Projektionsbelichtungsanlage (1), **dadurch gekennzeichnet**, dass ein Abstand (d_{11F}) zwischen einem ersten Facettenspiegel (13) und einem Zwischenfokus (ZF) mindestens 1200 mm beträgt und/oder dass ein Abstand (d_{12}) zwischen einem ersten Facettenspiegel (13) und einem zweiten Facettenspiegel (14) mindestens 1500 mm beträgt.

7. Facettenspiegel (14) für eine Beleuchtungsoptik (4) einer Projektionsbelichtungsanlage (1)

- 7.1. mit einer Vielzahl n von Facetten (14a),
- 7.1.1. wobei die Anzahl n der Facetten (14a) min-

destens 5000 beträgt,

- 7.1.2. wobei die Facetten (14a) eine charakteristische Länge von mindestens 5 mm aufweisen und
- 7.1.3. wobei die Facetten (14a) mindestens zwei Schwenk-Freiheitsgrade aufweisen.

8. Anordnung eines zweiten Facettenspiegels (14) mit einer Vielzahl verlagerbarer Facetten (14a) im Strahlengang einer Beleuchtungsoptik (4) insbesondere gemäß einem der Ansprüche 1 bis 6 einer Projektionsbelichtungsanlage (1) derart, dass ein maximaler Falzwinkel (FW) an den Facetten (14a) des zweiten Facettenspiegels (14) höchstens 20° beträgt.

9. Anordnung eines zweiten Facettenspiegels (14) im Strahlengang einer Beleuchtungsoptik (4) insbesondere gemäß einem der Ansprüche 1 bis 6 einer Projektionsbelichtungsanlage (1) derart, dass sein Abstand (d_2) zur Objektebene (6) und/oder sein Abstand (d_{12}) zu einem ersten Facettenspiegel (13) mindestens 1500 mm beträgt.

10. Anordnung eines zweiten Facettenspiegels (14) im Strahlengang eines optischen Systems einer Projektionsbelichtungsanlage (1) derart, dass sämtliche Abstände im Strahlengang benachbarter optischer Elemente kleiner sind als ein Abstand (d_2) des zweiten Facettenspiegels (14) zur Objektebene (6).

11. Anordnung eines zweiten Facettenspiegels (14) im Strahlengang eines optischen Systems einer Projektionsbelichtungsanlage (1) aufweisend

- 11.1. eine Beleuchtungsoptik (4) zur Ausleuchtung eines Objektfeldes (5) in einer Objektebene (6),
- 11.2. eine Projektionsoptik (7) zur Ausbildung eines im Objektfeld (5) angeordneten Retikels (20) auf einen in einer Bildebene (9) angeordneten Wafers (22),

11.3. wobei die Bildebene (9) in einem Abstand d_{BO} zur Objektebene (6) angeordnet ist, und

11.4. wobei der zweite Facettenspiegel (14) in einem Abstand (d_2) zur Objektebene (6) angeordnet ist,

11.5. wobei gilt: $0,8 < d_2 : d_{BO} < 1,4$.

12. Anordnung eines zweiten Facettenspiegels (14) im Strahlengang eines optischen Systems einer Projektionsbelichtungsanlage (1), **dadurch gekennzeichnet**, dass der zweite Facettenspiegel (14) im Bereich zwischen einem Strahlungsquellen-Modul und einem Wafertisch (23) angeordnet ist.

13. Optisches System für eine Projektionsbelichtungsanlage (1) aufweisend

- 13.1. eine Beleuchtungsoptik (4) zur Ausleuchtung eines Objektfeldes (5) in einer Objektebene (6) mit
 - 13.1.1. einem ersten Facettenspiegel (13) und
 - 13.1.2. einem zweiten Facettenspiegel (14) und

13.2. eine Projektionsoptik (7) zur Abbildung eines im Objektfeld (5) angeordneten Retikels (20) auf einen in einer Bildebene (9) angeordneten Wafer (22),

13.3. wobei die Bildebene (9) in einem Abstand d_{BO} zur Objektebene (6) angeordnet ist, und

13. 4. wobei der zweite Facettenspiegel (14) in einem zweiten Abstand (d_2) zur Objektebene (6) angeordnet ist,, wobei gilt: $0,8 \leq d_2 : d_{BO} < 1,4$.

14. Projektionsbelichtungsanlage (1) mit

14.1. einer Beleuchtungsoptik (4) gemäß einem der Ansprüche 1 bis 6 und/oder

14.2. einem optischen System gemäß Anspruch 13.

15. Verfahren zur Herstellung eines nano- oder mikrostrukturierten Bauelements umfassend die folgenden Schritte:

15.1. Bereitstellen einer Projektionsbelichtungsanlage (1) gemäß Anspruch 14,

15.2. Bereitstellen eines Retikels (20) mit abzubildenden Strukturen,

15.3. Bereitstellen eines Wafers (22), auf dem zumindest bereichsweise eine Schicht aus einem lichtempfindlichen Material aufgebracht ist,

15.4. Projizieren wenigstens eines Teils des Retikels (20) auf einen Bereich der lichtempfindlichen Schicht auf dem Wafer (22) mit Hilfe der Projektionsbelichtungsanlage (1).

Es folgt eine Seite Zeichnungen

