



(10) **DE 10 2018 201 010 A1** 2019.07.25

(12) **Offenlegungsschrift**

(21) Aktenzeichen: **10 2018 201 010.2**  
(22) Anmeldetag: **23.01.2018**  
(43) Offenlegungstag: **25.07.2019**

(51) Int Cl.: **G03F 7/20 (2006.01)**  
**G02B 6/00 (2006.01)**  
**G02B 17/00 (2006.01)**  
**G02B 27/00 (2006.01)**

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

(56) Ermittelter Stand der Technik:  
**DE 10 2008 041 288 A1**

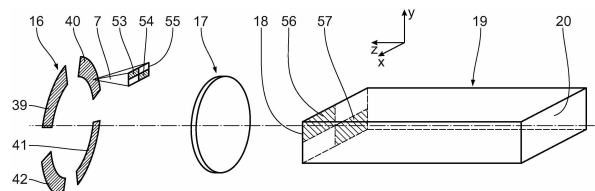
(72) Erfinder:  
**Bieling, Stig, 73434 Aalen, DE; Degünther,  
Markus, 73432 Aalen, DE**

Prüfungsantrag gemäß § 44 PatG ist gestellt.

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

(54) Bezeichnung: **Beleuchtungsoptik für die Projektionslithographie**

(57) Zusammenfassung: Eine Beleuchtungsoptik für die Projektionslithographie dient zur Beleuchtung eines Objektfeldes längs eines Beleuchtungslicht-Strahlengangs. Die Beleuchtungsoptik hat einen optischen Stab (19) mit stirnseitigen Ein- und Austrittsflächen (18, 20). Der optische Stab (19) ist so gestaltet, dass Beleuchtungslicht an Mantelwänden des optischen Stabs (19) durch mehrfache innere Totalreflexion gemischt und homogenisiert wird. Ein optisches Stabausleuchtungs-Vorgabeelement (16) ist im Beleuchtungslicht-Strahlengang dem optischen Stab (19) vorgeordnet und dient zur Vorgabe einer Ausleuchtung der Eintrittsfläche (18) mit einer über die Eintrittsfläche (18) vorgegebenen Verteilung einer Beleuchtungsintensität und gleichzeitig einer Beleuchtungswinkelverteilung. Die vorgegebene Beleuchtungsintensitäts-Verteilung weicht über die Eintrittsfläche (18) von einer homogenen Verteilung ab. Es resultiert eine Beleuchtungsoptik mit einem optischen Stab, bei der ein vorgegebenes Beleuchtungssetting mit geringeren Beleuchtungslicht-Verlusten eingestellt werden kann.



**Beschreibung**

**[0001]** Die Erfindung betrifft eine Beleuchtungsoptik für die Projektionslithographie. Ferner betrifft die Erfindung ein optisches System mit einer derartigen Beleuchtungsoptik, ein Beleuchtungssystem mit einem derartigen optischen System und eine Projektionsbelichtungsanlage mit einem derartigen Beleuchtungssystem.

**[0002]** Eine Beleuchtungsoptik der eingangs genannten Art ist bekannt aus der DE 195 20 563 A1. Weitere Beleuchtungsoptiken sind bekannt aus der WO 2005/006079 A1, der WO 2003/046663A2, der DE 10 2007 055 443 A, der US 7,209,218 A, der US 2003/0038931 A, der US 6,704,092 A, der WO 2009/024 164 A und der JP 2007/27240 A.

**[0003]** Es ist eine Aufgabe der vorliegenden Erfindung, eine Beleuchtungsoptik mit einem optischen Stab zum Mischen und Homogenisieren des Beleuchtungslichts so weiterzubilden, dass ein vorgegebenes Beleuchtungssetting mit geringeren Beleuchtungslicht-Verlusten eingestellt werden kann.

**[0004]** Diese Aufgabe ist erfindungsgemäß gelöst durch eine Beleuchtungsoptik mit den im Anspruch 1 angegebenen Merkmalen.

**[0005]** Erfindungsgemäß wurde erkannt, dass es zur verlustarmen Anpassung einer Ausleuchtung eines optischen Stabes erforderlich ist, nicht nur eine Beleuchtungswinkelverteilung am Stabeintritt einzustellen, sondern auch eine Beleuchtungsintensitätsverteilung über die Stab-Eintrittsfläche. Zusätzlich wurde erkannt, dass es möglich ist, den Stab eintrittsseitig mit Beleuchtungsrichtungen zu beleuchten, die nicht mit denjenigen des gewünschten Beleuchtungssettings übereinstimmen, sofern darauf geachtet wird, derartige, an sich nicht zum gewünschten Beleuchtungssetting passende Stabeintritts-Strahlrichtungen an den richtigen Positionen der Stab-Eintrittsfläche einzustrahlen. Das optische Stabausleuchtungs-Vorgabeelement kann diffraktiv oder auch refraktiv/diffraktiv ausgeführt sein. Aufgrund des optischen Stabausleuchtungs-Vorgabeelements wird das in den Stab eintretende Beleuchtungslicht effektiv zur Bereitstellung des gewünschten Beleuchtungssettings genutzt. Bei einer gegebenenfalls noch nachfolgenden Korrekturblende in einer Beleuchtungs-Pupillenebene wird dann nur noch wenig oder sogar gar kein Licht mehr geblockt.

**[0006]** Bei einer Ausführung nach Anspruch 2 ergibt sich eine besonders gute Effektivität bei der Bereitstellung des gewünschten Beleuchtungssettings.

**[0007]** Eine Anordnung des optischen Stabausleuchtungs-Vorgabeelements nach Anspruch 3 führt zu einer vorteilhaften Spezialisierung der Wirkung

dieses Stabausleuchtungs-Vorgabeelements auf einen Beleuchtungswinkel.

**[0008]** Ein Intensitäts-Vorgabeelement nach Anspruch 4 sorgt insbesondere dann, wenn das optische Stabausleuchtungs-Vorgabeelement ausschließlich auf den Beleuchtungswinkel wirkt, für die Intensitätsabhängigkeit zur Vorgabe des Beleuchtungssettings. Das Intensitäts-Vorgabeelement kann diffraktiv ausgeführt sein. Eine Beleuchtungsintensitäts-Verteilung auf dem optischen Stabausleuchtungs-Vorgabeelement kann durch das Intensitäts-Vorgabeelement gezielt inhomogen ausgeführt sein und eine Feinstruktur beziehungsweise Parzellierung beinhalten, die aus der Stabgeometrie folgt. Diese Feinstruktur kann über vom Intensitäts-Vorgabeelement erzeugte Beugungsordnungen erzeugt werden. Die Beleuchtungsintensitäts-Verteilung auf dem optischen Stabausleuchtungs-Vorgabeelement kann Abbildungsfehler einer Einkoppeloptik zur Einkopplung des Beleuchtungslichts in die Eintrittsfläche vorhalten.

**[0009]** Eine Anordnung des optischen Stabausleuchtungs-Vorgabeelements nach Anspruch 5 hat sich bewährt.

**[0010]** Ein Axicon nach Anspruch 6 ermöglicht eine insbesondere zusätzliche Formung einer Beleuchtungsintensitäts-Verteilung auf dem optischen Stabausleuchtungs-Vorgabeelement. Das Axicon kann als Zoom-Axicon ausgebildet sein.

**[0011]** Eine Pupillen-Korrekturblende nach Anspruch 7 ermöglicht eine abschließende Feinkorrektur des vorgegebenen Beleuchtungssettings.

**[0012]** Ein Wechselhalter nach Anspruch 8 ermöglicht eine Anpassung der Wirkungen des optischen Stabausleuchtungs-Vorgabeelements und/oder des Intensitäts-Vorgabeelements an eine gewünschte Beleuchtungswinkelverteilung beziehungsweise ein gewünschtes Beleuchtungssetting. Anstelle eines Wechselns des jeweiligen Vorgabeelement kann dieses auch zwischen einer Korrekturstellung und einer Neutralstellung ein- und ausgefahren werden, sodass eine jeweilige Position des Wechselhalters möglich ist, bei der keines der zugeordneten Vorgabeelemente eine optische Wirkung hat.

**[0013]** Ein Wechselhalterantrieb nach Anspruch 9 ermöglicht einen automatisierten Betrieb des jeweiligen Wechselhalters. Der Wechselhalterantrieb kann mit einer zentralen Steuereinrichtung der Beleuchtungsoptik in Signalverbindung stehen.

**[0014]** Die Vorteile eines optischen Systems nach Anspruch 10, eines Beleuchtungssystems nach Anspruch 11 sowie einer Projektionsbelichtungsanlage nach Anspruch 12 entsprechen denjenigen, die vor-

stehend unter Bezugnahme auf die erfindungsgemäße Beleuchtungsoptik bereits erläutert wurden. Das Beleuchtungssystem kann eine DUV(deep ultraviolet, tiefes Ultraviolett)-Lichtquelle aufweisen.

**[0015]** Mit der Projektionsbelichtungsanlage kann insbesondere ein mikro- beziehungsweise nanostrukturiertes Bauteil, besonders ein Halbleiterchip, beispielsweise ein Speicherchip, hergestellt werden.

**[0016]** Ausführungsbeispiele der Erfindung werden nachfolgend anhand der Zeichnung näher erläutert. In dieser zeigen:

**Fig. 1** eine schematische Übersicht einer Mikrolithografie-Projektionsbelichtungsanlage in einem Meridionalschnitt;

**Fig. 2** schematisch und perspektivisch beispielhafte Subbündel von Beleuchtungslicht der Projektionsbelichtungsanlage im Verlauf zwischen einer Lichtquelle und einem optischen Stabausleuchtungs-Vorgabeelement;

**Fig. 3** in einer zu **Fig. 2** ähnlichen Darstellung einen angedeuteten Strahlverlauf eines Subbündels des Beleuchtungslichts zwischen dem optischen Stabausleuchtungs-Vorgabeelement und einem optischen Stab der Beleuchtungsoptik der Projektionsbelichtungsanlage;

**Fig. 4** perspektivisch den optischen Stab zur Verdeutlichung der Lage von Koordinatenachsen eines kartesischen xyz-Koordinatensystems;

**Fig. 5** schematisch in einem Strahlrichtungs-Diagramm mit den kartesischen Koordinaten  $x$ ,  $y$  zugeordneten Strahlrichtungs-Komponenten  $k_x$ ,  $k_y$  Verhältnisse bei der Einkopplung eines Beleuchtungsstrahls in den Stab, der an allen vier Mantelwänden des Stabs reflektiert wird;

**Fig. 6** in einem Diagramm gemäß **Fig. 5** einen Vergleich zwischen einem gewünschten Beleuchtungssetting ( $45^\circ$ -Dipol) und den Strahlrichtungen bei den vier Reflexionen gemäß **Fig. 5**;

**Fig. 7** und **Fig. 8** in zu den **Fig. 5** und **Fig. 6** ähnlichen Darstellungen die Verhältnisse bei einer Einkoppel-Strahlrichtung in den optischen Stab, die derart ist, dass der Beleuchtungsstrahl nur von einer oberen und einer unteren Mantelwand des optischen Stabes reflektiert wird;

**Fig. 9** eine schematische Darstellung des optischen Stabes sowie einer aufgefächerten Austrittsflächen-Ebene, die zur Ermittlung jeweils erlaubter Einkoppel-Strahlrichtungen und der jeweiligen Einkoppel-Strahlrichtung zugeordneter erlaubter Einkoppelorte auf der Stab-Eintrittsfläche, also zur Ermittlung einer Vorgabe einer Ausleuchtung der Eintrittsfläche hinsichtlich

einer über die Eintrittsfläche vorliegenden Beleuchtungsintensität und gleichzeitig einer über die Eintrittsfläche vorliegenden Beleuchtungswinkelverteilung herangezogen werden kann;

**Fig. 10** ein weiteres beispielhaftes Beleuchtungssetting, welches in einer Pupillenebene der Beleuchtungsoptik nach Austritt aus dem optischen Stab vorliegen soll;

**Fig. 11** eine Ortsausleuchtung des optischen Stabausleuchtungs-Vorgabeelements, die in Zusammenwirkung mit einer von diesem optischen Stabausleuchtungs-Vorgabeelement ausgehenden Beleuchtungswinkelverteilung zum Beleuchtungssetting nach **Fig. 10** führt;

**Fig. 12** bis **Fig. 17** zu den **Fig. 10** und **Fig. 11** ähnliche Darstellungen von Soll-Beleuchtungssettings sowie zugeordnete Soll-Ortsausleuchtungen des optischen Stabausleuchtungs-Vorgabeelements, die zusammenwirkend mit vom optischen Stabausleuchtungs-Vorgabeelement dann jeweils ausgehenden Beleuchtungswinkelverteilungen zu diesem Soll-Beleuchtungssetting führen; und

**Fig. 18** und **Fig. 19** beispielhaft zwei Ausführungen einer Aperturblende, die in einer Pupillenebene der Beleuchtungsoptik im Beleuchtungslicht-Strahlengang nach dem optischen Stab angeordnet sein kann.

**[0017]** Zur Verdeutlichung von Lagebeziehungen ist in der Zeichnung ein kartesisches xyz-Koordinatensystem angegeben. In der **Fig. 1** verläuft die  $x$ -Achse senkrecht zur Zeichenebene aus dieser heraus. Die  $y$ -Achse verläuft in der **Fig. 1** nach oben. Die  $z$ -Achse verläuft in der **Fig. 1** nach links.

**[0018]** Eine Mikrolithografie-Projektionsbelichtungsanlage **1** hat ein Beleuchtungssystem mit einer Beleuchtungsoptik **2** zur Ausleuchtung eines definierten Beleuchtungs- beziehungsweise Objektfelds **3** am Ort eines Objekts beziehungsweise Retikels **4**, welches eine für die Produktion mikrostrukturierter beziehungsweise mikroelektronischer Halbleiterbauelemente zu projizierende Vorlage darstellt. Das Retikel **4** wird von einem nicht dargestellten Retikelhalter gehalten.

**[0019]** Als Lichtquelle **5** für Beleuchtungslicht des Beleuchtungssystems dient ein Laser im tiefen Ultraviolett (DUV). Hierbei kann es sich um einen ArF-Excimer-Laser handeln. Auch andere DUV-Quellen sind möglich.

**[0020]** Ein Strahlaufweiter **6**, beispielsweise eine aus der DE-A 41 24 311 bekannte Spiegelanordnung, dient zur Kohärenzreduktion und zur Erzeugung ei-

nes aufgeweiteten, kolimierten, rechteckigen Querschnitts eines Strahls des Beleuchtungslichts 7.

**[0021]** Ein erstes diffraktives optisches Rasterelement (DOE) 8 ist in einer Objektebene eines Kondensors 9 angeordnet. Dieses DOE 8 wird nachfolgend auch als Intensitäts-Vorgabelement bezeichnet. Der Kondensor 9 hat ein Axicon-Paar 10 und eine Linse 11 mit positiver Brennweite. Der Abstand der Axicon-Elemente des Axicon-Paars 10 zueinander sowie die Position der Linse 11 sind längs einer optischen Achse 12 der Beleuchtungsoptik 2 verstellbar, wie in der Fig. 1 durch Doppelpfeile 13, 14 angedeutet. Der Kondensor 9 stellt daher eine Zoom-Optik dar.

**[0022]** In einer Austritts-Pupillenebene 15 des Kondensors 9 ist ein weiteres diffraktives und/oder refraktives optisches Rasterelement (ROE) 16 angeordnet. Soweit das Rasterelement 16 diffraktiv ausgeführt ist, kann es beispielsweise als computergeneriertes Hologramm (CGH) ausgeführt sein. Alternativ oder zusätzlich zur Ausgestaltung als diffraktives optisches Element kann das ROE 16 refraktiv ausgeführt sein, beispielsweise als refraktives optisches Rasterelement, insbesondere als Mikrolinsen-Array. Obwohl auch eine diffraktive Ausführung möglich ist, wird das Rasterelement 16 nachfolgend als ROE bezeichnet.

**[0023]** Mit dem ersten DOE 8 wird am Ort des ROE 16 eine definierte Intensitätsverteilung in der Pupillenebene 15 eingestellt. Hierdurch wird ein vorgegebenes sogenanntes Beleuchtungssetting, also eine definierte Verteilung von Beleuchtungswinkeln über das Objektfeld 3, erzeugt. Das erste DOE 8 stellt daher ein Beleuchtungswinkel-Vorgabelement zur Vorgabe einer Beleuchtungswinkelverteilung über das Objektfeld 3 dar.

**[0024]** Eine dem ROE 16 nachgeordnete Einkopelloptik 17 überträgt das Beleuchtungslicht auf eine stirnseitige Eintrittsfläche 18 eines transparenten optischen Stabes in Form eines Glasstabes 19. Der Stab 19 mischt und homogenisiert das Beleuchtungslicht durch mehrfache innere Reflexion an den Mantelwänden des Stabs 19. Unmittelbar an einer der Eintrittsfläche 18 gegenüberliegenden, stirnseitigen Austrittsfläche 20 des Stabs 19 liegt eine Zwischenfeldebene, in der ein Retikel-Masking-System (REMA) 21, eine verstellbare Feldblende, angeordnet ist.

**[0025]** Mit dem ROE 16 wird unter anderem die Querschnittsform des Beleuchtungsstrahls 7 an die Rechteckform der Eintrittsfläche 18 des Stabs 19 angepasst.

**[0026]** Das ROE 16 wird nachfolgend auch als optisches Stabausleuchtungs-Vorgabelement bezeichnet. Das ROE 16 dient zur Vorgabe einer Ausleuch-

tung der Eintrittsfläche 18 des Stabes 19 mit dem Beleuchtungslicht 7. Diese Vorgabe der Ausleuchtung der Eintrittsfläche 18 ist so, dass hierüber eine Verteilung der Beleuchtungsintensität und gleichzeitig der Beleuchtungswinkelverteilung über die Eintrittsfläche 18 vorgegeben wird. Die vorgegebene Beleuchtungsintensitäts-Verteilung über die Eintrittsfläche 18 weicht von einer homogenen Verteilung ab, was nachfolgend noch näher erläutert wird.

**[0027]** Das DOE 8, also das Intensitäts-Vorgabeelement, dient zur Vorgabe einer Beleuchtungsintensitäts-Verteilung auf dem ROE 16, also auf dem optischen Stabausleuchtungs-Vorgabelement.

**[0028]** Dem REMA 21 nachgeordnet ist ein Kondensor 22. In einer Austritts-Pupillenebene 23 des Kondensors 22 kann ein Blenden-Wechselhalter 24 mit einer Mehrzahl von Blenden beziehungsweise Filtern angeordnet sein, von denen in der Fig. 1 zwei Blenden 25, 26 dargestellt sind. Der Blenden-Wechselhalter 24 trägt die verschiedenen Blenden nach Art eines Blendenkarussells. Zum Blendenwechsel wird das Karussell um eine Antriebswelle 27 eines Antriebsmotors 28 angetrieben, der mit einer zentralen Steuereinrichtung 28a der Projektionsbelichtungsanlage 1 in Signalverbindung steht. Die Blenden des Blenden-Wechselhalters 24 sind in eine gerade Anzahl von separaten Blendenabschnitten unterteilt. Bei den Blendenabschnitten kann es sich um das Beleuchtungslicht vollständig blockende Blenden, um das Beleuchtungslicht um einen vorgegebenen Anteil schwächende Graufilter oder um das Beleuchtungslicht linear polarisierende Polarisationsfilter handeln.

**[0029]** Der dem Stab 19 nachgeordneten Pupillenebene 23 ist ein weiterer Kondensor mit Linsengruppen 29, 30 nachgeordnet. Zwischen den beiden Linsengruppen 29, 30 ist ein 90 °-Umlenkspiegel 31 für das Beleuchtungslicht angeordnet. Der Kondensor 22 sowie der weitere Kondensor mit den beiden Linsengruppen 29, 30 bilden ein Objektiv 31a, das die Zwischenfeldebene des REMA 21 auf das Retikel 4 abbildet. Die Pupillenebene 23 stellt eine interne Pupillenebene dieses Objektivs 31a dar.

**[0030]** Ein Projektionsobjektiv 32 bildet das Objektfeld 3, das in einer Objektebene 33 liegt, in ein Bildfeld 34 in einer Bildebene 35 ab. Das Bildfeld 34 ist Teil der Oberfläche eines zu belichtenden Wafers 36, der mit einer für das Beleuchtungslicht empfindlichen Beschichtung versehen ist. Der Wafer 36 wird von einem nicht dargestellten Waferhalter gehalten. Bei der Projektionsbelichtung werden das Retikel 4 und der Wafer 36 synchron zueinander gescannt. Auch eine intermittierende Verlagerung der Halter des Retikels 4 und des Wafers 36, ein sogenannter Stepper-Betrieb, ist möglich.

**[0031]** Die verschiedenen bündelführenden beziehungsweise bündelformenden Komponenten der Projektionsbelichtungsanlage **1** sind mit Ausnahme des Umlenkspiegels **31** als refraktive Komponenten angedeutet. Genauso kann es sich auch um katadioptrische oder um reflektive Komponenten handeln.

**[0032]** Die Wirkungen des DOE **8** einerseits und des ROE **16** andererseits werden nachfolgend anhand der **Fig. 2** und **Fig. 3** näher erläutert.

**[0033]** Die **Fig. 2** zeigt einen Strahlengang ausgewählter Subbündel des Beleuchtungslichts **7** zwischen der Lichtquelle **5** und dem ROE **16**. Die **Fig. 3** zeigt wiederum den Strahlengang eines ausgewählten Subbündels des Beleuchtungslichts **7** zwischen dem ROE **16** und der Eintrittsfläche **18** des optischen Stabs **19**.

**[0034]** Von einem Punkt einer Emissionsfläche **37** der Lichtquelle **5** geht in der **Fig. 2** beispielhaft ein Subbündel **7a** des Beleuchtungslichts **7** mit einer geringen Ausgangsdivergenz aus und trifft auf das DOE **8** im Bereich eines vergleichsweise gering ausge dehnten Auftreffflecks **38**. Ein weiteres Subbündel **7b** des Beleuchtungslichts **7** ist in der **Fig. 2** ausgehend von einem Punkt des DOE **8** dargestellt. In einem Fernfeld **39** dieses weiteren Subbündels ergibt sich aufgrund der diffraktiven Wirkung des DOE **8** eine Intensitäts-Unterstruktur, die zur Vorgabe einer Strukturierung einer Ausleuchtung des ROE **16** genutzt werden kann. Das ROE **16** ist entsprechend in einem Fernfeld des DOE **8** angeordnet.

**[0035]** Zwischen dem DOE **8** und dem ROE **16** ist das Zoom-Axicon-Paar **10** angeordnet, welches in der **Fig. 2** durch eine Linse angedeutet ist.

**[0036]** Die Ortsausleuchtung des ROE **16**, die in der **Fig. 2** rechts veranschaulicht ist, ergibt sich als Kombination der Wirkungen der Divergenz der Lichtquelle **5**, des DOE **8** und des Axicon-Paars **10**.

**[0037]** **Fig. 11** zeigt beispielhaft diese Ausleuchtung des ROE **16** nach **Fig. 2** stärker im Detail. Beleuchtet werden vier teilkreisförmige Beleuchtungsregionen **39**, **40**, **41**, **42**, die in den vier Quadranten des ROE **16** angeordnet sind. Innerhalb dieser vier Beleuchtungsregionen **39** bis **42** ist eine Beleuchtungsintensität charakteristisch in intensivere und weniger intensive Parzellen aufgeteilt. Bei **43** ist in der **Fig. 11** eine intensivere Parzelle und bei **44** eine weniger intensive Parzelle bezeichnet. Eine Beleuchtungsintensität des ROE **16** ist in der **Fig. 11** durch eine rechts angegebene Intensitätsskala in willkürlichen Einheiten angegeben.

**[0038]** Die Parzellierung **43**, **44** folgt aus der Geometrie des optischen Stabs **19**.

**[0039]** Eine Feinstrukturierung im Fernfeld **39**, über die die Parzellierung **43**, **44** herbeigeführt werden kann, wird über verschiedene Beugungsordnungen des DOE **8** erzeugt.

**[0040]** Die Beleuchtungsintensitäts-Verteilung über die Beleuchtungsregionen **39** bis **42** auf dem ROE **16** kann Abbildungsfehler der Einkoppeloptik **17** bei der Einkopplung in den optischen Stab **19** vorhalten.

**[0041]** Das DOE **8** ist zum Austausch durch mindestens ein weiteres DOE **45** (vergleiche **Fig. 1**) über einen DOE-Wechselhalter **46** mit Wechselhalterantrieb mit Antriebsmotor **47** zum Drehen des DOE-Wechselhalter-Karussells um eine Antriebswelle **48** ausgeführt. Hierüber lässt sich die Wirkung des DOEs an gewünschte Vorgaben, beispielsweise zur Anpassung an ein gewünschtes Beleuchtungssetting, einstellen. Es ist auch eine Stellung des DOE-Wechselhalters **47** möglich, bei der kein DOE im Strahlengang des Beleuchtungslichts **7** wirkt.

**[0042]** Entsprechend hat die Beleuchtungsoptik **2** einen ROE-Wechselhalter **49** zum Austausch des ROE **16** gegen mindestens ein weiteres ROE **50**. Ein Antriebsmotor **51** sowie eine Antriebswelle **52** des ROE-Wechselhalters **49** entsprechen denjenigen Komponenten, die vorstehend im Zusammenhang mit dem DOE-Wechselhalter **46** beschrieben wurden. Es ist auch eine Stellung des ROE-Wechselhalters **49** möglich, bei der kein ROE im Strahlengang des Beleuchtungslichts **7** wirkt.

**[0043]** **Fig. 3** verdeutlicht eine Abstrahlwinkelcharakteristik des ROE **16**. Dargestellt ist beispielhaft ein Subbündel des Beleuchtungslichts **7**, welches von einem Punkt der Beleuchtungsregion **40** ausgeht. Die Abstrahlwinkelcharakteristik des ROE **16** ist so, dass das abgestrahlte Subbündel das Beleuchtungslicht **7** in zwei Abstrahlquadranten **53**, **54** eines insgesamt angenähert rechteckigen Abstrahlquerschnitts **55** abstrahlt. Ein x/y-Aspektverhältnis des Abstrahlquerschnitts **55** entspricht dem x/y-Aspektverhältnis der Eintrittsfläche **18** des optischen Stabes **19**.

**[0044]** Die Einkoppeloptik **17**, die in der **Fig. 3** wiederum durch eine Linse angedeutet ist, überträgt die Abstrahlwinkelcharakteristik, die vom ROE **16** erzeugt wird, in eine Beleuchtungsintensitätsverteilung an der Eintrittsfläche **18** des Stabes **19**. Den beiden ausgeleuchteten Abstrahlquadranten **53**, **54** entsprechen dann Eintrittsflächenabschnitte **56**, **57** der Eintrittsfläche **18**, die mit dem Beleuchtungslicht **7** aus Richtung des in der **Fig. 3** betrachteten Emissionspunktes vom ROE **16** beaufschlagt werden.

**[0045]** Von jedem Emissionspunkt auf den Beleuchtungsregionen **39** bis **42** des ROE **16** kann eine andere Abstrahlcharakteristik erzeugt werden. Die Vorschrift, von welchen Emissionspunkten des ROE **16**

welche Abstrahlwinkelcharakteristik emittiert werden soll, damit das gewünschte Beleuchtungssetting resultiert, wird nachfolgend erläutert.

**[0046]** Ein derartiges gewünschtes Beleuchtungssetting **58**, welches aufgrund der Abstrahlcharakteristik nach den **Fig. 2**, **Fig. 3** und **Fig. 11** resultiert, ist in der **Fig. 10** dargestellt. Dieses Beleuchtungssetting **58** ist ein Dipolsetting mit zwei teilkreisförmigen Beleuchtungspolen **59**, **60**, die im ersten und dritten Quadranten der Intensitätsverteilung im Bereich der Pupillenebene **23** angeordnet sind, die in der **Fig. 10** dargestellt ist. Zu beachten ist, dass die Ortsverteilung der Ausleuchtung des ROE **16** nach **Fig. 11** mit vier Beleuchtungsregionen **39** bis **42** dieses Dipol-Beleuchtungssetting **58** mit zwei Beleuchtungspolen **59**, **60** erzeugt, ohne dass es notwendig ist, beispielsweise zwei Pole abzublocken, wie dies beim Stand der Technik der Fall ist. Erreicht wird dies durch die gezielte Kombination aus Ortsausleuchtung und Abstrahlwinkelcharakteristik des ROE **16**.

**[0047]** **Fig. 5** verdeutlicht, wie sich die Richtung eines in den optischen Stab **19** einfallenden Beleuchtungsstrahls mit einem Richtungsvektor  $\mathbf{k}_{x0}$ ,  $\mathbf{k}_{y0}$  bei der Reflexion an den vier Mantelwänden des optischen Stabes **19** ändert (Richtungsvektor **61**). Der Strahl fällt in die Eintrittsfläche **18** zunächst so ein, dass seine Strahlrichtung sowohl eine positive x-als auch eine positive y-Richtungskomponente hat. Nach Reflexion an der ersten Mantelwand wird die x-Komponente der Strahlrichtung umgekehrt, wohingegen die y-Komponente erhalten bleibt (Richtungsvektor **62**). Bei der zweiten Reflexion an der zweiten Mantelwand wird nun die y-Richtung umgekehrt, nicht aber die x-Richtung, sodass der Richtungsvektor **63** resultiert. Die dritte Reflexion kehrt wiederum die x-Richtung um, nicht aber die y-Richtung, sodass der Richtungsvektor **64** resultiert. Die vierte Reflexion überführt den Richtungsvektor **64** wieder in den Richtungsvektor **61**. Sofern der mit dem Richtungsvektor **61** einfallende Strahl genau vier Reflexionen (oder ein ganzzahliges Vielfaches dieser Reflexionsanzahl) an den inneren Mantelwänden des Stabs **19** erfährt, verlässt er die Austrittsfläche **20** also mit exakt der gleichen Richtung wie beim Eintritt in die Eintrittsfläche **18**.

**[0048]** **Fig. 6** verdeutlicht, wie viele Reflexionen ein solcher Strahl mit einfallendem Richtungsvektor **61** mit positiver  $k_x$ - und positiver  $k_y$ -Komponente an den Mantelflächen des optischen Stabes erfahren darf, damit ein in diesem Fall gewünschtes  $45^\circ$ -Dipol-Beleuchtungssetting mit ausgeleuchteten Quadranten I und III resultiert. Im Vergleich mit der **Fig. 5** wird deutlich, dass ein derart mit dem Richtungsvektor **61** in den Stab einfallender Beleuchtungsstrahl entweder nicht an den Mantelwänden reflektiert werden darf oder eine gerade Anzahl von Reflexionen an den Mantelwänden des Stabs **19** erfahren darf, da-

mit der Beleuchtungsstrahl entweder eine Strahlrichtung hat, die zum Quadranten I (Richtungsvektor **61**) oder eine Strahlrichtung hat, die zum Quadranten III (Richtungsvektor **63**) des Wunsch-Beleuchtungssettings passt. Ungerade Anzahlen von Reflexionen an den Mantelwänden des Stabes würden zu nicht zum Wunsch-Beleuchtungssetting passenden Richtungsvektoren **62** oder **64** führen.

**[0049]** **Fig. 7** und **Fig. 8** zeigen die Verhältnisse, bei denen der Beleuchtungsstrahl mit einem Richtungsvektor **65** mit positiver x- und positiver y-Komponente der Strahlrichtung so einfällt, dass er nur von der oberen beziehungsweise der unteren Mantelwand des Stabes **19** reflektiert wird. Hier wird der Richtungsvektor bei einer ersten Reflexion in einen Richtungsvektor **66** mit umgekehrten y-Vorzeichen und gleichbleibendem x-Vorzeichen überführt und bei der nachfolgenden Reflexion wieder in sich selbst, also in den Richtungsvektor **65** überführt. Entsprechend ergibt sich, dass bei einer solchen Situation (Reflexion nur an gegenüberliegende Mantelflächen) zum Erreichen des Wunschsettings entweder keine Reflexion oder eine geradzahlige Anzahl von Reflexionen erlaubt ist. Eine ungeradzahlige Anzahl von Reflexionen würde zum unerwünschten Richtungsvektor **66** führen.

**[0050]** Anhand der **Fig. 8** wird deutlich, dass auch ein zunächst in einer in Bezug auf das Wunschsetting nicht gewünschten Strahlrichtung in den optischen Stab einfallender Beleuchtungsstrahl (Richtungsvektor **67**) bei ungeradzahliger Anzahl von Reflexionen an den Mantelwänden des Stabes **19** zu einem gewünschten Richtungsvektor **68** (Situation bei ausschließlicher Reflexion an gegenüberliegenden Mantelwänden des Stabes) oder auch zu einem gewünschten Richtungsvektor **65** (bei Reflexion auch an anderen Mantelwänden des Stabes) führen kann.

**[0051]** **Fig. 9** zeigt eine Anordnung, mit der entschieden werden kann, zu welcher Strahlrichtung des Beleuchtungslichts **7** am Eintritt in den Stab **19** Abschnitte der Eintrittsfläche **18** gehören, die mit dem Beleuchtungslicht beaufschlagt werden können, damit das gewünschte Beleuchtungssetting resultiert. Dargestellt ist dies in der **Fig. 9** für genau eine Strahlrichtung **69** des Beleuchtungslichts **7**. Diese Strahlrichtung schneidet eine Austrittsebene **70**, in der die Austrittsfläche **20** liegt, in einem Punkt  $\mathbf{x}_s$ ,  $\mathbf{y}_s$ . Betrachtet wird hierbei derjenige Strahl mit der Strahlrichtung **69**, der durch das Zentrum der Eintrittsfläche **18** verläuft.

**[0052]** Die Austrittsebene **70** ist unterteilt in xy-Koordinaten-Parzellen  $\mathbf{P}_{i,j}$ , deren Fläche genauso groß ist wie die Austrittsfläche **20**, und die die Austrittsebene **70** lückenlos parkettieren. Die Koordinaten  $x$ ,  $y$  in jeder der Koordinaten-Parzellen  $\mathbf{P}_{i,j}$  stehen für Strahlrichtungen genau eines Typs von Reflexionen an den Mantelwänden des optischen Stabs **19**.

**[0053]** Die Austrittsfläche **20** ist gleichzeitig die Koordinaten-Parzelle  $P_{0,0}$ . Strahlen des Beleuchtungslichts **7** mit einer Strahlrichtung, deren Durchstoßpunkt in der Parzelle  $P_{0,0}$  endet, erfahren keine Reflexion an den Mantelwänden des Stabs **19**.

**[0054]** Alle Strahlen mit der Strahlrichtung **69** treffen, sofern eine Ablenkung aufgrund der Reflexion an den Mantelwänden unberücksichtigt bleibt, auf die Austrittsebene **70** in einem Auftreffbereich **71**, der in der **Fig. 9** gestrichelt dargestellt ist. Dieser Auftreffbereich **71** liegt in den Parzellen  $P_{1,1}$ ,  $P_{1,2}$ ,  $P_{2,1}$  und  $P_{2,2}$ . Der Punkt  $x_s$ ,  $y_s$  liegt selbst in der Parzelle  $P_{1,1}$ , also in einer Parzelle mit exakt zwei Reflexionen an den Stab-Mantelwänden.

**[0055]** Im in der **Fig. 9** dargestellten Fall einer Kombination aus Soll-Beleuchtungssetting und betrachteter Strahlrichtung **69** sind, wie vorstehend im Zusammenhang mit den **Fig. 5** bis **Fig. 8** erläutert, gerade Anzahlen von Reflexionen an den Stab-Mantelwänden zulässig, führen also zu Strahlrichtungen des Beleuchtungslichts **7** beim Austritt aus der Austrittsfläche **20**, die zum gewünschten Beleuchtungssetting passen. Alle Strahlen mit der Strahlrichtung **69**, deren Durchstoßpunkte in der Schnittfläche des Auftreffbereichs **71** mit der Parzelle  $P_{1,1}$  liegen, sind daher Strahlrichtungen, die zum erlaubten Beleuchtungssetting beitragen. Das ROE **16** muss also so ausgelegt sein, dass Beleuchtungslicht **7** mit der Strahlrichtung **69** in den Eintrittsflächenabschnitt **57** der Eintrittsfläche **18** eingestrahlt wird.

**[0056]** Entsprechendes gilt für die Schnittfläche zwischen dem Auftreffbereich **71** und der Parzelle  $P_{2,2}$ , die ebenfalls zu einer geradzahigen Anzahl von Reflexionen des Beleuchtungslicht mit der Strahlrichtung **69** an den Mantelwänden des Stabs **19** gehört. Diese Schnittfläche gehört zum Eintrittsflächenbereich **58**.

**[0057]** Die beiden anderen, verbleibenden rechteckigen Eintrittsflächenabschnitte **72**, **73** müssen zum Erreichen des Soll-Beleuchtungssettings nicht mit Beleuchtungslicht der Strahlrichtung **69** beaufschlagt werden, da sie den Koordinaten-Parzellen  $P_{2,1}$  und  $P_{1,2}$  entsprechen, also zu Parzellen mit einer ungeradzahigen Anzahl von Reflexionen an den Stab-Mantelwänden gehören.

**[0058]** Die Betrachtung für die Strahlrichtung **69** kann nun für alle anderen Strahlrichtungen, die zum Soll-Beleuchtungssetting, beispielsweise zum Beleuchtungssetting **58** gehören, wiederholt werden und auch für hierzu komplementäre Strahlrichtungen (vergleiche die Beleuchtungsregionen **40** und **42** des ROE **16**, bei denen dann eine ungerade Anzahl von Reflexionen an den Stab-Mantelwänden zu gewünschten Beleuchtungsrichtungen führt, wie eben-

falls vorstehend im Zusammenhang mit den **Fig. 5** bis **Fig. 8** erläutert).

**[0059]** Bei derartigen, an sich nicht zum Beleuchtungssetting passenden Strahlrichtungen werden dann Schnittflächen des jeweiligen Auftreffbereichs mit den Koordinaten-Parzellen betrachtet, die zu Parzellen mit ungerader Reflexionsanzahl gehören, beispielsweise die Parzellen  $P_{1,2}$  und  $P_{2,1}$  des vorstehenden Beispiels. Würde beispielsweise die Strahlrichtung **69** nicht zu einer Strahlrichtung gehören, die im Beleuchtungssetting **58** vorkommt, würde sich die Aufteilung der Eintrittsfläche **18** in zu beleuchtende Eintrittsflächenabschnitte und nicht zu beleuchtende Eintrittsflächenabschnitte genau umkehren und die Eintrittsflächenabschnitte **72**, **73** wären zu beleuchten, die Eintrittsflächenabschnitte **57** und **58** wären dann gerade nicht zu beleuchten.

**[0060]** Für die jeweiligen Orte  $x_s$ ,  $y_s$  in der Austrittsebene **70** lässt sich als Funktion vom jeweiligen Abstrahlort  $p$ ,  $q$  und der Strahlrichtung  $k_p$ ,  $k_q$ , ausgehend von diesem Ort  $p$ ,  $q$  folgende Beziehung angeben:

$$x_s(p, q, k_p) = k_p f + \frac{Lp}{\sqrt{f^2 n_s^2 - p^2 - q^2}}$$

$$y_s(p, q, k_p) = k_q f + \frac{Lp}{\sqrt{f^2 n_s^2 - p^2 - q^2}}$$

**[0061]** Hierbei sind:

$x_s$ ,  $y_s$ : die die Strahlrichtung im Bereich des Stabeintritts repräsentierenden Koordinaten des Durchstoßpunktes dieser Strahlrichtung in der Austrittsflächenebene **70**;

$p$ ,  $q$ : Ortskoordinaten des ROE **16**;

$k_p$ ,  $k_q$ : Abstrahlrichtungen-Vektorkomponenten des jeweiligen Strahls des Beleuchtungslichts **7**, ausgehend vom Punkt  $p$ ,  $q$  am ROE **16**;

$f$ : Brennweite der Einkoppeloptik **17**;

$L$ : Länge des Stabs **19**, also Abstand zwischen der Eintrittsfläche **18** und der Austrittsfläche **20**;

$n_s$ : Brechungsindex des optischen Materials des Stabs **19**.

**[0062]** Für die Koordinaten  $x_s$ ,  $y_s$  gilt noch die erwähnte Nebenbedingung, dass für Strahlrichtungen am Stabeintritt, die zum gewünschten Beleuchtungssetting gehören, eine gerade Anzahl von Reflexionen an den Stab-Mantelwänden erfolgen darf, und für die anderen Strahlrichtungen, die also nicht zum Beleuchtungssetting passen, eine ungeradzahige Anzahl von Reflexionen an den Stab-Mantelwänden erfolgen muss.

**[0063]** Aus den obigen Formeln lässt sich eine Bedingung für eine Strukturierung des ROE **16** angeben.

**[0064]** Die **Fig. 12** bis **Fig. 17** zeigen drei weitere Varianten von Dipol-Beleuchtungssettings, jeweils mit Beleuchtungspolen **59**, **60** mit unterschiedlichen Anordnungspositionen innerhalb der Quadranten I und III sowie mit unterschiedlichen azimuthalen Erstreckungen. Diesen Beleuchtungssettings nach den **Fig. 12**, **Fig. 14** und **Fig. 16** sind in den **Fig. 13**, **Fig. 15** und **Fig. 17** die jeweiligen Ortsausleuchtungen des ROE **16** in einer Darstellung zugeordnet, die derjenigen der **Fig. 11** entspricht. Diese Ausleuchtungen sind wiederum mit einer Intensitätsskalierung versehen. Wie bei der Ortsausleuchtung des ROE **16** zur Erzeugung des Beleuchtungssettings **58** nach **Fig. 10** ist es auch bei den Dipolsettings nach den **Fig. 12**, **Fig. 14** und **Fig. 16** so, dass die Ortsausleuchtung am ROE **16** nach den **Fig. 13**, **Fig. 15** und **Fig. 17** jeweils vier Beleuchtungsregionen aufweist.

**[0065]** Die **Fig. 18** und **Fig. 19** zeigen Beispiele für die Filter beziehungsweise Blenden **25** und **26**. Beim Filter **25** sind die Quadranten I und III transparent und die Quadranten II und IV opak oder blockend ausgeführt. Der Filter beziehungsweise die Blende **26** ergibt sich durch Rotation der Blende **25** um deren Zentrum um  $90^\circ$ . Bei der Blende **26** sind also die Quadranten I und III opak beziehungsweise blockend ausgeführt und die Quadranten II und IV transparent. Die Blenden **25**, **26** dienen als Pupillen-Korrekturblenden. Bei der mikrolithografischen Herstellung eines mikro- beziehungsweise nanostrukturierten Bauelements wird zunächst der Wafer **36** zumindest abschnittsweise mit einer lichtempfindlichen Schicht beschichtet. Dann wird eine Struktur auf dem Retikel **4** mit der Projektionsbelichtungsanlage **1** auf den Wafer **36** projiziert. Sodann wird der belichtete Wafer **36** zur Ausbildung des mikrostrukturierten Bauelements bearbeitet.



**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**

- DE 19520563 [0002]
- WO 2005/006079 A1 [0002]
- WO 2003/046663 A2 [0002]
- DE 102007055443 A [0002]
- US 7209218 A [0002]
- US 2003/0038931 A [0002]
- US 6704092 A [0002]
- WO 2009/024164 A [0002]
- JP 2007027240 A [0002]
- DE 4124311 A [0020]

### Patentansprüche

1. Beleuchtungsoptik (2) für die Projektionslithographie zur Beleuchtung eines Objektfeldes (3) längs eines Beleuchtungslicht-Strahlengangs,

- mit einem optischen Stab (19)
- mit einer stirnseitigen Eintrittsfläche (18) für Beleuchtungslicht (7) und
  - mit einer gegenüberliegenden, stirnseitigen Austrittsfläche (20) für das Beleuchtungslicht (7),
  - wobei der optische Stab (19) derart gestaltet ist, dass das Beleuchtungslicht (7) an Mantelwänden des optischen Stabes (19) durch mehrfache innere Totalreflexion gemischt und homogenisiert wird,
  - mit einem optischen Stabausleuchtungs-Vorgabeelement (16), welches im Beleuchtungslicht-Strahlengang dem optischen Stab (19) vorgeordnet ist, zur Vorgabe einer Ausleuchtung der Eintrittsfläche (18) mit einer über die Eintrittsfläche (18) vorgegebenen Verteilung
    - einer Beleuchtungsintensität und gleichzeitig
    - einer Beleuchtungswinkelverteilung,
    - wobei die Ausleuchtungsvorgabe durch das optische Stabausleuchtungs-Vorgabeelement (16) derart ist, dass die vorgegebene Beleuchtungsintensitätsverteilung über die Eintrittsfläche (18) von einer homogenen Verteilung abweicht.

2. Beleuchtungsoptik nach Anspruch 1, **gekennzeichnet durch** eine Ausführung des optischen Stabausleuchtungs-Vorgabeelements (16) derart, dass für eine bestimmte Strahlrichtung (69) des Beleuchtungslichts (7) bei der Einkopplung in die Eintrittsfläche (18) die vorgegebene Beleuchtungsintensitätsverteilung so über die Eintrittsfläche (18) von einer homogenen Verteilung abweicht, dass Abschnitte (72, 73) der Eintrittsfläche (18) nicht mit Beleuchtungslicht (7) beaufschlagt werden.

3. Beleuchtungsoptik nach Anspruch 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet**, dass das optische Stabausleuchtungs-Vorgabeelement (16) in einer Pupillenebene (15) der Beleuchtungsoptik (2) angeordnet ist.

4. Beleuchtungsoptik nach einem der Ansprüche 1 bis 3, **gekennzeichnet durch** ein dem optischen Stabausleuchtungs-Vorgabeelement (16) vorgeordnetes Intensitäts-Vorgabeelement (8) zur Vorgabe einer Beleuchtungsintensitäts-Verteilung auf dem optischen Stabausleuchtungs-Vorgabeelement (16).

5. Beleuchtungsoptik nach Anspruch 4, **dadurch gekennzeichnet**, dass das optische Stabausleuchtungs-Vorgabeelement (16) in einem Fernfeld des Intensitäts-Vorgabeelements (8) angeordnet ist.

6. Beleuchtungsoptik nach einem der Ansprüche 1 bis 5, **gekennzeichnet durch** ein Axicon (10) im Beleuchtungslicht-Strahlengang zwischen dem Intensi-

täts-Vorgabeelement (8) und dem optischen Stabausleuchtungs-Vorgabeelement (16).

7. Beleuchtungsoptik nach einem der Ansprüche 1 bis 6, **gekennzeichnet durch** mindestens eine Pupillen-Korrekturblende (25, 26) im Beleuchtungslicht-Strahlengang nach dem optischen Stab (19).

8. Beleuchtungsoptik nach einem der Ansprüche 1 bis 7, **gekennzeichnet durch** einen Wechselhalter (46; 49) zum Austausch des Intensitäts-Vorgabeelements (8) und/oder des Stabausleuchtungs-Vorgabeelements (16) durch mindestens ein weiteres Vorgabeelement (45; 50).

9. Beleuchtungsoptik nach Anspruch 8, **gekennzeichnet durch** einen Wechselhalterantrieb (47; 51) zum angetriebenen Vorgabeelement-Austausch.

10. Optisches System mit einer Beleuchtungsoptik nach einem der Ansprüche 1 bis 9 und mit einer Projektionsoptik (32) zur Abbildung des Objektfeldes (3) in ein Bildfeld (34).

11. Beleuchtungssystem mit einem optischen System nach Anspruch 10 und mit einer Lichtquelle (5).

12. Projektionsbelichtungsanlage mit einem Beleuchtungssystem nach Anspruch 11, einem Retikelhalter zum Halten eines Retikels (4) in einer Objektebene (33), einem Projektionsobjektiv (32) zur Abbildung des Objektfeldes (3) in ein Bildfeld (34) in einer Bildebene (35) und mit einem Waferhalter zum Halten eines Wafers (36) in der Bildebene.

Es folgen 13 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

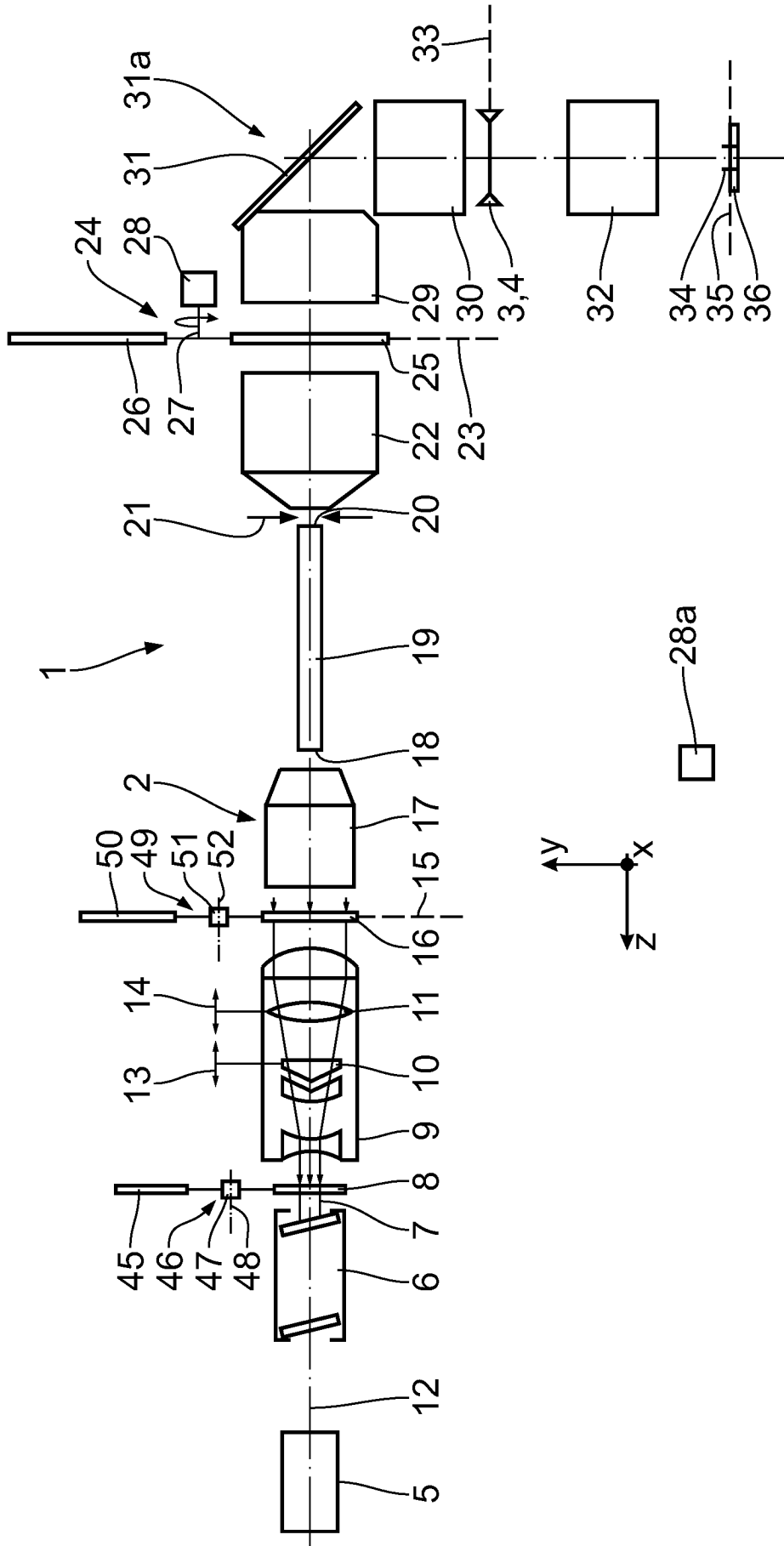


Fig. 1

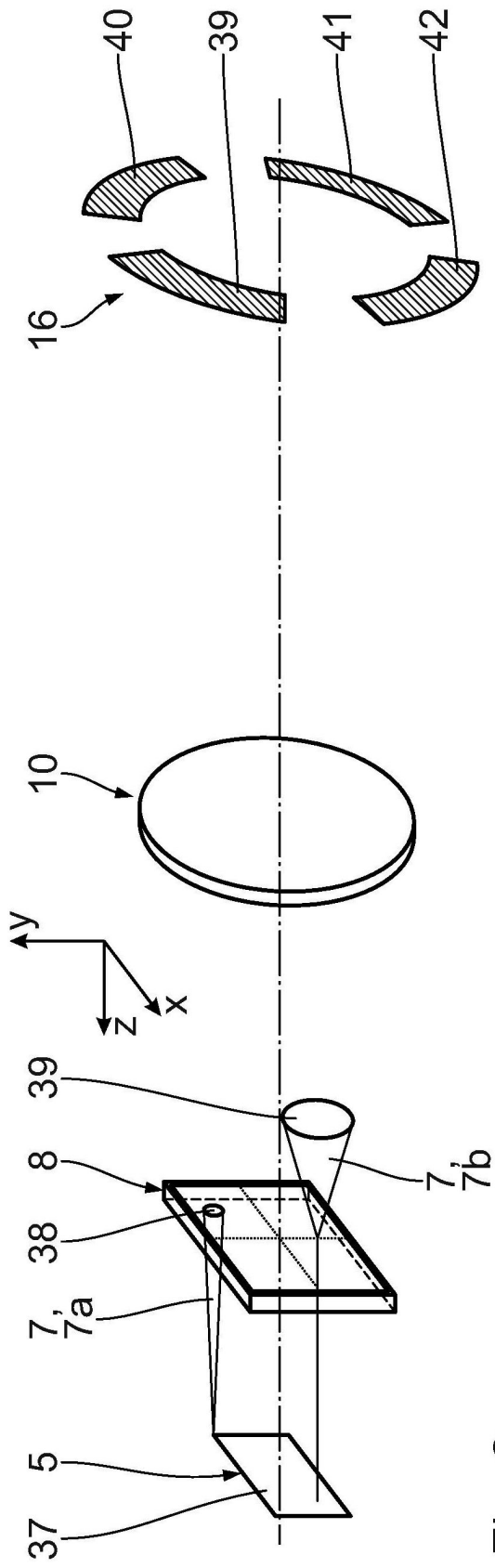


Fig. 2

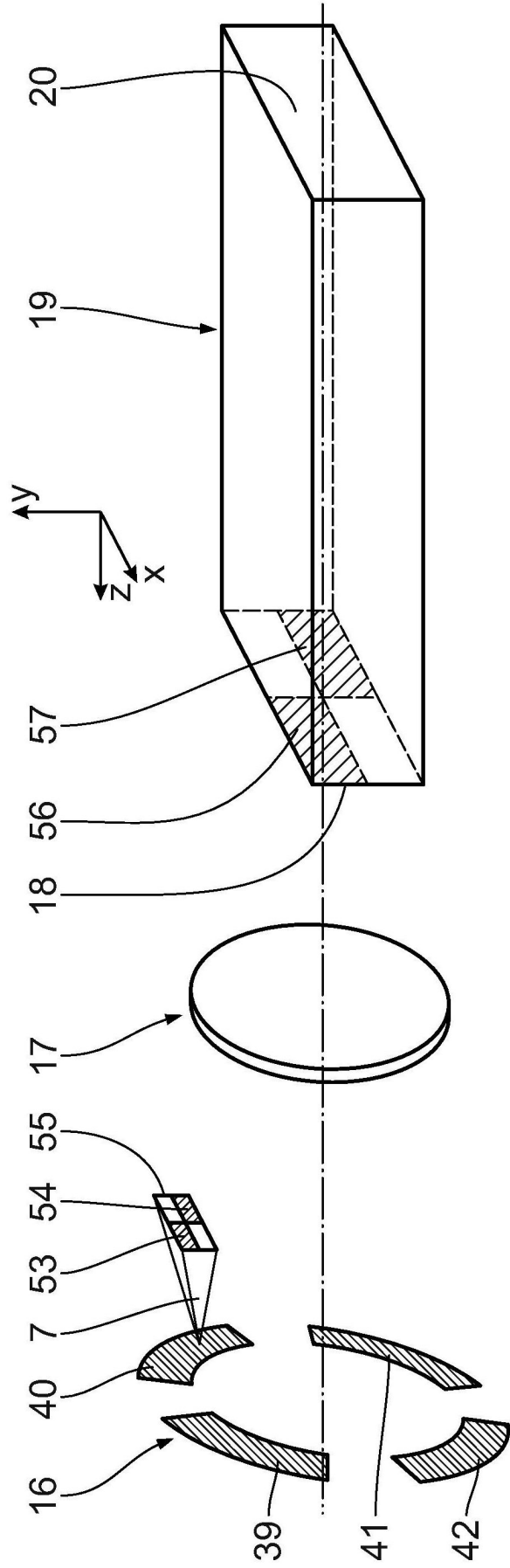


Fig. 3

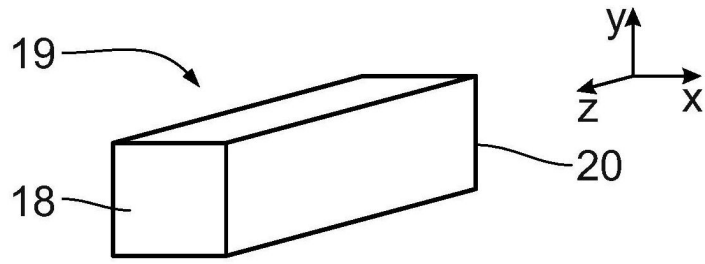


Fig. 4

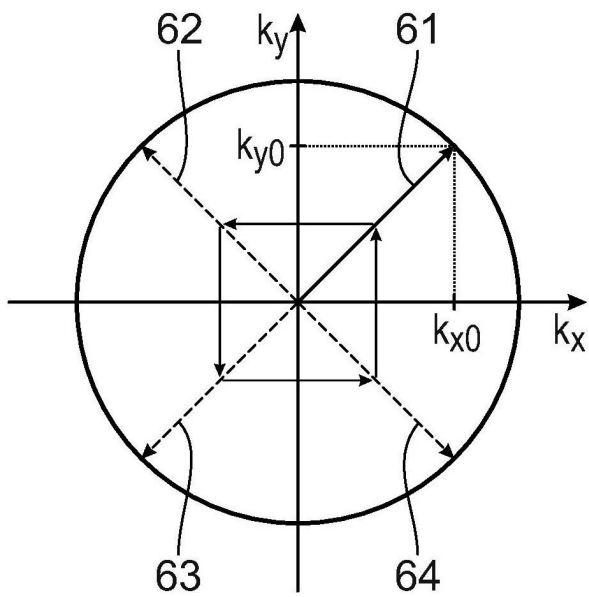


Fig. 5

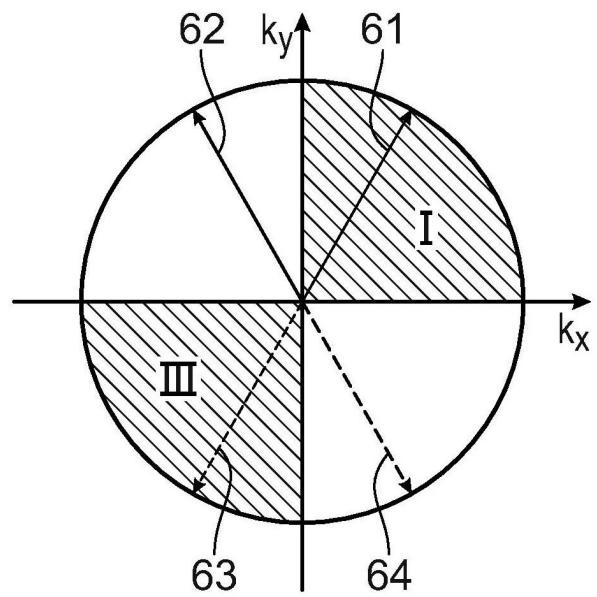


Fig. 6

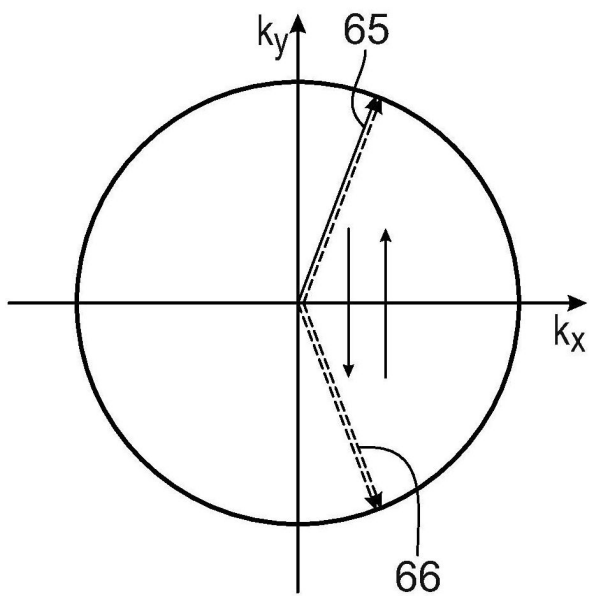


Fig. 7

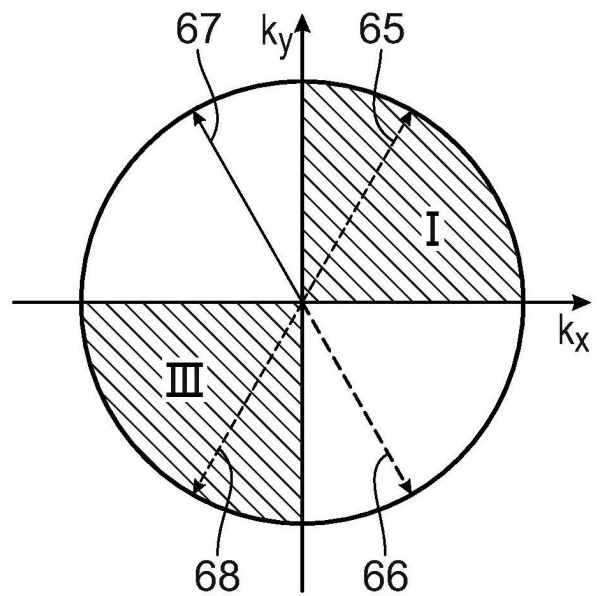


Fig. 8

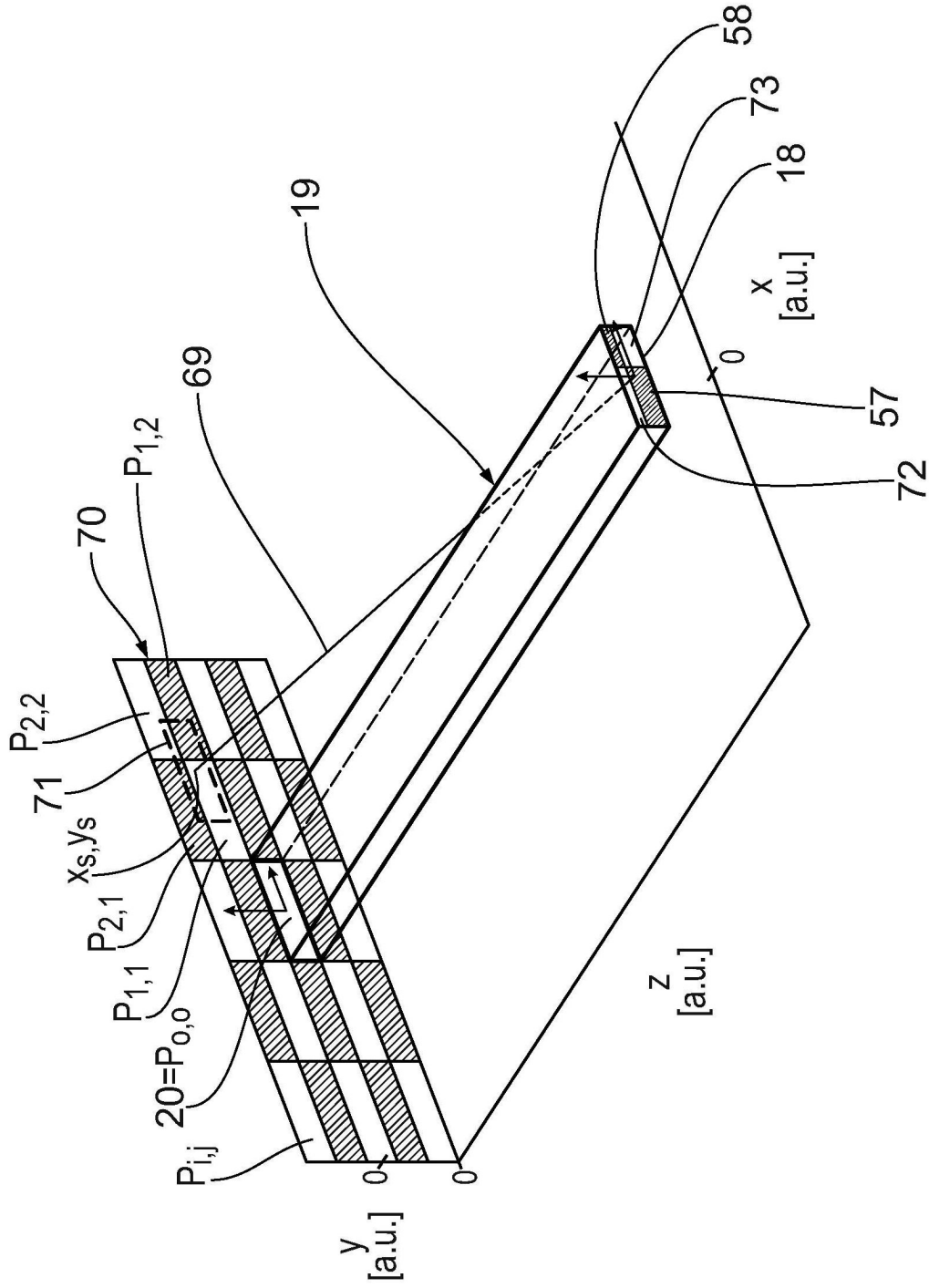


Fig. 9

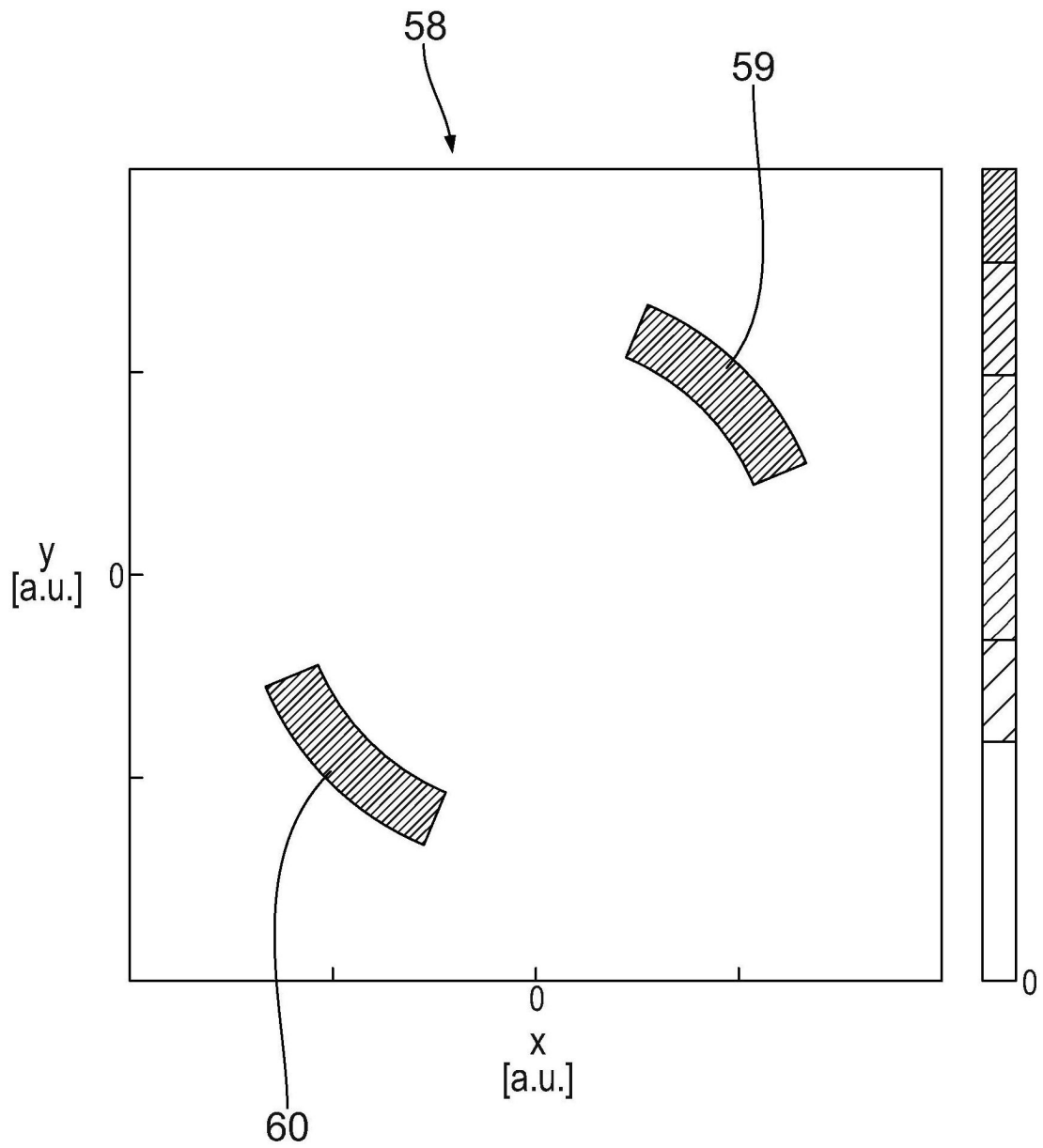


Fig. 10

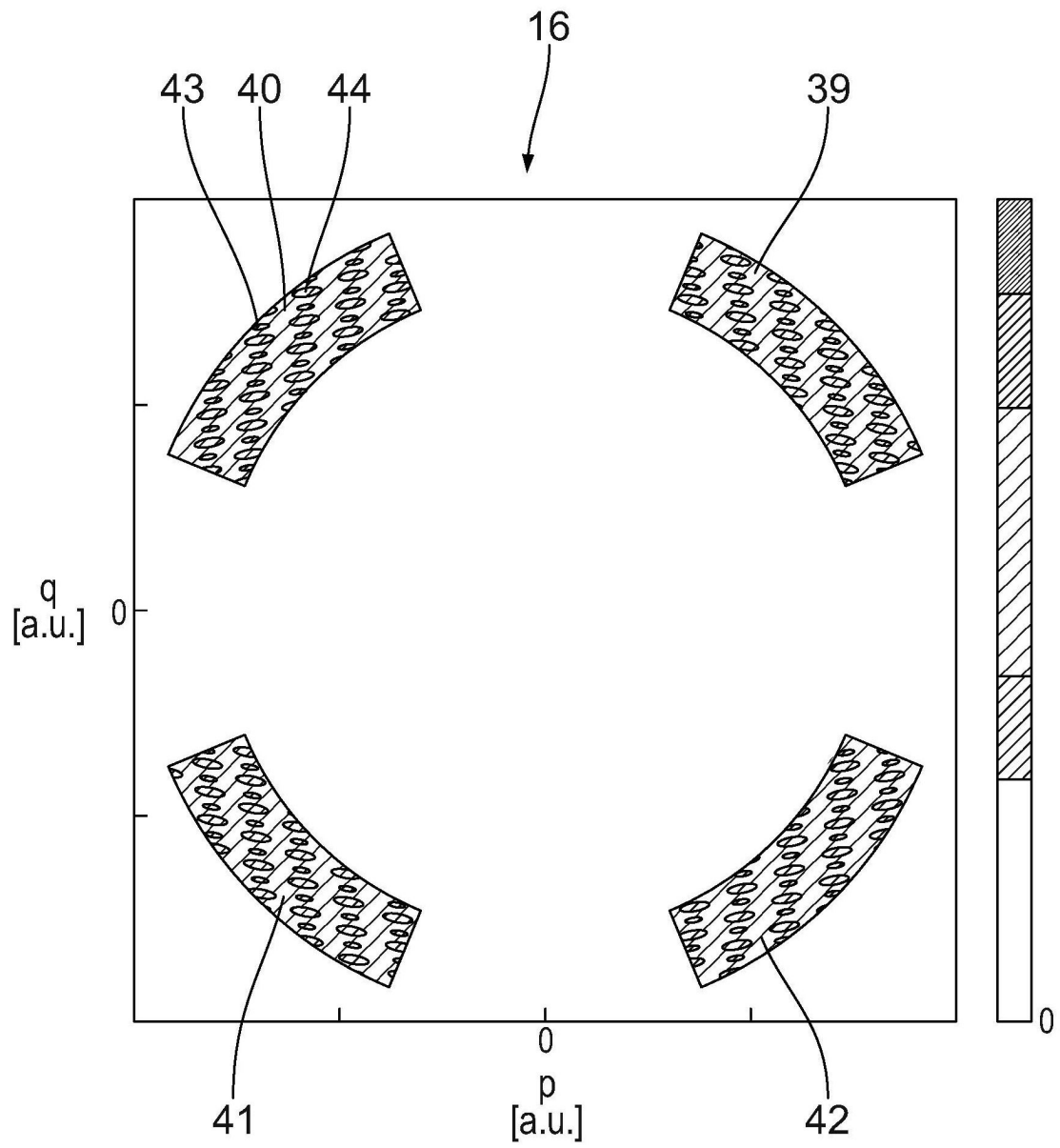


Fig. 11



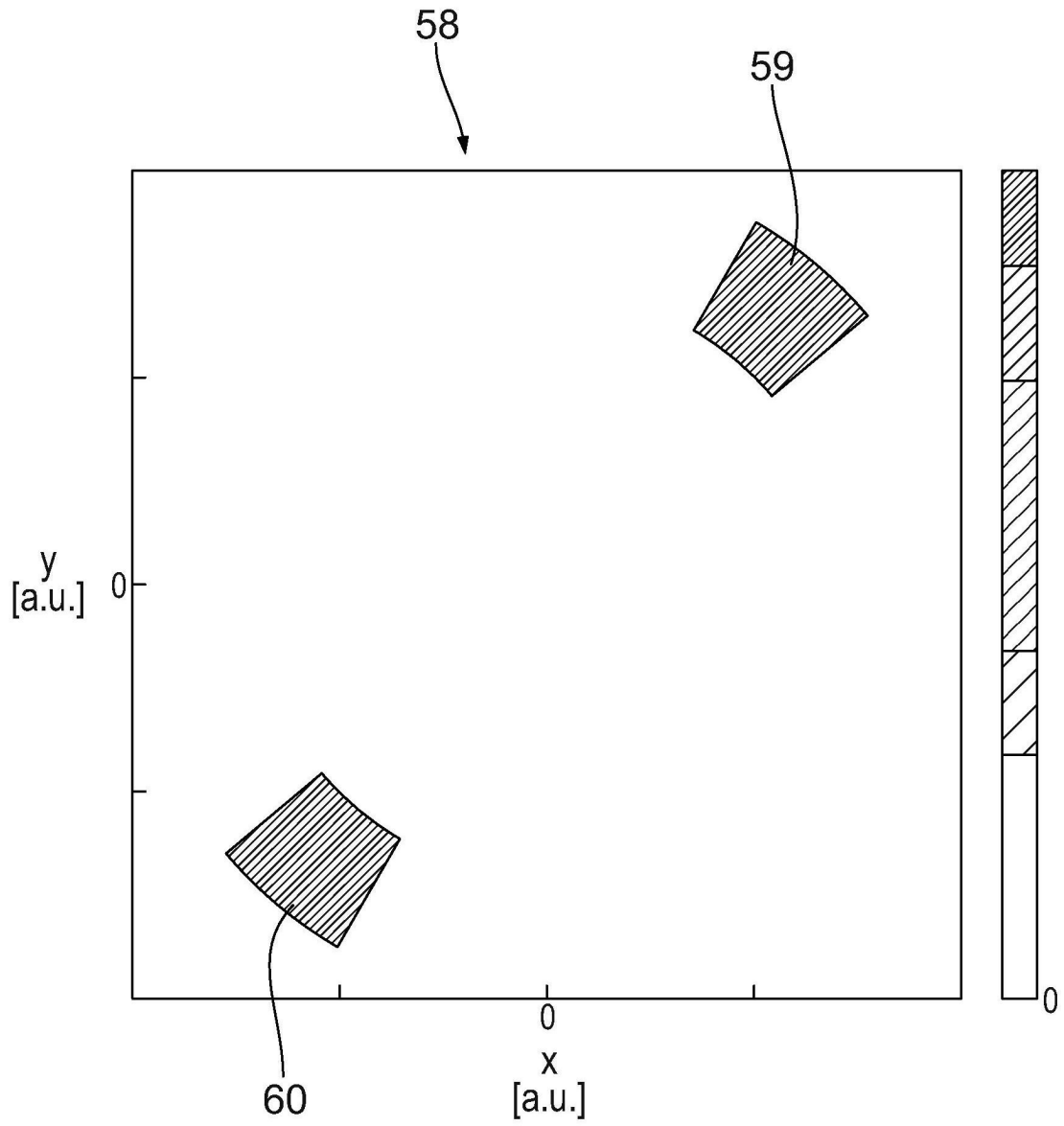


Fig. 12

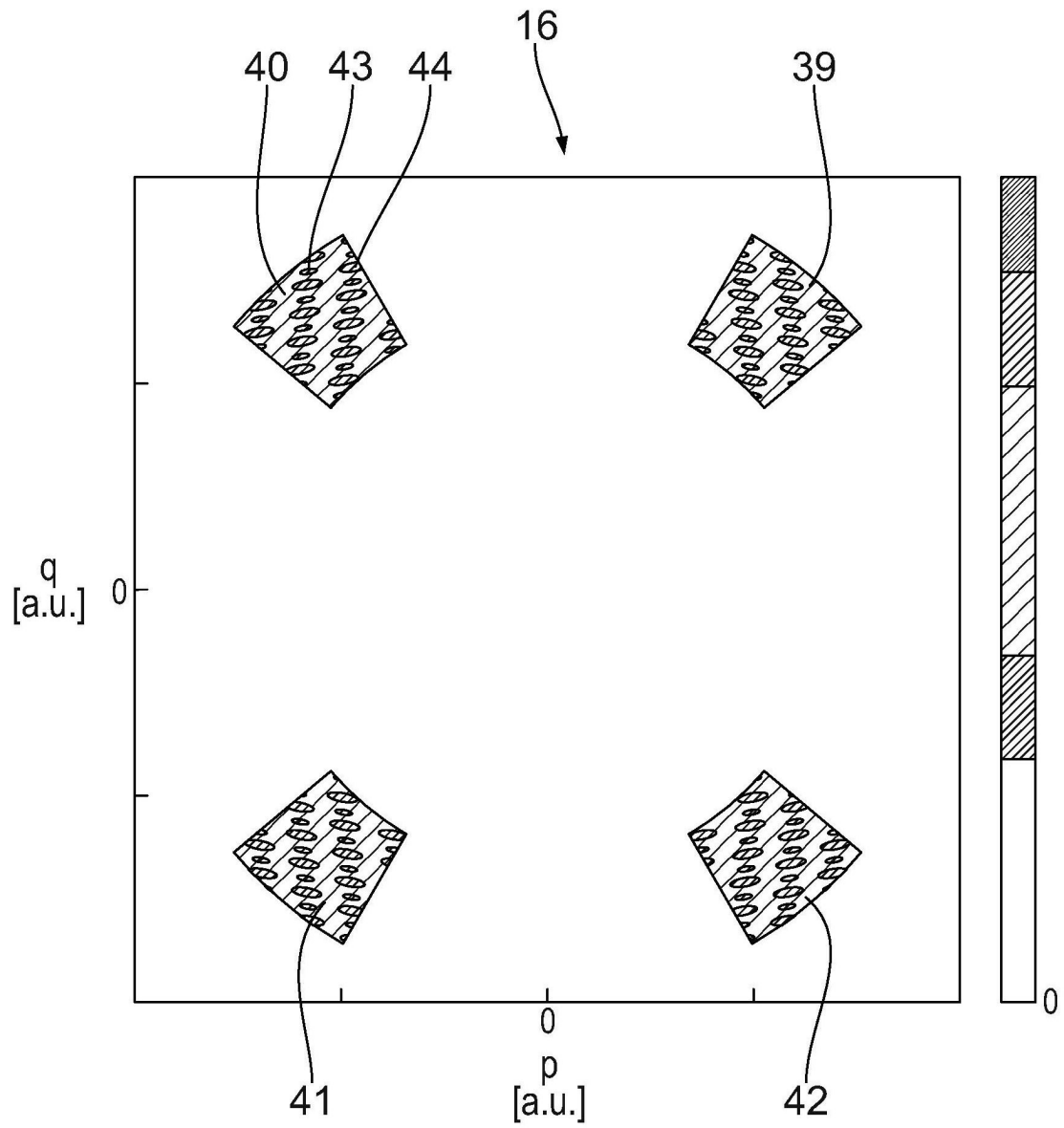


Fig. 13

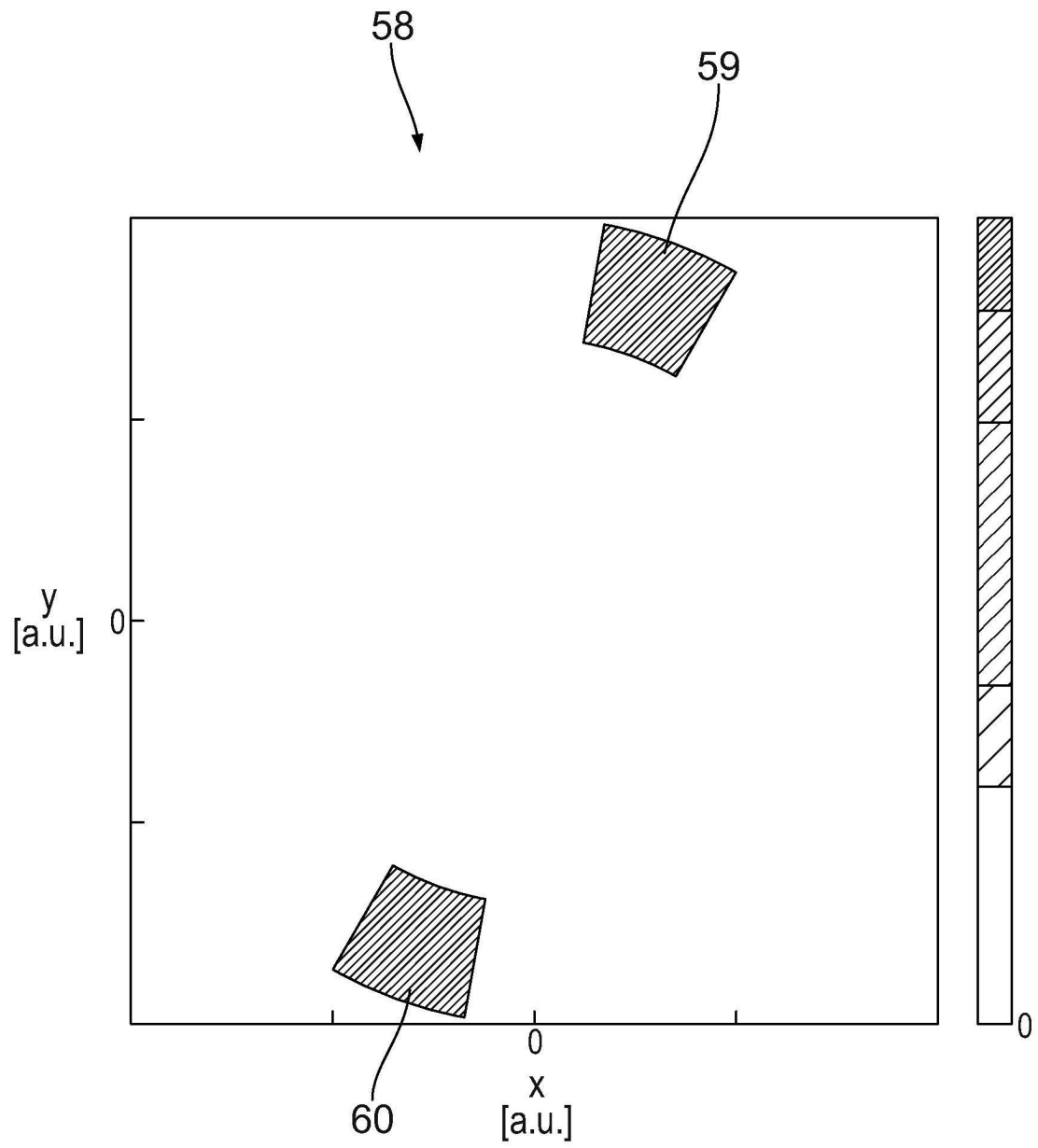


Fig. 14

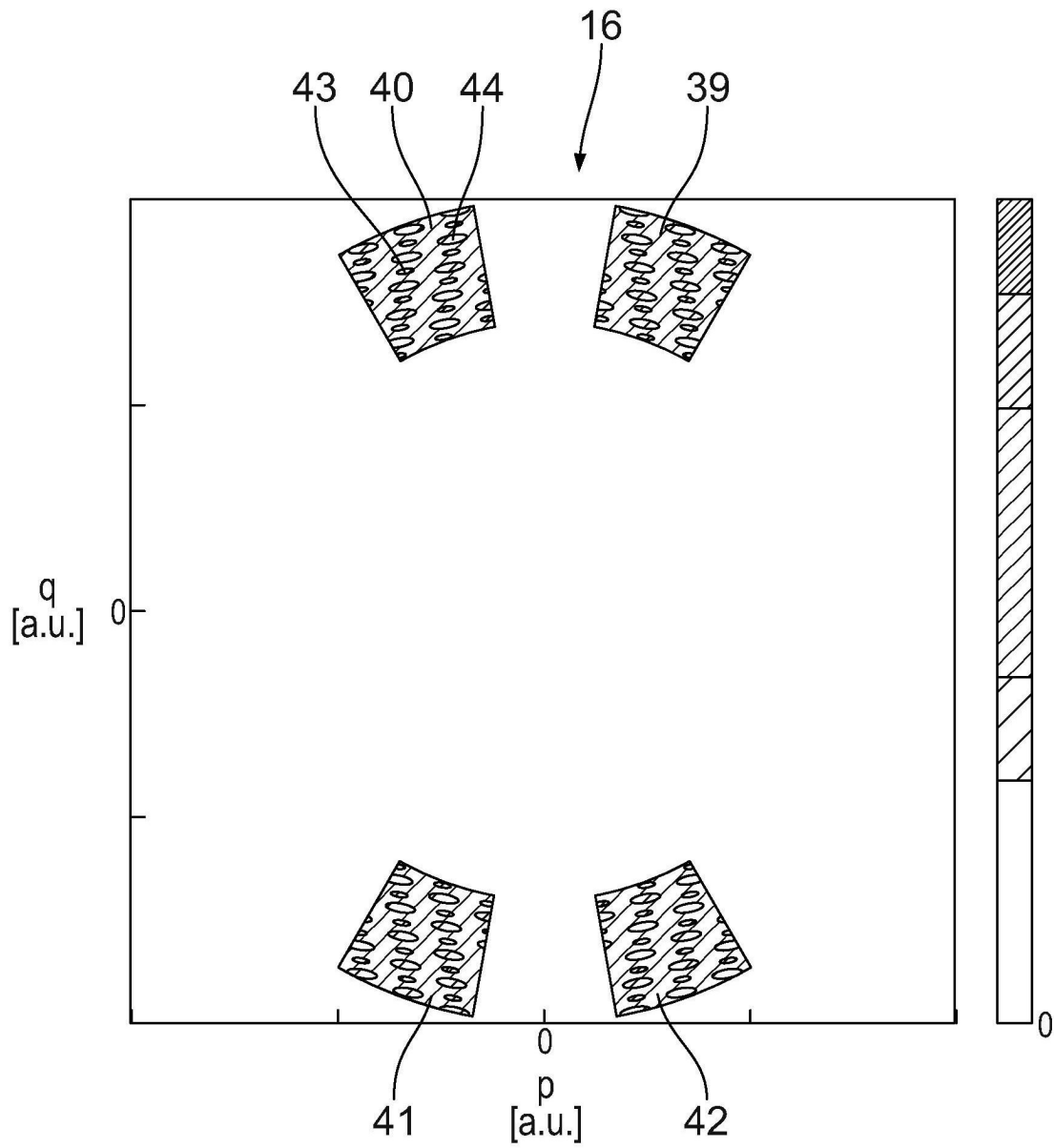


Fig. 15

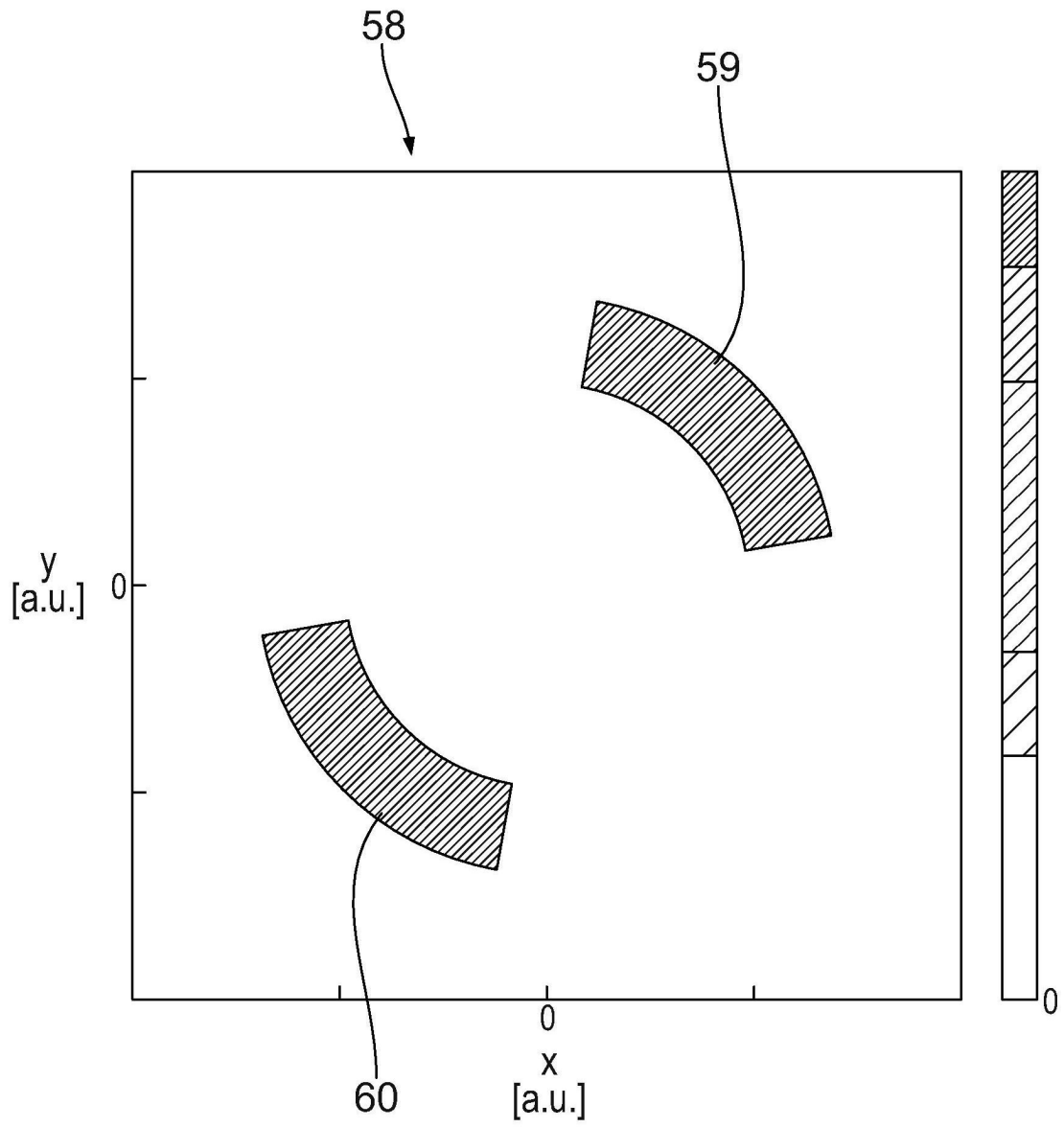


Fig. 16

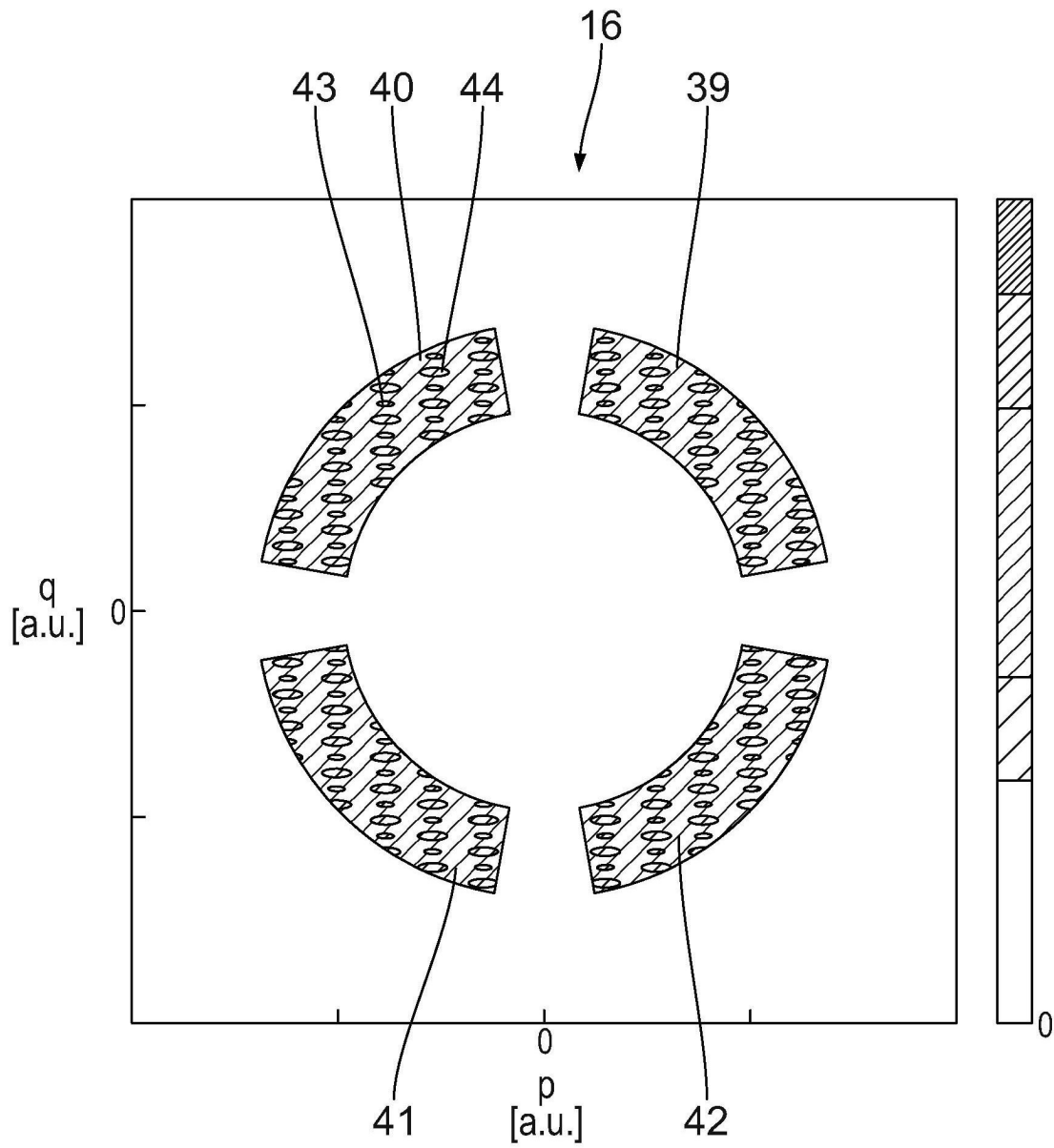


Fig. 17

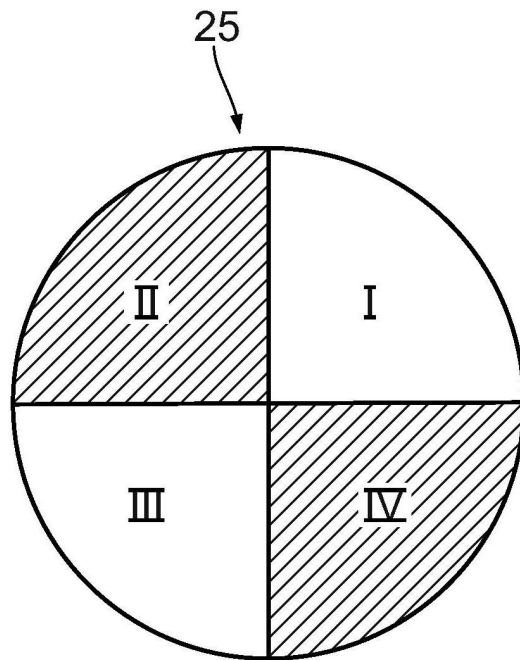


Fig. 18

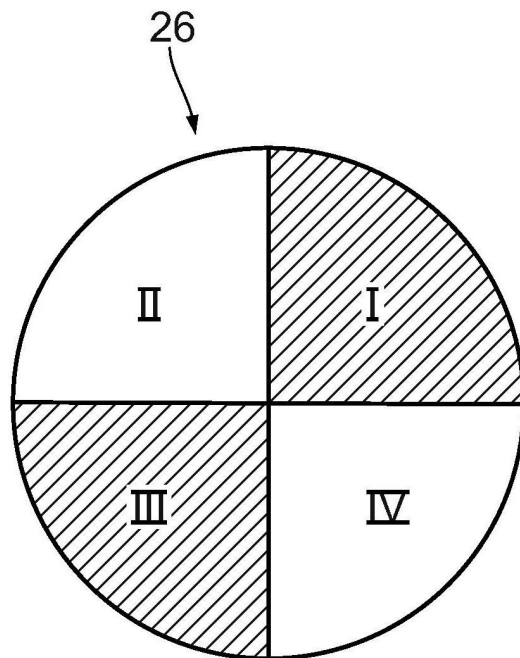


Fig. 19