(19) **Bundesrepublik Deutschland**
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 694 33 142 T2** 2004.04.01

(12) # Übersetzung der europäischen Patentschrift

(97) **EP 0 834 771 B1**
(21) Deutsches Aktenzeichen: **694 33 142.2**
(96) Europäisches Aktenzeichen: **97 121 449.9**
(96) Europäischer Anmeldetag: **15.07.1994**
(97) Erstveröffentlichung durch das EPA: **08.04.1998**
(97) Veröffentlichungstag
der Patenterteilung beim EPA: **10.09.2003**
(47) Veröffentlichungstag im Patentblatt: **01.04.2004**

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

(30) Unionspriorität:
17516593 15.07.1993 JP

(84) Benannte Vertragsstaaten:
DE, GB, NL

(73) Patentinhaber:
Nikon Corp., Tokio/Tokyo, JP

(72) Erfinder:
Shiraishi, Naomasa, 3-chome, JP

(74) Vertreter:
Pausch, T., Dipl.-Phys. Univ., Pat.-Anw., 82194 Gröbenzell

(54) Bezeichnung: **Vorrichtung und Verfahren zur Projektionsbelichtung**

Anmerkung: Innerhalb von neun Monaten nach der Bekanntmachung des Hinweises auf die Erteilung des europäischen Patents kann jedermann beim Europäischen Patentamt gegen das erteilte europäische Patent Einspruch einlegen. Der Einspruch ist schriftlich einzureichen und zu begründen. Er gilt erst als eingelegt, wenn die Einspruchsgebühr entrichtet worden ist (Art. 99 (1) Europäisches Patentübereinkommen).

Die Übersetzung ist gemäß Artikel II § 3 Abs. 1 IntPatÜG 1991 vom Patentinhaber eingereicht worden. Sie wurde vom Deutschen Patent- und Markenamt inhaltlich nicht geprüft.

Beschreibung

[0001] Die vorliegende Erfindung bezieht sich auf einen Vorrichtung und ein Verfahren zur Projektionsbelichtung, welche insbesondere zur Bildung von Feinrastern in integrierten Halbleiterschaltungen, Flüssigkristallanzeigen, usw. verwendet werden.

[0002] Ein optisches Projektionssystem bei einer Projektionsbelichtungsvorrichtung des vorgenannten Typs ist bei der Vorrichtung enthalten nach einem hochpräzisen optischen Entwurf, sorgfältiger Auswahl eines glasartigen Materials, ultrapräziser Verarbeitung, und Präzisionsmontagejustierung. Der vorliegende Halbleiterherstellungsvorgang verwendet hauptsächlich einen Stepper, bei dem eine Rasterblende (Maske) mit der i-Linie (Wellenlänge: 365 nm) einer Quecksilberdampflampe als Beleuchtungslicht bestrahlt wird, und das Licht, das durch ein Leiterraster auf der Rasterblende hindurchtritt, wird mittels eines optischen Projektionssystems auf ein lichtempfindliches Substrat (beispielsweise ein Halbleiterwafer) fokussiert, wodurch eine Abbildung des Leiterrasters auf dem Substrat gebildet wird. Neuerdings wurde auch ein Excimer-Stepper, der einen Excimer-Laser (KrF-Laser mit einer Wellenlänge von 248 nm) verwendet, als Beleuchtungslichtquelle eingesetzt. Wenn ein optisches Projektionssystem für einen solchen Excimer-Stepper nur eine Brechungslinse beinhaltet, sind die verwendbaren glasartigen Materialien auf Quarz, Fluorit und dergleichen beschränkt.

[0003] Allgemein gesagt, um ein feines Raster einer Rasterblende mittels Belichtung unter Verwendung eines optischen Projektionssystems getreu auf ein lichtempfindliches Substrat zu übertragen, sind die Auflösung und die Tiefenschärfe ("depth of focus", DOF) des optischen Projektionssystems wichtige Faktoren. Unter den derzeit in der Praxis eingesetzten optischen Projektionssystemen gibt es ein optisches Projektionssystem mit einer numerischen Apertur (NA) von ca. 0,6, welches die i-Linie verwendet. Im allgemeinen verbessert sich die Auflösung entsprechend, wenn die Wellenlänge des verwendeten Beleuchtungs-1ichts konstant gehalten wird, während die numerische Apertur des optischen Projektionssystems vergrößert wird. Im allgemeinen verringert sich jedoch die Tiefenschärfe (DOF) bei zunehmender numerischer Apertur NA. Die Tiefenschärfe ist definiert als $DOF = \pm \lambda/NA^2$, mit λ als der Wellenlänge des Beleuchtungslichts. Es ist zu beachten, dass sich die Auflösung verbessert, wenn die Wellenlänge des Beleuchtungslichts verringert wird, dass aber die Tiefenschärfe mit einer abnehmenden Wellenlänge abnimmt.

[0004] Andererseits, selbst wenn die Auflösung durch eine Vergrößerung der numerischen Apertur NA des optischen Projektionssystems verbessert wird, nimmt die Tiefenschärfe (Fokusspielraum) DOF umgekehrt proportional zum Quadrat der numerischen Apertur ab, wie in dem obenstehenden Ausdruck $DOF = \pm \lambda/NA^2$ gezeigt ist. Infolgedessen lässt sich die erforderliche Tiefenschärfe selbst dann nicht erzielen, wenn ein optisches Projektionssystem mit einer großen numerischen Apertur hergestellt werden kann; dies stellt ein großes Problem bei der praktischen Anwendung dar. Angenommen, dass die Wellenlänge des Beleuchtungslichts 365 nm der i-Linie und die numerische Apertur 0,6 ist, nimmt die Tiefenschärfe DOF einen relativ kleinen Wert an, d. h, etwa 1 μm (±0,5 μm) in der Breite. Infolgedessen verringert sich die Auflösung in einem Abschnitt mit einer Oberflächenunebenheit bzw. Krümmung, die größer als die DOF ist, in einer Belichtungszone auf dem Wafer (die etwa 20 mal 20 mm oder 30 mal 30 mm im Quadrat beträgt). Zusätzlich ergibt sich bei dem Stepper-System die Notwendigkeit, das Fokussieren, Einjustieren usw. für jede Belichtungszone auf dem Wafer mit insbesondere hoher Genauigkeit durchzuführen, was zu einer Zunahme der Ansprüche (d. h. des benötigten Aufwands zum Verbessern der Messauflösungsfähigkeit, Servosteuerungsgenauigkeit, Voreinstellzeit usw.) an das mechanische System, das elektrische System und die Software führt.

[0005] Unter diesen Umständen hat die vorliegende Anmelderin beispielsweise in der japanischen Offenlegungsschrift (KOKAI) Nr. 04-101148 und 04-225358 eine neuartige Projektionsbelichtungstechnik vorgeschlagen, wodurch die oben beschriebenen Probleme des optischen Projektionssystems gelöst werden, und sowohl eine hohe Auflösung als auch eine große Tiefenschärfe erhalten werden können, ohne eine mit einem Phasenschieber versehene Rasterblende wie die in der geprüften japanischen Patentveröffentlichung Nr. 62-50811 offengelegte zu verwenden. Diese vorgeschlagene Belichtungstechnik ermöglicht es, dass die scheinbare Auflösung und Tiefenschärfe durch Steuern des Rasterblendenbeleuchtungsverfahrens in einem besonderen Modus erhöht werden, ohne das vorhandene optische Projektionssystem zu modifizieren. Diese Technik wird als SHRINC (Super High Resolution by IllumiNation Control) -Verfahren bezeichnet. Nach dem SHRINC-Verfahren wird die Rasterblende mit zwei Beleuchtungslichtstrahlen (bzw. vier Beleuchtungslichtstrahlen) bestrahlt, die symmetrisch in der Längsneigungsrichtung eines Rasters mit Linien und Zwischenräumen („line-and-space pattern", L&S-Raster) auf der Rasterblende geneigt sind, und die gebeugte Lichtkomponente der 0. Ordnung sowie jede der gebeugten Lichtkomponenten der ±1. Ordnung, die von dem L&S-Raster erzeugt werden, werden gezwungen, symmetrisch bezüglich der optischen Achse durch die Pupille des optischen Projektionssystems hindurchzutreten, wodurch ein projiziertes Bild (Interferenzstreifen) des L&S-Rasters unter Anwendung des Prinzips der Zweistrahlinterferenz (d. h. der Interferenz zwischen einer der gebeugten Lichtkomponente der 1. Ordnung und der gebeugten Lichtkomponente der 0. Ordnung) erzeugt wird. Die Abbildung unter Anwendung der Zweistrahlinterferenz ermöglicht es im Gegensatz zu dem herkömmlichen Verfahren (d. h. der normalen Beleuchtung in Vertikalrichtung), das Auftreten einer Wellenfrontaberration zu

unterdrücken, wenn eine Defokussierung auftritt. Daher nimmt die Tiefenschärfe scheinbar zu.

[0006] Das SHRINC-Verfahren wendet jedoch die Interferenz von Licht zwischen Rastern an, die relativ nahe beieinander auf der Rasterblende gelegen sind, und verbessert dadurch die Auflösung und die Tiefenschärfe. Das heißt, der gewünschte Effekt kann erhalten werden, wenn das auf der Rasterblende ausgebildete Raster eine periodische Struktur aufweist, wie im Fall eines L&S-Rasters (Gitterraster). Der Effekt ist jedoch für freistehende Raster (bei denen der Abstand zwischen Rastern relativ groß ist), beispielsweise Kontaktlochrastern (feinen quadratischen Rastern), nicht erzielbar. Der Grund hierfür ist der folgende: In dem Fall von freistehenden feinen Rastern wird von diesen derart gebeugtes Licht erzeugt, dass eine Verteilung gebildet wird, die in der Richtung des Beugungswinkels annähernd gleichförmig ist, und sich daher in der Blende des optischen Projektionssystems nicht sauber in das gebeugte Licht der 0. Ordnung und gebeugtes Licht höherer Ordnungen aufspaltet.

[0007] Daher ist, um die scheinbare Tiefenschärfe für freistehende Raster, z. B. Kontaktlöcher, zu vergrößern, ein Belichtungsverfahren vorgeschlagen worden, bei dem ein Wafer für jede Belichtungszone auf dem Wafer schrittweise entlang der optischen Achse jedes Mal um einen vorgegebenen Betrag verstellt wird, und die Belichtung für jede Stopp-Position des Wafer durchgeführt wird, d. h. die Belichtung wird mehrere Male für jede Belichtungszone durchgeführt. Siehe z. B. die japanische Offenlegungsschrift (KOKAI) Nr. 63-42122 (entsprechend dem US-Patent Nr. 4,869,999). Dieses Belichtungsverfahren wird als FLEX (Focus Latitude enhancement EXposure)-Verfahren bezeichnet und stellt einen zufriedenstellenden Effekt der Vergrößerung der Tiefenschärfe für freistehende Raster, z. B. Kontaktlöcher, zur Verfügung. Das FLEX-Verfahren erfordert jedoch unbedingt eine Mehrfachbelichtung von Kontaktlochbildern, die geringfügig defokussiert sind. Daher nimmt die Schärfe eines mittels der Mehrfachbelichtung erhaltenen zusammengesetzten optischen Bildes und eines nach dem Entwickeln erhaltenen Lackbildes unweigerlich ab. Infolgedessen ist das FLEX-Verfahren mit Problemen wie etwa einer Verschlechterung der Auflösung von nahe beieinanderliegenden Kontaktlochrastern und einer Herabsetzung des Spielraums für Variationen beim Belichtungsgrad (d. h. Belichtungsspielraum) behaftet.

[0008] Es ist zu beachten, dass das FLEX-Verfahren auch in der von der vorliegenden Anmelderin eingereichten japanischen Offenlegungsschrift (KOKAI) Nr. 05-13305 offengelegt ist (entsprechend der US-Patentanmeldung mit der Seriennr. 820,244; hierbei wird der Wafer während der Belichtung nicht schrittweise, sondern kontinuierlich entlang der optischen Achse verstellt), wie auch im US-Patent Nr. 5,255,050.

[0009] Als ein weiteres herkömmliches Verfahren wurde kürzlich eine Technik vorgeschlagen, bei der ein Pupillenfilter in einer Blendenebene bzw. Pupillenebene eines optischen Projektionssystems vorgesehen wird, d. h. einer Ebene des optischen Projektionssystems, die sich in Fouriertransformationsbeziehung zu sowohl der Rasterblenden-Oberfläche als auch der Waferoberfläche befindet, in einem optischen Abbildungspfad zwischen dem Rasterblende und dem Wafer, wodurch die Auflösung und die Tiefenschärfe verbessert werden. Beispiele für diese Technik umfassen das Super-FLEX-Verfahren, veröffentlicht in Extended Abstracts (Spring Meeting, 1991) 29a-ZC-8, 9; The Japan Society of Applied Physics. Dieses Verfahren ist auch in EP-485062A offengelegt. In diesem Fall ist der Bewegungsraum der Bildebene und des Substrats 2 μm. Bei dem Super-FLEX-Verfahren wird eine transparente Phasenplatte an der Blende bzw. Pupille eines optischen Projektionssystems vorgesehen, so dass sich die komplexe Amplitudendurchlässigkeit, die dem Abbildungslicht von der Phasenplatte mitgeteilt wird, aufeinanderfolgend von der optischen Achse auf den Umfang hin in der Richtung senkrecht zu der optischen Achse ändert. Hierdurch behält das von dem optischen Projektionssystem erzeugte Bild seine Schärfe bei mit einer vorgegebenen Breite (breiter als in dem herkömmlichen Verfahren) in der Richtung der optischen Achse um die beste Fokusebene (eine bezüglich der Rasterblende konjugierte Ebene), welche das Zentrum der vorgegebenen Breite darstellt. Somit erhöht sich die Tiefenschärfe. Es ist zu beachten, dass das in dem Super-FLEX-Verfahren verwendete Pupillenfilter, d. h. ein sogenanntes Multifokus-Filter, in der Veröffentlichung mit dem Titel „Research on Imaging Performance of Optical System und Method of Improving the Same", S.41–55, in: Machine Testing Institute Report No. 40, herausgegeben am 23.01.1961, ausführlich beschrieben ist. Bezüglich des Pupillenfilters selbst wird auf US-Patent Nr. 5,144,362 verwiesen.

[0010] Das herkömmliche Super-FLEX-Verfahren ist jedoch mit dem Problem behaftet, dass die Intensität eines in der Umgebung eines Kontaktlochrasters auftretenden Nebenpeaks („Ringing") relativ hoch wird, obwohl das Verfahren einen zufriedenstellenden Effekt der Tiefenschärfenerhöhung für freistehende Kontaktlochraster zur Verfügung stellt. Daher wird in dem Fall einer Mehrzahl von relativ nahe beieinanderliegenden Kontaktlochrastern ein unerwünschtes Phantomraster auf eine Position übertragen, in der die zwischen benachbarten Löchern auftretenden Ringings einander überlappen, was eine unerwünschte Verringerung der Filmdicke des Fotolacks verursacht.

[0011] Nach einem ersten Aspekt dieser Erfindung weist ein Projektionsbelichtungsapparat auf:
ein Beleuchtungssystem für die Ausstrahlung von Licht;
eine optische Projektionseinrichtung für die Projektion einer Abbildung eines Rasters bzw. Musters, welche auf einer Maske durch das Licht auf ein lichtempfindliches Substrat gebildet wird; und

ein Verstellelement bzw. bewegliche Einrichtung zum Verstellen bzw. Bewegen einer Abbildungsebene (bildformenden Ebene) der optischen Projektionseinrichtung und des lichtempfindlichen Substrats relativ zueinander längs einer optischen Achse der optischen Projektionseinrichtung um mindestens

$$\lambda/\{1 - \sqrt{(1 - NA^2)}\}$$

, wobei λ die Wellenlänge des Lichts und NA die numerische Apertur der optischen Projektionseinrichtung auf der Seite des lichtempfindlichen Substrats ist; und
ein optisches Filter, angeordnet auf oder neben einer Fouriertransfomationsebene, welche innerhalb der optischen Projektionseinrichtung dergestalt angeordnet ist, dass die Amplitude von Licht, des durch einen kreisförmigen Bereich mit dem Radius r1, welcher bei einer optischen Achse der optischen Projektionseinrichtung (**PL**) zentriert ist, tretenden Lichtes und die Amplitude von Licht, welches durch einen äußeren Bereich tritt, welcher außerhalb des kreisförmigen Bereiches liegt, durch das optische Filter (**PF**) voneinander im Vorzeichen unterschiedlich gemacht sind.
[0012] Nach einem zweiten Aspekt dieser Erfindung wird ein Belichtungsverfahren unter Verwendung der optischen Projektionseinrichtung zur Verfügung gestellt, welches die folgende Schritte aufweist:
Bewegen einer bildformenden Ebene der optischen Projektionseinrichtung und des fotoempfindlichen Substrates relativ zueinander entlang einer optischen Achse der optischen Projektionseinrichtung um zumindest

$$\lambda/\{1 - \sqrt{(1 - NA^2)}\}$$

, wobei λ die Wellenlänge des Lichtes, und NA die numerische Apertur der optischen Projektionseinrichtung auf dessen Seite des fotoempfindlichen Substrates bezeichnet; und
Anordnen eines optischen Filters bei oder in der Nähe einer innerhalb der optischen Projektionseinrichtung (**PL**) vorgesehenen Fouriertransformationsebene dergestalt, dass die Amplitude des durch einen kreisförmigen Bereich mit dem Radius r_1, welcher bei einer optischen Achse der optischen Projektionseinrichtung zentriert ist, tretenden Lichtes und die Amplitude des Lichtes, welches durch einen äußeren Bereich tritt, welcher außerhalb des kreisförmigen Bereiches liegt, durch das optische Filter voneinander im Vorzeichen unterschiedlich gemacht werden.
[0013] Keines der Systeme der Stand der Technik zeigt eine Anordnung, in welcher der Betrag der relativen Verstellung zwischen der bildformenden Ebene und des Substrats durch die Wellenlänge des Lichtes und der numerischen Apertur des optischen Systems gemäß der Gleichung

$$\lambda/\{1 - \sqrt{(1 - NA^2)}\}$$

, bestimmt wird. Dies wird als besonderer Vorteil angesehen.
[0014] Die optische Projektionsvorrichtung kann weiterhin ausgestattet sein mit einer Wechseleinrichtung, worin die Phasenplatte in den bildformenden optischen Pfad eingefügt und entfernt werden kann, und wenn die Phasenplatte vom bildformenden optischen Pfad entfernt ist, wird eine transparente planparallele Platte, welche eine annähernd gleiche optische Dicke wie die der Phasenplatte aufweist, an oder in der Nähe der Fouriertransformationsebene angeordnet.
[0015] Wenn die bildformende Ebene der optischen Projektionsvorrichtung und des lichtempfindlichen Substrats schrittweise relativ zueinander durch das Verstellelement verstellt werden, wird darüber hinaus die Belichtung bei jedem der Vielzahl von diskreten Positionen, welche in der Richtung der optischen Achse voneinander um

$$\lambda/(1 - \sqrt{(1 - NA^2)})$$

, beabstandet sind durchgeführt, wobei λ die Wellenlänge des Beleuchtungslichtes ist und NA die numerische Apertur des optischen Projektionssystems auf dessen Seite des lichtempfindlichen Substrats. Andererseits, wenn die bildformende Ebene der optischen Projektionsvorrichtung und das lichtempfindliche Substrat kontinuierlich relativ zueinander in der Richtung der optischen Achse **AX** durch das Verstellelement verstellt werden, werden sie relativ zueinander mindestens um

$$2\lambda/(1 - \sqrt{(1 - NA^2)})$$

, verstellt.
[0016] Besonders bevorzugte Ausführungsbeispiele der Projektionsbelichtungsvorrichtung gemäß dieser Erfindung werden nun beschrieben und dem Stand der Technik gegenübergestellt, unter Bezugnahme auf die anliegende Zeichnung. Es zeigt:

[0017] **Fig.** 1 die Gesamtanordnung eines Projektionsbelichtungsgeräts gemäß einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung;
[0018] **Fig.** 2 eine Schnittansicht, welche den Aufbau eines Teils eines in **Fig.** 1 gezeigten optischen Projektionssystems zeigt;
[0019] **Fig.** 3 ein Beispiel für die Anordnung eines Halteelementes, das mit einer Mehrzahl von Pupillenfiltern vom Phasentyp gemäß der Darstellung von **Fig.** 2 versehen ist;
[0020] **Fig.** 4 ein spezifisches Beispiel für die Anordnung der in **Fig.** 1 gezeigten Pupillenfilter vom Phasentyp;
[0021] **Fig.** 5(A) zwei relativ nahe beieinanderliegende Kontaktlöcher;
[0022] **Fig.** 5(B) zwei relativ weit auseinanderliegende Kontaktlöcher;
[0023] **Fig.** 6(A) und 6(B) Diagramme, die jeweils die Ergebnisse einer Simulation zeigen, in denen der Effekt einer ersten Ausführungsform der vorliegenden Erfindung auf mehrere Lochraster durch eine Bildintensitätsverteilung dargestellt ist;
[0024] **Fig.** 7(A) und 7(B) Diagramme, die jeweils die Ergebnisse einer Simulation zeigen, in denen der Effekt einer zweiten Ausführungsform der vorliegenden Erfindung auf mehrere Lochraster durch eine Bildintensitätsverteilung dargestellt ist;
[0025] **Fig.** 8(A) und 8(B) Diagramme, die jeweils die Ergebnisse einer Simulation zeigen, in denen der Effekt, der durch die Verwendung von nur dem Pupillenfilter vom Phasentyp der vorliegenden Erfindung auf mehrere Lochraster erzeugt wird, durch eine Bildintensitätsverteilung dargestellt ist;
[0026] **Fig.** 9(A) und 9(B) Diagramme, die jeweils die Ergebnisse einer Simulation zeigen, in denen der Effekt einer dritten Ausführungsform der vorliegenden Erfindung auf mehrere Lochraster durch eine Bildintensitätsverteilung dargestellt ist;
[0027] **Fig.** 10(A) und 10(B) Diagramme, die jeweils die Ergebnisse einer Simulation zeigen, in denen der Effekt einer vierten Ausführungsform der vorliegenden Erfindung auf mehrere Lochraster durch eine Bildintensitätsverteilung dargestellt ist;
[0028] **Fig.** 11(A) und 11(B) Diagramme, die jeweils die Ergebnisse einer Simulation zeigen, in denen der Effekt einer fünften Ausführungsform der vorliegenden Erfindung auf mehrere Lochraster durch eine Bildintensitätsverteilung dargestellt ist;
[0029] **Fig.** 12(A) und 12(B) Diagramme, die jeweils die Ergebnisse einer Simulation zeigen, in denen der Effekt einer sechsten Ausführungsform der vorliegenden Erfindung auf mehrere Lochraster durch eine Bildintensitätsverteilung dargestellt ist;
[0030] **Fig.** 13(A) und 13(B) Diagramme, die jeweils die Ergebnisse einer Simulation zeigen, in denen der Effekt eines normalen Belichtungsverfahren auf mehrere Lochraster durch eine Bildintensitätsverteilung dargestellt ist;
[0031] **Fig.** 14(A) und 14(B) Diagramme, die jeweils die Ergebnisse einer Simulation zeigen, in denen der Effekt, der durch die gemeinsame Verwendung eines herkömmlichen normalen Belichtungsverfahrens und eines FLEX-Verfahrens auf mehrere Lochraster erzeugt wird, durch eine Bildintensitätsverteilung dargestellt ist;
[0032] **Fig.** 15(A) ein Diagramm, das die Ergebnisse einer Simulation zeigt, in dem der Effekt, der durch die Verwendung von nur einem herkömmlichen Doppelfokusfilter auf mehrere Lochraster erzeugt wird, durch eine Bildintensitätsverteilung dargestellt ist;
[0033] **Fig.** 15(B) ein Diagramm, das die Ergebnisse einer Simulation zeigt, in dem der Effekt, der durch die gemeinsame Verwendung eines herkömmlichen Doppelfokusfilter und eines FLEX-Verfahren auf mehrere Lochraster hervorgerufen wird, durch eine Bildintensitätsverteilung dargestellt ist;
[0034] **Fig.** 16(A) ein Diagramm, das die Ergebnisse einer Simulation zeigt, in dem der Effekt, der durch die Verwendung von nur einem herkömmlichen Doppelfokusfilter auf mehrere Lochraster erzeugt wird, durch eine Bildintensitätsverteilung dargestellt ist;
[0035] **Fig.** 16(B) ein Diagramm, das die Ergebnisse einer Simulation zeigt, in dem der Effekt, der durch die gemeinsame Verwendung eines herkömmlichen Doppelfokusfilters und eines FLEX-Verfahrens auf mehrere Lochraster erzeugt wird, durch eine Bildintensitätsverteilung dargestellt ist;
[0036] **Fig.** 17(A) ein Diagramm, das die Ergebnisse einer Simulation zeigt, in dem der Effekt, der durch die Verwendung von nur einem herkömmlichen Doppelfokusfilter auf mehrere Lochraster erzeugt wird, durch eine Bildintensitätsverteilung dargestellt ist; und
[0037] **Fig.** 17(B) ein Diagramm, das die Ergebnisse einer Simulation zeigt, in dem der Effekt, der durch die gemeinsame Verwendung eines herkömmlichen Doppelfokusfilters und eines FLEX-Verfahrens auf mehrere Lochraster erzeugt wird, durch eine Bildintensitätsverteilung dargestellt ist.
[0038] **Fig.** 1 zeigt die allgemeine Anordnung eines Projektionsbelichtungsgeräts (im nachfolgenden je nach den Umständen als „Stepper" bezeichnet) gemäß einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung. Unter Bezugnahme auf **Fig.** 1 wird von einer Quecksilberdampflampe **1** abgegebenes Licht mit hoher Luminanz auf dem Sekundärbrennpunkt eines Ellipsoidspiegels **2** von dem El-lipsoidspiegel **2** konvergiert. Daraufhin fällt das Licht in Form von divergentem Licht in ein Kollimatorobjektiv **4** ein. Ein Rotationsverschluss **3** ist an einem Sekundärbrennpunkt des Ellipsoidspiegels **2** (der ein vorderer Brennpunkt der Kollimatorlinse **4** ist) angeordnet,

um einen Belichtungsvorgang zu steuern, so dass Beleuchtungslicht selektiv durchgelassen und blockiert wird. Beleuchtungslicht, das von der Kollimatorlinse **4** in einen annähernd parallelen Lichtstrahl konvertiert wurde, fällt aufeinanderfolgend auf ein Kurzwellenlängen-Sperrfilter **5** und ein Interferenzfilter **6** ein, wo nur eine für die Belichtung gewünschte Spektrallinie, z. B. die i-Linie, extrahiert wird. Das aus dem Interferenzfilter **6** austretende Beleuchtungslicht (i-Linie) tritt dann in eine Fliegenaugenlinse **7** ein, die als optischer Integrator dient. Natürlich kann eine andere Wellenlänge als die i-Linie oder eine Mehrzahl von Wellenlängen verwendet werden, und die Lichtquelle kann ein Laser oder eine weitere geeignete Lichtquelle sein.

[0039] Das auf die Fliegenaugenlinse **7** einfallende Beleuchtungslicht (annähernd paralleler Lichtstrahl) wird durch eine Mehrzahl von Linsenelementen aufgeteilt, so dass ein Sekundärlichtquellenbild (d. h. ein Bild eines Lichtaustrittspunktes der Quecksilberdampflampe **1**) auf der Austrittsseite eines jeden Linsenelementes gebildet wird. Infolgedessen sind Bilder von punktförmigen Lichtquellen, deren Anzahl die gleiche wie die Anzahl der Linsenelemente ist, so verteilt, dass sie auf der Austrittsseite der Fliegenaugenlinse **7** ein Bild einer Flächenlichtquelle bilden. Ein variabler Anschlag **8** ist auf der Austrittsseite der Fliegenaugenlinse **7** vorgesehen, um die Größe des Bildes der Flächenlichtquelle zu steuern. Das durch den Anschlag **8** hindurchtretende Beleuchtungslicht (divergentes Licht) wird von einem Spiegel **9** reflektiert und tritt in ein Kondensorlinsensystem **10** ein. Daraufhin bestrahlt das Beleuchtungslicht eine in einer Rasterblendenmaske **11** vorgesehene rechteckige Aussparung mit einer gleichförmigen Beleuchtungsstärkeverteilung. In **Fig.** 1 ist von einer Mehrzahl von Beleuchtungslichtstrahlen aus einer Mehrzahl von Sekundärlichtquellenbildern (punktförmige Lichtquellen), die auf der Austrittsseite der Fliegenaugenlinse **7** gebildet werden, nur das Beleuchtungslicht aus einem auf einer optischen Achse **AX** liegenden Sekundärlichtquellenbild als ein typischer Beleuchtungslichtstrahl gezeigt. Die Austrittsseite der Fliegenaugenlinse **7** (d. h. die Oberfläche, wo die Sekundärlichtquellenbilder gebildet werden) bildet eine Fouriertransformationsebene bezüglich der Ebene der rechteckigen Aussparung der Rasterblendenmaske **11**. Infolgedessen werden Beleuchtungslichtstrahlen, die von einer Mehrzahl von Sekundärlichtquellenbildern abgegeben werden, die von der Fliegenaugenlinse **7** gebildet werden und auf das Kondensorlinsensystem **10** einfallen, einander auf der Rasterblendenmaske **11** in Form von parallelen Lichtstrahlen überlagert, deren Einfallswinkel sich geringfügig unterscheidet.

[0040] Das Beleuchtungslicht, das durch die rechteckige Aussparung in der Rasterblendenmaske **11** hindurchtritt, durchläuft ein Linsensystem **12** und tritt über einen Spiegel **13** in eine Kondensorlinse **14** ein. Aus der Kondensorlinse **14** austretendes Licht gelangt als ein Beleuchtungslichtstrahl **ILB** an eine Rasterblende **R**. In diesem System sind die Ebene der rechteckigen Aussparung der Rasterblendenmaske **11** und die Rasteroberfläche der Rasterblende **R** so angeordnet, dass sie von einem zusammengesetzten Linsensystem, das aus dem Linsensystem **12** und der Kondensorlinse **14** zusammengesetzt ist, miteinander konjugiert werden. Infolgedessen wird ein Bild der rechtwinkligen Aussparung der Rasterblendenmaske **11** so gebildet, dass es eine rechtwinklige Rasterbildungszone enthält, die in der Rasteroberfläche der Rasterblende **R** gebildet ist. Wie in **Fig.** 1 gezeigt ist, ist unter den Beleuchtungslichtstrahlen von den Sekundärlichtquellenbildern, die durch die Fliegenaugenlinse **7** gebildet werden, der Beleuchtungslichtstrahl **ILB** von einem auf der optischen Achse **AX** gelegenen Sekundärlichtbild ein paralleler Lichtstrahl, der nicht bezüglich der optischen Achse **AX** auf der Rasterblende **R** gekippt ist. Der Grund dafür ist, daß die Rasterblendenseite des optischen Projektionssystems **PL** telezentrisch ist. Da eine große Zahl von abseits der optischen Achse **AX** liegenden Sekundärlichtquellenbildern (d. h. punktförmigen Lichtquellen) auf der Austrittsseite der Fliegenaugenlinse **7** gebildet wird, sind alle Beleuchtungslichtstrahlen von diesen Sekundärlichtquellenbildern parallele Lichtstrahlen, die bezüglich der optischen Achse **AX** auf der Rasterblende **R** gekippt sind, und diese Beleuchtungslichtstrahlen sind einander dann in der Rasterbildungszone überlagert. Es ist zu beachten, daß die Rasteroberfläche der Rasterblende **R** und die austrittsseitige Oberfläche der Fliegenaugenlinse **7** durch ein zusammengesetztes Linsensystem, das somit aus dem Kondensorlinsensystem **10**, dem Linsensystem **12** und der Kondensorlinse **14** zusammengesetzt ist, optisch in ein Fouriertransformationsverhältnis zueinander gesetzt sind. Der Bereich ? von Einfallswinkeln des Beleuchtungslichtstrahls **ILB** auf die Rasterblende **R** variiert je nach dem Öffnungsdurchmesser des Anschlags **8**. Anders gesagt, mit einer Verringerung der praktisch verwendbaren Fläche der Flächenlichtquelle infolge einer Reduzierung des Öffnungsdurchmessers des Anschlags **8** verringert sich auch der Einfallswinkelbereich ?. Somit dient der Anschlag **8** dazu, die räumliche Kohärenz des Beleuchtungslichts zu steuern. Als ein Faktor, der den Grad der räumlichen Kohärenz des Beleuchtungslichts darstellt, wird das Verhältnis (σ-Wert) des Sinus des maximalen Einfallswinkels φ/2 des Beleuchtungslichtstrahls **ILB** zu der rasterblendenseitigen numerischen Apertur (NAr) des optischen Projektionssystems **PL** verwendet. Im allgemeinen ist der σ-Wert als $\sigma = \sin(\varphi/2)/NAr$ definiert. Viele gegenwärtig verwendete Stepper werden in dem σ-Bereich von etwa 0,5 bis etwa 0,7 eingesetzt. Bei der vorliegenden Erfindung kann σ einen jeglichen Wert annehmen; im Extremfall kann er in einem Bereich von etwa 0,1 bis etwa 0,3 liegen. Falls nötig, kann ein modifizierter Lichtquellenanschlag gemäß dem oben beschriebenen SHRINC-Verfahren oder ein ringförmiger Anschlag verwendet werden.

[0041] Die Rasteroberfläche der Rasterblende **R** weist übrigens ein vorgegebenes Rasterblendenraster auf, das aus einer Chromschicht gebildet ist. Es sei angenommen, dass die Rasterblende **R** eine Chromschicht auf-

weist, die auf ihrer gesamten Rasteroberfläche aufgebracht und mit einer Mehrzahl von Kontaktlochrastern ausgebildet ist, welche durch feine rechteckige Aussparungen definiert sind (d. h. transparente Abschnitte, in denen keine Chromschicht vorhanden ist). Ein Kontaktlochraster kann so entworfen sein, dass die Kontaktlochraster bei Projektion auf einen Wafer **W** eine Größe von nicht mehr als 0,5 mal 0,5 μm im Quadrat (bzw. einen Durchmesser von nicht mehr als 0,5 μm) aufweist. Die Größe von Kontaktlochrastern bei Messung auf der Rasterblende **R** wird bestimmt, indem man die Projektionsvergrößerung M des optischen Projektionssystems **PL** in Betracht zieht. Im allgemeinen wird in einem Fall, in dem der Abstand zwischen einem benachbarten Paar von Kontaktlochrastern beträchtlich größer als die Öffnungsgröße eines Kontaktlochrasters ist, jedes Kontaktlochraster als „freistehendes feines Raster" bezeichnet. Anders gesagt, in vielen Fällen ist jedes Paar von benachbarten Kontaktlochrastern ausreichend weit voneinander beabstandet, dass von diesen Kontaktlochrastern erzeugte Lichtstrahlen (gebeugtes Licht oder gestreutes Licht) einander nicht wie etwa in dem Fall von Beugungsgittern stark beeinträchtigen. Es gibt jedoch Rasterblenden mit relativ nahe beieinanderliegend ausgebildeten Kontaktlochrastern, wie im nachfolgenden ausführlich beschrieben ist. Bei derartigen Rasterblenden beeinträchtigen sich die von den Kontaktlochrastern erzeugten Lichtstrahlen gegenseitig [s. **Fig.** 14(A)], wie dies bei Beugungsgittern der Fall ist; daher ist Umsicht geboten.

[0042] Unter Bezugnahme auf **Fig.** 1 ist die Rasterblende **R** auf einem Rasterblendentisch **RST** gehalten, und durch das optische Projektionssystem **PL** wird ein optisches Bild (Lichtintensitätsverteilung) des Kontaktlochrasters auf der Rasterblende **R** auf einer Fotolackschicht gebildet, die auf der Oberfläche des Wafer **W** vorgesehen ist. In **Fig.** 1 ist ein optischer Pfad von der Rasterblende **R** zu dem Wafer **W** einzig durch den Hauptstrahl in dem Bündel von Abbildungslichtstrahlen gezeigt. Ein Pupillenfilter vom Phasentyp **PF** ist auf einer Fouriertransformationsebene **FTP** (im nachfolgenden als „Pupillenebene" bezeichnet) in dem optischen Projektionssystem **PL** vorgesehen. Das Pupillenfilter **PF** hat einen Durchmesser, der ausreichend groß ist, um den maximalen Durchmesser (entsprechend der numerischen Apertur NA) der Pupillenebene des optischen Projektionssystems **PL** abzudecken, und ist an einem Halteelement (z. B. einer Revolverscheibe, einem Schieber usw.) **30** gesichert, das von einem Austauschmechanismus **20** verstellt wird, so dass sich das Pupillenfilter **PF** in den optischen Pfad hineinerstrecken und aus diesem zurückgezogen werden kann.

[0043] Falls der Stepper nur für die Belichtung von Kontaktlochrastern verwendet wird, die keine L&S-Raster aufweisen, kann das Pupillenfilter **PF** ortsfest in dem optischen Projektionssystem **PL** angebracht sein. Jedoch in einem Fall, in dem ein Belichtungsvorgang für ein Lithographieverfahren unter Verwendung einer Mehrzahl von Steppern durchgeführt wird, ist es unter dem Gesichtspunkt des effizientesten Einsatzes eines jeden Stepper nicht effizient, der Belichtung für Kontaktlochraster einen bestimmten Stepper zuzuweisen. Daher ist es vorzuziehen, das Pupillenfilter **PF** so vorzusehen, dass es selektiv in die Blendenebene bzw. Pupillenebene (Foueiertransformationsebene) FTP des optischen Projektionssystems **PL** eingeschoben und daraus entfernt werden kann, wodurch ein Einsatz des Stepper nicht nur für die Belichtung von Kontaktlochrastern, sondern auch für die Belichtung eines Rasterblendenrasters (z. B. L&S-Rasters) ermöglicht wird. Es ist zu beachten, dass in einigen optischen Projektionssystemen ein kreisförmiger Blendenanschlag bzw. Pupillenanschlag (variabler NA-Anschlag) an der Pupillenposition (Fouriertransformationsebene FTP) vorgesehen werden kann, um den effektiven Pupillendurchmesser zu variieren. In diesem Fall sind der variable NA-Anschlag und das Pupillenfilter **PF** so angeordnet, dass sie einander nicht mechanisch behindern und dennoch so nahe wie möglich beieinander angeordnet sind. Es ist zu beachten, dass ein Beispiel für den variablen NA-Anschlag in dem US-Patent Nr. 4,931,830 offengelegt ist.

[0044] Der Wafer **W** ist auf einem Wafertisch **WST** gehalten, der für eine zweidimensionale Bewegung in einer zu der optischen Achse **AX** senkrechten Ebene (diese Bewegung ist im nachfolgenden als „XY-Bewegung" bezeichnet) und auch für eine geringfügige Bewegung einer einer zu der optischen Achse **AX** parallelen Richtung (diese Bewegung ist im nachfolgenden als „Z-Bewegung" bezeichnet) ausgelegt ist. Die XY- und Z-Bewegung des Wafertischs **WST** werden durch eine Tischantriebseinheit **22** bewirkt. Die XY-Bewegung wird gemäß einem von einem Laserinterferometer **23** gemessenen Wert gesteuert, wohingegen die Z-Bewegung gemäß einem Wert gesteuert wird, der von einem für die Autofokussierung verwendeten Fokussensor **24** erfasst wird. Die Tischantriebseinheit **22**, der Austauschmechanismus **20** usw. arbeiten auf der Grundlage eines von einer Hauptsteuereinheit **25** ausgegebenen Befehls. Die Hauptsteuereinheit **25** liefert auch einen Befehl an eine Verschlussansteuereinheit **26**, um den Betrieb zum Öffnen und Schließen des Verschlusses **3** zu steuern, und liefert des weiteren einen Befehl an eine Blendensteuereinheit **27**, um die Öffnungsgröße (bzw. den Öffnungsgrad) des Anschlags **8** oder der Rasterblendenmaske **11** zu steuern. Des weiteren ist die Hauptsteuereinheit **25** in der Lage, eine Rasterblendenbezeichnung einzugeben, die von einem in dem Pfad zum Transport einer Rasterblende zum Rasterblendentisch **RST** vorgesehenen Strichcodeleser **28** abgelesen wird. Infolgedessen steuert die Hauptsteuereinheit **25** im wesentlichen den Betrieb des Austauschmechanismus **20** und den Betrieb der Blendensteuereinheit **27** gemäß einer eingegebenen Rasterblendenbezeichnung und ermöglicht dadurch eine automatische Steuerung der Öffnungsgröße des Anschlags **8** und der Rasterblendenmaske **11**, und ob das Pupillenfilter **PF** benötigt wird (sowie auch eine Auswahl des am besten geeigneten Pupillenfilters) in Übereinstimmung mit der verwenden Rasterblende. Es ist zu beachten, dass die Z-Bewegung anstelle durch

den Wafertisch **WST** durch das optische Projektionssystem **PL** bewirkt werden kann.

[0045] Der Aufbau eines Teils des in **Fig.** 1 gezeigten optischen Projektionssystems **PL** wird im nachfolgenden unter Bezugnahme auf **Fig.** 2 erläutert. **Fig.** 2 ist eine Teilschnittansicht, die einen zur Gänze aus einem lichtbrechenden glasartigen Material ausgebildeten Teil des optischen Projektionssystems **PL** zeigt. Die Fouriertransformationsebene (Pupillenebene) **FTP** ist in dem von der untersten Linse GA_1 eines vorderen Linsensystems GA und der obersten Linse GB_1 eines hinteren Linsensystems GB begrenzten Raum vorhanden. Das optische Projektionssystem **PL** weist eine Mehrzahl von Linsen auf, die von einem Linsentubus gehalten sind. Bei der vorliegenden Ausführungsform ist eine Mehrzahl von Pupillenfiltern **PF** austauschbar in einer Öffnung in einem Teil des Linsentubus positioniert, nämlich durch Drehung des Halteelementes **30**, das die Pupillenfilter **PF** hält. Des weiteren erstreckt sich eine Abdeckung **20B** von der Öffnung des Linsentubus, so dass verhindert wird, dass das Halteelement **30** und eine Antriebswelle **30A** vollständig oder teilweise der Außenluft ausgesetzt sind. Die Abdeckung **20B** verhindert den Eintritt von Feinstaub, der in der Außenluft schwebt, in den Pupillenraum in dem optischen Projektionssystem **PL**. Zusätzlich ist ein Betätigungselement **20A**, z. B. ein Drehmotor, mit dem Austauschmechanismus **20** verbunden, so dass eine Mehrzahl von Pupillenfiltern, wie obenstehend beschrieben, abwechselnd durch die Drehung des Halteelementes **30** an der Pupillenebene **FTP** des optischen Projektionssystems **PL** positioniert werden kann. Des weiteren ist ein Strömungspfad **Af** derart in einem Teil des Linsentubus vorgesehen, dass er mit dem Pupillenraum in Verbindung steht. Somit wird temperaturgeregelte Reinluft durch eine Röhre **29** und den Strömungspfad **Af** zu dem Pupillenraum gefördert, wodurch nicht nur ein Temperaturanstieg des Pupillenfilters **PF** infolge der Absorption von Belichtungslicht, sondern auch ein Temperaturanstieg des gesamten Pupillenraums unterdrückt wird. Es ist zu beachten, dass es möglich ist, den Eintritt von Staub, der durch den Austauschmechanismus **20**, das Halteelement **30** usw. erzeugt wird, in den Pupillenraum zu verhindern, wenn die in den Pupillenraum zwangszugeführte Reinluft durch den Austauschmechanismus **20** und das Betätigungselement **20A** ausgetrieben wird.

[0046] **Fig.** 3 zeigt eine konkrete Anordnung des Halteelementes **30** in **Fig.** 2. Bei dieser Ausführungsform sind drei Pupillenfilter **PF1** bis **PF3** in gleichen Winkelabständen an einer drehkopfartigen Scheibe angebracht. Die drei Pupillenfilter **PF1** bis **PF3** haben jeweils einen Radius r_3, der ausreichend groß ist, um den maximalen Radius der Pupillenebene des optischen Projektionssystems **PL** abzudecken, so dass in der Pupillenebene FTP verteiltes Abbildungslicht immer durch das Pupillenfilter verläuft, unabhängig von dem Öffnungsdurchmesser (Radius r_2) des oben beschriebenen NA-Anschlags. Das Pupillenfilter **PF3** wird insbesondere für die Belichtung von L&S-Rastern verwendet. Daher wird es auf der Pupillenebene FTP angeordnet, wenn eine normale Belichtung (einschließlich des SHRINC-Verfahrens und des Ringbeleuchtungsverfahrens), die keinen Phasenschieber verwendet, durchgeführt werden soll. Das Pupillenfilter **PF3** ist eine transparente planparallele Platte (z. B. ein Quarzsubstrat) mit einer Dicke (optischen Dicke), die annähernd gleich derjenigen der Pupillenfilter **PF1** und **PF2** ist. Das Pupillenfilter **PF3** wird verwendet, um eine Variation der Abbildungscharakteristiken (Aberrationen) des optischen Projektionssystems **PL** zu minimieren.

[0047] Die Pupillenfilter **PF1** und **PF2** sind gemäß der vorliegenden Erfindung Pupillenfilter vom Phasentyp, die durch das Aufbringen von Phasenschiebern **PS1** und **PS2** [z. B. aufgeschleudertem Glas („spin-on-glass", SOG)] mit einer vorgegebenen Dicke und einem vorgegebenen Radius r_1 in jeweiligen zentralen kreisförmigen Zonen (schraffierte Abschnitte in **Fig.** 3) von transparenten, beispielsweise aus Quarz hergestellten Substraten ausgebildet sind. Infolgedessen ist in den Pupillenfiltern **PF1** und **PF2** die Amplitude des Lichts, das durch die zentralen kreisförmigen durchlässigen Abschnitte verläuft (Phasenschieberabschnitte **PS1** und **PS2**), bzw. die Durchlässigkeit der kreisförmigen durchlässigen Abschnitte, verschieden von der Amplitude des Lichts, das durch die äußeren Abschnitte (die bloßliegenden Abschnitte des transparenten Substrats) hindurchtritt, bzw. der Durchlässigkeit der bloßliegenden Substratabschnitte. Die Dicke der Phasenschieber **PS1** und **PS2** ist so eingestellt, dass zwischen dem Licht, das durch den zentralen kreisförmigen durchlässigen Abschnitt gelangt, und dem Licht, das durch den bloßliegenden Abschnitt des Substrats hindurchtritt, eine Phasendifferenz von $(2m + 1)\,\pi$ [rad] besteht (wobei m eine ganze Zahl ist).

[0048] Bei dieser Ausführungsform sind übrigens die Pupillenfilter **PF1** und **PF2** so ausgebildet, dass sie sich im Radius r_1 des kreisförmigen durchlässigen Abschnitts **PS** und auch in der Amplitudendurchlässigkeit voneinander unterscheiden. Anders gesagt, die kreisförmigen durchlässigen Abschnitte **PS1** und **PS2** der Pupillenfilter **PF1** und **PF2** besitzen unterschiedliche Radien r_{11} und r_{12} und eine unterschiedliche Amplitudendurchlässigkeit. Der Grund hierfür ist, dass sich bei dem Pupillenfilter gemäß der vorliegenden Erfindung mindestens einer der optimalen Werte für den Radius r_1 des kreisförmigen durchlässigen Abschnitts sowie das Amplitudendurchlässigkeitsverhältnis zwischen dem kreisförmigen durchlässigen Abschnitt und dem außerhalb davon gelegenen, bloßliegenden Substratabschnitt in Abhängigkeit von der numerischen Apertur NA (Durchmesser der Pupillenebene) des optischen Projektionssystems PL ändert. (Es ist zu beachten, dass bei dieser Ausführungsform das Verhältnis der Amplitudendurchlässigkeit äquivalent zu der Amplitudendurchlässigkeit des kreisförmigen durchlässigen Abschnitts ist, da das Verhältnis durch Aufbringen eines Phasenschiebers auf dem kreisförmigen durchlässigen Abschnitt bestimmt wird). Somit werden zwei Pupillenfilter vorbereitet, die sich in den Bedingungen bei ihrer Ausbildung voneinander unterscheiden, um die Verwendung eines jeweils

optimalen Pupillenfilters für zwei Werte der numerischen Apertur NA in einem Stepper zu ermöglichen, bei dem die numerische Apertur NA des optischen Projektionssystems **PL** gemäß der obenstehenden Beschreibung durch einen variablen NA-Anschlag [der zum Variieren des Pupillenradius (= r_2) an der Fouriertransformationsebene FTP entworfen ist] variiert werden kann. Die vorliegende Erfindung ist jedoch nicht notwendigerweise auf die beschriebene Anordnung beschränkt. Anders gesagt, der Aufbau des Halteelementes **30** kann so modifiziert werden, dass vier oder mehr unterschiedliche Arten von Pupillenfiltern vorgesehen sind, wodurch eine Optimierung des Radius des kreisförmigen durchlässigen Abschnitts und der Amplitudendurchlässigkeit für jede von drei oder mehr unterschiedlichen numerischen Aperturen NA ermöglicht wird, d. h. die Verwendung eines optimalen Pupillenfilters für jede numerische Apertur NA wird ermöglicht.

[0049] **Fig.** 4 zeigt ein Beispiel für die Anordnung des Pupillenfilters vom Phasentyp **PF1** gemäß der vorliegenden Erfindung. Es wird angenommen, dass das Pupillenfilter **PF1** in das optische Projektionssystem **PL** eingesetzt und sein Mittelpunkt mit der optischen Achse **AX** zur Deckung gebracht wurde. Unter Bezugnahme auf **Fig.** 4 weist das Pupillenfilter **PF1** einen Phasenschieber **PS** auf, der in einem an der optischen Achse **AX** zentrierten, kreisförmigen durchlässigen Abschnitt (Zone **FA**) mit einem Radius r_1 aufgebracht ist, und des weiteren eine äußere Zone (Zone **FB**) aufweist, die außerhalb der kreisförmigen Zone **FA** vorgesehen ist. Nimmt man an, dass die Amplitude des Lichts, das durch den Außenbereich **FB** hindurchtritt, $t_2 = +1{,}0$ (Referenz) ist, dann ist die Phase des Lichts, das durch den Phasenschieber **PS** in der kreisförmigen Zone **FA** hindurchtritt, invertiert, und der Absolutwert seiner Amplitude wird t_1 (eine negative reelle Zahl) kleiner als 1,0, wodurch in gewissem Maße eine Auslöschung des Lichts hervorgerufen wird. Die Auslöschung des Lichts kann beispielsweise erhalten werden, indem der Phasenschieber **PS** selbst aus einem Licht absorbierenden Material ausgebildet wird. Der Phasenschieber kann jedoch beispielsweise aus einem Doppelschichtfilm ausgebildet sein, der aus einem dünnen metallischen Film (mit einer vorgegebenen Durchlässigkeit, um den Durchtritt eines Teils des Lichts zu gestatten) und einem lichtdurchlässigen Phasenschieber besteht. Es ist zu beachten, dass in **Fig.** 4 der äußere Radius r_3 des Pupillenfilters **PF** gleich der maximalen numerischen Apertur (d. h. dem maximalen Radius der Pupillenebene) des optischen Projektionssystems **PL** ist. In der Praxis kann der Radius r_3 des Pupillenfilters **PF** jedoch größer als der maximale Radius der Pupillenebene sein, weil das Abbildungslicht in einem Bereich mit einem Durchmesser, der größer als der Radius r_3 ist, durch den obenstehend beschriebenen NA-Anschlag blockiert wird, der in dem optischen Projektionssystem **PL** vorgesehen ist. Darüber hinaus kann das Pupillenfilter **PF** selbst als ein Pupillenanschlag (NA-Anschlag) verwendet werden, indem der äußere Radius r_3 des Pupillenfilter **PF** kleiner als der maximale Radius der Pupillenebene des optischen Projektionssystems gemacht wird.

[0050] Die vorliegende Erfindung beabsichtigt die Minimierung von Ringings, und gleichzeitig eine zufriedenstellende Tiefenschärfe und einen zufriedenstellenden Belichtungsspielraum zu gewährleisten, und zwar durch die gemeinsame Verwendung des oben beschriebenen Pupillenfilters vom Phasentyp **PF** (in **Fig.** 4 gezeigt) und eines herkömmlichen FLEX-Verfahrens. Daher erfüllt der Wafertisch **WST** zum Halten des Wafer **W**, wie in **Fig.** 1 gezeigt ist, bei dieser Ausführungsform die Funktion eines herkömmlichen FLEX-Verfahrens. Anders gesagt, der Wafertisch WST dient dazu, den Wafer **W** während der Belichtung in der Richtung der optischen Achse **AX** zu verstellen bzw. vibrieren.

[0051] Als Ergebnis umfangreicher Simulationen durch den Erfinder wurde folgendes festgestellt: Wird das Verhältnis der Amplitudendurchlässigkeit t_1 des kreisförmigen durchlässigen Abschnitts **FA** zu der Amplitudendurchlässigkeit t_2 des äußeren durchlässigen Abschnitts **FB** als $t\ (= t_1/t_2)$ angenommen, dann sollten der Radius r_1 und das Verhältnis $t\ (= t_1/t_2)$ bei dem in **Fig.** 4 gezeigten Pupillenfilter **PF1** so bestimmt werden, dass sie die folgende Beziehung erfüllen:

$$r_1 = (0{,}34 + 0{,}12t)r_2$$

[0052] Dies ist die optimale Lösung zur Minimierung von Ringings, während sie eine zufriedenstellende Tiefenschärfe und einen zufriedenstellenden Belichtungsspielraum in dem Pupillenfilter **PF** gewährleistet. Es ist zu beachten, dass r_2 in dem obenstehenden Ausdruck der Radius des Pupillenanschlags (variabler NA-Anschlag) ist, der gemäß der obenstehenden Beschreibung an der Pupillenebene FTP vorgesehen ist; als Alternative ist r_2 der Radius der Pupillenebene in dem Fall eines optischen Projektionssystems, bei dem an der Pupillenebene kein Pupillenanschlag vorgesehen ist. Da die Amplitudendurchlässigkeit t_2 der äußeren Zone **FB**, d. h. des bloßliegenden transparenten Abschnitts des Substrats, ein feststehender Wert ist, sollten der Radius r_1 und die Amplitudendurchlässigkeit t_1 so gesteuert werden, dass sie die obenstehende Beziehung erfüllen.

[0053] In einem Fall, in dem die numerische Apertur des optischen Projektionssystems **PL** von dem an der Fouriertransformationsebene FTP vorgesehenen NA variiert wird, ändert sich der Wert des Pupillenebenenradius r_2 in der obenstehenden Beziehung. Daher muss das Pupillenfilter **PF** auf ein Pupillenfilter umgestellt werden, bei dem mindestens eine der Größen Radius r_1 und Amplitudendurchlässigkeit t_1 so geändert ist, dass diese mit der variierten numerischen Apertur zusammenstimmen. In der Praxis ist jedoch der Radius r_1 nicht notwendigerweise auf $(0{,}34 + 0{,}12t)r_2$ beschränkt, was durch den obenstehenden Ausdruck definiert ist. In der

Praxis kann eine zufriedenstellende Leistung erzielt werden, solange der Radius r_1 in einem Bereich liegt, der unter Zugeständnissen von etwa α 15% an die durch den obenstehenden Ausdruck definierten Grenzwerte (d. h. in dem Bereich von $0{,}85r_1$ bis $1{,}15t_1$) bestimmt wurde. Anders gesagt, bei dem in **Fig.** 4 gezeigten Pupillenfilter **PF** können der Radius r_1 und die Amplitudendurchlässigkeit t_1 so bestimmt werden, dass sie das folgende Verhältnis erfüllen:

$$0{,}85 \times (0{,}34 + 0{,}12t)r_2 \leq r_1 \leq 1{,}15 \times (0{,}34 + 0{,}12)r_2$$

[0054] Folglich kann das Pupillenfilter **PF** ohne die Notwendigkeit einer Änderung verwendet werden, solange der Änderungsbetrag der numerischen Apertur des optischen Projektionssystems **PL**, verursacht durch den an der Fouriertransformationsebene FTP vorgesehenen variablen NA-Anschlag, in dem Bereich von etwa ±15% liegt.

[0055] Des weiteren wendet die vorliegende Erfindung beispielsweise ein FLEX-Verfahren in Kombination mit dem Pupillenfilter vom Phasentyp an, ein Verfahren, bei dem der Wafer für jede Belichtungszone auf einem Wafer um einen vorgegebenen Betrag schrittweise entlang der optischen Achse verstellt wird, und die Belichtung für jede Stopposition des Wafer durchgeführt wird, d. h. die Belichtung wird für jede Belichtungszone mehrere Male durchgeführt, wie in US-Patent Nr. 4,869,999 offengelegt ist. Bei diesem Verfahren wird das Intervall zwischen einem Paar von benachbarten Belichtungspositionen unter einer Mehrzahl von diskreten Belichtungspositionen (d. h. der Betrag der Verstellung des Wafer **W** pro Belichtungsvorgang), ΔF_1, als annähernd gleich

$$\lambda/(1-\sqrt{1-NA^2})$$

bestimmt, wobei λ die Wellenlänge des Beleuchtungslichts **ILB** und NA die numerische Apertur des optischen Projektionssystems **PL** auf der Waferseite ist.

[0056] Der Grund hierfür ist, dass der oben beschriebene Verstellbetrag von dem vorliegenden Erfinder als der optimale Wert bei diesem Verfahren festgestellt wurde.

[0057] Wenn bei der vorliegenden Erfindung ein FLEX-Verfahren verwendet wird, bei dem der Wafer **W** während der Belichtung kontinuierlich entlang der optischen Achse verstellt wird, wird der Verstellbereich ΔF_2 als mindestens etwa

$$2\lambda/(1-\sqrt{1-NA^2})$$

bestimmt.

[0058] Der Grund hierfür liegt auch darin, dass der oben beschriebene Verstellbereich von dem vorliegenden Erfinder als der optimale Verstellbereich festgestellt wurde. Insbesondere in einem Fall, in dem der Wafer **W** vibriert wird, wird die Vibrationsamplitude beispielsweise bevorzugt als größer als ein etwa zwischen den beiden oben genannten Verstellbeträgen ΔF_1 und ΔF_2 liegender Wert bestimmt.

[0059] Vormals wurde ein Verfahren vorgeschlagen, bei dem, wenn der Wafer **W** gemäß der obenstehenden Beschreibung kontinuierlich verstellt wird, die Geschwindigkeit der Bewegung des Wafer **W** auf geeignete Weise gesteuert wird, wodurch ein vorteilhafter Effekt erzielt wird, der annähernd gleich dem ist, der von dem Verfahren erzielt wird, bei dem der Wafer **W** schrittweise verstellt wird (um die Belichtung an diskreten Positionen durchzuführen), beispielsweise gemäß der Offenlegung in den japanischen Offenlegungsschriften (KOKAI) Nr. 05-13305 und 05-47625 und in dem US-Patent Nr. 5,255,050. Bei Anwendung dieses Verfahrens der kontinuierlichen Verstellung wird der Verstellbetrag nicht auf den oben beschriebenen Wert, d. h.

$$\Delta F_2 = 2\lambda/(1-\sqrt{1-NA^2})$$

eingestellt, sondern als annähernd gleich zu dem oder größer als das Intervall zwischen einem Paar von benachbarten Belichtungspositionen unter einer Mehrzahl von diskreten Belichtungspositionen in dem Verfahren der schrittweisen Verstellung bestimmt, d. h.

$$\Delta F_1 = \lambda/(1-\sqrt{1-NA^2}) \ .$$

[0060] Es ist zu beachten, dass in einem Fall, in dem die Belichtung unter schrittweiser oder kontinuierlicher Verstellung des Wafer **W** durchgeführt wird, wie oben beschrieben wurde, der Wafer **W** in einem annähernd symmetrischen Bereich bezüglich der besten Fokusposition des optischen Projektionssystems **PL** in der Richtung der optischen Achse verstellt wird.

[0061] Zum Verschieben des Wafer **W** kann die Verstellung des Wafertiches **WST** übrigens auf der Grundlage eines Wertes gesteuert werden, der durch eine Positionsmessvorrichtung, z. B. einen Codierer, gemessen

wurde, der an einem Waferverstellmechanismus im Inneren des Wafertisches **WST** vorgesehen sein kann. Als Alternative kann der Wafertisch **WST** auf der Grundlage eines Wertes gesteuert werden, der von dem Fokussensor **24** oder dergleichen in der in **Fig.** 1 gezeigten Anordnung erfasst wurde. Es ist auch möglich, die Rasterblende **R** anstelle des Wafer **W** während der Belichtung zu verstellen. In diesem Fall muss jedoch der Verstellbetrag um einen Betrag erhöht werden, der der Axialvergrößerung (dem Quadrat der Transversalvergrößerung) des optischen Projektionssystems **PL** entspricht. Anders gesagt, falls es sich beispielsweise bei dem optischen Projektionssystem **PL** um ein 5×-System (d. h. ein auf 1/5 reduzierendes System) handelt, ist der Verstellbetrag der Rasterblende **R** das 25-fache des Betrags der Verstellung des Wafer **W**. Es ist zu beachten, dass die Abbildungsebene des optischen Projektionssystems **PL** entlang der optischen Achse verschoben werden kann durch Verstellen zumindest eines Teils der optischen Elemente, welche das optische Projektionssystem **PL** bilden, oder durch eine geringfügige Änderung der Wellenlänge des auf die Rasterblende **R** beaufschlagten Beleuchtungslichts **ILB**. In diesem Fall wird der Betrag der Verschiebung der Abbildungsebene als annähernd gleich dem Verstellbetrag des Wafer **W**, oben beschrieben, bestimmt.

[0062] Bei der obenstehenden Ausführungsform wird die vorliegende Erfindung auf ein Projektionsbelichtungsgerät (z. B. einen Stepper) angewendet, bei dem die gesamte Oberfläche einer Rasterbildungszone auf der Rasterblende beleuchtet wird, während sowohl die Rasterblende als auch der Wafer stationär gehalten werden, wodurch eine in der Rasterbildungszone ausgebildete Abbildung eines Leiterrasters auf den Wafer projiziert wird. Die vorliegende Erfindung kann jedoch auch auf ein Projektionsbelichtungsgerät angewendet werden, bei dem ein Bild des Leiterrasters auf der Rasterblende durch ein Abtast-Belichtungsverfahren auf den Wafer projiziert wird, d. h., ein Abtast-Projektionsbelichtungsgerät, bei dem nur ein Teil der Rasterbildungszone auf der Rasterblende beleuchtet wird, und die Rasterblende und der Wafer synchron in einer Richtung senkrecht zu der optischen Achse des optischen Projektionssystems verstellt werden, wodurch ein Bild des Leiterrasters auf den Wafer projiziert wird, wie in U.S. Pat. Nr. 4,924,257, 5,194,893 und 5,281,996 offengelegt ist. Ein solches Abtast-Projektionsbelichtungsgerät wendet jedoch ein FLEX-Verfahren an, bei dem die Abbildungsebene des optischen Projektionssystems und der Wafer kontinuierlich relativ zueinander entlang der optischen Achse des optischen Projektionssystems verstellt werden, wie beispielsweise in US-Patent Nr. 5,255,050 offengelegt ist. Infolgedessen werden während der Abtastbelichtung, die in dem Abtast-Projektionsbelichtungsgerät durchgeführt wird, die Abbildungsebene des optischen Projektionssystems und der Wafer relativ zueinander um etwa

$$\lambda/(1-\sqrt{1-NA^2})$$

oder mehr verstellt, während ein Punkt auf dem Wafer eine Zone des von dem optischen Projektionssystem projizierten Rasterblendenrasters (d. h. eine Zone, welche einer beleuchteten Zone auf der Rasterblende ähnlich ist) durchquert.

[0063] Als nächstes folgt eine Beschreibung des Effekts der vorliegenden Erfindung basierend auf den Ergebnissen von Simulationen, bei denen das Pupillenfilter **PF** in dieser Ausführungsform (**Fig.** 4) und ein FLEX-Verfahren in Kombination eingesetzt wurden.

[0064] **Fig.** 6(A) und 6(B) zeigen jeweils Ergebnisse (Querschnitt-Intensitätsverteilung) von Simulationen eines optischen Bildes von Kontaktlochrastern, wenn der Radius r_1 und die Amplitudendurchlässigkeit t_1 des kreisförmigen durchlässigen Abschnitts FA in **Fig.** 4 auf $r_1 = 0{,}22 \times r_2$ bzw. $t_1 = -1{,}0$ ($t_2 = +1{,}0$) eingestellt waren. Die Belichtungsbedingungen waren wie folgt: die Wellenlänge des Beleuchtungslichts **ILB** war 0,365 µm der i-Linie; die numerische Apertur NA des optischen Projektionssystems **PL** (waferseitig) war 0,57; und der σ-Wert des optischen Beleuchtungssystems war 0,6. Zusätzlich wurde das FLEX-Verfahren mit schrittweisem Verstellen, bei dem eine Belichtung an jeder von zwei diskreten Positionen durchgeführt wurde, in Kombination mit dem Pupillenfilter **PF** verwendet, und das Intervall (Abstand) ΔF_1 zwischen den beiden Positionen war auf

$$\Delta F_1 = \lambda/(1-\sqrt{1-NA^2}) = 2{,}0[\mu m]$$

eingestellt.

[0065] **Fig.** 6(A) zeigt eine Querschnitt-Bildintensitätsverteilung entlang der Linie A-A' des Bildes eines Rasters, bei dem, wie in **Fig.** 5(A) gezeigt ist, zwei Kontaktlöcher von 0,3 mal 0,3 µm im Quadrat (bei Messung auf dem Wafer) relativ nahe beieinander angeordnet sind, d. h. in einem Kantenabstand von 0,45 µm, d. h. einem Abstand zwischen zwei Mittelpunkten von 0,75 µm (bei Messung auf dem Wafer). **Fig.** 6(B) zeigt eine Querschnitt-Bildintensitätsverteilung entlang der Linie B-B' des Bildes eines Rasters, bei dem, wie in **Fig.** 5(B) gezeigt ist, zwei Kontaktlöcher von 0,30 mal 0,30 µm im Quadrat (bei Messung auf dem Wafer) relativ weit auseinanderliegend angeordnet sind, d. h. in einem Abstand von 0,75 µm zwischen zwei Kanten , d. h. in einem Abstand von 1,05 µm zwischen zwei Mittelpunkten (bei Messung auf dem Wafer), der größer als 0,45 µm im Fall der **Fig.** 6(A) ist. In **Fig.** 6(A) und 6(B) stellt die durchgehende Linie eine Bildintensitätsverteilung an der besten Fokusposition dar, die Strichpunktlinie stellt eine Bildintensitätsverteilung an einer ±1 µm-Unschärfepo-

sition dar, und die Zweipunkt-Strich-Linie stellt eine Bildintensitätsverteilung an einer ± 2 μm-Unschärfeposition dar. Des weiteren stellt Eth in **Fig.** 6(A) und 6(B) die Intensität des Belichtungslichtes dar, die benötigt wird, um einen positiven Fotolack vollständig aufzulösen. Infolgedessen wird die Scheibenbreite des optischen Bildes bei dem Intensitätswert Eth in den Figuren als der Durchmesser eines auf dem Wafer gebildeten Lochrasters betrachtet. Es ist zu beachten, dass die Verstärkung (Axialvergrößerung) des optischen Bildes in jeder der **Fig.** 6(A) und 6(B) so bestimmt ist, dass die Scheibenbreite des optischen Bildes bei dem Intensitätswert Eth in Sinne der Bildintensitätsverteilung (durchgehende Linie) an der besten Fokusposition 0,3 μm beträgt.

[0066] Wie in den **Fig.** 6(A) und 6(B) gezeigt ist, besteht bei der vorliegenden Erfindung im wesentlichen keine Variation in dem Lochrasterbild zwischen der besten Fokusposition (durchgehende Linie) und der ±1 μm-Unschärfeposition (Strichpunktlinie) (in den Figuren sind die Lochrasterbilder einander an den zwei Positionen im wesentlichen überlagert). Anders ausgedrückt ist es möglich, eine Projektionsbelichtung von Kontaktlochrastern mit einer extrem hohen Tiefenschärfe zu erzielen. Zusätzlich stellt die vorliegende Erfindung ein zufriedenstellendes Isolierungsvermögen (Auflösungsvermögen) für Lochraster zur Verfügung, insbesondere für zwei relativ nahe beieinander gelegene Lochraster, wie in **Fig.** 6(A) gezeigt ist, und weist des weiteren einen Vorteil darin auf, dass zwischen den beiden Löchern kein unerwünschter Transfer (Helligkeitsspitze) auftritt.

[0067] **Fig.** 7(A) und 7(B) zeigen Ergebnisse der Simulation von optischen Bildern, die unter Bedingungen unterschiedlich von denen der Fälle von **Fig.** 6(A) und 6(B) durchgeführt wurden. Bei der in **Fig.** 7(A) und 7(B) gezeigten Simulation betrug der Radius r_1 des zentralen durchlässigen Abschnitts **FA** $r_1 = 0{,}22 \times r_2$, und die Amplitudendurchlässigkeit t_1 betrug $t_1 = -1{,}0$ (diese Werte sind die gleichen wie in dem Fall der **Fig.** 6(A) und 6(B)). Es wurde jedoch ein FLEX-Verfahren durchgeführt, bei dem eine Belichtung jeweils an drei diskreten Positionen durchgeführt wurde, die in Intervallen von 2.0 μm in der Richtung der optischen Achse beabstandet waren. Es ist zu beachten, dass die Belichtungsbedingungen (NA, σ, λ usw.) und weitere Bedingungen wie die verwendeten Raster die gleichen wie im Fall der **Fig.** 6(A) und 6(B) waren. **Fig.** 7(A) und 7(B) zeigen optische Bilder von Rastern, die in **Fig.** 5(A) und 5(B) gezeigt sind, auf die gleiche Weise wie in **Fig.** 6(A) und 6(B). In **Fig.** 7(A) und 7(B) sind alle Bilder an der besten Fokusposition (durchgehende Linie), der ±1 μm-Unschärfeposition (Strichpunktlinie) und der ±2 μm-Unschärfeposition (Zweipunkt-Strich-Linie) einander überlagert. Anders gesagt, die Resultate der Simulation lassen erkennen, dass über einen äußerst breiten Bereich in der Fokusrichtung (Richtung der optischen Achse) bemerkenswert hochqualitative Bilder erhalten werden können. Auch in diesem Fall ist die Trennfähigkeit zwischen benachbarten Kontaktlöchern äußerst hoch, und Ringings sind somit auf ein zufriedenstellend niedriges Niveau reduziert.

[0068] **Fig.** 8(A) und 8(B) zeigen die Ergebnisse (optische Bilder) einer Simulation, bei der die Bedingungen der Pupillenfilterbildung (r_1 und t_1) die gleichen wie für die Pupillenfilter gemäß der vorliegenden Erfindung (**Fig.** 6(A) bis 7(B)) waren, jedoch kein FLEX-Verfahren in Kombination verwendet wurde. Es ist zu beachten, daß die Belichtungsbedingungen (NA, λ, σ usw.) und weitere Bedingungen wie die verwendeten Lochraster die gleichen wie im Fall von **Fig.** 6(A) bis 7(B) waren. Auch in **Fig.** 8(A) und 8(B) sind Ringings auf ein zufriedenstellend niedriges Niveau reduziert. Das Bild (Strichpunktlinie) an der ±1 μ m-Unschärfeposition ist jedoch im Vergleich mit dem Bild (durchgehende Linie) an der besten Fokusposition beträchtlich verschlechtert. Daher wird keine zufriedenstellende Tiefenschärfe erhalten. Anders gesagt, da das bei der vorliegenden Erfindung verwendete Pupillenfilter vom Phasentyp keinen starken Tiefenschärfeverstärkungseffekt (Doppelfokuseffekt) aufweist, wie er mit einem (im nachfolgenden beschriebenen) Doppelfokus-Pupillenfilter erzielt wird, ist es unmöglich, eine angemessene Verbesserung der Tiefenschärfe zu erwarten, wenn kein FLEX-Verfahren in Kombination verwendet wird.

[0069] **Fig.** 9(A) bis 11(B) zeigen Ergebnisse der Simulation von optischen Bildern, bei der Pupillenfilter verwendet wurden, die unter anderen Bedingungen als im Fall der **Fig.** 6(A) bis 8(B) gebildet wurden. In **Fig.** 9(A) und 9(B) betrug die Amplitudendurchlässigkeit t_1 des kreisförmigen durchlässigen Abschnitts **FA** $t_1 = -0{,}7$, und der Radius r_1 betrug $r_1 = (0{,}34 + 0{,}12t)r_2 \fallingdotseq 0{,}26r_2$. Es ist zu beachten, dass bei dieser Ausführungsform die Amplitudendurchlässigkeit t_2 des durchlässigen Abschnitts **FB** +1,0 ist, und das Verhältnis t daher $t = t_1$ ist. Die Belichtungsbedingungen (NA, σ, λ usw.) und weitere Bedingungen wie die verwendeten Raster waren die gleichen wie im Fall von **Fig.** 6(A) bis 7(B). Infolgedessen war der Verstellbetrag ΔF_1 des Wafer **W** bei dem FLEX-Verfahren auch der gleiche wie im Fall der **Fig.** 6(A) bis 7(B), weil die numerische Apertur NA und die Wellenlänge λ konstant waren. Anders gesagt, es wurde ein FLEX-Verfahren angewendet, bei dem die Belichtung an jeder von drei diskreten Positionen durchgeführt wurde, die in Intervallen von 2.0 μm in der Richtung der optischen Achse beabstandet waren. In **Fig.** 9(A) und 9(B) waren die Bilder einander auch im wesentlichen an jeder Fokusposition überlagert, und somit wird eine zufriedenstellende Tiefenschärfe erzielt. Zusätzlich ist die Fähigkeit zur Trennung zwischen benachbarten Kontaktlöchern äußerst hoch, und Ringings sind auf ein zufriedenstellend niedriges Niveau reduziert.

[0070] Die Amplitudendurchlässigkeit t_1 in **Fig.** 10(A) und 10(B) betrug $t = -0{,}4$, und der Radius r_1 betrug $r_1 = (0{,}34 + 0{,}12t)r_2 \fallingdotseq 0{,}29r_2$. Die Amplitudendurchlässigkeit t_1 in **Fig.** 11(A) und 11(B) betrug $t_1 = -0{,}2$, und der Radius r_1 betrug $r_1 = (0{,}34 + 0{,}12t)r_2 \fallingdotseq 0{,}32r_2$. In **Fig.** 10(A), 10(B), 11(A) und 11(B) sind die Bilder einander auch im wesentlichen an jeder Fokusposition überlagert, und somit wird eine zufriedenstellende Tiefenschärfe er-

zielt. Zusätzlich ist die Fähigkeit zur Trennung zwischen benachbarten Kontaktlöchern äußerst hoch, und Ringings sind auf ein zufriedenstellend niedriges Niveau reduziert.

[0071] Wie aus den obenstehend beschriebenen Simulationsergebnissen hervorgeht [**Fig.** 7(A), 7(B) und 9(A) bis 11(B)], kann bei der vorliegenden Erfindung eine äußerst hervorragende Abbildungsleistung unter der Bedingung erzielt werden, dass der Radius r_1 und die Amplitudendurchlässigkeit t_1 (d. h. das Verhältnis t) des Pupillenfilters vom Phasentyp **PF** im wesentlichen das Verhältnis $r_1 = (0{,}34 + 0{,}12t)r_2$ erfüllen, und dass das Intervall zwischen diskreten Belichtungspositionen bei dem angewendeten FLEX-Verfahren annähernd

$$\lambda/(1-\sqrt{1-NA^2})$$

beträgt. In der Praxis ist es jedoch möglich, solange der Radius r_1 die obenstehende Bedingung in einem Bereich erfüllt, der unter Zugeständnissen von ca. ±15% für die von dem Bedingungsausdruck definierten Grenzwerte bestimmt wird, die gewünschte Trennfähigkeit von mehreren benachbarten Kontaktlöchern zu erzielen, sowie gleichzeitig eine zufriedenstellende Tiefenschärfe zu gewährleisten und Ringings auf ein zufriedenstellend niedriges Niveau zu reduzieren.

[0072] Obwohl bei den in **Fig.** 7(A), 7(B) und 9(A) bis 11(B) gezeigten Simulationen ein FLEX-Verfahren angewendet wird, bei dem die Belichtung an jeder von drei diskreten Positionen durchgeführt wird, ist anzumerken, dass die Anzahl von diskreten Belichtungspositionen bei dem verwendeten FLEX-Verfahren nicht notwendigerweise auf drei beschränkt ist, sondern jegliche Zahl von nicht weniger als zwei sein kann. **Fig.** 12(A) und 12(B) zeigen Resultate einer optischen Bildsimulation, bei der das gleiche Pupillenfilter ($t_1 = -0{,}2$, und $r_1 = 0{,}32r_2$) wie das in

[0073] **Fig.** 11(A) und 11(B) eingesetzte in Kombination mit einem FLEX-Verfahren verwendet wurde, bei dem die Belichtung an jeder von zwei diskreten Positionen durchgeführt wurde, die in einem Intervall von 2 μm in der Richtung der optischen Achse beabstandet sind. In **Fig.** 12(A) und 12(B) kann auch im wesentlichen auf die gleiche Weise wie in dem Fall von **Fig.** 6(A) und 6(B) (wo ein Pupillenfilter mit $t_1 = -1{,}0$ und $r_1 = 0{,}22r_2$ in Kombination mit einem FLEX-Verfahren verwendet wurde, bei dem die Belichtung an jeder von zwei diskreten Positionen durchgeführt wurde) ein ausgezeichnetes optisches Bild erzielt werden. Es ist zu beachten, dass in **Fig.** 6(A) bis 14(B) die Figuren mit dem Suffix (A) optische Bilder von Kontaktlochrastern zeigen, die relativ nahe beieinander liegen, wie in **Fig.** 5(A) gezeigt ist, wohingegen die Figuren mit dem Suffix (B) optische Bilder von freistehenden Kontaktlochrastern zeigen, die relativ weit auseinanderliegen, wie in **Fig.** 5(B) gezeigt ist.

[0074] Bei den oben erwähnten Simulationen wurden FLEX-Verfahren angewendet, bei denen die Belichtung an jeder von mehreren diskreten Positionen durchgeführt wurde, und für das Intervall ΔF_1 zwischen der Mehrzahl von diskreten Belichtungspositionen wurde ein optimaler Wert verwendet, der aus den Ergebnissen der von dem vorliegenden Erfinder durchgeführten Simulationen erhalten wurde. Falls das Intervall ΔF_1 kleiner als der optimale Wert ist, kann kein adäquater Tiefenschärfeverstärkungseffekt erzielt werden, wogegen, wenn er größer als der optimale Wert ist, das Phänomen des doppelten (oder dreifachen) Fokus auftritt, was den Erhalt einer zufriedenstellenden Tiefenschärfe unmöglich macht. Des weiteren, obwohl bei den oben genannten Simulationen die Anzahl der Mehrzahl von diskreten Belichtungspositionen bei dem FLEX-Verfahren zwei oder drei ist, kann sie auch drei oder vier betragen. Es ist auch möglich, ein FLEX-Verfahren anzuwenden, bei dem der Wafer **W** während der Belichtung kontinuierlich innerhalb eines bestimmten Bereiches in der Richtung der optischen Achse verstellt wird, anstatt die Belichtung jeweils an einer Mehrzahl von diskreten Positionen durchzuführen. In diesem Fall wird der Bereich, in dem der Wafer **W** kontinuierlich verstellt wird, bevorzugt auf einen Viert eingestellt, der mindestens etwa das Doppelte des optimalen Wertes ΔF_1 für das Intervall zwischen den diskreten Positionen ist.

[0075] Im folgenden wird begründet, warum die Anzahl von diskreten Punkten für die schrittweise Verstellung im einen Fall zwei und in einem anderen Fall, wenn das FLEX-Verfahren mit schrittweisem Verstellen des Wafer angewendet wird, drei ist. Anders gesagt, für einen Vorgang, der keine sehr große Tiefenschärfe erfordert, wird das FLEX-Verfahren mit Belichtung an zwei Punkten in Kombination mit dem Pupillenfilter verwendet, wie in **Fig.** 6(A), 6(B), 12(A) und 12(B) gezeigt ist. Für einen Vorgang, der eine relativ hohe Tiefenschärfe erfordert, wird andererseits das FLEX-Verfahren mit Belichtung an drei oder mehr Punkten in Kombination mit dem Pupillenfilter angewendet, wie in **Fig.** 7(A), 7(B), 9(A), 9(B), 10(A), 10(B), 11(A) und 11(B) gezeigt ist.

[0076] Wenn das FLEX-Verfahren, bei dem der Wafer **W** während der Belichtung kontinuierlich entlang der optischen Achse verstellt wird, in Kombination mit dem Pupillenfilter angewendet wird, wird der Verstellbetrag des Wafer F folgendermaßen eingestellt: Für einen Vorgang, der keine sehr hohe Tiefenschärfe erfordert, wird der Wafer-Verstellbetrag ΔF_2 auf etwa

$$2\lambda/(1-\sqrt{1-NA^2})$$

eingestellt, wie oben beschrieben ist. Für einen Vorgang, der eine relativ hohe Tiefenschärfe erfordert, wird der Wafer-Verstellbetrag ΔF_2 auf einen höheren Wert als den obenstehenden eingestellt.

[0077] **Fig.** 13(A) und 13(B) zeigen die Ergebnisse (optische Bilder) einer Simulation, bei der in einem herkömmlichen normalen Belichtungsvorgang (ohne Verwendung von Pupillenfilter) zu Vergleichszwecken kein FLEX-Verfahren angewendet wurde. **Fig.** 13(A) zeigt optische Bilder der in **Fig.** 5(A) gezeigten Raster, und **Fig.** 13(B) zeigt optische Bilder der in **Fig.** 5(B) gezeigten Raster. Da in **Fig.** 13(A) und 13(B) das Pupillenfilter vom Phasentyp und ein FLEX-Verfahren nicht in Kombination verwendet wurden, ist das Bild (Strichpunktlinie) an der ±1 μm-Unschärfeposition im Vergleich mit dem Bild (durchgehende Linie) an der besten Fokusposition beträchtlich verschlechtert. Von daher ist es verständlich, dass mit dem normalen Abbildungsverfahren keine zufriedenstellende Tiefenschärfe erzielt werden kann.

[0078] **Fig.** 14(A) und 14(B) zeigen auch die Ergebnisse einer Simulation, bei der ein FLEX-Verfahren zu Vergleichszwecken auf einen normalen Belichtungsvorgang (ohne Verwendung eines Pupillenfilters) angewendet wurde. Bei der in **Fig.** 14(A) und 14(B) gezeigten Simulation wurde das FLEX-Verfahren unter den Bedingungen ausgeführt, dass die Belichtung jeweils an drei diskreten Positionen durchgeführt wurde und das Intervall zwischen jedem Paar von benachbarten Belichtungspositionen 1,5 μm betrug. Wie aus **Fig.** 14(A) und 14(B) hervorgeht, kann das Bild (Strichpunktlinie) an der ±1 μm-Unschärfeposition nahe an das Bild (durchgehende Linie) an der besten Fokusposition herangebracht werden, d. h. die Tiefenschärfe kann verstärkt werden, indem man gemeinsam einen normalen Belichtungsvorgang und ein FLEX-Verfahren anwendet. In dem Fall von Bildern [**Fig.** 14(A)] von Lochrastern jedoch, die gemäß der Darstellung von **Fig.** 5(A) nahe beieinander liegen, können die beiden Löcher nicht zufriedenstellend getrennt werden, weshalb die Bilder dieser Löcher an einem Abschnitt verbunden sind, der durch das Bezugszeichen C in **Fig.** 14(A) bezeichnet ist, wohingegen zwei benachbarte Löcher vollständig getrennt sind in dem Fall von Bildern [**Fig.** 14(B)] einer Mehrzahl von Lochrastern, die gemäß der Darstellung von **Fig.** 5(B) relativ weit auseinanderliegend angeordnet sind. Der Grund hierfür ist es, das die Bildintensität an einer Zone zwischen den beiden Löchern in **Fig.** 14(A) nahe bei Eth/2 liegt. Es ist zu beachten, dass Eth/2 in **Fig.** 6(A) bis 17(B) vermutlich im wesentlichen dem Belichtungsbetrag entspricht, bei dem eine unerwünschte Verringerung der Filmdicke an einem positiven Fotolack beginnt. Infolgedessen besteht bei einem bloßen FLEX-Verfahren die Gefahr, dass ein Abschnitt des zwischen den beiden Löchern befindlichen Fotolacks eine Dickenverringerung erfährt. Im Gegensatz hierzu weisen die mittels des Verfahrens gemäß der vorliegenden Erfindung gebildeten Bilder [in **Fig.** 6(A) bis 7(B) und 9(A) bis 12(B) gezeigt] eine ausreichend geringe Lichtmenge in der Zone zwischen den beiden Löchern auf, weshalb keine Gefahr einer Reduzierung der Fotolackfilmdicke besteht.

[0079] **Fig.** 15(A) bis 17(B) zeigen die Resultate einer Simulation, bei der ein herkömmliches Pupillenfilter vom Doppelfokustyp (Phasenkontrastfilter) allein verwendet wurde. In **Fig.** 15(A) bis 17(B) waren die Simulationsbedingungen (NA, λ, σ und Fokuspositionen) die gleichen wie in **Fig.** 6(A) bis 14(B), jedoch wurde als Pupillenfilter ein Phasenfilter eingesetzt, das unter anderen Bedingungen als denjenigen der vorliegenden Erfindung gebildet war. Des weiteren wurde in **Fig.** 15(A) bis 17(B) ein Raster von zwei relativ weit auseinanderliegend angeordneten Löchern verwendet, wie in **Fig.** 5(B) gezeigt ist.

[0080] Der Radius r_1 betrug in **Fig.** 15(A) und 15(B) $r_1 = 0{,}4r_2$, und die Amplitudendurchlässigkeit t_1 betrug $t_1 = -1{,}0$, wohingegen der Radius r_1 in **Fig.** 16(A) und 16(B) $r_1 = 0{,}3r_2$ betrug, und die Amplitudendurchlässigkeit t_1 betrug $t_1 = -1{,}0$. **Fig.** 15(A)

[0081] und 16(A) zeigen optische Bilder, die gebildet wurden, als kein FLEX-Verfahren in Kombination verwendet wurde. **Fig.** 15(B) und 16(B) zeigen optische Bilder, die durch gemeinsame Verwendung eines FLEX-Verfahrens gebildet wurden, wobei die Belichtung jeweils an zwei diskreten Positionen durchgeführt wurde, die in einem optimierten Intervall gemäß der obenstehenden Beschreibung beabstandet waren. In **Fig.** 15(B) beträgt das Intervall ΔF_1 3,5 μm; in **Fig.** 16(B) beträgt das Intervall ΔF_2 2,5 μ m.

[0082] Das Pupillenfilter, das bei der in **Fig.** 15(A) und 15(B) gezeigten Simulation verwendet wurde, ist ein herkömmlich vorgeschlagenes Pupillenfilter mit relativ starkem Doppelfokuseffekt (Tiefenschärfeverstärkungseffekt). Selbst wenn kein FLEX-Verfahren in Kombination verwendet wird, sind das Bild (durchgehende Linie) an der besten Fokusposition und das Bild (Strichpunktlinie) an der ±1 μm-Unschärfeposition einander daher im wesentlichen überlagert, wie in **Fig.** 15(A) gezeigt ist. Somit kann eine hohe Tiefenschärfe erzielt werden. Ringings sind jedoch beträchtlich stark, und Ringings, die zwischen den beiden Löchern auftreten, sind in einer dazwischenliegenden Zone summiert, so dass sie ein äußerst helles Phantombild bilden. Als Ergebnis wird ein unerwünschtes Lochraster auf eine Zone zwischen den beiden Löchern übertragen. Ein solches Pupillenfilter kann daher in der Praxis nicht eingesetzt werden. Selbst wenn ein FLEX-Verfahren in Kombination verwendet wird, wie in **Fig.** 15(B) bezeigt ist, sind Ringings des weiteren noch stark, wenn auch etwas verringert. Das System kann daher nicht praktisch eingesetzt werden.

[0083] In **Fig.** 16(A) und 16(B) ist der Radius r_1 des Pupillenfilter kleiner als im Fall von **Fig.** 15(A) und 15(B). Daher verringern sich Ringings etwas im Vergleich mit **Fig.** 15(A) und 15(8), jedoch nimmt andererseits die Tiefenschärfe ab. Anders gesagt, in **Fig.** 16(A) ist das Bild (Strichpunktlinie) an der ±1 μm-Unschärfeposition im Vergleich mit dem Bild (durchgehende Linie) an der besten Fokusposition beträchtlich verschlechtert. In **Fig.** 16(B) hingegen kann eine zufriedenstellende Tiefenschärfe erzielt werden, weil das FLEX-Verfahren in Kombination verwendet wird. In **Fig.** 16(B) erzeugen jedoch Ringings, die selbst dann bleiben, wenn das

FLEX-Verfahren in Kombination verwendet wird, einen abträglichen Effekt. Infolgedessen weist selbst das Bild (durchgehende Linie) an der besten Fokusposition eine derart deformierte Konfiguration auf, dass sich die beiden Löcher auf der Höhe von Eth/2 nach innen hin ausbauchen. Somit kann kein günstiges Lackprofil (Übertragungsraster) erzielt werden.

[0084] **Fig.** 17(A) und 17(B) zeigen die Ergebnisse einer Simulation, bei der ein herkömmliches Doppelfokus-Pupillenfilter verwendet wurde, das unter anderen Bedingungen als im Fall der **Fig.** 15(A) bis 16(B) gebildet wurde. Der Radius r_1 betrug in **Fig.** 17(A) und 17(B) $r_1 = 0{,}6r_2$, und die Amplitudendurchlässigkeit t_1 betrug $t_1 = -0{,}2$. Somit wurde dem Pupillenfilter als Bedingung für eine gewisse Verstärkung der Tiefenschärfe ein Absorptionsvermögen verliehen (bei den Pupillenfiltern in **Fig.** 15(A) bis 16(B) $t_1 = -1{,}0$). **Fig.** 17(A) zeigt ein optisches Bild, das gebildet wurde, als kein FLEX-Verfahren in Kombination verwendet wurde. **Fig.** 17(B) zeigt ein optisches Bild, das gebildet wurde, als ein FLEX-Verfahren in Kombination verwendet wurde. In **Fig.** 17(B) wird die Belichtung an jeder von zwei diskreten Positionen durchgeführt, die in einem Intervall von 4 μm in der Richtung der optischen Achse beabstandet sind. Wie in **Fig.** 17(A) und 17(B) gezeigt ist, ist der Effekt von Ringings bei diesem Beispiel selbst dann groß, wenn der Wert der Amplitudendurchlässigkeit t_1 geändert wird, und es kann kein günstiges optisches Bild erzielt werden, auch wenn eine zufriedenstellende Tiefenschärfe erzielt werden kann. Es ist zu beachten, dass vom vorliegenden Erfinder für das in Fig. 15(B), 16(B) und 17(B) verwendete FLEX-Verfahren optimale Werte des Verstellbetrags gewählt wurden.

[0085] Im Gegensatz zu dem obenstehenden verwendet die vorliegende Erfindung ein Pupillenfilter, das einen relativ schwachen Tiefenschärfeverstärkungseffekt aufweist, und optimiert die Bedingungen der Pupillenfilterbildung sowie die Bedingungen eines in. Kombination damit verwendeten FLEX-Verfahrens. Daher ist es möglich, ein äußerst hervorragendes Projektionsbelichtungsgerät mit einer ausreichend großen Tiefenschärfe, ausreichend reduzierten Ringings und einer verbesserten Fähigkeit zur Trennung der Bilder von nahe beieinanderliegenden Löchern zu verwirklichen, wie bereits in **Fig.** 6(A) bis 7(B) und 9(A) bis 12(B) gezeigt wurde.

[0086] Es ist zu beachten, dass das Pupillenfilter bei der obenstehenden Ausführungsform durch Aufbringen eines Phasenschiebers auf einem Teil eines transparenten Substrats ausgebildet ist, wodurch die Amplitudendurchlässigkeit t_1 des zentralen kreisförmigen durchlässigen Abschnitt **FA** optimiert wird, so dass die oben beschriebene Bedingung erfüllt ist. Als ein alternatives Beispiel ist es auch möglich, einen Phasenschieber auf der gesamten Oberfläche eines transparenten Substrats aufzubringen und eine unterschiedliche Filmdicke zwischen dem zentralen durchlässigen Abschnitt **FA** und dem äußeren durchlässigen Abschnitt **FB** vorzusehen. In diesem Fall werden die Amplitudendurchlässigkeitswerte der durchlässigen Abschnitte **FA** und **FB** als Parameter bei der Optimierung verwendet.

[0087] Bei den obenstehenden Beispielen (Simulationen) ist das Kontaktlochraster auf der Rasterblende 0,3 mal 0,3 μm im Quadrat (bzw. Durchmesser) bei Messung auf dem Wafer. Anders gesagt, im Fall eines auf 1/5 reduzierenden Systems soll das Kontaktlochraster mit 1,5 mal 1,5 μm im Quadrat (bzw. Durchmesser) auf der Rasterblende in ein Raster mit 0,3 mal 0,3 μm im Quadrat auf dem Wafer übertragen werden. Die Größe des Rasterblendenrasters braucht jedoch nicht notwendigerweise die gewünschte Größe gemäß Messung auf dem Wafer zu sein. Die Übertragung kann zum Beispiel durchgeführt werden, indem der Belichtungsbetrag so eingestellt wird, dass ein Lochraster mit 2 mal 2 μm im Quadrat auf der Rasterblende und 0,4 mal 0,4 μm bei Messung auf dem Wafer in ein quadratisches Raster mit 0,3 mal 0,3 μm auf dem Wafer übertragen wird.

[0088] Die relativen Verstellbeträge ΔF_1 und ΔF_2 zwischen der Abbildungsfläche des optischen Projektionssystems **PL** und dem Wafer W bei dem in der vorliegenden Erfindung angewendeten FLEX-Verfahren sind übrigens durch den oben beschriebenen Bedingungsausdruck nicht vollständig eingeschränkt. Tatsächlich können praktische Abbildungseigenschaften innerhalb eines Bereichs erzielt werden, der unter Zugeständnissen von etwa ±10% für die durch den obenstehenden Bedingungsausdruck bestimmten ΔF_1 und ΔF_2 (d. h. in dem Bereich von 0,9 ΔF_1 bis 1,1 ΔF_1; 0,9 ΔF_2 bis 1,1 ΔF_2) bestimmt wird. Beispielsweise kann der Verstellbetrag ΔF1 in dem folgenden Bereich bestimmt werden

$$0{,}9\times\lambda/(1-\sqrt{1-NA^2})\leq\Delta F_1\leq 1{,}1\times\lambda/(1-\sqrt{1-NA^2})\ .$$

[0089] Es ist zu beachten, dass bei dem Verfahren, bei dem der Wafer W gemäß der obenstehenden Beschreibung vibriert wird, oder bei dem Verfahren, das z. B. in der japanischen Offenlegungsschrift (KOKAI) Nr. 05-13305 und in US-Patent Nr. 5,255,050 vorgeschlagen ist, der Verstellbetrag in einem Bereich eingestellt werden kann, der unter Zugeständnissen von etwa ±10% für die oben beschriebene Vibrationsamplitude bestimmt wird.

[0090] Weiterhin kann das Projektionsbelichtungsgerät gemäß der vorliegenden Erfindung in Kombination mit einer Halbtonphasenschieber-Rasterblende, einer Phasenschieber-Rasterblende zur Kantenschärfenverbesserung usw. eingesetzt werden, die z. B. in der japanischen Offenlegungsschrift (KOKAI) Nr. 04-136854 bzw. 04-162039 offengelegt sind.

Patentansprüche

1. Vorrichtung zur Projektionsbelichtung, welche aufweist: eine Beleuchtungseinrichtung (**1**–**14**) zur Ausstrahlung von Licht;
eine optische Projektionseinrichtung (**PL**) zur Projektion eines Bildes eines auf einer Maske (**R**) ausgebildeten Musters durch das Licht auf ein fotoempfindliches Substrat (**W**); und
eine bewegliche Einrichtung (**WST**) zur Bewegung einer bildformenden Ebene der optischen Projektionseinrichtung (**PL**) und des fotoempfindlichen Substrates (**W**) relativ zueinander entlang einer optischen Achse (**AX**) der optischen Projektionseinrichtung (**PL**) um zumindest

$$\lambda/\{1 - \sqrt{(1 - NA^2)}\}$$

, wobei λ die Wellenlänge des Lichtes, und NA die numerische Apertur der optischen Projektionseinrichtung (**PL**) auf dessen Seite des fotoempfindlichen Substrates bezeichnet; und
ein optisches Filter (**PF**), welches bei oder in der Nähe einer innerhalb der optischen Projektionseinrichtung (**PL**) vorgesehenen Fourier Transformationsebene dergestalt angeordnet ist, dass die Amplitude des durch einen kreisförmigen Bereich mit dem Radius r_1, welcher bei einer optischen Achse der optischen Projektionseinrichtung (**PL**) zentriert ist, tretenden Lichtes und die Amplitude des Lichtes, welches durch einen äußeren Bereich tritt, welcher außerhalb des kreisförmigen Bereiches liegt, durch das optische Filter (**PF**) voneinander im Vorzeichen unterschiedlich gemacht sind.

2. Vorrichtung nach Anspruch 1, bei welcher die bewegliche Einrichtung (**WST**) zur Bewegung der bildformenden Ebene der optischen Projektionseinrichtung (**PL**) und des fotoempfindlichen Substrates (**W**) relativ zueinander um zumindest

$$2\lambda/\{1 - \sqrt{(1 - NA^2)}\}$$

angeordnet ist.

3. Vorrichtung nach Anspruch 1, bei welcher das optische Filter dergestalt definiert ist, dass der Radius r_1 und das Verhältnis t der Amplitude des Lichtes, welches durch den kreisförmigen Bereich tritt, zur Amplitude des Lichtes, welches durch den äußeren Bereich tritt, derart bestimmt sind, dass die folgende Bedingung erfüllt ist-$0.85 \times (0.34 + 0.12t) \leq r_1/r_2 \leq 1.15 \times (0.34 + 0.12t)$ wobei r_2 der Radius einer Pupillenebene der optischen Projektionseinrichtung (**PL**) bezeichnet.

4. Vorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei welcher die bewegliche Einrichtung (**WST**) eine Stufe aufweist, welche das fotoempfindliche Substrat (**W**) trägt und welche entlang der optischen Achse der optischen Projektionseinrichtung (**PL**) beweglich ist.

5. Vorrichtung nach Anspruch 1, bei welcher die bewegliche Einrichtung (**WST**) die bildformende Ebene und das fotoempfindliche Substrat (**W**) schrittweise relativ zueinander bewegt.

6. Vorrichtung nach Anspruch 2, bei welcher die bewegliche Einrichtung (**WST**) die bildformende Ebene und das fotoempfindliche Substrat kontinuierlich relativ zueinander bewegt.

7. Belichtungsverfahren unter Verwendung einer optischen Beleuchtungseinrichtung (**1**–**14**) zur Ausstrahlung von Licht und einer optischen Projektionseinrichtung (**PL**) zur Projektion eines Bildes eines auf einer Maske (**R**) ausgebildeten Musters auf ein fotoempfindliches Substrat (**W**), wobei das Verfahren die Schritte aufweist der Bewegung einer bildformenden Ebene der optischen Projektionseinrichtung (**PL**) und des fotoempfindlichen Substrates (**W**) relativ zueinander entlang einer optischen Achse (**AX**) der optischen Projektionseinrichtung (**PL**) um zumindest

$$\lambda/\{1 - \sqrt{(1 - NA^2)}\}$$

, wobei λ die Wellenlänge des Lichtes, und NA die numerische Apertur der optischen Projektionseinrichtung (**PL**) auf dessen Seite des fotoempfindlichen Substrates bezeichnet; und weiterhin die Schritte aufweist:
Anordnen eines optischen Filters (**AF**) bei oder in der Nähe einer innerhalb der optischen Projektionseinrichtung (**PL**) vorgesehenen Fourier-Transformationsebene dergestalt, dass die Amplitude des durch einen kreisförmigen Bereich mit dem Radius r_1, welcher bei einer optischen Achse der optischen Projektionseinrichtung (**PL**) zentriert ist, tretenden Lichtes und die Amplitude des Lichtes, welches durch einen äußeren Bereich tritt,

welcher außerhalb des kreisförmigen Bereiches liegt, durch das optische Filter (**AF**) voneinander im Vorzeichen unterschiedlich gemacht werden.

8. Verfahren nach Anspruch 7, wobei die bildformende Ebene der optischen Projektionseinrichtung (**PL**) und das fotoempfindliche Substrat (**W**) um zumindest

$2\lambda/\{1 - \sqrt{(1 - NA^2)}\}$

bewegt werden.

9. Verfahren nach Anspruch 7, wobei das optische Filter (**AF**) dergestalt definiert wird, dass der Radius r_1 und das Verhältnis t der Amplitude des Lichtes, welches durch den kreisförmigen Bereich tritt, zu der Amplitude des Lichtes, welches durch den äußeren Bereich tritt, derart bestimmt werden, dass die folgende Bedingung erfüllt ist:

10. $85 \times (0.34 + 0.12t) \leq r_1/r_2 \leq 1.15 \times (0.34 + 0.12t)$ wobei r_2 der Radius einer Pupillenebene der optischen Projektionseinrichtung (**PL**) bezeichnet.

11. Verfahren nach Anspruch 7, wobei die bildformende Ebene und das fotoempfindliche Substrat (**W**) schrittweise relativ zueinander bewegt werden.

12. Verfahren nach Anspruch 8, wobei die bildformende Ebene und das fotoempfindliche Substrat (**W**) kontinuierlich relativ zueinander bewegt werden.

Es folgen 17 Blatt Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

Fig. 1

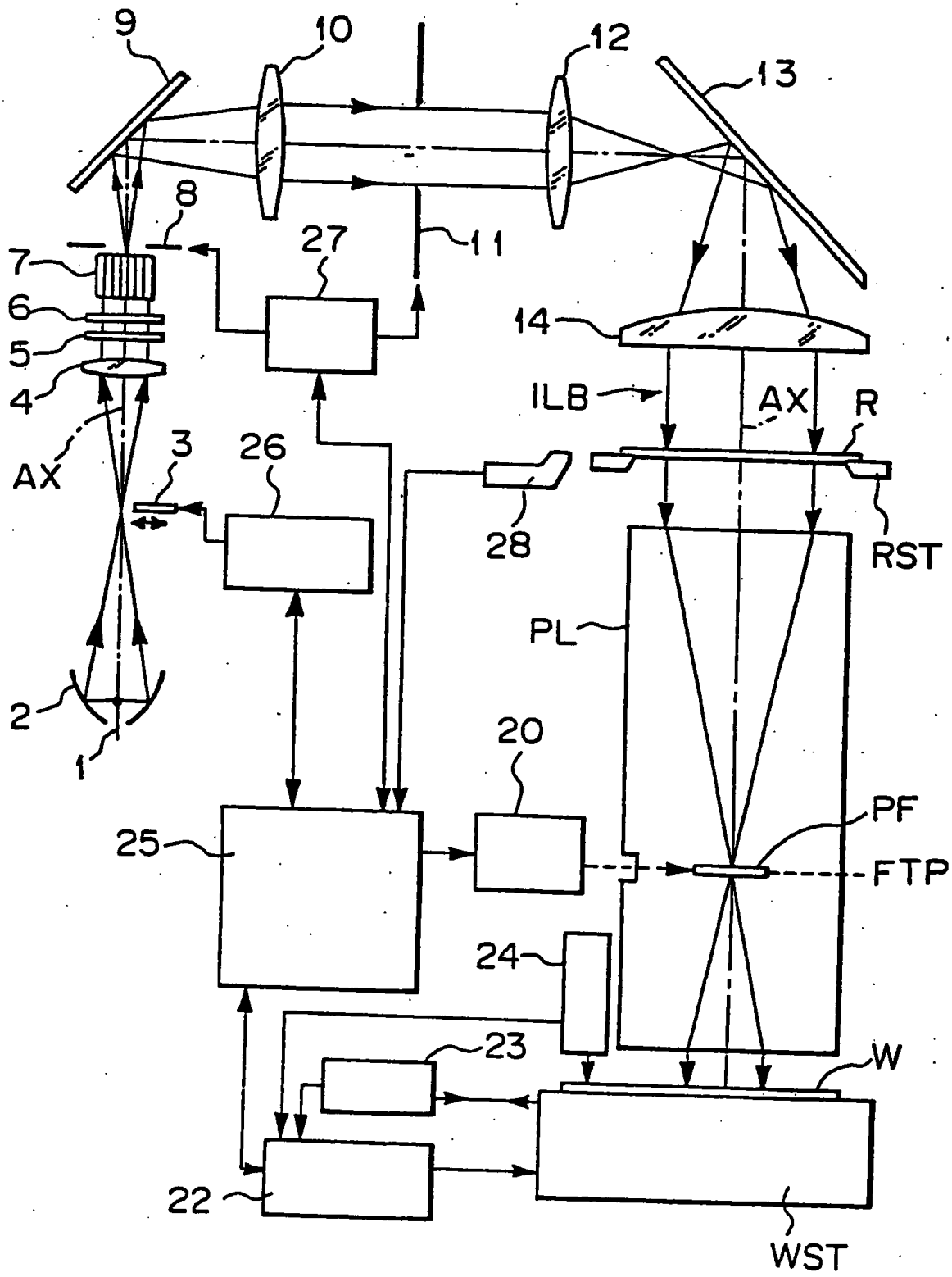

Fig. 2

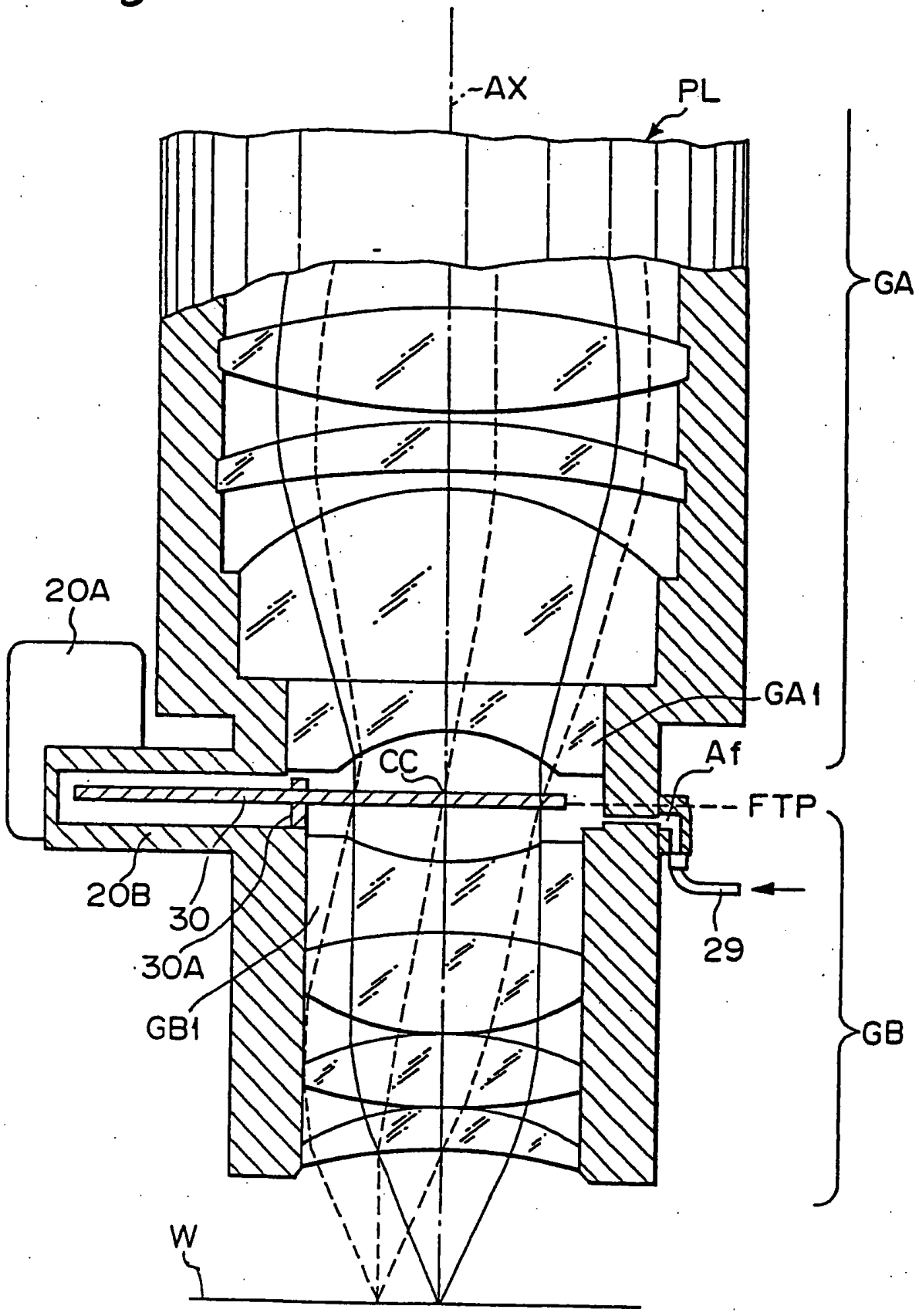

Fig. 3

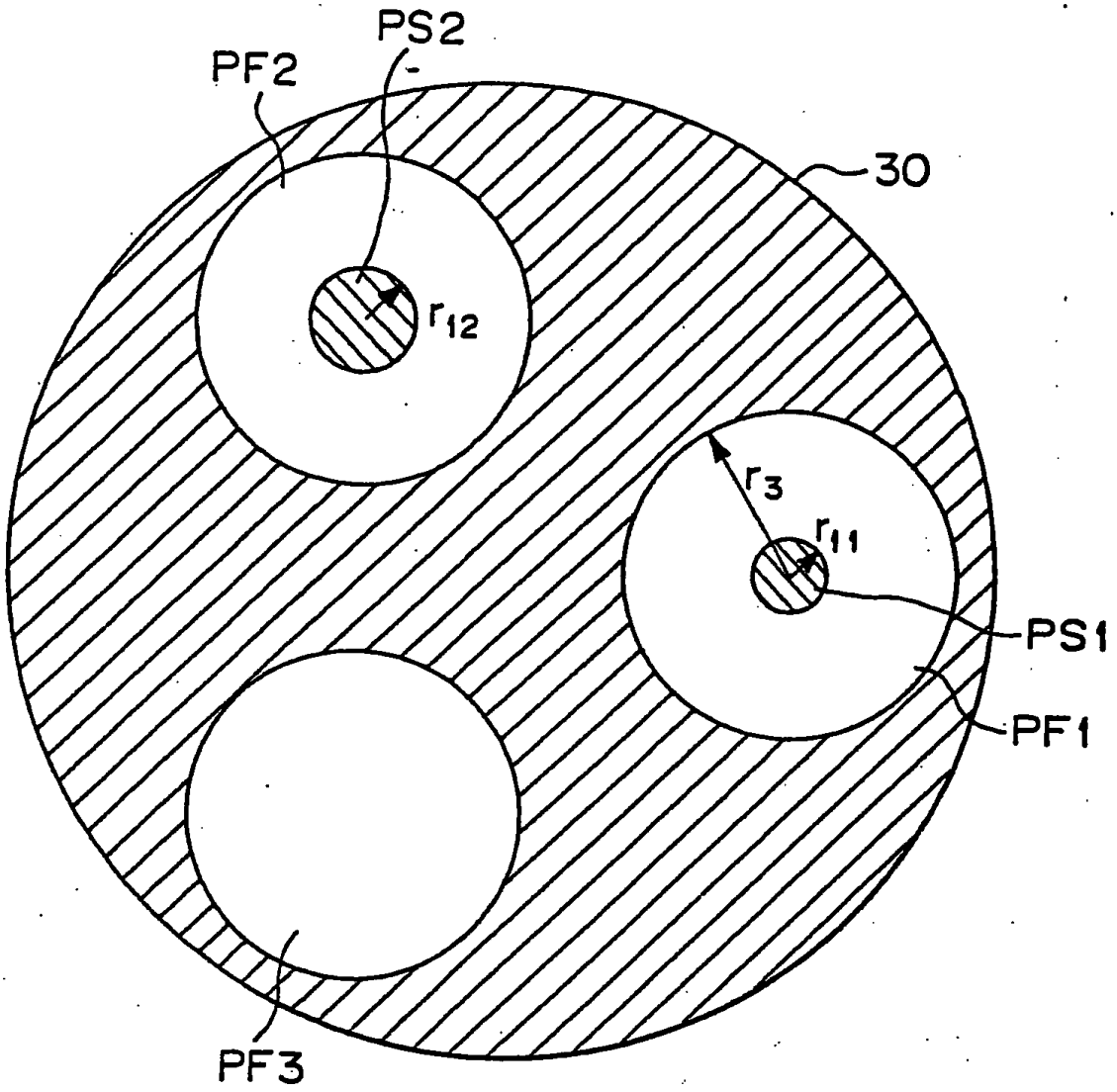

Fig. 4

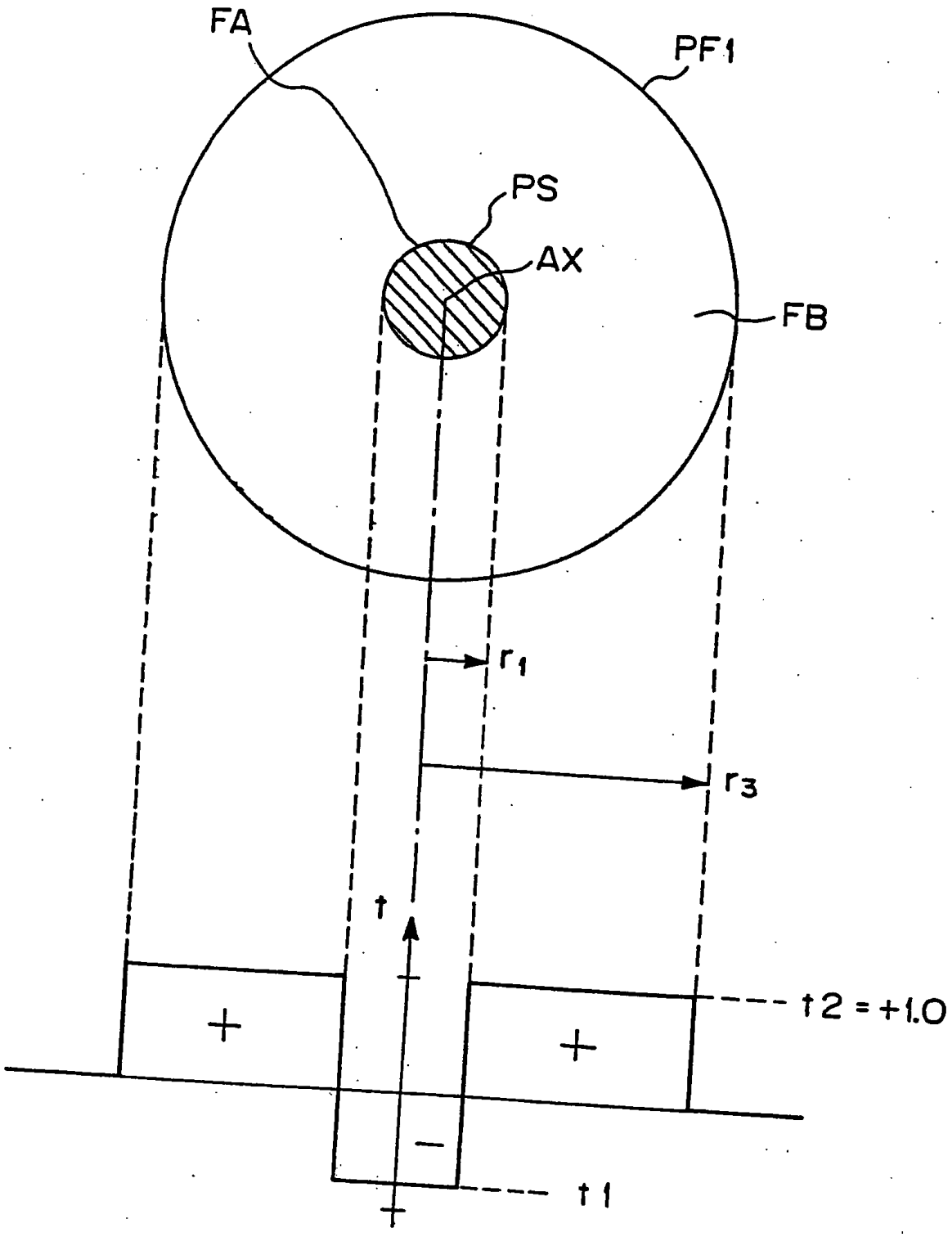

Fig. 5(A)

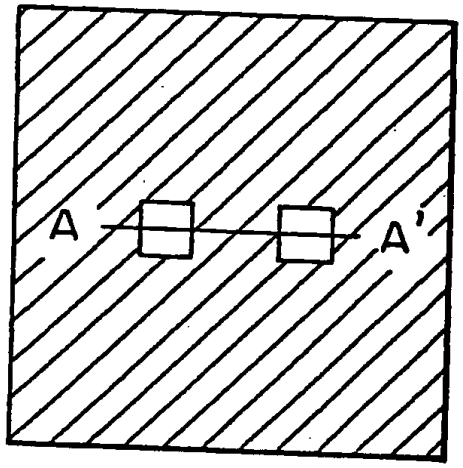

Fig. 5(B)

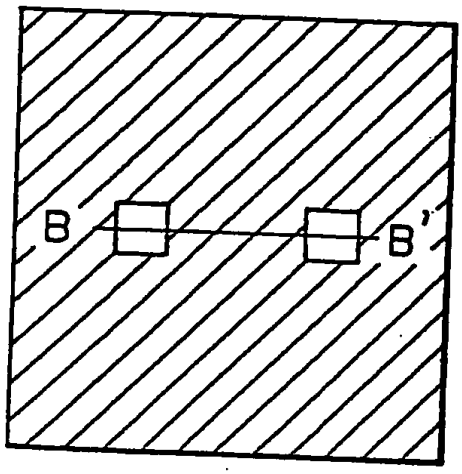

Fig. 6(A)

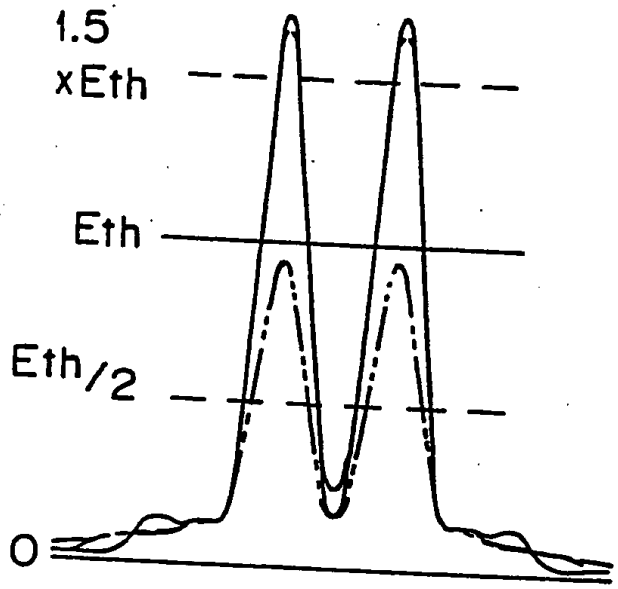

Fig. 6(B)

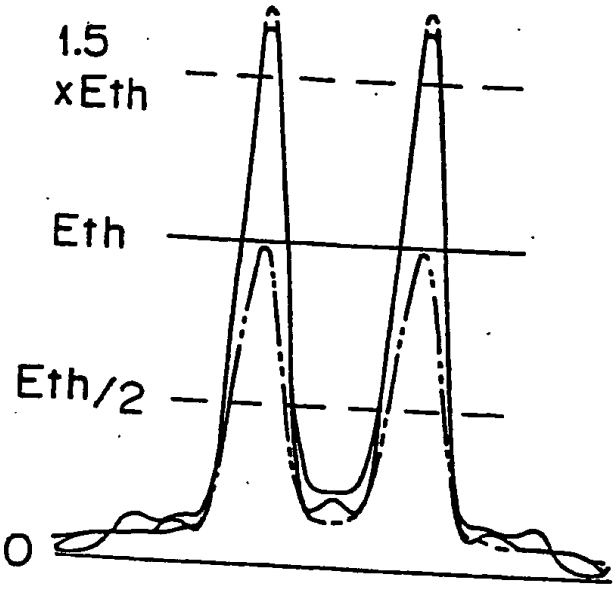

Fig. 7(A)

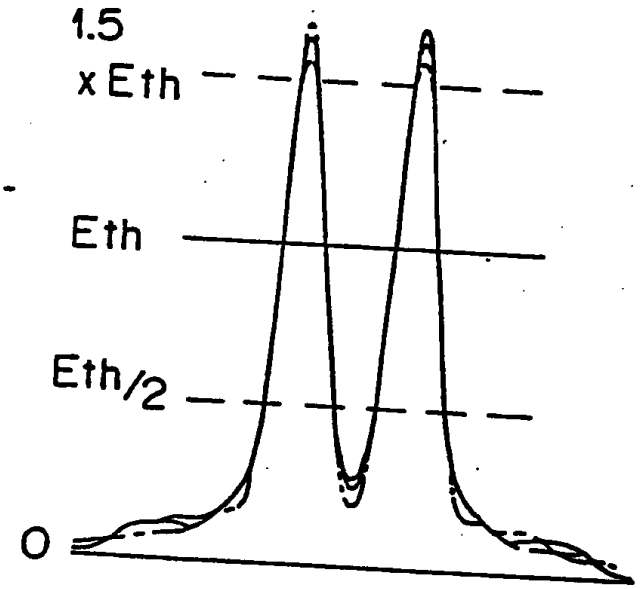

Fig. 7(B)

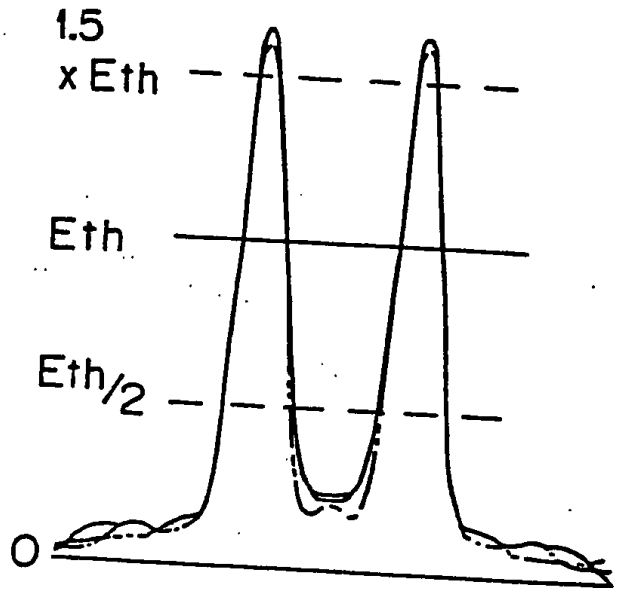

Fig. 8(A)

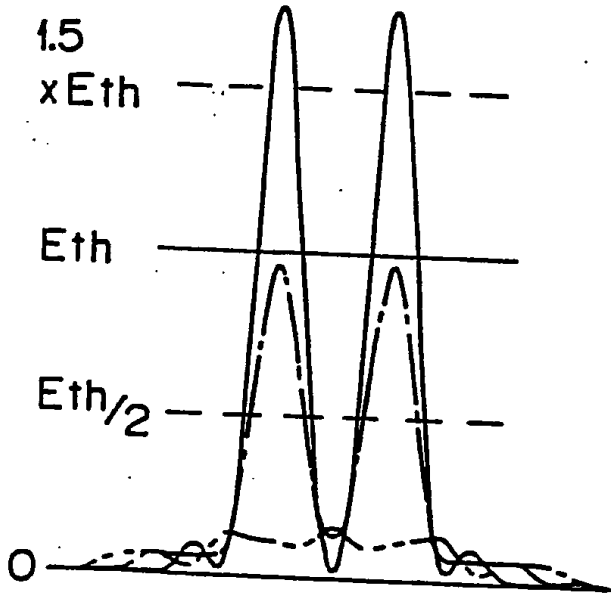

Fig. 8(B)

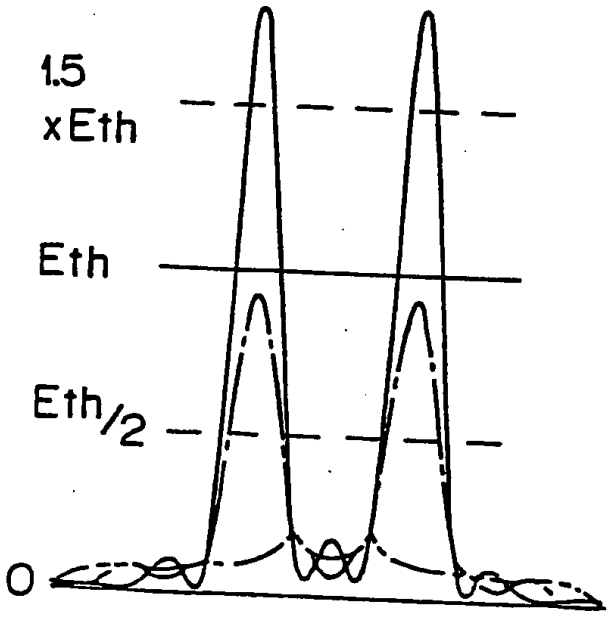

Fig. 9(A)

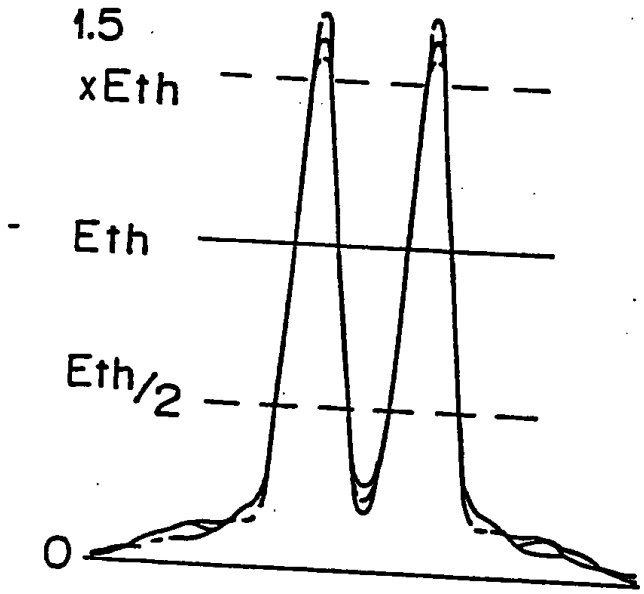

Fig. 9(B)

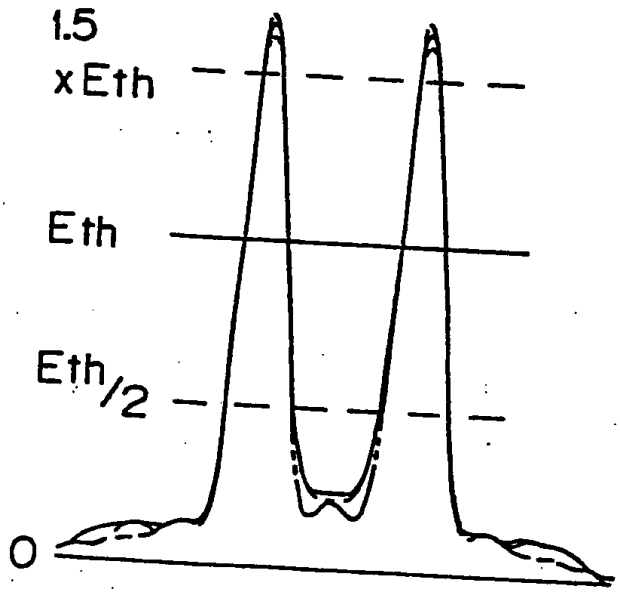

Fig. 10(A)

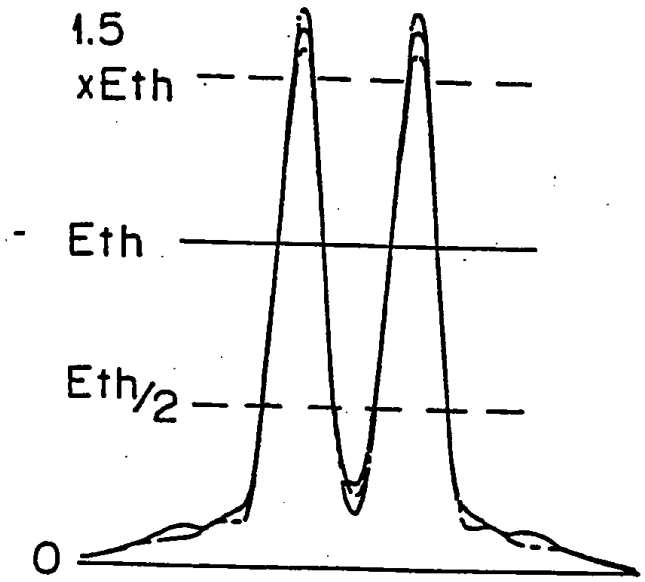

Fig. 10(B)

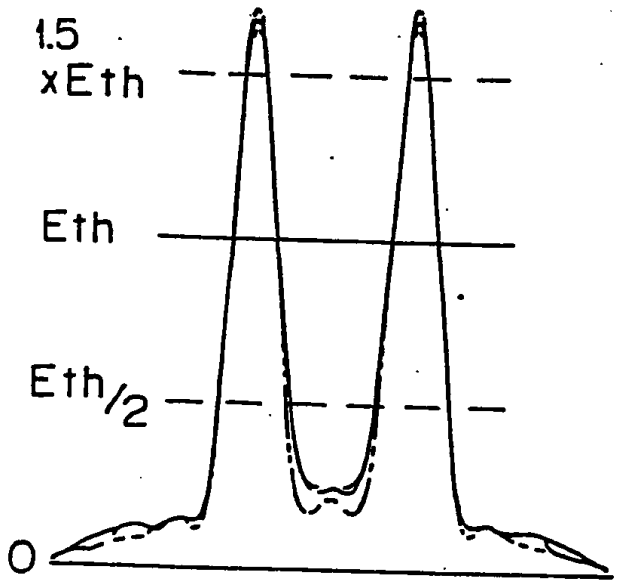

Fig. 11(A)

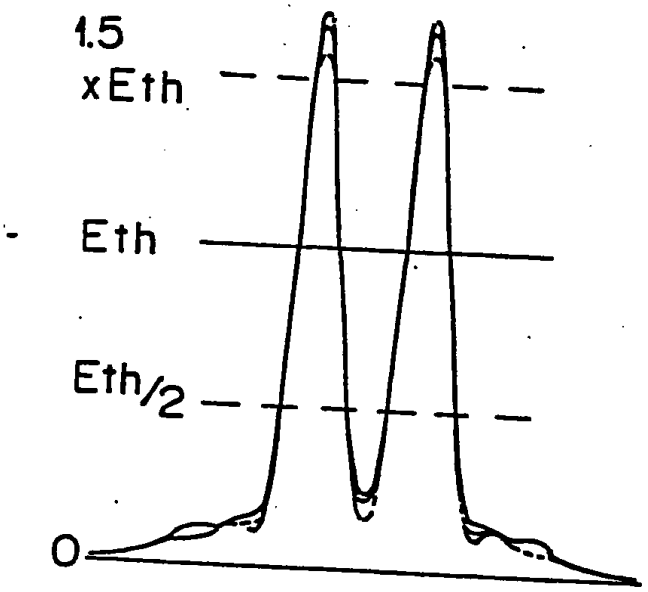

Fig. 11(B)

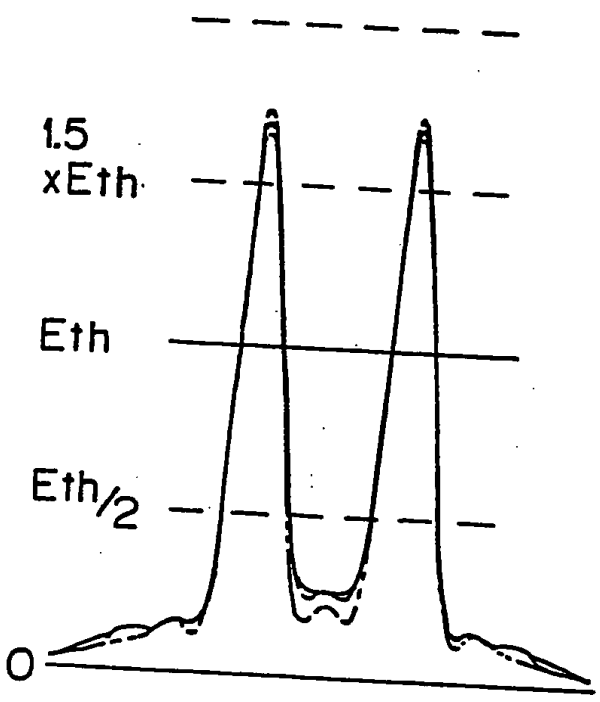

Fig. 12(A)

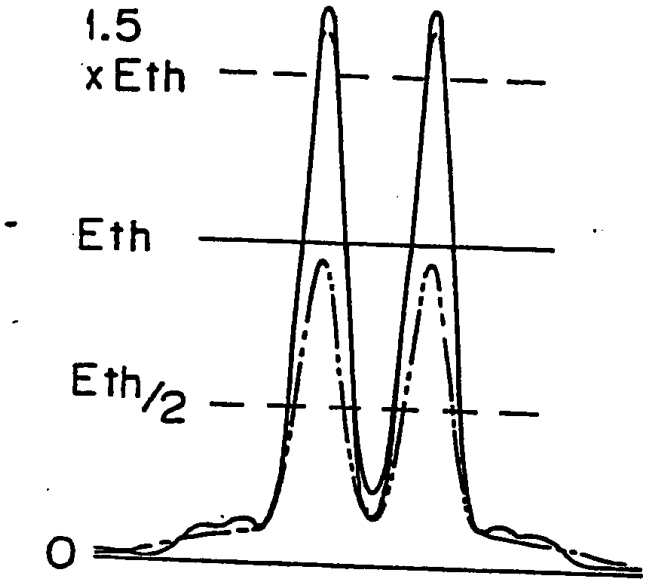

Fig. 12(B)

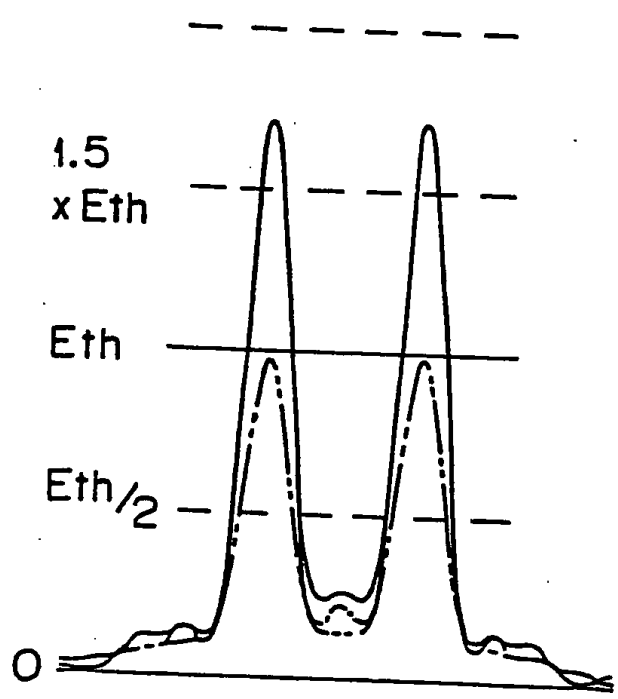

Fig. 13(A)

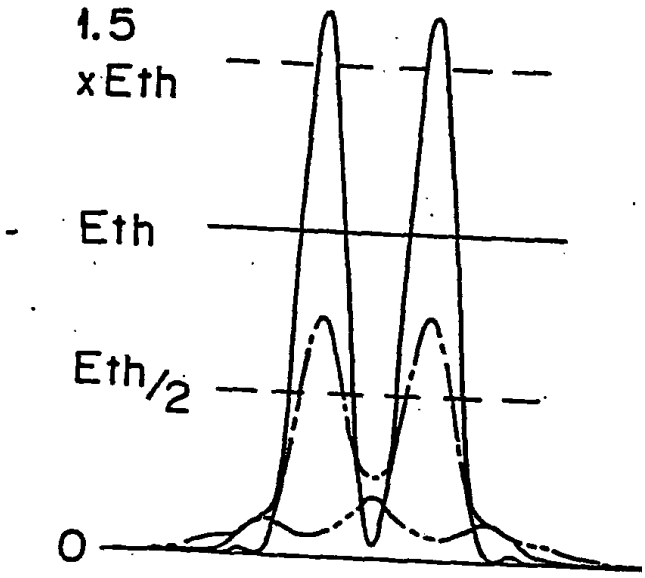

Fig. 13(B)

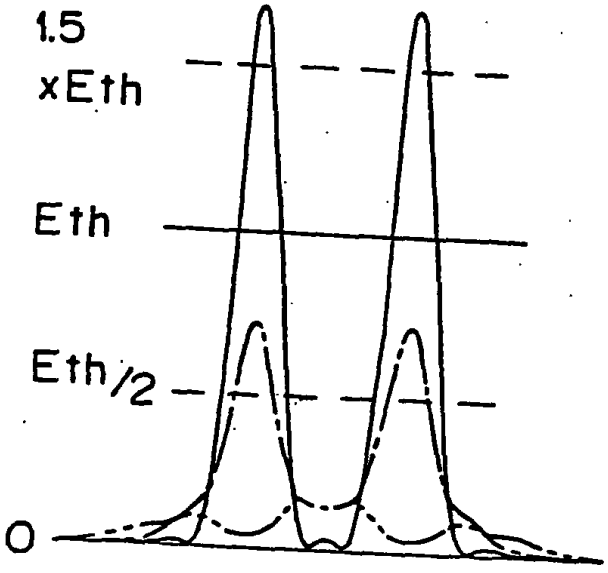

Fig. 14(A)

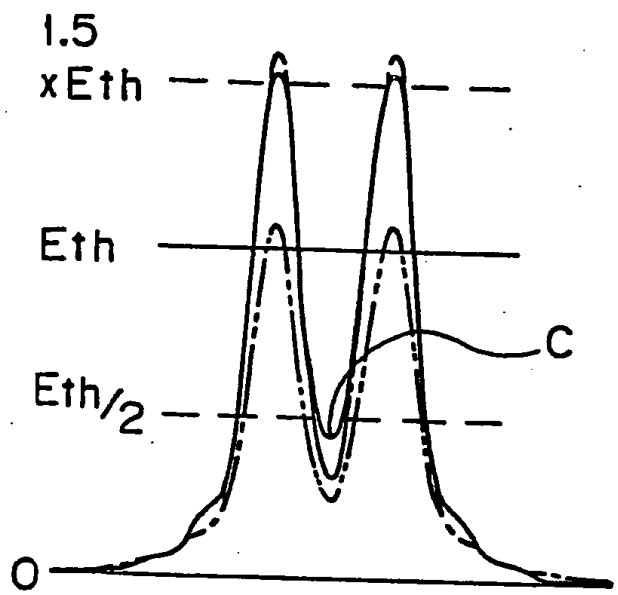

Fig. 14(B)

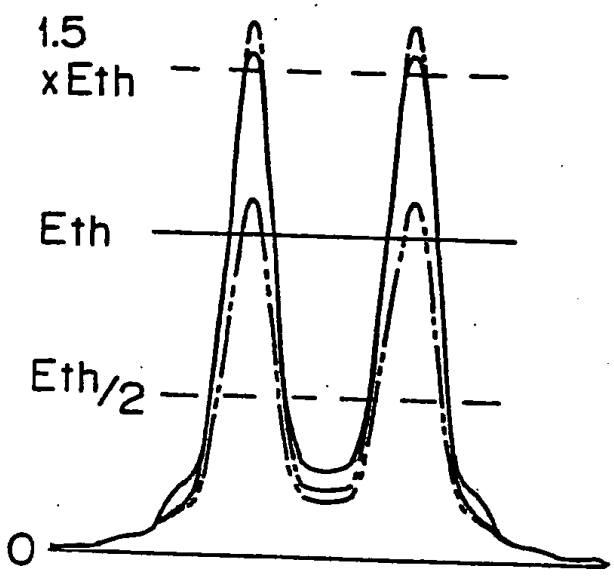

Fig. 15(A)

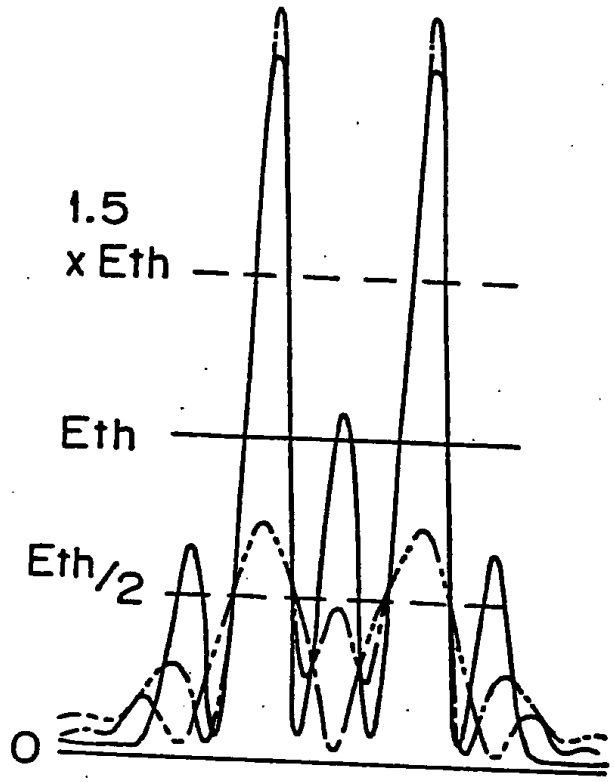

Fig. 15(B)

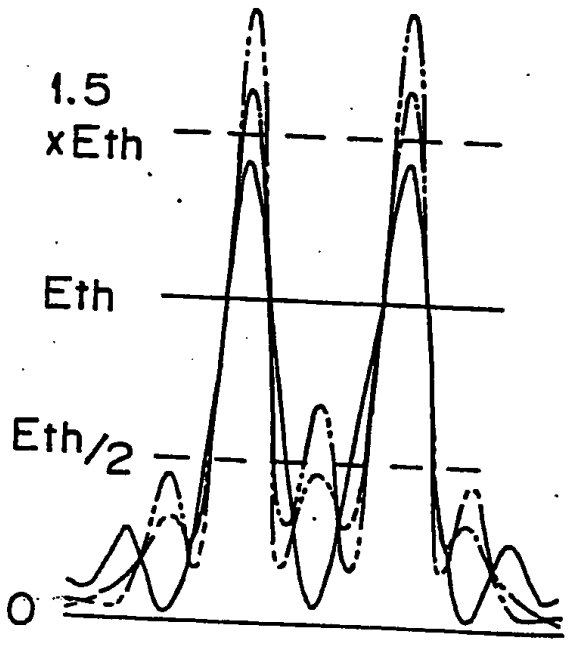

Fig. 16(A)

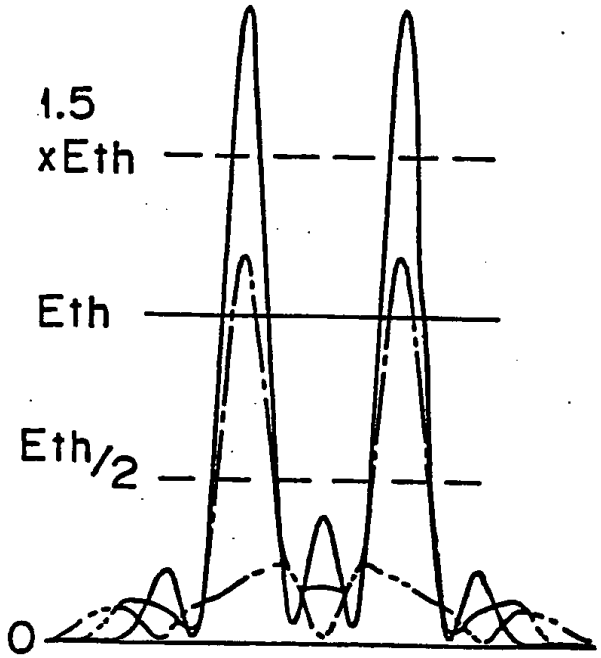

Fig. 16(B)

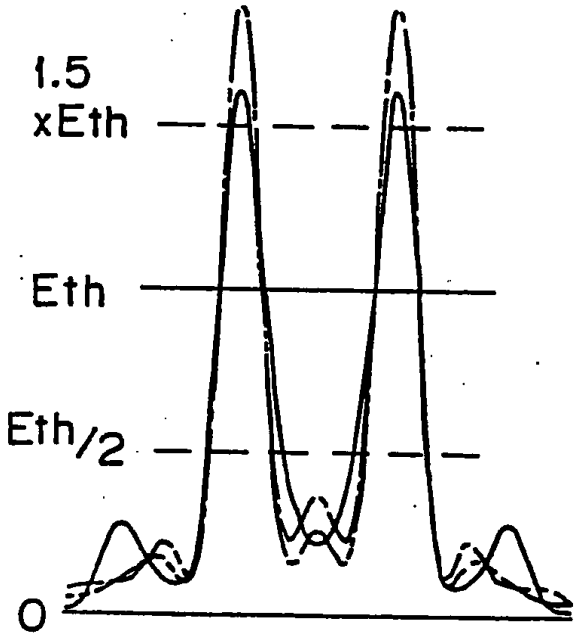

Fig. 17(A)

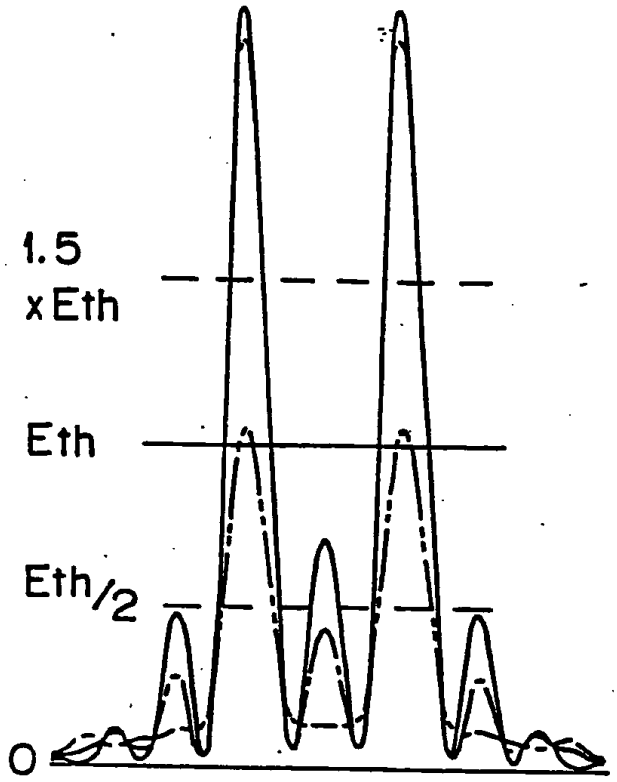

Fig. 17(B)

