



(19)
Bundesrepublik Deutschland
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 601 12 355 T2 2006.06.01**

(12)

Übersetzung der europäischen Patentschrift

(97) **EP 1 152 288 B1**

(21) Deutsches Aktenzeichen: **601 12 355.7**

(96) Europäisches Aktenzeichen: **01 303 850.0**

(96) Europäischer Anmeldetag: **27.04.2001**

(97) Erstveröffentlichung durch das EPA: **07.11.2001**

(97) Veröffentlichungstag

der Patenterteilung beim EPA: **03.08.2005**

(47) Veröffentlichungstag im Patentblatt: **01.06.2006**

(51) Int Cl.⁸: **G03F 1/00 (2006.01)**

G03F 1/14 (2006.01)

G03F 7/20 (2006.01)

(30) Unionspriorität:

562445 01.05.2000 US

(73) Patentinhaber:

ASML MaskTools B.V., Veldhoven, NL

(74) Vertreter:

**WUESTHOFF & WUESTHOFF Patent- und
Rechtsanwälte, 81541 München**

(84) Benannte Vertragsstaaten:

DE, FR, GB, IT, NL

(72) Erfinder:

**Chen, Jang-Fung, Cupertino, California 95014, US;
Petersen, John S., Austin, Texas 78759, US**

(54) Bezeichnung: **Verfahren zum Entwurf und Verfahren zur Verwendung einer Phasenverschiebungsmaske**

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 betrifft allgemein die Lithographie und insbesondere den Entwurf, die Auslegung und die Herstellung von Phasenschiebmasken, die bei der Herstellung von Halbleiter- und anderen Vorrichtungen verwendet werden können.

[0002] Die vorliegende Erfindung betrifft auch die Verwendung solcher Masken in einem lithographischen Apparat, der z. B. aufweist:

- ein Bestrahlungssystem zum Liefern eines aus Strahlung bestehenden Projektionsstrahles;
- einen Maskentisch zum Halten einer Maske;
- einen Substrattisch zum Halten eines Substrats; and
- ein Projektionssystem zum Projizieren wenigstens eines Teils eines Musters auf der Maske auf einen Zielabschnitt des Substrats.

Hintergrund der Erfindung

[0003] Lithographische Apparate können z. B. bei der Herstellung von integrierten Schaltungen (ICs) verwendet werden. In einem solchen Fall kann die Maske ein einzelnes Schaltungsmuster enthalten, und dieses Muster kann auf einen Zielabschnitt (der z. B. einen oder mehrere Chips aufweist) auf einem Substrat (Silizium-Wafer) abgebildet werden, das mit einer Schicht aus strahlungsempfindlichem Material (Resist) beschichtet worden ist. Im Allgemeinen enthält ein einziger Wafer ein ganzes Netzwerk benachbarter Zielabschnitte, die durch das Projektionssystem nacheinander jeweils einzeln bestrahlt werden. Bei einem Typ von lithographischen Projektionsapparaten wird jeder Zielabschnitt durch Belichten des gesamten Maskenmusters auf den Zielabschnitt auf einmal bestrahlt. Ein solcher Apparat wird im Allgemeinen als ein Wafer-Stepper bezeichnet. Bei einem im Allgemeinen als ein Step-and-Scan-Apparat bezeichneten alternativen Apparat wird jeder Zielabschnitt durch allmähliches Abtasten des Maskenmusters unter dem Projektionsstrahl in einer gegebenen Bezugsrichtung (der "Abtast"-Richtung) bestrahlt, während der Substrattisch parallel oder antiparallel zu dieser Richtung synchron abgetastet wird. Da das Projektionssystem im Allgemeinen einen Vergrößerungsfaktor M aufweist (im Allgemeinen < 1), ist die Geschwindigkeit V , mit der der Substrattisch abgetastet wird, ein Faktor M mal derjenigen, mit der der Maskentisch abgetastet wird. Weitere Informationen hinsichtlich lithographischer Geräte wie hier beschrieben können z. B. aus der US 6,046,792 entnommen werden.

[0004] Bei einem Herstellungsprozess unter Verwendung eines lithographischen Projektionsapparats wird ein Maskenmuster auf ein Substrat abgebildet, das wenigstens teilweise mit einer Schicht aus strah-

lungsempfindlichem Material (Resist) bedeckt ist. Vor diesem Abbildungsschritt kann das Substrat verschiedenen Vorgängen unterzogen werden, wie z. B. Vorbereitung, Beschichtung mit Resist und einem Soft Bake (leichten Trocknen). Nach der Belichtung kann das Substrat anderen Vorgängen unterzogen werden, wie z. B. einem Post Exposure Bake (PEB, Trocknen nach der Belichtung), einer Entwicklung, einem Hard Bake (starken Trocknen) und einer Messung/Inspektion der abgebildeten Merkmale. Diese Reihe von Vorgängen wird als Basis zur Musterung einer einzelnen Schicht einer Vorrichtung, z. B. eines IC, verwendet. Eine solche gemusterte Schicht kann dann verschiedenen Prozessen unterzogen werden wie z. B. Ätzen, Ionenimplantation (Dotieren), Metallisierung, Oxidation, chemo-mechanisches Polieren usw., die alle dazu vorgesehen sind, eine einzige Schicht zu vollenden. Sind mehrere Schichten erforderlich, muss der gesamte Vorgang oder eine seiner Varianten für jede neue Schicht wiederholt werden. Schließlich sind auf dem Substrat (Wafer) eine Reihe von Vorrichtungen vorhanden. Diese Vorrichtungen werden dann durch eine Technik wie z. B. Zerschneiden oder Zersägen voneinander getrennt, wodurch die einzelnen Vorrichtungen auf einem Träger montiert, an Stifte angeschlossen werden können usw. Weitere Informationen bezüglich solcher Prozesse sind z. B. dem Buch "Microchip Fabrication: A Practical Guide to Semiconductor Processing", dritte Ausgabe, von Peter van Zant, McGraw Hill Publishing Co., 1997, ISBN 0-07-067250-4, zu entnehmen.

[0005] Der Einfachheit halber kann das Projektionssystem nachstehend als die "Linse" bezeichnet werden, diese Bezeichnung ist jedoch allgemein als verschiedene Typen von Projektionssystemen einschließlich z. B. Brechungsoptik-, Spiegeloptik- und Spiegellinsensysteme umfassend auszulegen. Das Bestrahlungssystem kann auch Komponenten enthalten, die gemäß einer dieser Entwurfsarten arbeiten, um den aus Strahlung bestehenden Projektionsstrahl zu richten, formen oder steuern, und diese Komponenten können nachstehend zusammen oder einzeln auch eine "Linse" bezeichnet werden. Ferner kann der lithographische Apparat einem Typ angehören, der zwei oder mehr Substrattische (und/oder zwei oder mehr Maskentische) aufweist. Bei solchen "Mehrstufen"-Vorrichtungen können die zusätzlichen Tische parallel verwendet werden oder es können Vorbereitungsschritte an einem oder mehreren Tischen ausgeführt werden, während ein oder mehrere andere Tische für Belichtungen verwendet werden. Zweistufige lithographische Apparate sind z. B. in der US 5,969,441 und WO 98/40791 beschrieben.

[0006] Obwohl in diesem Text speziell auf die Verwendung lithographischer Apparate und Masken bei der Herstellung von ICs verwiesen werden kann, soll ausdrücklich klar sein, dass solche Apparate und Masken andere mögliche Anwendungen haben. Sie

können z. B. bei der Herstellung von integrierten optischen Systemen, Leit- und Detektionsmustern für Magnetblasenspeicher, Flüssigkristall-Anzeigetafeln, Dünnfilm-Magnetköpfen usw. verwendet werden. Der Fachmann wird erkennen, dass im Kontext solcher alternativer Anwendungen jede Verwendung der Bezeichnungen "Retikel", "Wafer" oder "Chip" in diesem Text als durch die allgemeineren Bezeichnungen "Maske", "Substrat" bzw. "Zielabschnitt" ersetzt betrachtet werden soll.

[0007] Im vorliegenden Dokument sind die Bezeichnungen "Strahlung" und "Strahl" als alle Typen elektromagnetischer Strahlung einschließlich ultravioletter Strahlung (z. B. mit einer Wellenlänge von 365, 248, 193, 157 oder 126 nm) und EUV (Extrem-Ultraviolettstrahlung, z. B. mit einer Wellenlänge im Bereich von 5–20 nm) umfassend verwendet.

[0008] Eine lithographische Maske kann typischerweise in einem vorgegebenen Muster ausgebildete lichtundurchlässige und transparente Zonen enthalten. Die Belichtungsstrahlung belichtet das Maskenmuster auf eine auf dem Substrat gebildete Resist-schicht. Dieses Resist wird dann entwickelt, um entweder die belichteten Resistabschnitte bei einem Positivresist oder die unbelichteten Resistabschnitte bei einem Negativresist zu entfernen. Dies bildet auf dem Substrat ein Resistmuster. Eine Maske kann typischerweise eine transparente Platte (z. B. aus Quarzglas) mit auf der Platte angeordneten lichtundurchlässigen (Chrom-) Elementen, die zum Begrenzen eines Musters verwendet werden, aufweisen. Eine Strahlungsquelle bestrahlt die Maske gemäß hinreichend bekannten Verfahren. Die die Maske und die Projektionsoptik des lithographischen Apparates transversierende Strahlung bildet ein diffraktionsbegrenztes Patentes Abbild der Maskenmerkmale auf dem Fotoresist (lichtempfindlichen Abdeckmittel). Dieses kann dann in nachfolgenden Herstellungsprozessen wie z. B. Ablagerungs-, Ätz- oder Ionenimplantationsprozessen verwendet werden, um integrierte Schaltungen und andere sehr kleine Merkmale aufweisende Vorrichtungen auszubilden.

[0009] Während die Halbleiterherstellung zur Ultrahochintegration (ultra-large scale integration, ULSI) hin fortschreitet, schrumpfen die Vorrichtungen auf Halbleiterwafern auf Sub-Mikronabmessungen, und die Schaltdichte erhöht sich auf mehrere Millionen Transistoren pro Chip. Um diese hohe Vorrichtungspackungsdichte zu erreichen, sind immer kleinere Merkmalgrößen erforderlich. Dies kann die Breite und den Abstand von Verbindungslinien und die Oberflächengeometrie wie z. B. Ecken und Kanten verschiedener Merkmale beinhalten.

[0010] Während die Mindestnenngrößen der Merkmale weiterhin abnehmen, wird die Kontrolle der Unbeständigkeit dieser Merkmalgrößen kritischer. Die

Empfindlichkeit gegebener kritischer Abmessungen gemusterter Merkmale gegen Belichtungswerkzeug- und Maskenherstellungsmängel sowie gegen die Unbeständigkeit des Resist- und Dünnfilmprozesses erlangt größere Bedeutung. Zur weiteren Entwicklung realisierbarer Prozesse im Lichte dieser beschränkten Fähigkeit, die Unbeständigkeit von Belichtungswerkzeug- und Maskenherstellungsparametern zu verringern, ist es wünschenswert, die Empfindlichkeit kritischer Abmessungen gemusterter Merkmale gegen diese Parameter zu verringern.

[0011] Mit abnehmenden Merkmalgrößen sind Halbleitervorrichtungen typischerweise kostengünstiger herzustellen und leistungsfähiger. Zur Erzeugung kleinerer Merkmalgrößen ist ein Belichtungswerkzeug mit einer hinreichenden Auflösung und Fokustiefe, die mindestens so tief ist wie die Dicke der Fotoresistschicht, erwünscht. Bei Belichtungswerkzeugen, die eine herkömmliche oder schräge Bestrahlung verwenden, lässt sich z. B. eine bessere Auflösung durch Verringerung der Wellenlänge der belichtenden Strahlung oder durch Erhöhung der numerischen Apertur des lithographischen Belichtungsapparates erreichen.

[0012] Der Fachmann wird erkennen, dass sich die Auflösung im Verhältnis zur Belichtungswellenlänge verändert und sich im umgekehrten Verhältnis zur numerischen Apertur (NA) des Projektionsoptiksystems ändert. Die NA ist ein Maß für die Fähigkeit einer Linse, gebeugte Strahlung von einer Maske zu sammeln und sie auf den Wafer zu projizieren. Die Auflösungsgrenze R (nm) bei einer fotolithographischen Technik, die ein Verkleinerungsbelichtungsverfahren anwendet, wird durch folgende Gleichung beschrieben:

$$R = k_1 \lambda / (NA)$$

wobei:

λ die Wellenlänge (nm) der Belichtungsstrahlung ist;
 NA die numerische Apertur der Linse ist; und
 k_1 eine unter anderem vom Typ des verwendeten Resists abhängige Konstante ist.

[0013] Es folgt, dass eine Möglichkeit zur Erhöhung der Auflösungsgrenze in der Erhöhung der numerischen Apertur (hohe NA) besteht. Dieses Verfahren hat jedoch wegen einer damit verbundenen Abnahme der Fokustiefe, Schwierigkeit beim Entwurf von Linsen und Komplexität bei der Linsenherstellungstechnologie selbst Nachteile. Ein alternativer Ansatz ist die Verringerung der Wellenlänge der Belichtungsstrahlung zur Ausbildung feinerer Muster, z. B. zur Unterstützung einer Erhöhung der Integrationsdichte von LSI- (Großintegrations-) Vorrichtungen. Ein 1-Gbit-DRAM benötigt z. B. ein 0,2-Mikrometer-Muster, wogegen ein 4-Gbit-DRAM ein 0,1-Mikrome-

ter-Muster benötigt. Zur Verwirklichung dieser Muster kann eine Belichtungsstrahlung mit kürzeren Wellenlängen verwendet werden.

[0014] Wegen der größeren Komplexität der Halbleitervorrichtung, die zu einer höheren Komplexität des Musters führt, und wegen der höheren Musterpackungsdichte auf einer Maske hat sich jedoch der Abstand zwischen beliebigen zwei lichtundurchlässigen Maskenbereichen verringert. Durch Verringern der Abstände zwischen den lichtundurchlässigen Bereichen werden kleine Öffnungen ausgebildet, die die durch die Öffnungen fallende Strahlung beugen. Die gebeugte Strahlung führt zu Wirkungen, die dazu neigen, die Strahlung zu verbreitern oder abzulenken, während sie hindurchfällt, so dass der Zwischenraum zwischen den zwei lichtundurchlässigen Bereichen nicht aufgelöst ist. Auf diese Weise ist die Diffraktion ein ernstlicher einschränkender Faktor für die optische Fotolithographie.

[0015] Ein herkömmliches Verfahren zum Umgang mit Diffraktionswirkungen in der optischen Fotolithographie betrifft die Verwendung einer Phasenschiebemaske, die die vorher besprochene Maske ersetzt. Angesichts dessen, dass die Strahlung als eine Welle angesehen wird, ist die Phasenschiebung im Allgemeinen eine Änderung des zeitlichen Ablaufs (Phase) eines regulären sinusförmigen Musters von Strahlungswellen, die sich durch ein transparentes Material ausbreiten. Obwohl sich der Rest dieser Beschreibung im Allgemeinen auf durchlässige Phasenschiebemasken konzentriert wird, sollte klar sein, dass reflektierende Phasenschiebemasken (z. B. zur Verwendung mit den mit EUV-Strahlung verbundenen Wellenlängen) ebenfalls vorgesehen werden können. Die vorliegende Erfindung umfasst beide dieser Konzepte.

[0016] Typischerweise wird eine Phasenschiebung erreicht, indem Strahlung durch Bereiche eines lichtundurchlässigen Materials entweder mit verschiedener Dicke oder durch Materialien mit verschiedenen Brechungsindizes oder beides geschickt wird, wodurch die Phase oder das periodische Muster der Strahlungswelle geändert wird. Phasenschiebemasken verringern Diffraktionswirkungen, indem sie gebeugte Strahlung und phasenverschobene gebeugte Strahlung kombinieren, so dass konstruktive und destruktive Interferenz vorteilhaft stattfinden. Im Durchschnitt ist eine Mindestbreite eines durch Verwendung einer Phasenschiebemaske aufgelösten Musters ungefähr die Hälfte der Breite eines durch Verwendung einer gewöhnlichen Maske aufgelösten Musters.

[0017] Es gibt mehrere verschiedene Typen von Phasenschiebestrukturen. Zu diesen Typen gehören Phasenschiebestrukturen mit alternierender Öffnung (alternating aperture phase shift structures), Subauf-

lösungs-Phasenschiebestrukturen (sub-resolution phase shift structures), Randphasenschiebestrukturen (rim phase shift structures) und chromfreie Phasenschiebestrukturen (chromeless phase shift structures). "Alternierende Phasenschiebung" ist ein räumliches Frequenzreduzierungskonzept, das durch ein Muster aus durch eine Phasenschiebeschicht abwechselnd bedeckten Merkmalen gekennzeichnet ist. Die "Subauflösungs-Phasenschiebung" fördert die Kantenintensitätsausschaltung durch Platzieren eines Subauflösungs-Merkmals neben einem Hauptmerkmal und Bedecken desselben mit einer Phasenschiebeschicht. Die "Randphasenschiebung" sieht einen Phasenschieber über einem Chrommaskenmuster übertragend vor.

[0018] Im Falle von durchlässigen Masken sind diese Phasenschiebestrukturen im Allgemeinen in Masken aufgebaut, die drei einzelne Materialschichten aufweisen. Eine lichtundurchlässige Schicht ist gemustert, um Sperrbereiche auszubilden, die keine Belichtungsstrahlung hindurchlassen. Eine transparente Schicht, typischerweise die Substratplatte (z. B. aus Quarz oder Kalziumfluorid) ist mit durchlässigen Bereichen gemustert, die nahezu 100 % der Belichtungsstrahlung hindurchlassen. Eine Phasenschiebeschicht ist mit Phasenschiebereichen gemustert, die nahezu 100 % der Belichtungsstrahlung hindurchlassen aber um 180° (π) phasenverschoben. Die durchlässigen und phasenschiebenden Bereiche sind so gelegen, dass die durch jeden Bereich gebeugte Belichtungsstrahlung in einem dazwischen liegenden abgedunkelten Bereich aufgehoben wird. Dies schafft das Muster aus dunklen und hellen Bereichen, die verwendet werden können, um Merkmale klar darzustellen. Diese Merkmale sind typischerweise durch die lichtundurchlässige Schicht (d. h. lichtundurchlässigen Merkmale) oder durch Öffnungen in der lichtundurchlässigen Schicht (d. h. klaren Merkmale) definiert.

[0019] Zur Herstellung von Halbleitern (und anderen Vorrichtungen) können typischerweise Phasenschiebemasken mit alternierender Öffnung verwendet werden, wo es mehrere Paare eng gepackter lichtundurchlässiger Merkmale gibt. In Situationen, in denen ein Merkmal jedoch zu weit von einem benachbarten Merkmal entfernt ist, um für eine Phasenschiebung zu sorgen, können typischerweise Subauflösungs-Phasenschiebestrukturen verwendet werden. Subauflösungs-Phasenschiebestrukturen können typischerweise für isolierte Merkmale wie z. B. Kontaktlöcher und Leitungsöffnungen verwendet werden, wobei die Phasenschiebestrukturen Hilfsschlitzlöcher und Auslegerstrukturen auf den Seiten eines Merkmals enthalten können. Subauflösungs-Phasenschiebestrukturen sind unterhalb der Auflösungsgrenze des lithographischen Systems und werden deshalb nicht auf dem Substrat gedruckt. Eine Unzulänglichkeit von Subauflösungs-Phasen-

schiebestrukturen besteht darin, dass sie auf der Maske eine relativ große Fläche einnehmen.

[0020] Randphasenschiebemasken enthalten Phasenschiebestrukturen, die am Rand der durch die lichtundurchlässigen Bereiche der Maske definierten Merkmale ausgebildet sind. Ein Problem in Verbindung mit Randphasenschiebestrukturen besteht darin, dass sie schwierig herzustellen sind. Im Falle von Randphasenschiebestrukturen müssen mehrfache lithographische Schritte verwendet werden, um die lichtundurchlässige Schicht freizulegen, so dass sie im Bereich des Randphasenschiebers weggeätzt werden kann. Dieser Schritt ist schwierig, da das im lithographischen Schritt verwendete Resist nicht nur die lichtundurchlässige Schicht bedeckt, sondern auch in das Substrat geätzte Gräben.

[0021] Im Allgemeinen ist die Verbesserung der Integrationsdichte von integrierten Halbleiterschaltungen in den vergangenen Jahren hauptsächlich durch eine Verringerung der Größe der verschiedenen Schaltungsmuster erreicht worden. Diese Schaltungsmuster werden gegenwärtig hauptsächlich durch lithographische Prozesse ausgebildet, die einen Wafer-Stepper oder Step-and-Scan-Apparat verwenden.

[0022] [Fig. 1](#) zeigt den Aufbau eines solchen lithographischen Apparats vom Stand der Technik. Eine Maske **108** wird durch eine von einem Bestrahlungssystem **102** ausgesandte Strahlung bestrahlt. Ein Abbild der Maske **108** wird auf einen auf den Wafer **120** aufgebracht Fotoresistfilm, der das durch das Projektionssystem **110** zu belichtende Substrat ist, projiziert. Wie in [Fig. 1](#) dargestellt, enthält das Bestrahlungssystem **102** eine Quelle **100**, eine Sammellinse **104** und eine Apertur **106** zum Bestimmen der Form und Größe der effektiven Quelle. Das Projektionssystem **110** enthält eine Projektionslinse **112**, einen Pupillenfilter **114** und eine Apertur **116**, die in oder nahe der Pupillenebene der Fokussierlinse **118** angeordnet ist, um die numerische Apertur (NA) der Linse festzulegen.

[0023] Wie früher besprochen, ist die Mindestmerkmalgröße R von durch ein optisches System übertragbaren Mustern ungefähr proportional der Wellenlänge λ der zur Belichtung verwendeten Strahlung und umgekehrt proportional zur numerischen Apertur (NA) des Projektionsoptiksystems. Deshalb wird R als $R = k_1 \lambda / NA$ ausgedrückt, wobei k_1 eine empirische Konstante ist und $k_1 = 0,61$ als die Rayleigh-Grenze bezeichnet wird.

[0024] Wenn sich die Musterabmessungen der Rayleigh-Grenze nähern, ist das projizierte Bild im Allgemeinen keine getreue Reproduktion der Form des Maskenmusters mehr. Diese Erscheinung wird durch so genannte optische Proximity-Effekte (OPEs = Na-

heffekte) verursacht und führt unter anderem zu Eckenabrundung, Linienendeverkürzung und Linienbreitenfehlern. Zur Lösung dieses Problems sind Algorithmen vorgeschlagen worden, die zur Vorverformung des Maskenmusters verwendet werden können, so dass die Form eines projizierten Abbilds die gewünschte Form annimmt.

[0025] Außerdem sind Ansätze beschrieben worden, die die Auflösungsgrenze eines gegebenen optischen Systems verbessern, was effektiv zu einem verringerten Wert von k_1 führt. Die Übernahme einer Phasenschiebemaske, wie oben beschrieben, ist ein typisches Beispiel für diesen Ansatz. Eine Phasenschiebemaske wird verwendet, um einen Phasenunterschied zwischen benachbarten Öffnungen einer herkömmlichen Maske vorzusehen.

[0026] Ein Verfahren mit einer chromfreien Phasenschiebemaske ist bekannt als ein Phasenschiebeprozess, das zur Übertragung eines feinen isolierten lichtundurchlässigen Linienmusters geeignet ist, das z. B. für das Gattermuster einer logischen LSI-Vorrichtung benötigt wird.

[0027] Bestrahlung unter Abstand von der Achse und Pupillenfilterung sind Verfahren, die zur Verbesserung von Abbildern zusätzlich bekannt sind. Gemäß dem Verfahren der Bestrahlung unter Abstand von der Achse wird die Durchlässigkeit der Apertur **106** im Bestrahlungssystem **102** von [Fig. 1](#) (Stand der Technik) geändert. Eine spezielle Ausführungsform dieses Verfahrens ändert das Bestrahlungsintensitätsprofil so, dass die Durchlässigkeit am Rand größer wird als die im zentralen Abschnitt, was zur Verbesserung der Auflösung eines periodischen Musters sowie der Fokustiefe besonders wirksam ist. Das Pupillenfilterungsverfahren ist ein Verfahren zur Durchführung der Belichtung durch einen Filter (Pupillenfilter), der an der Pupillenposition einer Projektionslinse angeordnet ist, um die Amplitude und/oder Phase der durchgelassenen Strahlung lokal zu ändern. Dieser Ansatz ermöglicht z. B. eine starke Vergrößerung der Fokustiefe eines isolierten Musters. Außerdem ist hinreichend bekannt, dass die Auflösung eines periodischen Musters durch Kombinieren des Verfahrens der Bestrahlung unter Abstand von der Achse und des Pupillenfilterungsverfahrens weiter verbessert werden kann.

[0028] Dennoch besteht ein inhärentes Problem bei einer herkömmlichen Durchlassungsmaske wie den oben beschriebenen darin, dass das Maskensubstrat (Platte) im Allgemeinen eine Verringerung der Durchlässigkeit erfährt, während die Wellenlänge der von einer Belichtungsstrahlungsquelle ausgesandten Strahlung verringert wird, um feinere Muster zu erhalten. Ein Substrat aus Quarzmaterial wird z. B. lichtundurchlässiger, während die Wellenlänge der Strahlungsquelle abnimmt, insbesondere, wenn die Wel-

lenlänge weniger als 200 nm beträgt. Diese Verringerung der Durchlässigkeit beeinträchtigt die Fähigkeit, feinere Auflösungsmuster zu erhalten. Aus diesem Grund wird ein Material für eine Durchlassungs-Phasenschiebemaske benötigt, die eine hohe Durchlässigkeit bezüglich Strahlung mit einer kurzen Wellenlänge erhalten kann. Ein solches Material mit einer hohen Durchlässigkeit bezüglich einer Belichtungsstrahlung mit kurzer Wellenlänge ist jedoch schwierig zu finden oder herzustellen.

[0029] Ein Beispiel für ein Fotomaskenmuster ist in [Fig. 2](#) dargestellt (Stand der Technik). Der Durchgang von Strahlung um die veranschaulichten Merkmale herum verursacht eine Diffraktion der Strahlung in getrennte dunkle und helle Bereiche. Die hellen Bereiche werden Beugungsordnungen genannt, und das Gesamtmuster, das sie bilden, ist mathematisch durch Nehmen der Fourier-Transformation der gesamten lichtundurchlässigen und transparenten Zonen beschreibbar. Das in seiner einfachsten Verkörperung beobachtete Muster hat eine starke Beugungsordnung, die als nullte Ordnung bezeichnet wird, die auf symmetrische Weise von weniger starken Beugungsordnungen umgeben ist. Diese weniger starken Ordnungen werden als die plus/minus erste (\pm erste) Ordnung usw. bis zu einer Unendlichkeit von Ordnungen bezeichnet. Bei derselben Merkmalsbreite werden für dichte und isolierte Merkmale verschiedene Diffraktionsmuster gebildet. [Fig. 3\(A\)](#) (Stand der Technik) zeigt die Größen relativer elektrischer Felder und jeweilige Pupillenpositionen (X) von Beugungsordnungen für ein dichtes Merkmal, wogegen [Fig. 3\(B\)](#) (Stand der Technik) die Größen von Beugungsordnungen für ein isoliertes zeigt. Die in jeder grafischen Darstellung beobachtete mittlere Spitze ist die nullte Ordnung.

[0030] Die nullte Ordnung enthält keine Informationen über das Muster, aus dem sie sich ergab. Die Informationen über das Muster sind in den nicht nullten Ordnungen enthalten. Die nullte Ordnung ist jedoch mit den höheren Ordnungen räumlich zusammenhängend, so dass beim Umleiten der Strahlen zu einem Brennpunkt diese miteinander interferieren und dabei ein Abbild des ursprünglichen Musters von lichtundurchlässigen und transparenten Objekten aufbauen. Werden alle Beugungsordnungen gesammelt, wird eine perfekte Darstellung des Ausgangsobjekts erhalten. Bei hochauflösender Lithographie von Merkmalen mit kleinem Abstand, bei der der Abstand die Summe der Breite der lichtundurchlässigen und transparenten Objekte ist, werden nur die nullten und \pm ersten Ordnungen von der Projektionslinse gesammelt, um das Abbild zu bilden, weil höhere Ordnungen mit größeren Winkeln gebeugt werden, die außerhalb der Linsenpupille fallen, wie durch die numerische Apertur (NA) festgelegt.

[0031] Wie in [Fig. 4\(A\)](#) (Stand der Technik) darge-

stellt, liegen die nullte Ordnung **402** und die \pm ersten Ordnungen **404** innerhalb der Linsenpupille **406**. Wie in [Fig. 4\(A\)](#) weiter dargestellt, liegen die + zweiten Ordnungen **408** außerhalb der Linsenpupille **406**. Wie in [Fig. 4\(B\)](#) (Stand der Technik) zu sehen ist, wird außerdem während der Belichtung ein entsprechendes Luftbild gebildet (I bedeutet Intensität und H bedeutet horizontale Position). Das Fotoresistmuster wird dann anhand dieses Luftbildes gezeichnet.

[0032] Es ist seit langem bekannt, dass es zum Bilden des Abbildes nur erforderlich ist, zwei Beugungsordnungen wie z. B. entweder mit der nullten Ordnung und mindestens einer der höheren Beugungsordnungen oder einfach zwei höheren Ordnungen ohne die nullte Ordnung zu sammeln.

[0033] Wie in [Fig. 5\(A\)](#) (Stand der Technik) dargestellt, wird durch eine Fokussierlinse **502** durchgelassene Strahlung durch diejenige dargestellt, die senkrecht **504** zum Objekt (nicht dargestellt) ist, und diejenige, die durch die Kanten **506**, **508** der Fokussierlinse **502** durchgelassen wird. Obwohl Strahlung fortlaufend durch die gesamte Oberfläche der Linse **502** durchgelassen wird, sind die drei Strahlungswege **504–508** dargestellt, um die Phasenübereinstimmung verschiedener Strahlungswege zu veranschaulichen. Bei Punkt **510** vereinigen sich die drei Strahlungswege **504–508** und sind miteinander phasengleich. Wenn sich die drei Strahlungswege **504**, **512** und **514** bei Punkt **516** vereinigen, sind sie jedoch nicht phasengleich. Der Phasenfehler aus einer Änderung der Weglängen von **512** und **514** von jeweiligen Weglängen **506** und **508** ergibt eine endliche Fokustiefe (DoF) des Systems.

[0034] Die Toleranz gegenüber Schwankungen des in [Fig. 5\(A\)](#) dargestellten, durch Aberrationen wie z. B. Defokussierung verursachten relativen Phasenfehlers lässt sich verbessern. [Fig. 5\(B\)](#) (Stand der Technik) stellt dar, wie durch Eliminieren des senkrecht zum Objekt angeordneten Strahlungswegs Schwankungen des Phasenfehlers verringert werden können. Obwohl Strahlung fortlaufend durch die Oberfläche der Linse **502** durchgelassen wird, sind die zwei Strahlungswege **506** und **508** dargestellt, um abermals die Phasenübereinstimmung verschiedener Strahlungswege zu veranschaulichen. Bei Punkt **510** vereinigen sich die zwei Strahlungswege **506** und **508** und sind miteinander phasengleich. Wenn sich die zwei Strahlungswege **512** und **514** bei Punkt **516** vereinigen, sind sie phasengleich. Ohne den in [Fig. 5\(A\)](#) zu sehenden Strahlungsweg **504** ist der Phasenfehler aus den gegenüber jeweiligen Weglängen **506** und **508** vergrößerten Weglängen **512** und **514** eliminiert, was zu einer unendlichen Fokustiefe, DoF, des Systems führt. Die Eliminierung des zum Objekt senkrechten Strahlungswegs kann durch Platzieren einer Abdunkelung in der Mitte der Strahlungsquelle erreicht werden, wodurch die zum Objekt

senkrechte Strahlung eliminiert wird und nur schräge Bestrahlung zugelassen wird, wie z. B. in [Fig. 6\(A\)](#) dargestellt.

[0035] [Fig. 6\(A\)](#) (Stand der Technik) stellt ein lithographisches "axiales" Projektionssystem dar ("C" bedeutet conventional = herkömmlich), bei dem die Bestrahlungskonfiguration **602** so ausgelegt ist, dass die Durchlassung der zum Objekt senkrechten Strahlung möglich ist. In der Figur geht Strahlung durch das ein Quarzsubstrat **604** und Chrommuster **606** umfassendes Retikel, durch die Linsenöffnung **608**, in die Linse **610** und wird in den Bereich **612** fokussiert. [Fig. 6\(B\)](#) (Stand der Technik) stellt ein beispielhaftes lithographisches System zur Projektion unter Abstand von der Achse dar, bei dem eine ringförmige (A) Bestrahlungskonfiguration **614** oder Quadrupol-(Q-) Bestrahlungskonfiguration **616** die Durchlassung der zum Objekt senkrechten Strahlung verhindert. In der Figur geht Strahlung durch das glasartige Substrat **604** an den Chrommustern **606** vorbei, durch die Linsenöffnung **608**, in die Linse **610** und wird in den Bereich **618** fokussiert. Beim Vergleich der [Fig. 6\(A\)](#) und [Fig. 6\(B\)](#) wird bemerkt, dass die Fokustiefe (DoF) von [Fig. 6\(A\)](#) kleiner ist als die von [Fig. 6\(B\)](#).

[0036] Senken der Größe der nullten Ordnung so, dass sie dieselbe oder kleiner als die der ersten Ordnung ist, verbessert die Abbildungstoleranz dieses Zwei-Strahl-Abbildungssystems. Ein Verfahren zum Abstimmen der Größe der Beugungsordnungen besteht in der Verwendung schwacher Phasenschiebemasken. Starke Phasenschiebemasken und schwache Phasenschiebemasken unterscheiden sich in Funktionsweise und Wirkung.

[0037] Starke Phasenschiebemasken eliminieren die Null-Beugungsordnung und verdoppeln die Auflösung durch eine Frequenzverdoppelungstechnik. Um zu verstehen, wie starke Phasenschieber wirken, ist es nützlich, sich den kritischen Abstand so vorzustellen, als habe er abwechselnde klare Bereiche neben dem lichtundurchlässigen Hauptmerkmal. Wegen der Zonen mit abwechselnder Phase wird der Abstand zwischen gleichphasigen Zonen verdoppelt. Diese Verdoppelung halbiert die Position, in der die Beugungsordnungen andernfalls durch die Projektionslinse relativ zum kritischen Abstand gehen würden, wodurch sie es ermöglicht, Merkmale mit dem halben durch herkömmliches Abbilden zulässigen Abstand abzubilden. Wenn sich die zwei einander entgegengesetzten Phasenzonen durch destruktive Interferenz summieren, um das endgültige Abbild aufzubauen, hat ihre jeweilige Nullordnungs-Strahlung die gleiche Größe aber entgegengesetzte Phase, wodurch sie einander aufheben. Abbilden erfolgt nur mit den frequenzverdoppelten höheren Ordnungen. Andererseits dämpfen schwache Phasenschiebemasken die Nullordnungs-Strahlung und steigern die hö-

heren Ordnungen. Schwache Phasenschiebemasken bilden ihre Phasenschiebung zwischen benachbarten Merkmalen durch Schaffung elektrischer Felder mit ungleicher Größe und entgegengesetzter Phase, wobei das unmittelbar an ein kritisches Merkmal angrenzende Feld die kleinere Größe hat. Das elektrische Nettopfeld reduziert die Größe der Nullordnung, während es die geeignete Phase beibehält.

[0038] Schwache Phasenschiebemasken erlauben den Durchgang einer Menge Belichtungsstrahlung durch Objekte auf eine Weise, die einen Phasenunterschied zwischen kohärent verbundenen Punkten erzeugt, während ein Ungleichgewicht im elektrischen Feld zwischen den verschobenen Zonen vorhanden ist. [Fig. 7\(A\)](#) (Stand der Technik) stellt ein Substrat **702** und ein Maskenmuster **704** dar, das Phasenschiebung nicht ermöglicht. [Fig. 7\(C\)](#) (Stand der Technik) ist eine grafische Veranschaulichung, inwiefern die Größe der nullten Ordnung größer ist als diejenige der Größe der \pm ersten Ordnungen von einer wie in [Fig. 7\(A\)](#) dargestellten nicht phasenschiebenden Maske. [Fig. 7\(B\)](#) (Stand der Technik) stellt ein Substrat **702** und ein Maskenmuster **706** dar, die eine Phasenschiebung ermöglichen (in der Figur ist ϕ die Phase, t die Dicke, n der Brechungsindex und λ die Wellenlänge). [Fig. 7\(D\)](#) (Stand der Technik) ist eine grafische Veranschaulichung, inwiefern die Größe der nullten Ordnung verkleinert ist, um mit derjenigen der Größe der \pm ersten Ordnungen von einer wie in [Fig. 7\(B\)](#) dargestellten Phasenschiebemaske vergleichbar zu sein.

[0039] Mehrere Arten von Phasenschiebemasken sind im Stand der Technik bekannt, wie z. B. die Rand-, abgeschwächte oder eingebettete (oder inkorrekt Raster-) und unabgeschwächte oder chromfreie (oder transparente) Schieber-Blenden-Phasenschiebemasken (shifter-shutter phase shift masks).

[0040] [Fig. 8\(A\)](#) (Stand der Technik) ist eine Querschnittansicht einer Randphasenschiebemaske **802**, die strahlungsdurchlassende Abschnitte **804** und strahlungshemmende Abschnitte **806** aufweist. [Fig. 8\(B\)](#) (Stand der Technik) ist eine grafische Darstellung der Amplitude (E) des E-Feldes an der Maske, wohingegen [Fig. 8\(C\)](#) (Stand der Technik) ein Schaubild ist, das die Größe der nullten Beugungsordnung **810** und \pm ersten Ordnungen **812**, **814**, die sich aus der Verwendung der in [Fig. 8\(A\)](#) dargestellten Maske ergeben, darstellt.

[0041] [Fig. 9\(A\)](#) (Stand der Technik) ist eine Querschnittansicht einer abgeschwächten oder eingebetteten Phasenschiebemaske **902** mit einer Abschwächung von 5 %, die einen strahlungsabschwächenden Abschnitt **904** aufweist. [Fig. 9\(B\)](#) (Stand der Technik) ist eine grafische Darstellung der Amplitude des E-Feldes an der Maske, wohingegen [Fig. 9\(C\)](#) (Stand der Technik) ein Schaubild ist, das die Größe

der nullten Beugungsordnung und \pm ersten Beugungsordnungen, die sich aus der Verwendung der in [Fig. 9\(A\)](#) dargestellten Maske ergeben, darstellt. [Fig. 9\(D\)](#) (Stand der Technik) ist eine Querschnittansicht einer abgeschwächten oder eingebetteten Phasenschiebemaske **912** mit einer Abschwächung von 10 %, die einen strahlungsabschwächenden Abschnitt **914** aufweist. [Fig. 9\(E\)](#) (Stand der Technik) ist eine grafische Darstellung der Amplitude des E-Feldes an der Maske, wohingegen [Fig. 9\(F\)](#) (Stand der Technik) ein Schaubild ist, das die Größe der nullten Beugungsordnung und \pm ersten Beugungsordnungen, die sich aus der Verwendung der in [Fig. 9\(D\)](#) dargestellten Maske ergeben, darstellt.

[0042] [Fig. 10\(A\)](#) (Stand der Technik) ist eine Querschnittansicht einer unabgeschwächten oder chromfreien (oder transparenten) Schieber-Blenden-Phasenschiebemaske **1002**, die einen strahlungsschiebenden Abschnitt **1004** aufweist. [Fig. 10\(B\)](#) (Stand der Technik) ist eine grafische Darstellung der Amplitude des E-Feldes an der Maske, wohingegen [Fig. 10\(C\)](#) (Stand der Technik) ein Schaubild ist, das die Größe der nullten Beugungsordnung **1006** und \pm ersten Beugungsordnungen **1008**, **1010**, die sich aus der Verwendung der in [Fig. 10\(A\)](#) dargestellten Maske ergeben, darstellt.

[0043] Die Phasenschiebemasken von [Fig. 8](#) bis [Fig. 10](#) bilden ihre Phasenschiebung typischerweise unterschiedlich, aber relativ zu ihrem nicht phasenverschobenen Gegenstück ergeben sie alle eine nullte Beugungsordnung mit einer kleineren Amplitude und eine erste Beugungsordnung mit einer größeren Amplitude hinsichtlich des elektrischen Feldes. Welches Verhältnis der ersten zur nullten Beugungsordnungsgröße optimal ist, hängt vom Abstand des abzubildenden Merkmals zusammen mit der Form der Bestrahlungskonfiguration und der gewünschten Druckgröße im entwickelten Fotoresist ab. Diese abgestimmten Diffraktionsmuster werden dann mit Bestrahlung unter Abstand von der Achse verwendet, um kleinere Abstände mit besserer Toleranz gegen die Abbildungsprozessschwankungen abzubilden.

[0044] Das Konzept der Manipulation des Amplitudenverhältnisses der nullten bis ersten Beugungsordnungen ist herkömmlicherweise auf die Verwendung bestimmter schwacher Phasenschiebetechniken mit Biasing-Merkmalen (biasing = Verbreiterung oder Verlängerung von Maskenmerkmalen) und Subauflösungs-Hilfsstrukturen beschränkt gewesen.

[0045] [Fig. 11\(A\)](#) (Stand der Technik) stellt eine zum Auflösen eines gewünschten Merkmals verwendete herkömmliche Biasing-Technik dar. Wie in [Fig. 11\(A\)](#) zu sehen ist, sind Biasing Bars (Verbreiterungsbalken) (B) **1102** und **1104** an die Maske des Hauptmerkmals **1106** angrenzend angeordnet. [Fig. 11\(B\)](#) stellt eine Raster-Biasing- (HB)-Technik

dar, die zum Auflösen eines gewünschten Merkmals verwendet wird, den Anmeldern der gegenwärtigen Anmeldung bekannt und im US-Patent US 6,114,071 beschrieben ist und nach Artikel **54** EPÜ nicht zum Stand der Technik gehört, sondern der WO 99/27420 A entspricht, die nach Artikel **54** EPÜ zum Stand der Technik gehört. Wie in [Fig. 11\(B\)](#) zu sehen ist, sind Raster-Biasing Bars **1108** und **1110** an die Maske des gewünschten Merkmals **1112** angrenzend angeordnet. [Fig. 12](#) (Stand der Technik) stellt eine herkömmliche Fotoresistmaske **1202** dar. Die Fotoresistmaske **1202** weist eine Mehrzahl Streubalken (scatter bars) **1204**, Serifen **1206** und Chromschilder **1208** auf. Die WO 99/47891 A offenbart eine ähnliche Technik.

[0046] Bei herkömmlichen abgeschwächten Phasenschiebern kann die Transparenz der Schiebermaterialien typischerweise angepasst und zusammen mit Biasing- und Subauflösungs-Hilfsmerkmalen verwendet werden. Die Transparenz der Schieber liegt typischerweise im Bereich von 3 % bis 10 %, wobei höhere Durchlassungen wie z. B. von 10 % bis 100 % als optimal für Abstände berichtet werden, bei denen der Zwischenraum zwischen den Merkmalen größer ist als die phasenverschobene Linie. [Fig. 13](#) (Stand der Technik) zeigt die Abhängigkeit des durch die normalisierte logarithmische Neigung des Abbildes (Normalized Image Log Slope, NILS) definierten Bildkontrastes bezüglich variierender Durchlässigkeit (T) des phasenverschobenen Materials für eine 175 nm-Linie auf einer 525 nm-Abstandsstruktur ([Fig. 13\(A\)](#)) und einer 1050 nm-Abstandsstruktur ([Fig. 13\(B\)](#)). Jede Kurve in der Figur stellt eine andere Einstellung des Fokus (F) dar. Die Kurve mit der größten NILS ist die am meisten fokussierte und hat den F-Wert Null. Mit jeder Fokusänderung nimmt ferner die NILS jeder jeweiligen Kurve ab. [Fig. 13\(A\)](#) zeigt, dass die beste Durchlassung für die 175 nm-Linie mit der 525 nm-Abstandsstruktur 0,35 bis 0,45 beträgt. [Fig. 13\(B\)](#) zeigt, dass die beste Durchlassung für die 175 nm-Linie mit der 1050 nm-Abstandsstruktur 0,25 bis 0,35 beträgt.

[0047] Ein Beispiel für eine zu 100 % transparente abgeschwächte Phasenschiebetechnologie ist die vorher erwähnte chromfreie Schieber-Blende (shifter-shutter), wie in [Fig. 10](#) abgebildet. Unter Verwendung einer chromfreien Schieber-Blende können Phasenkanten eines Musters typischerweise innerhalb eines Bereiches platziert werden, der das 0,2- bis 0,3-fache der Belichtungswellenlänge λ dividiert durch die numerische Apertur NA der Projektionslinse beträgt. Für Linien, die größer oder kleiner als dieser Wert sind, ist die destruktive Interferenz ungenügend, um eine Belichtung in einem nicht zu belichtenden Bereich zu verhindern. Drucken von Merkmalen, die größer als dieser Wert sind, wird auf eine von zwei Weisen erreicht. Die erste platziert eine lichtundurchlässige Schicht in der Zone, die dunkel bleiben soll, wobei die Merkmalkanten lichtundurchlässig

oder randverschoben sind (**Fig. 14**; Stand der Technik). Die wie in **Fig. 15** (Stand der Technik) dargestellte zweite erzeugt ein dunkles Gitter **1502** durch Platzieren einer Reihe von Merkmalen **1504**, deren Größe die Kriterien zum Drucken einer lichtundurchlässigen Linie **1506** mittels chromfreier Technologie erfüllt. In den **Fig. 14** und **Fig. 15** bedeutet "IM" (image) Abbild, "CPSM" (chromeless phase shift mask) bezeichnet eine chromfreie Phasenschiebemaske, "OP" (opaque) bedeutet lichtundurchlässig und "PS" (phase shift) bedeutet Phasenschiebung.

[0048] Chromfreie Phasenschiebemasken erfüllen herkömmlicherweise bei Belichtung unter Abstand von der Achse ihre Funktion nicht, wenn sich die Schieber- (Merkmal-) Größen und Blenden- (Zwischenraum-) Größen einander nähern. Die **Fig. 16(A)** bis **Fig. 16(C)** stellen eine herkömmliche chromfreie Phasenschiebemaske dar. In **Fig. 16(A)** (Stand der Technik) ist **1602** eine Querschnittsansicht eines Abschnitts einer herkömmlichen chromfreien Phasenschiebemaske, die Schieber **1604** und Blenden **1606** aufweist, wobei die Schieberlänge im Wesentlichen gleich der Blendenlänge ist. **Fig. 16(B)** (Stand der Technik) ist eine graphische Darstellung der Amplitude des E-Feldes an der Maske **1602**. **Fig. 16(C)** (Stand der Technik) ist ein Schaubild, das die Größen der \pm ersten Beugungsordnungen **1608** und **1610** für die Maske von **Fig. 16(A)** darstellt. Wie in **Fig. 16(C)** zu sehen ist, gibt es keine nullte Beugungsordnung. Die funktionale Grenze der relativen Größen des Schiebers und der Blenden herkömmlicher chromfreier Phasenschiebemasken ergibt sich daraus, dass die integrierten elektrischen Felder der zwei entgegengesetzten phasenverschobenen Zonen gleich sind. Dieser ausgeglichene Zustand hebt die nullte Beugungsordnung auf und macht es unmöglich, die erforderliche nullte Beugungsordnung zu erhalten, die zur Anwendung von Bestrahlung unter Abstand von der Achse nötig ist.

[0049] Zusammenfassend gesagt, löst jede der oben beschriebenen herkömmlichen schwachen Phasenschiebetechniken bestimmte Abbildungsprobleme. Mit jeder Technik sind jedoch Nachteile verbunden. Die Rand-, abgeschwächten oder eingebetteten und unabgeschwächten oder chromfreien (oder transparenten) Schieber-Blenden-Phasenschiebemasken liefern z. B. große Verhältnisse der nullten zu den \pm ersten Beugungsordnungen. Versuche des Standes der Technik, diese Verhältnisse zu manipulieren, umfassen die Verwendung von Biasing-Techniken, die mit einer abgeschwächten Phasenschiebemaske gekoppelt sind. Diese Versuche des Standes der Technik beinhalten jedoch komplexe Herstellungsschritte und ergeben infolge der Abschwächung ineffiziente Masken. Überdies gelingt es unabgeschwächten Schieber-Blenden-Phasenschiebemasken außerdem nicht, mit Bestrahlung unter Abstand von der Achse genaue Abbilder zu ergeben, wenn

sich die Schieber- und Blendengrößen einander nähern.

Zusammenfassung der Erfindung

[0050] Eine Aufgabe dieser Erfindung ist die Bereitstellung eines einfachen Systems und Verfahrens zur Herstellung einer effizienten Phasenschiebemaske, die die Verhältnisse der nullten zu den \pm ersten Beugungsordnungen zu manipulieren vermag.

[0051] Eine andere Aufgabe dieser Erfindung ist die Bereitstellung eines Systems und Verfahrens zur Herstellung einer nicht abgeschwächten Phasenschiebemaske, die die Verhältnisse der nullten zu den \pm ersten Beugungsordnungen zu manipulieren vermag.

[0052] Noch eine andere Aufgabe dieser Erfindung ist die Bereitstellung eines Systems und Verfahrens zur Herstellung einer chromfreien (oder transparenten) Schieber-Blenden-Phasenschiebemaske, die bei Bestrahlung unter Abstand von der Achse verwendet werden kann, wenn sich die Schieber- und Blendengrößen einander nähern.

[0053] Noch eine andere Aufgabe dieser Erfindung ist die Bereitstellung eines Systems und Verfahrens zur Rasterung von Hauptmerkmalen, um das korrekte Verhältnis der Strahlung nullter Beugungsordnung zur Strahlung einer höheren Beugungsordnung für optimale Abbildung zu erreichen.

[0054] Noch eine andere Aufgabe dieser Erfindung ist die Bereitstellung eines Systems und Verfahrens zur Rasterung von Hilfsmerkmalen, um das korrekte Verhältnis der Strahlung nullter Beugungsordnung zur Strahlung einer höheren Beugungsordnung für optimale Abbildung zu erreichen.

[0055] Die vorliegende Erfindung stellt ein Verfahren zur wirksamen Manipulation des Amplitudenverhältnisses der nullten zur ersten Beugungsordnung durch Anwendung von Rasterung phasenverschobener transparenter Merkmale innerhalb des Hauptmerkmals und als Subauflösungs-Hilfsmerkmale bereit. Die relativen Größen der nullten und höheren Beugungsordnungen werden gebildet, während die belichtende Wellenlänge durch die Mehrzahl um 0° und 180° phasenverschobener Zonen geht. Anschließend werden einige der Beugungsordnungen gesammelt und projiziert, um das Abbild des Objekts zu bilden.

[0056] Verfahren gemäß der vorliegenden Erfindung nutzen ferner Rasterungsstrukturen zum Manipulieren der relativen Größen von Beugungsordnungen, um schließlich das gewünschte projizierte Abbild aufzubauen. An der Auflösungsgrenze des Maskenherstellers ist dies besonders nützlich zum Um-

wandeln von stark verschobenen chromfreien Phasenkanten einer nicht nullten Beugungsordnung mit gleichmäßigen Linien und Abständen in schwache Phasenschieber, die eine nullte Ordnung aufweisen. Rasterung erzeugt ein Ungleichgewicht im elektrischen Feld zwischen den verschobenen Zonen und führt deshalb zur Einbringung der nullten Beugungsordnung. Als solche verwandeln sich diese vorher stark verschobenen Merkmale bei Rasterung in schwache Phasenschieber und sind mit den anderen chromfreien Schieber-Blenden-Merkmalen verträglich, die typischerweise unter der Mehrzahl Objekte zu finden sind, die bei der Herstellung einer herkömmlichen Halbleiterschaltung verwendet werden.

[0057] Durch Verringern der Größe des Hauptmerkmals für die sehr dichten Merkmale lässt sich wie bei der herkömmlichen Maskenherstellungstechnik ein begrenzter Umfang der Modifizierung der Beugungsordnung erreichen. Wegen der Interferenzwirkungen ist es nicht möglich sicherzustellen, dass eine Maskenbreite, die geringer ist als das Subauflösungs-Hilfsmerkmal, unter Anwendung von herkömmlichen Maskenherstellungsverfahren zuverlässig hergestellt werden kann. Gemäß der vorliegenden Erfindung kann jedoch durch Biasing der Hauptmerkmale die Merkmalbreite auf weniger als die der Subauflösungs-Hilfsmerkmale verringert werden.

[0058] Ferner ist die Verwendung einer chromfreien Phasenschiebemaske als ein leistungsfähiges Abbildungsverfahren bekannt, wenn sie mit der Anwendung von Bestrahlung unter Abstand von der Achse kombiniert wird, aber sie hat ernstliche optische Proximity-Effekte. Diese Erfindung liefert eine wirksame optische Proximity-Lösung. Die Erfindung ist durch die unabhängigen Ansprüche definiert.

[0059] Die vorliegende Erfindung beinhaltet ein Verfahren zur Herstellung einer Maske.

[0060] Wie unten detaillierter beschrieben, bietet die vorliegende Erfindung wesentliche Vorteile gegenüber dem Stand der Technik. Am wichtigsten ist, dass die durch die Verfahren der vorliegenden Erfindung erzeugte unabgeschwächte Phasenschieber-Fotomaske Drucken von Merkmalen mit hoher Auflösung ermöglicht, während die nullte Beugungsordnung und \pm ersten Beugungsordnungen manipuliert werden.

[0061] Zusätzliche Vorteile der vorliegenden Erfindung werden dem Fachmann anhand der folgenden detaillierten Beschreibung beispielhafter Ausführungsformen der vorliegenden Erfindung offenbar. Die Erfindung selbst samt weiteren Aufgaben und Vorteilen ist unter Bezugnahme auf die folgende detaillierte Beschreibung und die beiliegenden schematischen Zeichnungen besser verständlich.

[0062] Die beiliegenden schematischen Zeichnungen, die in die Patentbeschreibung aufgenommen sind und einen Teil von ihr bilden, veranschaulichen Ausführungsformen der vorliegenden Erfindung und dienen zusammen mit der Beschreibung zur Erklärung der Grundgedanken der Erfindung. Die Zeichnungen:

[0063] [Fig. 1](#) zeigt ein Wafer-Stepper-System vom Stand der Technik.

[0064] [Fig. 2](#) zeigt ein Fotomaskenmuster, das mit optischen Proximity-Korrekturmerkmalen wie z. B. Streubalken und Serifen versehen ist.

[0065] [Fig. 3\(A\)](#) zeigt ein Diffraktionsspektrum für gleichmäßige Linien und Abstände. [Fig. 3\(B\)](#) zeigt ein Diffraktionsspektrum für eine isolierte Linie.

[0066] [Fig. 4\(A\)](#) zeigt ein Diffraktionsspektrum von Objekten, deren Größe in der Nähe der Wellenlänge der belichtenden Energie liegt. [Fig. 4\(B\)](#) zeigt ein Luftbild des Diffraktionsspektrums von [Fig. 4\(A\)](#).

[0067] [Fig. 5\(A\)](#) zeigt die Wirkungen der Dreistrahlbelichtung bei einem herkömmlichen Maskenherstellungssystem. [Fig. 5\(B\)](#) zeigt die Wirkungen der Zweistrahlbelichtung bei einem herkömmlichen Maskenherstellungssystem.

[0068] [Fig. 6\(A\)](#) zeigt eine herkömmliche axiale Belichtungstechnik zur Maskenherstellung. [Fig. 6\(B\)](#) zeigt herkömmliche Techniken zur Belichtung unter Abstand von der Achse zur Maskenherstellung, bei denen die Bestrahlungskonfiguration eine ringförmige Form oder eine Quadrupolform aufweist.

[0069] [Fig. 7\(A\)](#) zeigt eine Querschnittansicht einer herkömmlichen nicht phasenschiebenden Maske. [Fig. 7\(B\)](#) zeigt eine Querschnittansicht einer herkömmlichen Phasenschiebemaske. [Fig. 7\(C\)](#) zeigt das entsprechende Diffraktionsspektrum für die herkömmliche nicht phasenschiebende Maske von [Fig. 7\(A\)](#). [Fig. 7\(D\)](#) zeigt das entsprechende Diffraktionsspektrum für die herkömmliche Phasenschiebemaske von [Fig. 7\(C\)](#).

[0070] [Fig. 8\(A\)](#) zeigt eine Querschnittansicht einer herkömmlichen Phasenschiebemaske des Randtyps. [Fig. 8\(B\)](#) zeigt ein Schaubild der Amplitude des elektrischen Feldes bei der herkömmlichen Phasenschiebemaske des Randtyps von [Fig. 8\(A\)](#). [Fig. 8\(C\)](#) zeigt das entsprechende Diffraktionsspektrum für die herkömmliche Phasenschiebemaske des Randtyps von [Fig. 8\(A\)](#).

[0071] [Fig. 9\(A\)](#) zeigt eine Querschnittansicht einer herkömmlichen Phasenschiebemaske des abgeschwächten Typs mit einem Abschwächungsfaktor von 5 %. [Fig. 9\(B\)](#) zeigt ein Schaubild der Amplitude

des elektrischen Feldes bei der herkömmlichen Phasenschiebemaske des Abschwächungstyps von [Fig. 9\(A\)](#). [Fig. 9\(C\)](#) zeigt das entsprechende Diffraktionsspektrum für die herkömmliche Phasenschiebemaske des Abschwächungstyps von [Fig. 9\(A\)](#). [Fig. 9\(D\)](#) zeigt eine Querschnittansicht einer herkömmlichen Phasenschiebemaske des abgeschwächten Typs mit einem Abschwächungsfaktor von 10 %. [Fig. 9\(E\)](#) zeigt ein Schaubild der Amplitude des elektrischen Feldes bei der herkömmlichen Phasenschiebemaske des Abschwächungstyps von [Fig. 9\(D\)](#). [Fig. 9\(F\)](#) zeigt das entsprechende Diffraktionsspektrum für die herkömmliche Phasenschiebemaske des Abschwächungstyps von [Fig. 9\(D\)](#).

[0072] [Fig. 10\(A\)](#) zeigt eine Querschnittansicht einer herkömmlichen transparenten oder chromfreien Phasenschiebemaske des Schieber-Blendentyps. [Fig. 10\(B\)](#) zeigt ein Schaubild der Amplitude des elektrischen Feldes bei der herkömmlichen transparenten oder chromfreien Phasenschiebemaske des Schieber-Blendentyps von [Fig. 10\(A\)](#). [Fig. 10\(C\)](#) zeigt das entsprechende Diffraktionsspektrum für die herkömmliche transparente oder chromfreie Phasenschiebemaske des Schieber-Blendentyps von [Fig. 10\(A\)](#).

[0073] [Fig. 11\(A\)](#) zeigt eine herkömmliche Fotomaske mit Biasing. [Fig. 11\(B\)](#) zeigt eine Rasterfotomaske mit Biasing.

[0074] [Fig. 12](#) zeigt eine herkömmliche abgeschwächte lithographische Phasenschiebemaske.

[0075] [Fig. 13\(A\)](#) und [Fig. 13\(B\)](#) zeigen auf graphische Weise den Bildkontrast als eine Funktion der Durchlässigkeit (T) für verschiedene Abstände und Fokuseinstellungen.

[0076] [Fig. 15](#) zeigt ein herkömmliches chromfreies dunkles Gitter als ein lichtundurchlässiges Merkmal und sein entsprechendes Abbild.

[0077] [Fig. 16\(A\)](#) zeigt eine Querschnittansicht einer herkömmlichen chromfreien Phasenkantenmaske. [Fig. 16\(B\)](#) zeigt ein Schaubild der Amplitude des elektrischen Feldes bei der herkömmlichen transparenten oder chromfreien Phasenkantenmaske von [Fig. 16\(A\)](#). [Fig. 16\(C\)](#) zeigt das entsprechende Diffraktionsspektrum für die herkömmliche chromfreie Phasenkantenmaske von [Fig. 16\(A\)](#).

[0078] [Fig. 17\(A\)](#) zeigt ein Hauptmerkmal in einer Phasenkantenmaske. [Fig. 17\(C\)](#) zeigt das entsprechende Diffraktionsspektrum für die Phasenkantenmaske von [Fig. 17\(A\)](#). [Fig. 17\(B\)](#) zeigt ein Rasterhauptmerkmal in einer Phasenkantenmaske gemäß der vorliegenden Erfindung. [Fig. 17\(D\)](#) zeigt das entsprechende Diffraktionsspektrum für die Phasenkantenmaske von [Fig. 17\(C\)](#).

[0079] [Fig. 18](#) zeigt ein Rasterstreubalken-Hilfsmerkmal gemäß der vorliegenden Erfindung.

[0080] [Fig. 19\(A\)](#) ist ein Schaubild simulierter Resist-Abbilder für eine Mehrzahl Abstands- und Durchlassungsbedingungen. [Fig. 19\(B\)](#) ist eine graphische Darstellung der in [Fig. 19\(A\)](#) dargestellten Daten. [Fig. 19\(C\)](#) ist eine Konturdarstellung, die den Satz Belichtungsdosisbedingungen (Vertikalachse) und Fokusbedingungen (Horizontalachse), um ein 100 nm-Resist-Abbild auf eine Größe zwischen 90 nm und 110 nm zu bringen, zeigt. Die zwei Prozessfenster in [Fig. 19\(C\)](#) sind für einen Abstand von 400 nm (obere Kontur) und für einen Abstand von 600 nm (untere Kontur). Diese Prozessfenster überlappen einander nicht. [Fig. 19\(D\)](#) ist eine andere Analyse derselben Informationen, die in [Fig. 19\(C\)](#) gezeigt sind. [Fig. 19\(D\)](#) veranschaulicht, wie viel Belichtungsspielraum (Vertikalachse) es in einem Prozessfenster für eine bestimmte Fokustiefe (Horizontalachse) gibt. In [Fig. 19\(D\)](#) ist die obere Kurve für den Abstand von 400 nm und die untere Kurve ist für den Abstand von 600 nm.

[0081] [Fig. 20\(A\)](#) zeigt die Auslegung für eine abgeschwächte Phasenschiebemaske mit einer Durchlässigkeit von 26 %. [Fig. 20\(B\)](#) zeigt eine Auslegung für eine unabgeschwächte chromfreie Phasenschiebemaske, die gemäß der vorliegenden Erfindung gerastert wurde, um ihr Diffraktionsmuster dem der abgeschwächten 26 %-Maske von [Fig. 20\(A\)](#) ähnlich zu machen. [Fig. 20\(C\)](#) ist ein grafischer Vergleich der durch die Maske von [Fig. 20\(A\)](#) und die Maske von [Fig. 20\(B\)](#) erzeugten Beugungsordnungen. [Fig. 20\(D\)](#) ist ein Luftbild eines Abschnitts des Musters der Maske von [Fig. 20\(B\)](#). [Fig. 20\(E\)](#) ist eine grafische Darstellung des Fokus-Belichtungs-Prozessfensters zur Wahrung einer spezifizierten Linienbreitendimensionierung für die Maske von [Fig. 20\(A\)](#). [Fig. 20\(F\)](#) ist eine grafische Darstellung des Fokus-Belichtungs-Prozessfensters zur Wahrung einer spezifizierten Linienbreitendimensionierung für die Maske von [Fig. 20\(B\)](#). [Fig. 20\(G\)](#) ist eine grafische Darstellung des Prozentsatzes des Belichtungsspielraumes für beide Masken von [Fig. 20\(A\)](#) bzw. [Fig. 20\(B\)](#). [Fig. 20\(H\)](#) ist eine alternative grafische Darstellung des Prozentsatzes des Belichtungsspielraumes für beide Masken von [Fig. 20\(A\)](#) bzw. [Fig. 20\(B\)](#).

[0082] Die [Fig. 21\(A\)](#) und [Fig. 21\(B\)](#) zeigen herkömmliche chromfreie Phasenschiebemuster. Die [Fig. 21\(C\)](#) und [Fig. 21\(D\)](#) zeigen chromfreie Raster-Phasenschiebemuster gemäß der vorliegenden Erfindung, die den Phasenschiebemuster der [Fig. 21\(A\)](#) bzw. [Fig. 21\(B\)](#) entsprechen. Die [Fig. 21\(E\)](#) bis [Fig. 21\(H\)](#) zeigen Diffraktionsmuster (Schaubilder der Beugungsordnungen) für das Objektmuster der Phasenschiebemasken der [Fig. 21\(A\)](#) bis [Fig. 21\(D\)](#). [Fig. 21\(I\)](#) zeigt die Fokus-Belich-

tungs-Prozessfenster für eine 100 nm-Linie mit Abständen von 400 nm (**2134** und **2132**) und 600 nm (**2130**) für Masken, die die geeignete Rasterung nutzen ([Fig. 21\(D\)](#) für den 400 nm-Abstand und [Fig. 21\(C\)](#) für den 600 nm-Abstand), um die Merkmalgröße mit ähnlicher Belichtung und ähnlichem Fokus zu erzeugen. Für den 400 nm-Abstand enthält das gesamte Prozessfenster Bereiche **2134** und **2132**, wobei sich 2134 mit dem einen Abstand von 600 nm aufweisenden Prozessfenster **2130** überlappt. [Fig. 21\(J\)](#) zeigt den Belichtungsspielraum für unterschiedliche Beträge von Fokustiefen für den gemeinsamen Fokus-Belichtungs-Bereich **2134**.

[0083] [Fig. 22\(A\)](#) zeigt ein Diffraktionsmuster für das Objektmuster einer herkömmlichen Phasenschiebemaske. [Fig. 22\(B\)](#) zeigt ein Diffraktionsmuster für das Objektmuster einer Rasterphasenschiebemaske gemäß der vorliegenden Erfindung. [Fig. 22\(C\)](#) ist eine grafische Darstellung des Fokus-Belichtungs-Prozessfensters zur Wahrung einer spezifizierten Linienbreitendimensionierung für die Maske von [Fig. 22\(A\)](#). [Fig. 22\(D\)](#) ist eine grafische Darstellung des Fokus-Belichtungs-Prozessfensters zur Wahrung einer spezifizierten Linienbreitendimensionierung für die Maske von [Fig. 22\(B\)](#).

[0084] [Fig. 23\(A\)](#) zeigt eine globale Auslegung eines herkömmlichen Hauptmerkmals. [Fig. 23\(B\)](#) zeigt eine globale Auslegung eines Rasterhauptmerkmals gemäß der vorliegenden Erfindung. [Fig. 23\(C\)](#) ist ein Luftbild der globalen Auslegung von [Fig. 23\(A\)](#). [Fig. 23\(D\)](#) ist ein Luftbild der globalen Auslegung von [Fig. 23\(B\)](#). [Fig. 23\(E\)](#) ist ein vergrößerter Abschnitt von [Fig. 23\(C\)](#). [Fig. 23\(F\)](#) ist ein vergrößerter Abschnitt von [Fig. 23\(D\)](#).

[0085] [Fig. 24](#) ist ein logisches Ablaufdiagramm, das ein Verfahren zum Entwerfen von Mustern beschreibt, die unterschiedliche Phasenschiebemasken gemäß der vorliegenden Erfindung nachbilden.

[0086] [Fig. 25](#) zeigt einen lithographischen Projektionsapparat.

[0087] In den Figuren geben gleiche Bezugszeichen gleiche Teile an.

Detaillierte Beschreibung der Erfindung

[0088] In der folgenden Beschreibung werden zu Erklärungs Zwecken zahlreiche spezielle Details aufgeführt, um ein besseres Verständnis der vorliegenden Erfindung zu schaffen. Dem Fachmann ist jedoch klar, dass die vorliegende Erfindung ohne diese speziellen Details angewendet werden kann.

[0089] Konkret betrifft die folgende detaillierte Beschreibung der unabgeschwächten Phasenschiebemaske der vorliegenden Erfindung die Maske selbst

und ein Verfahren zur Ausbildung der Maske. Es ist zu bemerken, dass im Bemühen zur Erleichterung des Verständnisses der vorliegenden Erfindung die folgende Beschreibung ausführlich darlegt, wie die unabgeschwächte Phasenschiebemaske verwendet werden kann, um Merkmale auszubilden, die in heutigen Halbleitervorrichtungen vom Stand der Technik enthalten sind. Es ist jedoch auch zu bemerken, dass die vorliegende Erfindung nicht auf die Verwendung in Halbleitervorrichtungen beschränkt ist. Die vorliegende Erfindung kann nämlich in einer Vielzahl unterschiedlicher Entwurfstypen und Prozesse verwendet werden, die die Projektion hochauflösender Abbilder beinhalten.

[0090] Eine erste beispielhafte Ausführungsform der vorliegenden Erfindung beinhaltet die Rasterung von Hauptmerkmalen einer chromfreien Schieber-Blenden-Phasenschiebemaske. [Fig. 17](#) zeigt die Rasterung eines Hauptmerkmals, so dass es eine optimale Amplitude der nullten bis ersten Beugungsordnung unter Verwendung einer chromfreien Schieber-Blenden-Phasenschiebemaske hat. [Fig. 17\(A\)](#) zeigt Hauptmerkmale **1702** vor dem Rastern, wohingegen [Fig. 17\(B\)](#) die Hauptmerkmale **1704** nach dem Rastern zeigt. Die [Fig. 17\(C\)](#) und [Fig. 17\(D\)](#) stellen Diffraktionsmuster eines chromfreien Linien-/Abstandsmusters dar, das demjenigen der jeweiligen Strukturen in den [Fig. 17\(A\)](#) und [Fig. 17\(B\)](#) gleich ist. Wie in [Fig. 17\(C\)](#) zu sehen ist, gibt es ohne Rasterung \pm erste Beugungsordnungen **1706** und **1708**, jedoch gibt es keine nullte Beugungsordnung. Wie in [Fig. 17\(D\)](#) zu sehen ist, gibt es wegen der Rasterung der Hauptmerkmale, durch die Bestrahlung unter Abstand von der Achse für diese dichten Merkmale ermöglicht wird, andererseits \pm erste Beugungsordnungen **1710**, **1712**, und es gibt eine nullte Beugungsordnung **1714**. In den Figuren bedeutet "CPE" (chromless phase edge) chromfreie Phasenkante und "HCPE" (half-tone CPE) bedeutet Raster-CPE.

[0091] Eine zweite beispielhafte Ausführungsform der vorliegenden Erfindung beinhaltet die Rasterung von Streubalken-Hilfsmerkmalen einer chromfreien Schieber-Blenden-Phasenschiebemaske. [Fig. 18](#) stellt ein Beispiel für eine chromfreie Schieber-Blenden-Phasenschiebemaske **1802** dar, die gerasterte Streubalken-Hilfsmerkmale **1804** und Hauptmerkmale **1806** aufweist. Die Rasterung eines Streubalken-Hilfsmerkmals ermöglicht es seinem zugehörigen Hauptmerkmal, eine optimale Amplitude der nullten bis ersten Beugungsordnung unter Verwendung einer chromfreien Schieber-Blenden-Phasenschiebemaske zu haben.

[0092] Eine Untersuchung mittels Phasenschiebemasken abgebildeter Merkmale mit veränderlicher Abstandsgröße zeigt eine Abhängigkeit des Abstands von der Durchlassung, die am besten geeig-

net ist, um dieselbe Resist-Abbildgröße für eine gegebene Belichtungsbedingung zu erhalten. Die [Fig. 19\(A\)](#) und [Fig. 19\(B\)](#) zeigen für 100 nm-Linien, die durch Zwischenräume mit einer Größe von 100 nm bis 800 nm voneinander getrennt sind, die Durchlassung der Phasenschiebung, die zur Erzeugung einer 100 nm-Linie für jeden Abstand erforderlich ist.

[0093] Insbesondere zeigt [Fig. 19\(A\)](#) das Abbildungsergebnis für unterschiedliche Kombinationen von Durchlässigkeit und Zwischenraumgrößen zwischen 10 nm-Merkmalen einer abgeschwächten Phasenschiebemaske. Wie in [Fig. 19\(A\)](#) zu sehen ist, sind Figuren **1902** an den Schnittpunkten jeder Bedingung von Durchlässigkeit und Zwischenraumgröße simulierte Querschnitte entwickelter Fotoresistabbilder, die bei 22mJ/cm und -0,15 Mikron Fokus unter Verwendung eines 248 nm-Belichtungswerkzeugs mit einer NA von 0,70 mit Quadrupol-Bestrahlung belichtet wurden. Die von den Rahmen umgebenen Abbilder **1904** haben eine Resistabbildgröße zwischen 90 und 110 nm. Diese Größen sind hier verwendet, um die unteren und oberen Grenzen zur annehmbaren Dimensionierung willkürlich abzuleiten. Abbilder außerhalb der umrahmten Bereiche erfüllen dieses Kriterium nicht. In der Figur bezeichnet "PSM1T" die Durchlässigkeit von Phasenschiebemaske-Merkmal Nr. 1, und "PSM2W" bezeichnet die Breite von Phasenschiebemaske-Merkmal Nr. 2. [Fig. 19\(B\)](#) ist eine graphische Darstellung derselben Daten, die in [Fig. 19\(A\)](#) dargestellt sind. Wie in den [Fig. 19\(A\)](#) und [Fig. 19\(B\)](#) zu sehen ist, erfüllen die Figuren im Bereich von 20 % bis 30 % Durchlässigkeit die Dimensionierungskriterien ± 10 % von 100 nm für die Belichtungsbedingung 22 mJ/cm und -0,15 Mikron Fokus bei 400 nm-Abstandgrößen und 600 nm Abstandgrößen, die jeweils eine Durchlassung von 100 % aufweisen.

[0094] [Fig. 19\(C\)](#) ist ein Schaubild des Fokus-Belichtungs-Prozessfensters zur Wahrung einer spezifizierten Linienbreitendimensionierung bei Phasenschiebemasken mit einem 600 nm- und 400 nm-Abstand, die jeweils eine Durchlassung von 100 % aufweisen. Wie in [Fig. 19\(C\)](#) zu sehen, sind die Belichtungsdosis- (D) und Fokus- (F) Bedingungen zur Erzielung von 100 nm-Linien bei 600 nm- und 400 nm-Abständen vollständig getrennt, ohne gemeinsamen Prozesskorridor. [Fig. 19\(D\)](#) ist ein Schaubild des Belichtungsspielraumes (EL) gegenüber der Fokustiefe (DoF) bei Phasenschiebemasken mit 600 nm- und 400 nm-Abständen, die jeweils eine Durchlassung von 100 % aufweisen. Der Belichtungsspielraum ist der Belichtungsbereich, der eine Merkmaldimensionierung von ± 10 % bewahrt, dividiert durch die Belichtungsdosis zur Dimensionierung des Merkmals, mal 100. Es ist klar, dass bei abnehmendem Belichtungsspielraum die Fokustiefe für jeden Abstand zunimmt. Wie jedoch in [Fig. 19\(D\)](#) zu sehen ist, gibt es keinen Punkt, in dem die Phasenschiebemas-

ken mit 600 nm und 400 nm Abstand einen gemeinsamen Belichtungsspielraum und eine entsprechende Fokustiefe teilen. Als solcher kann ein 600 nm- und 400 nm-Abstand ohne Korrektur gemäß der vorliegenden Erfindung keine 100 nm-Resistlinie unter Verwendung derselben Belichtungs- und Fokusbedingungen dimensionieren.

[0095] Die [Fig. 19\(A\)](#)–(D) stellen Fotomasken entsprechende simulierte Daten dar. Im Allgemeinen sind abgeschwächte 5–10 %-PSM herkömmlicherweise für kommerzielle Anwendungen erhältlich, wohingegen höhere Durchlassungen kundenspezifisch hergestellt werden können. Als solche stehen begrenzte Materialien zur Herstellung von Masken zur Verfügung. Ferner mögen unterschiedliche Abstandstrukturen auf solchen Materialien mit begrenzter Verfügbarkeit ihre Funktion vielleicht nicht optimal erfüllen. Weiter wäre zudem ein einziges Material für die Mehrzahl Strukturen, die auf einem Satz Muster auftreten, die auf einer einzigen herkömmlichen Maske zu finden sind, niemals optimal. Deshalb beseitigt die vorliegende Erfindung diese Barrieren, weil die vorliegende Erfindung ein Verfahren zur Rasterung von Haupt- und Hilfsmerkmalen zum Nachbilden des Diffraktionsmusters einer beliebigen Phasenschiebemaske vom Stand der Technik bereitstellt. Insbesondere ermöglicht die vorliegende Erfindung, dass unterschiedliche Abstandstrukturen auf einer einzigen Maske ihre Funktion optimal erfüllen.

[0096] Im Folgenden wird das Verfahren der Erfindung zur Lösung des hinsichtlich der [Fig. 19\(A\)](#) bis [Fig. 19\(D\)](#) beschriebenen Problems beschrieben.

[0097] Rasterung kann verwendet werden, um einer unabgeschwächten chromfreien 100 %-Maske Erzeugen eines Diffraktionsmusters und eines resultierenden Luftbildes zu ermöglichen, die ein Diffraktionsmuster und ein resultierendes Luftbild nachbilden, die einer transparenten, abgeschwächten 26 %-Phasenschiebemaske entsprechen. Dies ist ein hypothetisches Beispiel, weil abgeschwächtes 26 %-Material kommerziell nicht in Massenmengen existiert. Nichtsdestoweniger ist es eine optimale Durchlassung für einige Merkmale, und die vorliegende Erfindung erzeugt eine gerasterte chromfreie Phasenschiebemaske, die mit der Leistung des abgeschwächten 26 %-Materials übereinstimmt. Als solche ist die optimale Durchlassung erreichbar, ohne das Abbild mit den abgeschwächten Masken vom Stand der Technik abzuschwächen.

[0098] Die [Fig. 20\(A\)](#) bis [Fig. 20\(D\)](#) stellen dar, wie eine abgeschwächte Phasenschiebemaske aus einer unabgeschwächten, chromfreien Phasenschiebemaske hergestellt wird, um in diesem Beispiel eine 100 nm-Linie eines Merkmals mit 400 nm Abstand auf dieselbe Weise abzubilden, wie wenn eine unabgeschwächte, chromfreie Phasenschiebemaske ver-

wendet worden wäre. [Fig. 20\(A\)](#) zeigt ein Hauptmerkmal **2006** in einem Abschnitt **2004** einer Maskenauslegung **2002** für eine abgeschwächte Phasenschiebemaske mit einer Durchlässigkeit von 26 %. [Fig. 20\(B\)](#) zeigt Rasterungsobjekte **2012** in einem Abschnitt **2010** einer Maskenauslegung **2008** für eine unabgeschwächte, chromfreie Phasenschiebemaske, die gerastert wurde, wodurch sie ein Diffraktionsmuster demjenigen der abgeschwächten 26 %-Maske von [Fig. 20\(A\)](#) nahezu perfekt ähnlich macht. [Fig. 20\(C\)](#) ist eine Kurve, die die Beugungsordnungen vergleicht, die durch beide Abschnitte **2004** und **2010** der abgeschwächten bzw. der gerasterten unabgeschwächten Masken erzeugt wurden (die aus den zwei unterschiedlichen Situationen resultierende Überlappung der Kurven ist im Wesentlichen perfekt); NA ist die numerische Apertur. [Fig. 20\(D\)](#) ist ein Luftbild der Rastermaske von [Fig. 20\(B\)](#), wobei das Luftbild keine Anzeichen von den einzelnen Rasterungsobjekten zeigt.

[0099] Die [Fig. 20\(E\)](#) und [Fig. 20\(F\)](#) veranschaulichen Kurven, die das Fokus-Belichtungs-Prozessfenster zur Wahrung der 90 nm- bis 110 nm-Resistlinienbreitendimensionierung in der abgeschwächten Phasenschiebemaske (attPSM) mit 26 % Durchlässigkeit von [Fig. 20\(A\)](#) bzw. der unabgeschwächten, chromfreien Rasterphasenschiebemaske (HTPSM) von [Fig. 20\(B\)](#) zeigen. [Fig. 20\(G\)](#) ist eine grafische Darstellung des Fokus-Belichtungs-Prozessfensters zur Wahrung einer spezifizierten Linienbreitendimensionierung für beide Masken von [Fig. 20\(A\)](#) und [Fig. 20\(B\)](#). Wie in [Fig. 20\(G\)](#) zu sehen ist, gibt es einen überlappenden Abschnitt (OV) der Kurve für beide Masken von [Fig. 20\(A\)](#) und [Fig. 20\(B\)](#). Wie in [Fig. 20\(H\)](#) zu sehen ist, ist ferner der Prozentsatz des Belichtungsspielraumes für beide Masken relativ ähnlich. Wie durch die [Fig. 20\(G\)](#) und [Fig. 20\(H\)](#) nachgewiesen, kann die unabgeschwächte, chromfreie Rasterphasenschiebemaske von [Fig. 20\(B\)](#) deshalb verwendet werden, um eine abgeschwächte Phasenschiebemaske mit einer Durchlässigkeit von 26 % von [Fig. 20\(A\)](#) nachzubilden.

[0100] Bei dieser beispielhaften Ausführungsform umfasste die Nachbildung einer Art abgeschwächten 26 %-Phasenschiebemaske, z. B. wie sie in [Fig. 20\(A\)](#) dargestellt ist, mit einer chromfreien 100 %-Phasenschiebemaske, z. B. wie sie in [Fig. 20\(B\)](#) dargestellt ist, die Vergrößerung der Breite der 100 nm-Linie auf 115 nm und Rasterung der Linie unter Verwendung eines 180 nm-Rasterabstands (htp) mit einem 67 %-Arbeitszyklus von 180°-Schieber-zu-Nichtschieber-Zonen. Das Raster hat eine Zone, die relativ zu einer nicht verschobenen Zone verschoben ist. Bei dieser beispielhaften Ausführungsform bedeutet ein 67 %-Rasterarbeitszyklus, dass 67 % oder 120 nm modifiziert worden sind, um um 180° phasenverschoben zu sein, und 33 % oder 60 nm ein unmodifizierter 0°-Referenzbereich sind.

[0101] Die [Fig. 21\(A\)](#) bis [Fig. 21\(J\)](#) zeigen, wie zwei Merkmale mit unterschiedlichen optimalen Durchlassungen gerastert sein können, so dass sie unter Verwendung desselben abgeschwächten Phasenschiebematerials optimale Abbildungsfähigkeit aufweisen. [Fig. 21\(A\)](#) zeigt ein Hauptmerkmal **2106** in einem Abschnitt **2104** einer Maskenauslegung **2102** für eine chromfreie Phasenschiebemaske mit einem 600 nm-Abstand. [Fig. 21\(B\)](#) zeigt ein Hauptmerkmal **2112** in einem Abschnitt **2110** einer Maskenauslegung **2108** für eine chromfreie Phasenschiebemaske mit einem 400 nm-Abstand.

[0102] [Fig. 21\(C\)](#) stellt ein Hauptmerkmal **2118** und einen Raster-Streubalken **2120** in einem Abschnitt **2116** einer Maskenauslegung **2114** für eine unabgeschwächte Phasenschiebemaske mit einem 600 nm-Abstand dar (CrSB bedeutet Chromstreubalken). Die Linienbreite des Hauptmerkmals **2118** ist gegenüber derjenigen des Hauptmerkmals **2106** von [Fig. 21\(A\)](#) vergrößert. Ähnlich stellt [Fig. 21\(D\)](#) ein Raster- (HT-) Hauptmerkmal **2126** in einem Abschnitt **2124** einer Maskenauslegung **2122** für eine unabgeschwächte Phasenschiebemaske mit einem 400 nm-Abstand dar, wobei die Linienbreite des Rasterhauptmerkmals **2126** gegenüber derjenigen des Hauptmerkmals **2112** von [Fig. 21\(B\)](#) vergrößert ist. Die in den [Fig. 21\(A\)](#) und [Fig. 21\(B\)](#) dargestellten Masken sind modifiziert worden, um die in den Figuren [Fig. 21\(C\)](#) bzw. [Fig. 21\(D\)](#) dargestellten Masken zu ergeben.

[0103] Die [Fig. 21\(E\)](#) bis [Fig. 21\(H\)](#) zeigen die Diffraktionsmuster, die jeweils den Maskenmustern der [Fig. 21\(A\)](#) bis [Fig. 21\(D\)](#) entsprechen. [Fig. 21\(G\)](#) und [Fig. 21\(H\)](#) zeigen die modifizierten Diffraktionsmuster, die den Maskenmustern der [Fig. 21\(C\)](#) und [Fig. 21\(D\)](#) entsprechen. Im Vergleich zu den in [Fig. 21\(E\)](#) und [Fig. 21\(F\)](#) veranschaulichten Diffraktionsmuster werden die Diffraktionsmuster modifiziert, wenn die in [Fig. 21\(A\)](#) und [Fig. 21\(B\)](#) veranschaulichten ursprünglichen Maskenmuster modifiziert werden, um die in [Fig. 21\(C\)](#) bzw. [Fig. 21\(D\)](#) veranschaulichten Maskenmuster zu werden.

[0104] [Fig. 21\(I\)](#) zeigt, dass es einen gemeinsamen Fokus-Belichtungs-Korridor für beide Maskenmuster der [Fig. 21\(C\)](#) und [Fig. 21\(D\)](#) gibt. Wie in [Fig. 21\(I\)](#) zu sehen, überlappt das Fokus-Belichtungs-Prozessfenster **2130** für die Maske von [Fig. 21\(C\)](#) das Fokus-Belichtungs-Prozessfenster **2132** für die Maske von [Fig. 21\(D\)](#) an einem gemeinsamen Fokus-Belichtungs-Prozessfenster **2134**. Dieses Simulationsbeispiel zeigt, dass eine gerasterte, unabgeschwächte chromfreie Maske eine abgeschwächte Phasenschiebemaske mit niedrigerer Durchlässigkeit nachbilden kann. [Fig. 21\(J\)](#) zeigt den Belichtungsspielraum für unterschiedliche Beträge von Fokustiefen für den gemeinsamen Fokus-Belichtungs-Bereich **2134**.

[0105] Die [Fig. 22\(A\)](#) bis [Fig. 22\(D\)](#) zeigen, wie das Fokus-Belichtungs-Prozessfenster unter Verwendung von Streubalken gesteigert wird, um die nullte Beugungsordnung zu unterdrücken. [Fig. 22\(A\)](#) stellt die Beugungsordnungskurve für eine unkorrigierte abgeschwächte 100 nm-Phasenschiebelinie mit einem 600 nm-Abstand dar. [Fig. 22\(B\)](#) stellt die Beugungsordnungen für eine korrigierte, gerasterte, ungeschwächte chromfreie Auslegung dar. [Fig. 22\(C\)](#) ist eine Kurve, die das Prozessfenster für die unkorrigierte abgeschwächte 100 nm-Phasenschiebelinie mit einem 600 nm-Abstand von [Fig. 22\(A\)](#) zeigt. [Fig. 22\(D\)](#) ist eine Kurve, die das Prozessfenster für die korrigierte, gerasterte, ungeschwächte chromfreie Auslegung von [Fig. 22\(B\)](#) zeigt. Es ist zu beachten, dass die korrigierte Maske die vierfache Fokustiefe (DoF) der unkorrigierten Maske aufweist.

[0106] Die [Fig. 23\(A\)](#) bis [Fig. 23\(F\)](#) zeigen, wie ein Winkel in einem gegebenen Muster unter Verwendung von Raster- (HT-) Strukturen auf dem Hauptmerkmal genau kompensiert werden kann. [Fig. 23\(A\)](#) zeigt eine globale Auslegung (unkorrigiert) eines Hauptmerkmals **2304** aufweisenden Musters **2302**. [Fig. 23\(B\)](#) zeigt einen rasterkorrigierten Abschnitt **2306** eines gewinkelten Hauptmerkmals. Die [Fig. 23\(C\)](#) und [Fig. 23\(D\)](#) sind Luftbilder für die jeweiligen in den [Fig. 23\(A\)](#) bzw. [Fig. 23\(B\)](#) gezeigten Merkmale. Die [Fig. 23\(E\)](#) und [Fig. 23\(F\)](#) sind vergrößerte Ansichten der Luftbilder des gewinkelten Hauptmerkmals und des rasterkorrigierten gewinkelten Hauptmerkmals der [Fig. 23\(C\)](#) bzw. [Fig. 23\(D\)](#). Wie in [Fig. 23\(E\)](#) zu sehen, beinhaltet das Luftbild des Hauptmerkmals "heiße Stellen" **2310**, an denen die Beugungsordnungen infolge destruktiver Interferenz im Diffraktionsmuster verringert sind. Wie jedoch in [Fig. 23\(F\)](#) zu sehen, beinhaltet das Luftbild des Hauptmerkmals keine "heißen Stellen" wodurch es in einem genaueren Luftbild des Hauptmerkmals resultiert.

[0107] Außerdem zeigt [Fig. 23](#), dass diese Rasterstrukturen verwendet werden, um eine Mehrzahl Größen, Formen und Abstände so wiederzugeben, dass die ausgebildeten Abbilder ihre jeweilige gewünschte Größe und Form mit ausreichender Abbild-Prozess-toleranz erzeugen. Diese Abbilder werden typischerweise unter identischen Belichtungsbedingungen erzeugt, sind jedoch nicht auf Einzelbelichtungsbedingungen beschränkt. Diese Rasterungsstrukturen können außerhalb des Hauptmerkmals als Hilfsmerkmale oder innerhalb verwendet werden. Diese Strukturen können eine Durchlassung im Bereich von 0 % bis 100 % aufweisen und sie können relativ zu den Hauptmerkmalen phasenverschoben sein oder nicht.

[0108] Variationen der unabgeschwächten Phasenschiebemaske der vorliegenden Erfindung sind

ebenfalls möglich. Während z. B. die in der oben dargestellten beispielhaften Ausführungsform offenbarte Hybride eine abgeschwächte 26 %-Phasenschiebemaske nachbilden kann, sind Alternativen möglich.

[0109] Bei der obigen beispielhaften Ausführungsform haben der 600 nm-Abstand und 400 nm-Abstand ein gemeinsames Fokus-Belichtungs-Prozessfenster, eine solche Beziehung kann jedoch verallgemeinert werden. Ein allgemeines Verfahren zur Entwicklung eines Fokus-Belichtungs-Prozessfensters, das mehreren vorgegebenen Abstandgrößen gemein ist, kann wie beschrieben mit dem logischen Ablaufdiagramm von [Fig. 24](#) erreicht werden.

[0110] [Fig. 24](#) ist ein logisches Ablaufdiagramm, das ein Verfahren zum Entwerfen von unabgeschwächten Phasenschiebemaskenmustern beschreibt, deren entsprechende Diffraktionsmuster die abgeschwächten Phasenschiebemasken entsprechenden Diffraktionsmuster nachbilden, und deren Fokus-Belichtungs-Prozessfenster vorgegebenen Abstandgrößen gemein ist.

[0111] Nachdem ein interner Zähler n auf 1 (Schritt S1) gesetzt ist, werden die Dimensionierungsdosis, die die Dosis der zur Herstellung eines Resistabbildes mit der Zielgröße erforderliche Belichtungsenergie ist, und die Linienbreitenkontrolle für unterschiedliche Merkmale einschließlich Arten, Größen und Abstände, die von Interesse sind, für unterschiedliche Durchlassungen schwacher Phasenschiebemasken bestimmt (Schritt S2). Diese Bestimmung kann z. B. mittels eines Lithographie-Simulators (wie z. B. ProLith™ oder Solid-C™) erfolgen. Als Nächstes wird das Merkmal mit der höchsten Empfindlichkeit gegen Belichtung, Fokus und Aberrationen bestimmt (Schritt S3). Diese Bestimmung kann außerdem z. B. mittels eines Lithographie-Simulators erfolgen. Als Nächstes wird bestimmt, ob der interne Zähler n größer ist als 1, wodurch angegeben wird, ob Schritt S2 und Schritt S3 wiederholt worden sind (Schritt S4). Ist n nicht größer als 1 (Schritt S4), wird eine Modifizierung des Abbildungsprozesses vorgesehen, die die Empfindlichkeit des Musters gegen Belichtung, Fokus und Aberrationen verringert (Schritt S5). Die Modifikation kann die Verwendung von schwachen Phasenschiebemasken mit unterschiedlicher Durchlassung, von unterschiedlichen Belichtungsapparaturbedingungen und Resistprozessen beinhalten. Diese Modifikationen können wieder z. B. mittels eines Lithographie-Simulators vorgesehen werden. Der interne Zähler wird dann um 1 erhöht (Schritt S6). An diesem Punkt werden Schritt S2 und Schritt S3 wiederholt, um sicherzustellen, dass die in Schritt S5 vorgesehenen neuen Prozessbedingungen nicht das ändern, was nach der ersten Anwendung von Schritt S2 und Schritt S3 beobachtet wurde (Schritt S7).

[0112] Nach dem zweiten Lauf durch Schritt S3 wird der interne Zähler n als größer als 1 bestimmt, wobei angegeben wird, dass Schritt S2 und Schritt S3 wiederholt worden sind (Schritt S4). Als solche werden die Ergebnisse der während des ersten Laufs durch Schritt S2 und Schritt S3 und des zweiten Laufs durch Schritt S2 und Schritt S3 vorgenommenen Bestimmungen jeweils verglichen (Schritt S8). Liegt der Vergleich zwischen den während der zwei vorherigen Läufe durch Schritt S2 und Schritt S3 gefundenen Bestimmungen nicht innerhalb einer vorgegebenen Schwelle, d. h. bei Schritt S5 eingebrachte neue Prozessbedingungen haben das geändert, was im ersten Durchlauf durch die zwei vorherigen Schritte Schritt S2 und Schritt S3 beobachtet wurde, wird eine neue Modifizierung des Abbildungsprozesses vorgesehen (Rückkehr zu Schritt S5). Liegt der Vergleich zwischen den während der zwei vorherigen Läufe durch Schritt S2 und Schritt S3 gefundenen Bestimmungen jedoch innerhalb einer vorgegebenen Schwelle, d. h. bei Schritt S5 eingebrachte neue Prozessbedingungen haben nicht das geändert, was im ersten Durchlauf durch die zwei vorherigen Schritte Schritt S2 und Schritt S3 beobachtet wurde, wird der Prozess bei Schritt S9 fortgesetzt.

[0113] Die Maskenauslegungsbedingungen für die anderen interessierenden Merkmale, die zuerst mit der Amplitude des elektrischen Feldes bei Nullfrequenz des Diffraktionsmusters in der Pupillenebene der Belichtungslinse übereinstimmen und die die maximale Amplitude der Seitenlappen für jedes isolierte Merkmal bei der Frequenz der Referenzgeometrie setzen, werden dann bestimmt (Schritt S9). Nicht einschränkende Verfahren zum Erreichen der Maskenauslegungsbedingungen für die anderen interessierenden Merkmale beinhalten Rasterung jedes Merkmals, Biasing jedes Merkmals oder Hinzufügen von Streubalken zu isolierten Merkmalen. Bei Verwendung von Streubalken sollen die Streubalken um einen Referenzabstand von dem Merkmal, das abgestimmt wird, entfernt platziert werden, damit das resultierende gebeugte Abbild der Streubalken und ihr jeweiliges Hauptmerkmal mit dem gebeugten Bildreferenzmerkmal, das abgestimmt wird, übereinstimmen. Ferner können Streubalken gerastert, gleichphasig und/oder biased sein, wie durch die zur Herstellung solcher Muster verwendete Maskenherstellungstechnologie vorgeschrieben.

[0114] Als Nächstes wird die sinc-Hüllfunktion $[\text{sinc}(x) = \sin(x)/x]$ für alle Merkmale so abgestimmt, dass sie alle dieselbe Form aufweisen (Schritt S10). Eine sinc-Funktion bezieht sich auf das nicht diskrete Diffraktionsmuster für ein isoliertes Merkmal oder für mehrere Linien oder Zwischenräume. Durch Hinzufügen von Streubalken zu einem isolierten Merkmal wird seine sinc-Funktion durch Abschwächen des Abbildes bei bestimmten Frequenzen und Verstärken des Abbildes bei anderen Frequenzen modifiziert.

Das resultierende Diffraktionsmuster kann diskreten Ordnungen gleichen, obwohl es das Ergebnis einer sinc-Funktion ist. Alle Beugungsordnungen einer Reihe von Linien und Abständen sind durch $\lambda/\text{Abstand}$ getrennt, und weisen ohne die sinc-Hülle dieselbe Größe auf. Die sinc-Funktion für einen einzigen Abstand innerhalb der Reihe von Linien und Abständen ändert die Amplitude jeder Ordnung. Werden Streubalken verwendet, bedarf der Abstand vielleicht einer Anpassung, um den Seitenlappen so zu bewegen, dass die maximale Amplitude außerhalb der numerischen Apertur des lithographischen Apparates platziert wird und sich nur die Seite des Seitenlappens in der Linse befindet. Dies kann durch Verringerung des Streubalkenstrukturabstands des Hauptmerkmals erreicht werden.

[0115] Dann wird bestimmt, ob alle Merkmale dieselben Luftbildformattribute wie z. B. I-MAX (maximum intensity level = maximales Intensitätsniveau), I-MIN (minimum intensity level = minimales Intensitätsniveau) und normalisierte logarithmische Neigung des Abbildes (NILS) haben, und ob die Prozessfenster eines jeden Merkmals überlappen (Schritt S11). Haben nicht alle Merkmale dieselben Luftbildformattribute oder überlappen die Prozessfenster eines jeden Merkmals nicht, wird Schritt S9 mit einer neuen Modifikation der sinc-Hüllfunktion wiederholt. Haben alle Merkmale dieselben Luftbildformattribute und überlappen die Prozessfenster eines jeden Merkmals, hält der Prozess an, wobei eine optimale Phasenschiebemaske bereitgestellt wird.

[0116] [Fig. 25](#) stellt schematisch einen lithographischen Apparat dar, bei dem die Maske gemäß der Erfindung verwendet werden kann. Der Apparat weist auf: ein Bestrahlungssystem Ex, IL, zum Liefern eines aus Strahlung PB (z. B. UV-Strahlung) bestehenden Projektionsstrahles. In diesem speziellen Fall weist das Bestrahlungssystem auch eine Strahlungsquelle LA auf; einen mit einem Maskenhalter zum Halten einer Maske MA (z. B. Retikel) versehenen ersten Objektisch (Maskentisch) MT, der zum genauen Positionieren der Maske bezüglich Teil PL mit ersten Positionierungsmitteln verbunden ist; einen mit einem Substrathalter zum Halten eines Substrats W (z. B. eines resistbeschichteten Siliziumwafers) versehenen zweiten Objektisch (Substrat-tisch) WT, der zum genauen Positionieren des Substrats bezüglich Teil PL mit zweiten Positionierungsmitteln verbunden ist; ein Projektionssystem ("Linse") PL (z. B. ein Brechungs-, Spiegelungs- oder Spiegellinsensystem) zum Abbilden eines bestrahlten Abschnitts der Maske MA auf einen Zielabschnitt C (z. B. der z. B. einen oder mehrere Chips aufweist) des Substrats W. Wie hier dargestellt, ist der Apparat ein durchlassender Typ (d. h. er hat eine durchlassende Maske). Im Allgemeinen kann er jedoch z. B. auch ein spiegelnder

Typ sein (mit einer spiegelnden Maske). Alternativ kann der Apparat eine andere Art von Musterungsmitteln verwenden wie z. B. eine programmierbare Spiegelanordnung.

[0117] Die Quelle LA (z. B. eine Lampe oder ein Excimerlaser) erzeugt einen aus Strahlung bestehenden Strahl. Dieser Strahl wird entweder direkt oder nach Traversieren von Konditionierungsmitteln wie z. B. eines Strahlaufweiters Ex indirekt in ein Bestrahlungssystem (Bestrahler) IL gespeist. Der Bestrahler IL kann Einstellmittel AM zum Einstellen der äußeren und/inneren radialen Ausdehnung (im allgemeinen als σ -äußere bzw. σ -innere bezeichnet) der Intensitätsverteilung im Strahl aufweisen. Außerdem wird er im Allgemeinen verschiedene andere Komponenten aufweisen wie z. B. einen Integrator IN und einen Kondensator CO. Ferner kann der Bestrahler Mittel zum Erzeugen von Konfigurationen zur Bestrahlung unter Abstand von der Achse wie z. B. ringförmige, Quadrupol- Dipol- und/oder weiche Multipol-Konfigurationen aufweisen. Diese können auf verschiedene Weise erzeugt werden, wie z. B. in der europäischen Patentanmeldung EP 0 949 541 detailliert dargelegt. Auf diese Weise hat der auf die Maske MA auftreffende Strahl PB in seinem Querschnitt eine gewünschte Einheitlichkeit und Intensitätsverteilung.

[0118] In Bezug auf [Fig. 25](#) ist zu bemerken, dass sich die Quelle LA innerhalb eines Gehäuses des lithographischen Projektionsapparates befinden kann (wie es oft der Fall ist, wenn die Quelle LA z. B. eine Quecksilberlampe ist), aber dass sie auch vom lithographischen Projektionsapparat entfernt sein kann, wobei der von ihr erzeugte aus Strahlung bestehende Strahl in den Apparat geleitet wird (z. B. mit Hilfe geeigneter Lenkungsspiegel). Dieses letztere Szenario ist oft der Fall, wenn die Quelle LA ein Excimerlaser ist.

[0119] Der Strahl PB schneidet anschließend die Maske MA, die auf einem Maskentisch MT gehalten wird. Nachdem der Strahl PB die Maske MA traversiert hat, fällt er durch die Linse PL, die den Strahl PB auf einen Zielabschnitt C des Substrats W fokussiert. Mit Hilfe der zweiten Positionierungsmittel (und interferometrischen Messmittel IF) kann der Substrattisch WT genau bewegt werden, z. B. um verschiedene Zielabschnitte C im Weg des Strahls PB zu positionieren. Ähnlich können die ersten Positionierungsmittel verwendet werden, um die Maske MA in Bezug auf den Weg des Strahls PB genau zu positionieren, z. B. nach der mechanischen Entnahme der Maske MA aus der Maskenbibliothek oder während einer Abtastung. Im Allgemeinen wird die Bewegung der Objektische MT, WT mit Hilfe eines Langhubmoduls (Grobpositionierung) und eines Kurzhubmoduls (Feinpositionierung), die in [Fig. 25](#) nicht ausdrücklich dargestellt sind, verwirklicht. Im Falle eines Wafer-Steppers (im Gegensatz zu einem

Step-and-Scan-Apparat) kann der Maskentisch MT bloß mit einem Kurzhubaktuator verbunden oder starr befestigt sein.

[0120] Der dargestellte Apparat kann in zwei verschiedenen Moden verwendet werden:

Im Schrittmodus wird der Maskentisch MT im Wesentlichen stationär gehalten und ein gesamtes Maskenabbild wird auf einmal (d. h. in einem einzigen "Blitz") auf einen Zielabschnitt C projiziert. Dann wird der Substrattisch WT in den x- und/oder y-Richtungen verschoben, so dass ein anderer Zielabschnitt C durch den Strahl PB bestrahlt werden kann.

[0121] Im Abtastmodus gilt im Wesentlichen das gleiche Szenario, außer dass ein gegebener Zielabschnitt C nicht in einem einzigen "Blitz" belichtet wird. Stattdessen ist der Maskentisch MT mit einer Geschwindigkeit v in einer gegebenen Richtung (die so genannte "Abtastrichtung", z. B. die y-Richtung) beweglich, so dass der Projektionsstrahl PB zum Abtasten über einem Maskenabbild veranlasst wird. Gleichzeitig wird der Substrattisch WT mit einer Geschwindigkeit $V = Mv$, bei der M die Vergrößerung der Linse PL ist (typischerweise $M = 1/4$ oder $1/5$), simultan in der gleichen oder entgegengesetzten Richtung bewegt. Auf diese Weise kann ein relativ großer Zielabschnitt C belichtet werden, ohne dass bezüglich der Auflösung ein Kompromiss geschlossen werden muss.

[0122] Obwohl bestimmte spezielle Ausführungsformen der vorliegenden Erfindung offenbart worden sind, wird bemerkt, dass die vorliegende Erfindung auf andere Arten verkörpert werden kann, ohne vom durch die Ansprüche definierten Anwendungsbereich der Erfindung abzuweichen.

Patentansprüche

1. Verfahren zum Entwerfen einer Phasenschiebemaske zum Ausbilden eines Abbildes des Maskenmusters auf einem Material, wobei das Maskenmuster erste Merkmale mit einem ersten Abstand und zweite Merkmale mit einem zweiten Abstand umfasst, der sich vom ersten Abstand unterscheidet, wobei das Verfahren den Schritt umfasst: das Modifizieren wenigstens eines (**1702**) der ersten und zweiten Merkmale im Maskenmuster, um zumindest ein unabgeschwächtes, gerastertes Phasenschiebemerkmale (**1704**) einzuschließen, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Modifizierungsschritt derart ist, dass die ersten und zweiten Merkmale im Maskenmuster unterschiedliche Prozentdurchlassungen nachbilden, so dass die ersten und zweiten Merkmale beim Ausbilden des Abbildes einen gemeinsamen Belichtungsspielraum und eine entsprechende Fokustiefe teilen.

2. Verfahren nach Anspruch 1, wobei wenigstens

eines der ersten und zweiten Merkmale ein chromfreies gleichmäßiges Linien-/Abstandsmuster umfasst und der Schritt des Modifizierens auf dem chromfreien gleichmäßigen Linien-/Abstandsmuster so durchgeführt wird, dass das Muster eine nullte Ordnung mit einer Amplitude, die nicht null beträgt, erzeugt, wenn es bestrahlt wird.

ke unter Abstand von der Achse durch das Bestrahlungssystem bestrahlt wird.

Es folgen 34 Blatt Zeichnungen

3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, wobei der Schritt des Modifizierens so ausgeführt wird, dass die modifizierten Merkmale ein Diffraktionsmuster und ein Luftbild, welche einer teilweise transparenten, abgeschwächten Phasenschiebemaske entsprechen, mit einer beliebigen Prozentsatzdurchlassung erzeugen.

4. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei das unabgeschwächte, gerasterte Phasenschiebemerkmale ein Hauptmerkmal ist.

5. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei das unabgeschwächte, gerasterte Phasenschiebemerkmale ein Hilfsmerkmal ist.

6. Verfahren zum Herstellen einer Phasenschiebemaske zum Übertragen eines Abbildes auf ein Material, wobei das Verfahren das Entwerfen der Maske gemäß dem Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche und das Herstellen einer Maske gemäß dem Entwurf umfasst.

7. Vorrichtungsherstellungsverfahren, das die Schritte umfasst:

das Vorsehen eines Substrats, das wenigstens teilweise mit einer Schicht aus strahlungsempfindlichem Material bedeckt ist,

das Vorsehen eines aus Strahlung bestehenden Projektionsstrahles unter Verwendung eines Bestrahlungssystems,

das Verwenden eines Musters auf einer Maske, um den Projektionsstrahl in seinem Querschnitt mit einem Muster zu versehen, und das Projizieren des aus Strahlung bestehenden, gemusterten Strahls auf einen Zielabschnitt der Schicht aus strahlungsempfindlichem Material, wobei: das Maskenmuster erste Merkmale mit einem ersten Abstand und zweite Merkmale mit einem zweiten Abstand umfasst, wobei wenigstens eines der ersten Merkmale zumindest ein unabgeschwächtes, gerastertes Phasenschiebemerkmale umfasst,

dadurch gekennzeichnet, dass

die ersten und zweiten Merkmale in der Maske unterschiedliche Prozentdurchlassungen nachbilden, und der Projektionsschritt so durchgeführt wird, dass die ersten und zweiten Merkmale einen gemeinsamen Belichtungsspielraum und eine entsprechende Fokustiefe teilen.

8. Vorrichtungsherstellungsverfahren nach Anspruch 7, das einen Schritt umfasst, in dem die Mas-

Anhängende Zeichnungen

Fig.1.

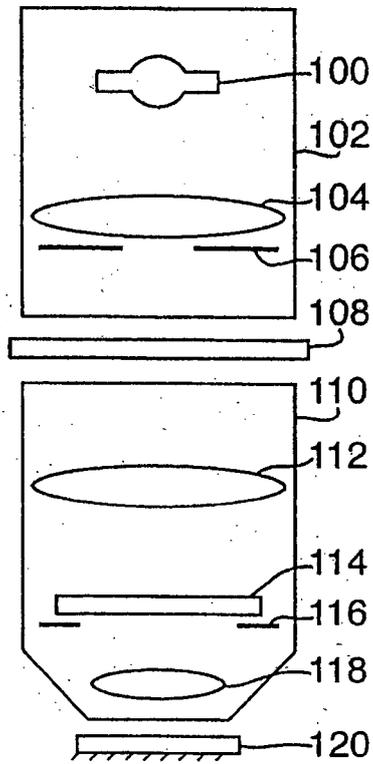


Fig.2.

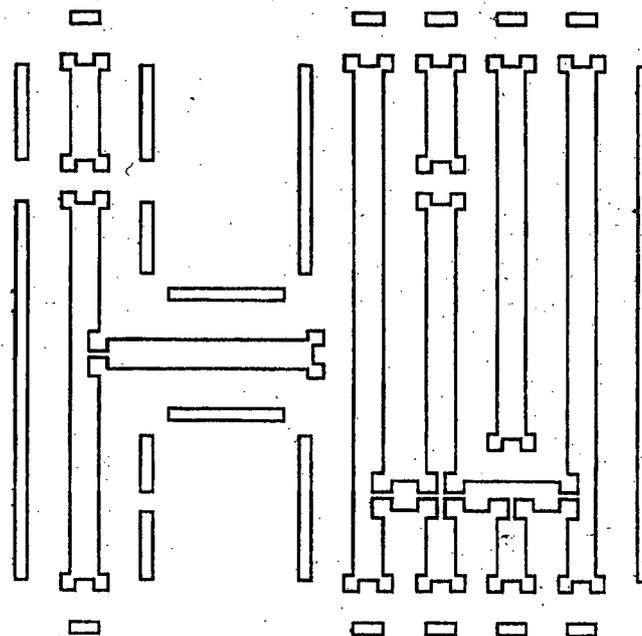


Fig.3(A).

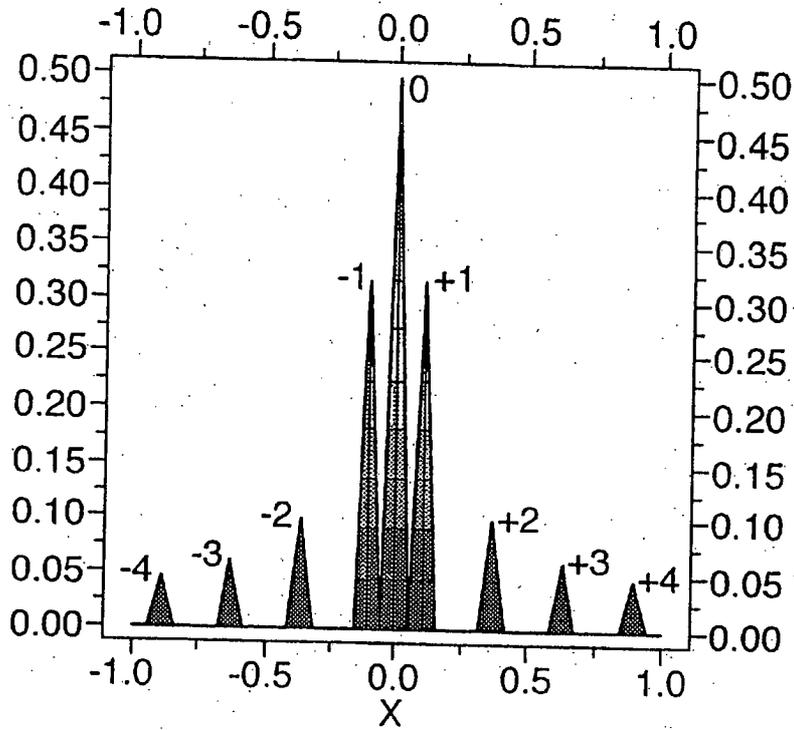


Fig.3(B).

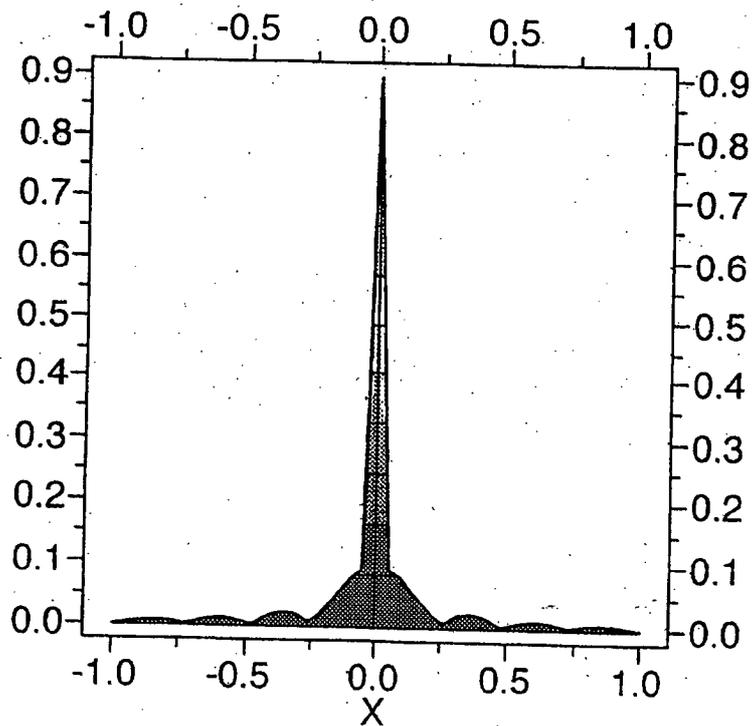


Fig.4(A).

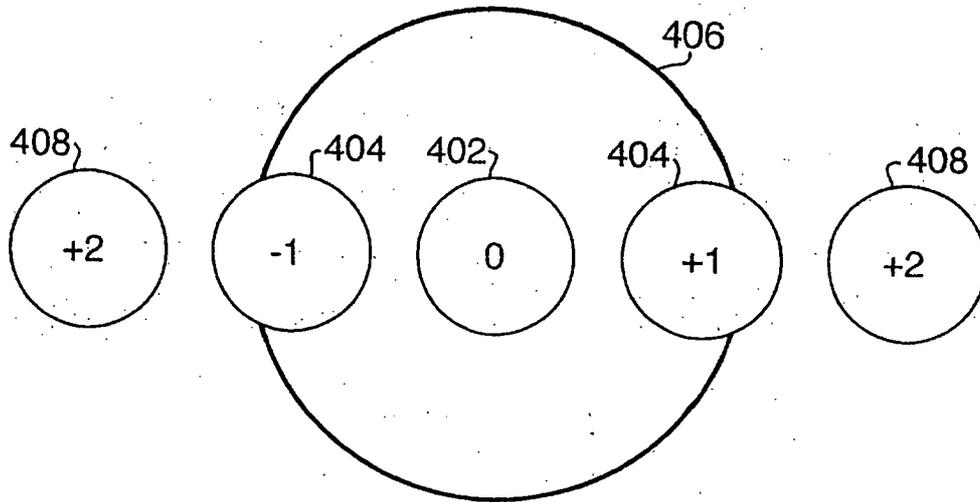


Fig.4(B).

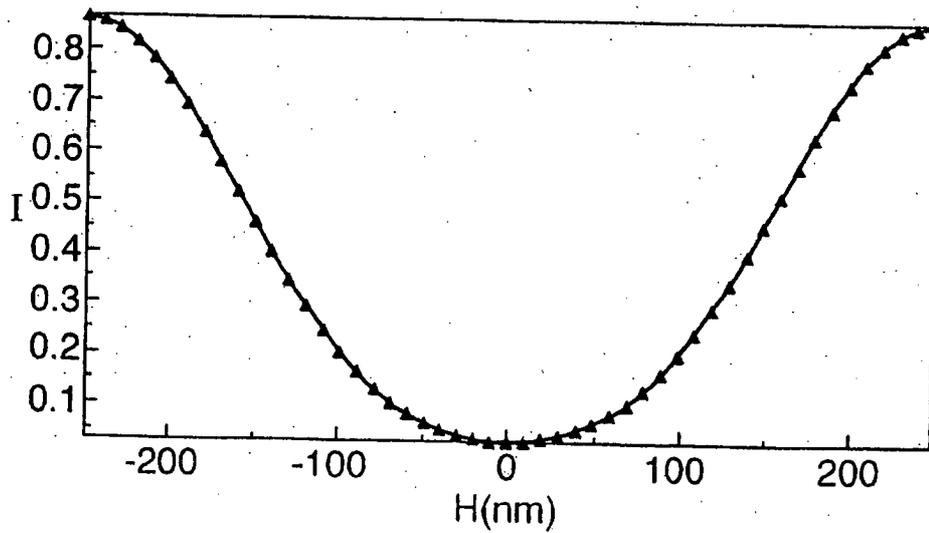


Fig.5(A).

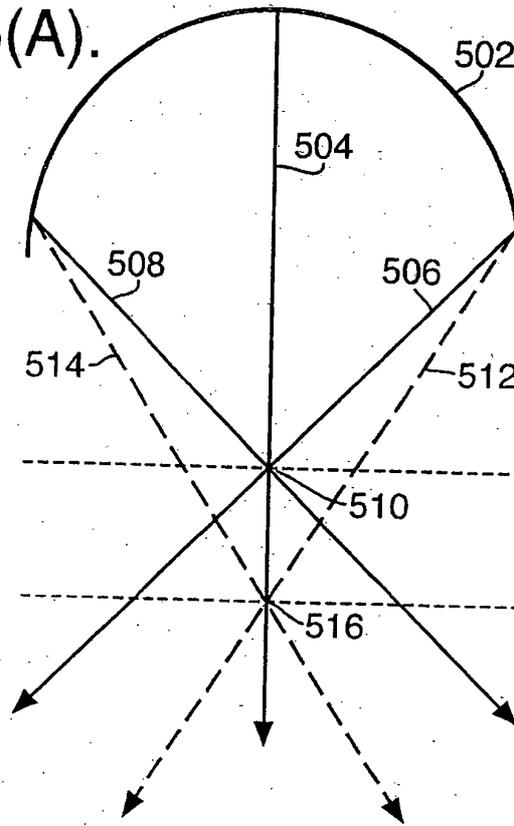


Fig.5(B).

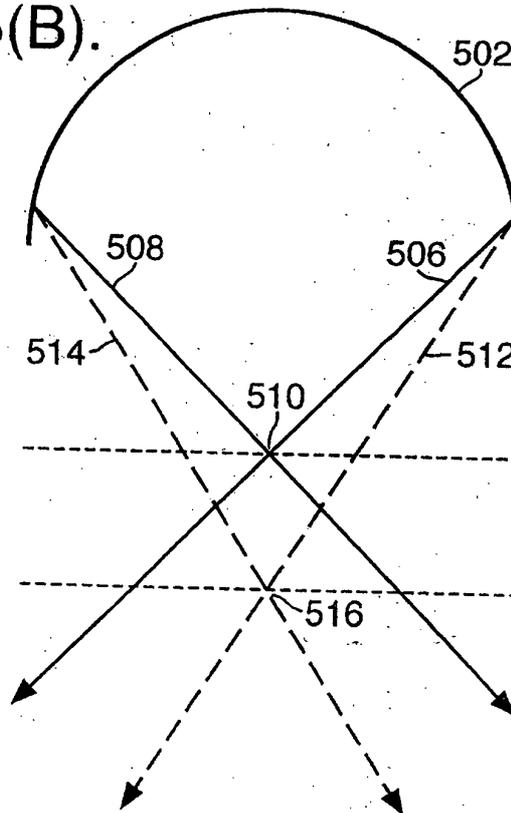


Fig.6(A).

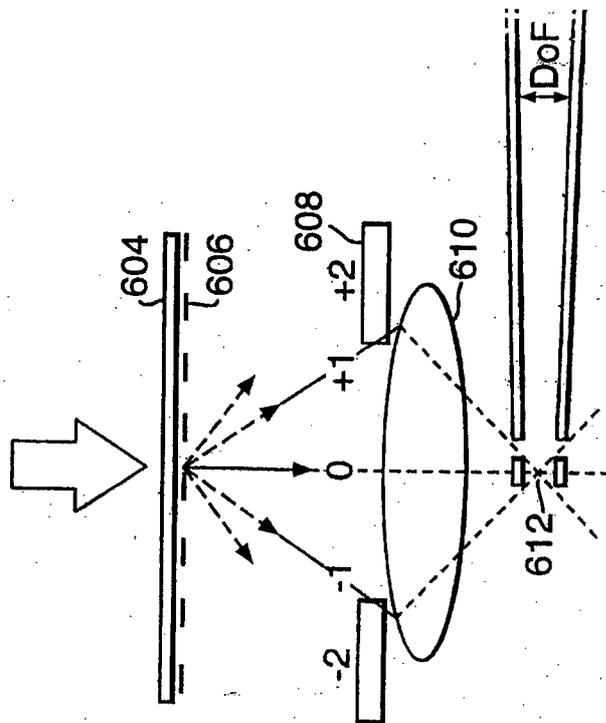
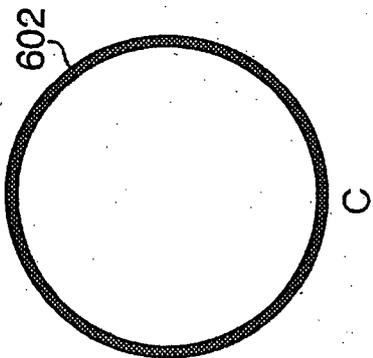


Fig.6(B).

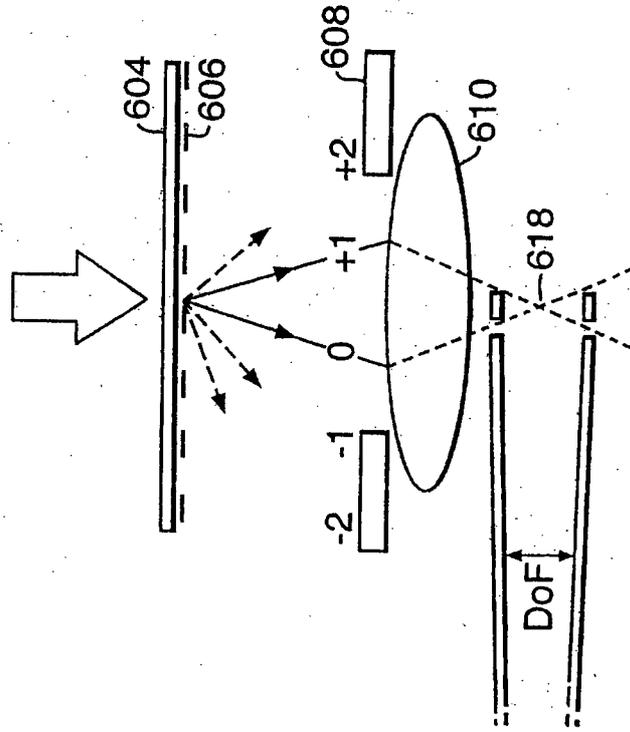
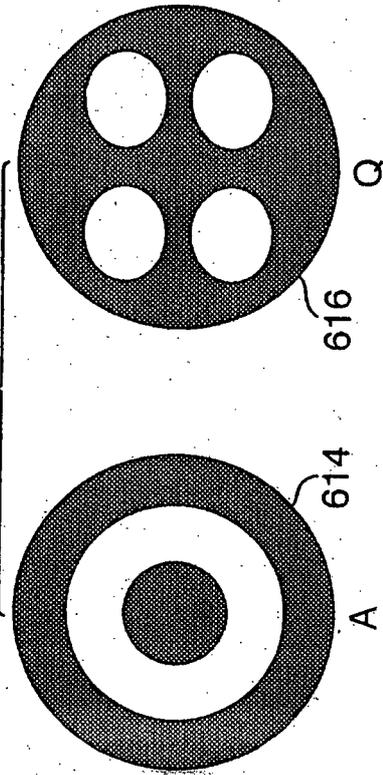


Fig.7(A).

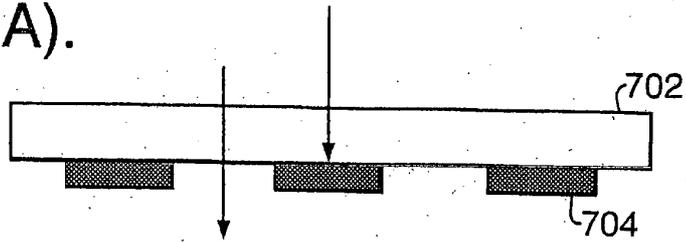


Fig.7(B).

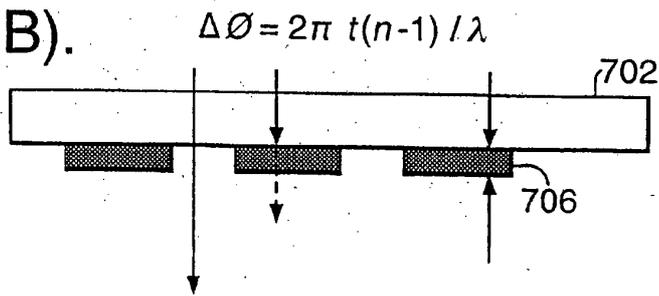


Fig.7(C).

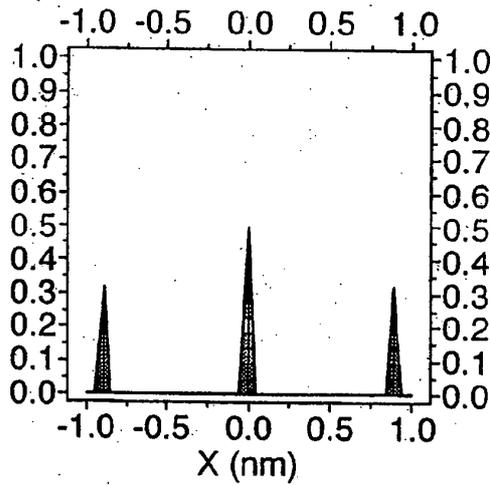


Fig.7(D).

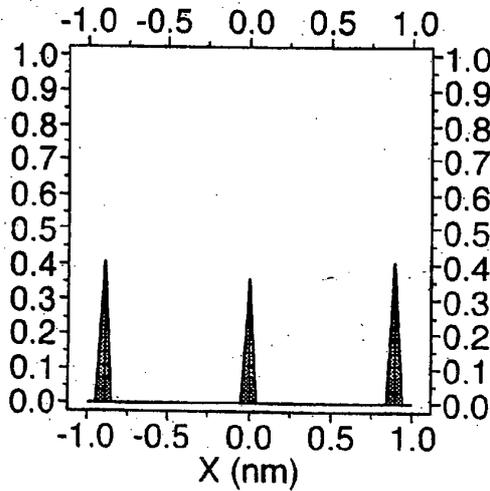


Fig.8(A).

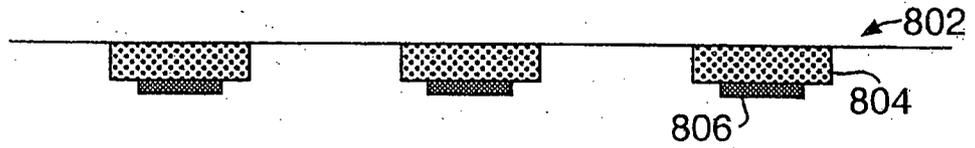


Fig.8(B).

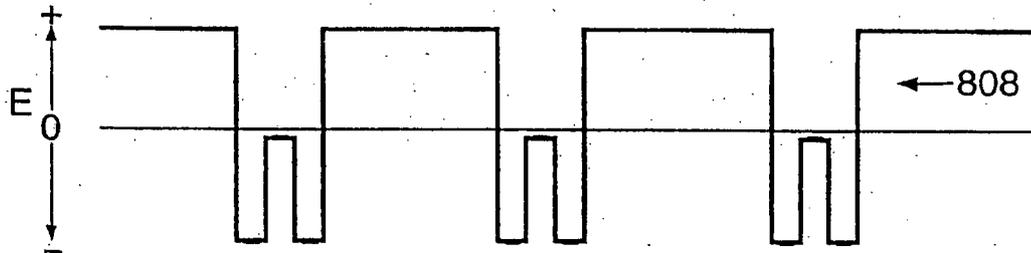


Fig.8(C).

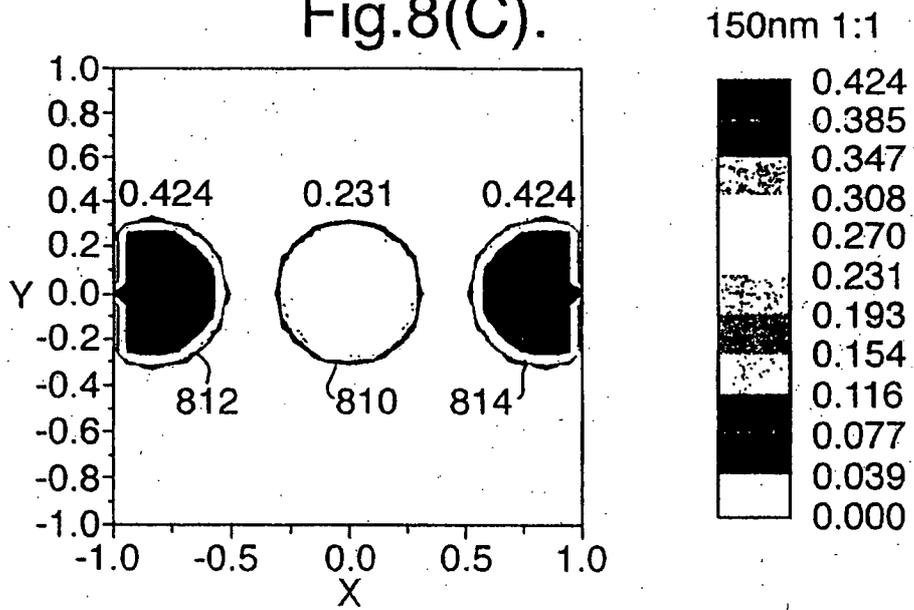


Fig.9(A).



Fig.9(D).



Fig.9(B).

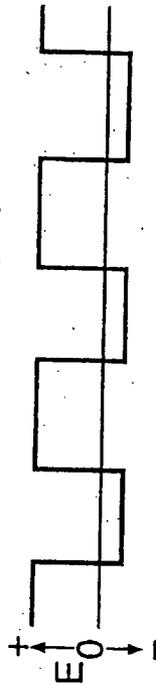


Fig.9(E).

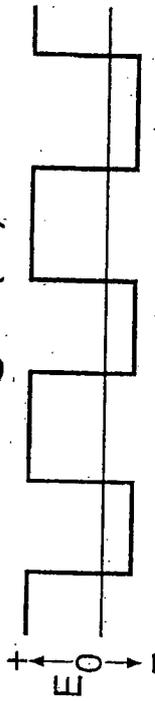


Fig.9(C).

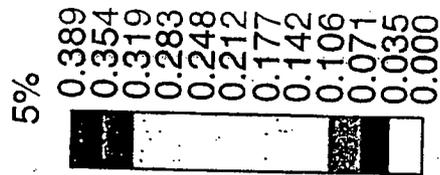
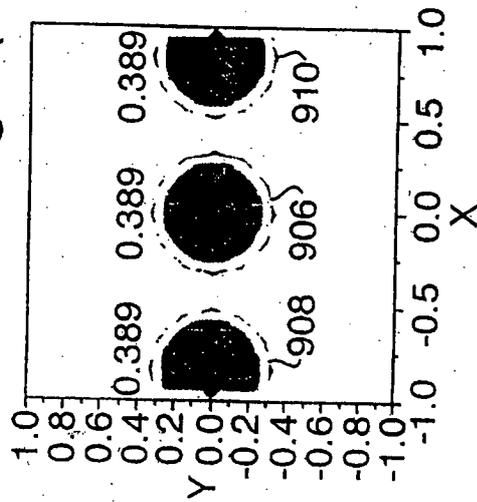


Fig.9(F).

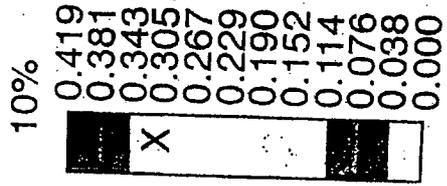
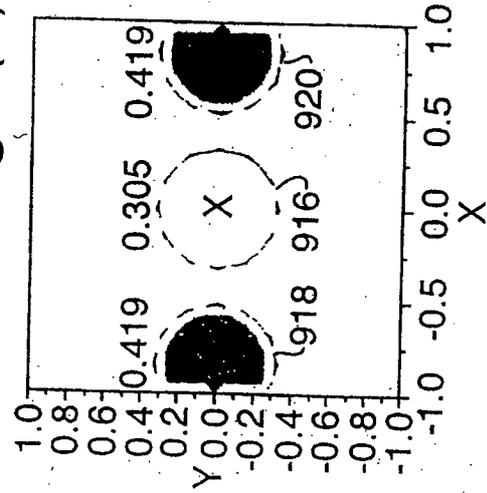


Fig.10(A).

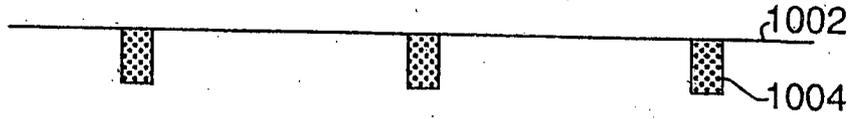


Fig.10(B).

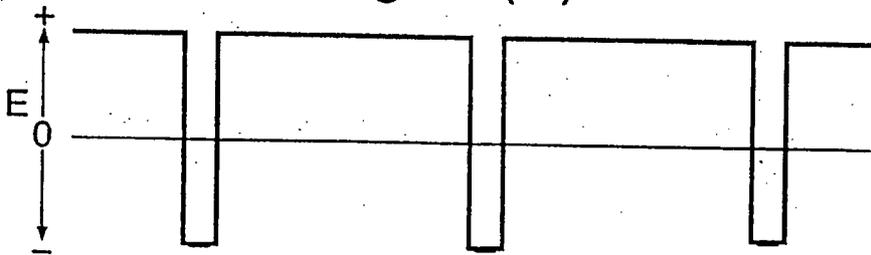


Fig.10(C).

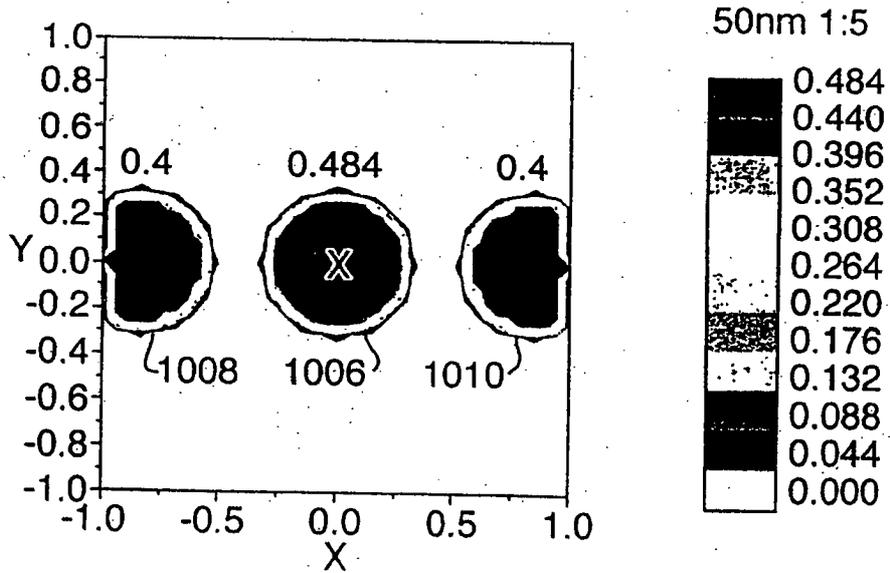


Fig.11(A).

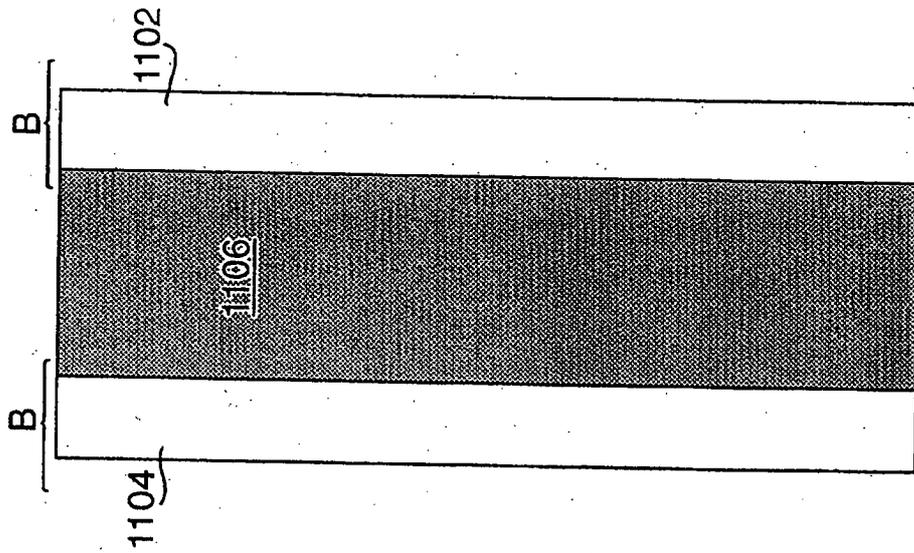


Fig.11(B).

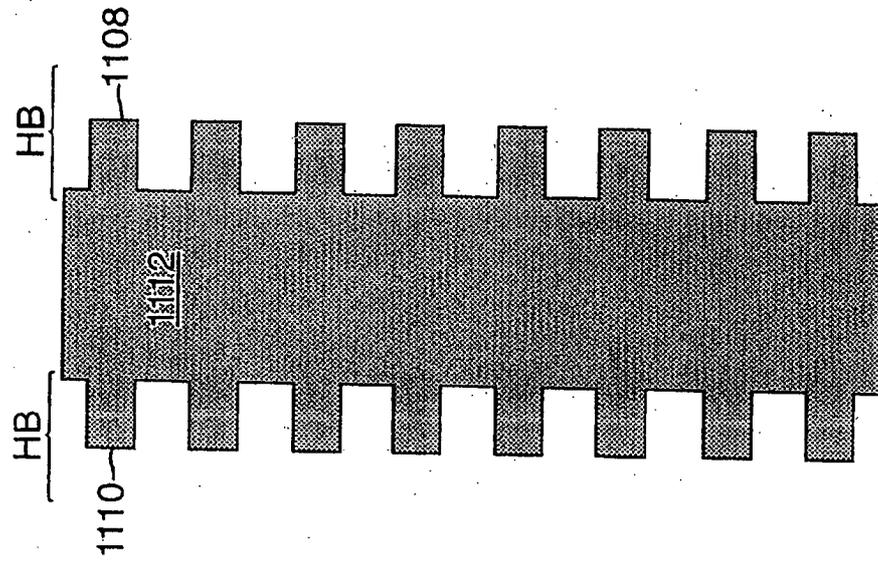


Fig. 12.

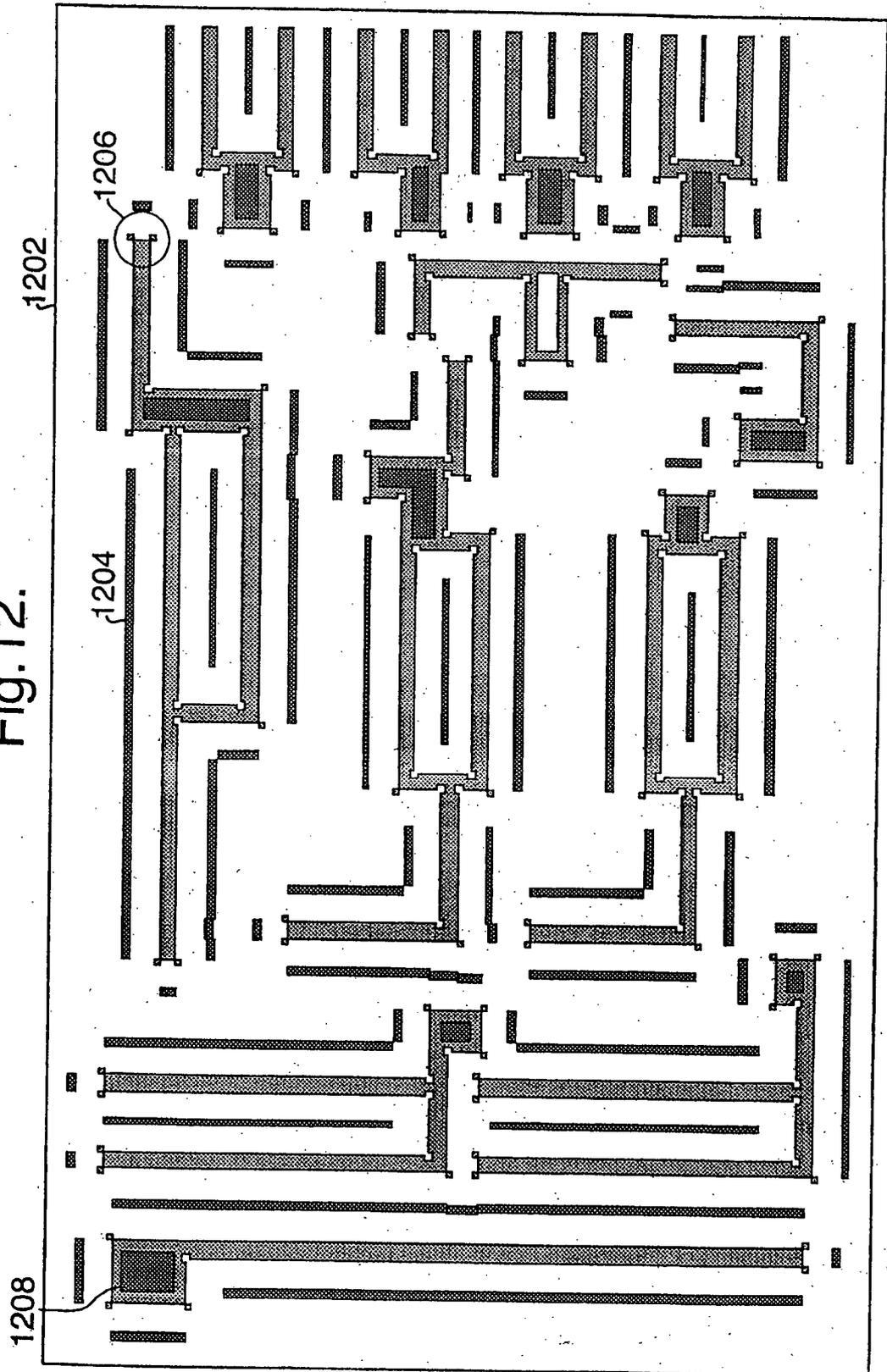


Fig.13(A).

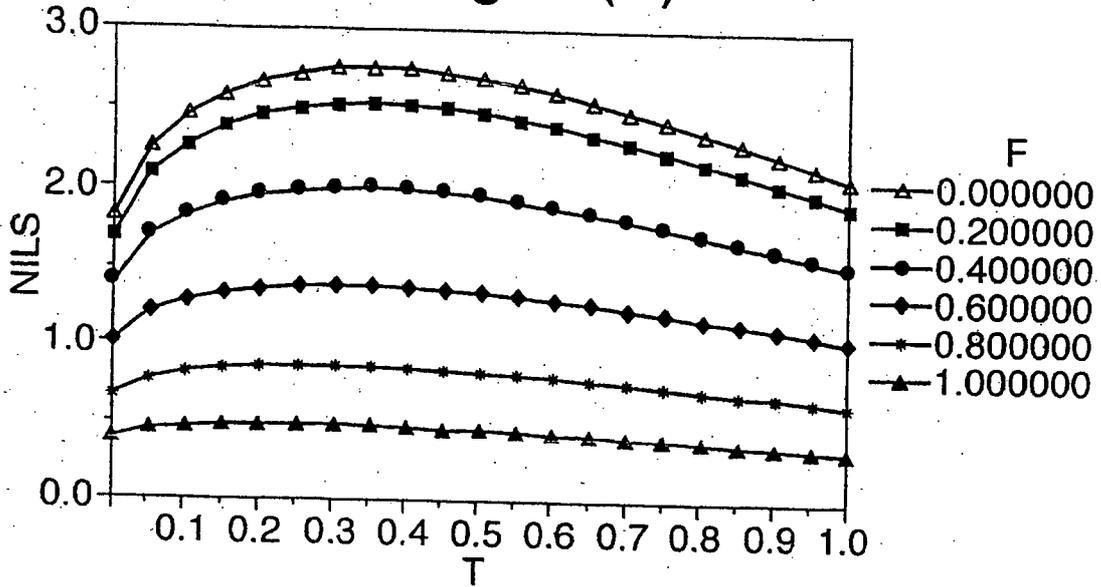


Fig.13(B).

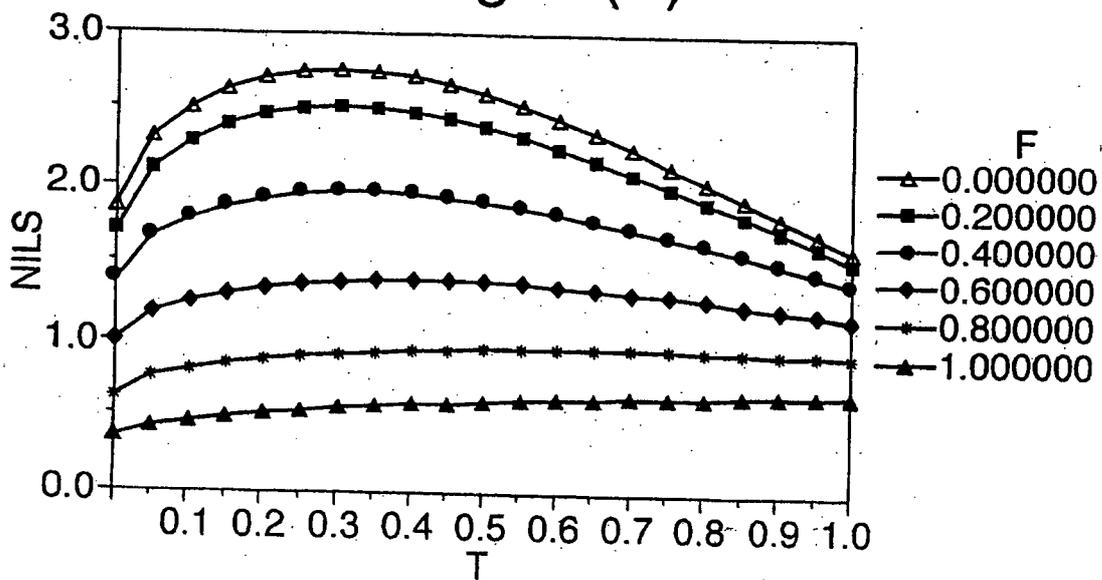


Fig.14(A).

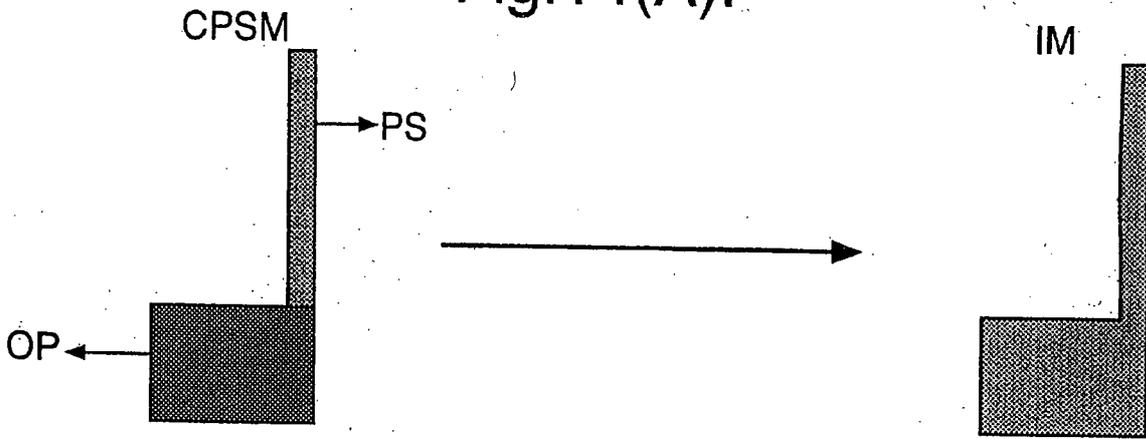


Fig.14(B).

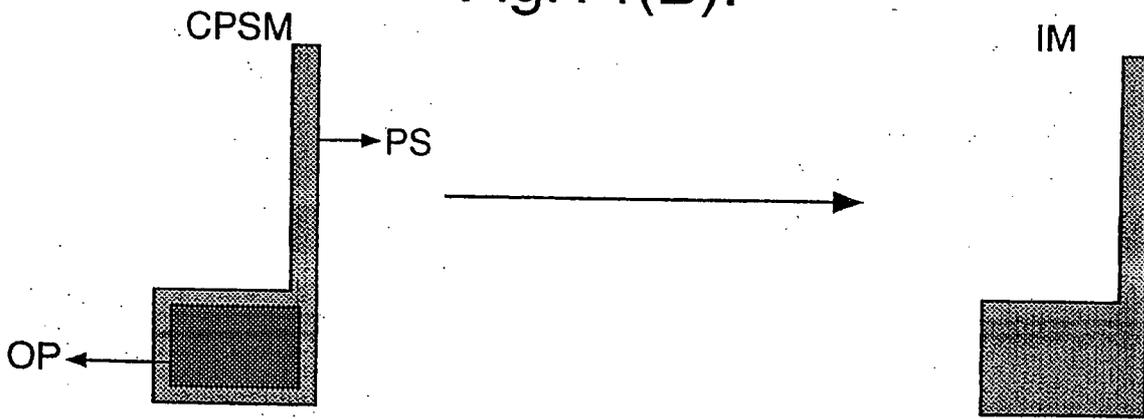


Fig.15.

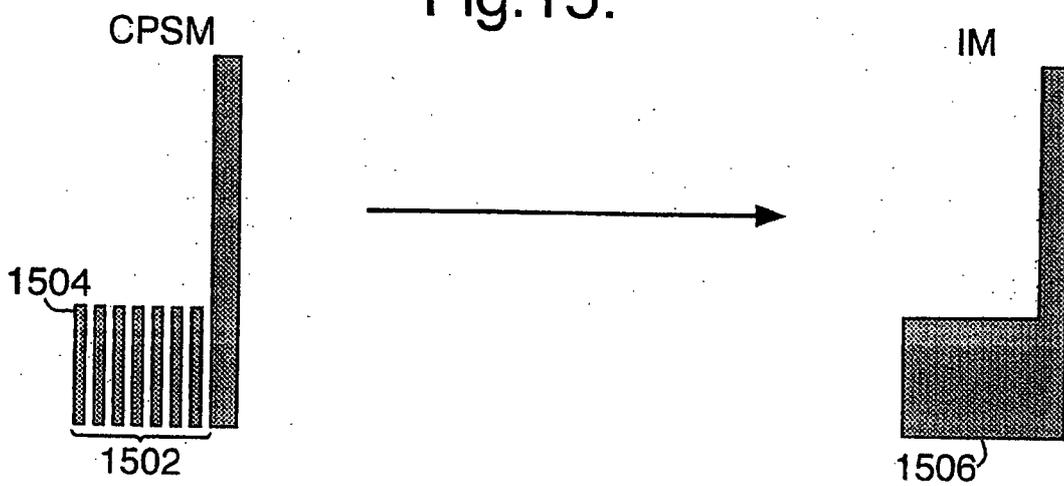


Fig.16(A).

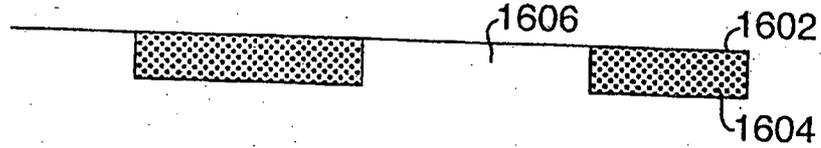


Fig.16(B).

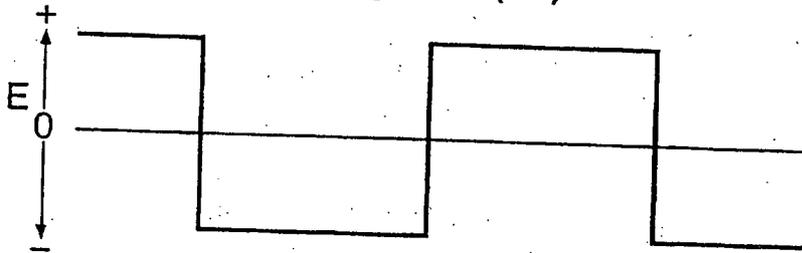


Fig.16(C).

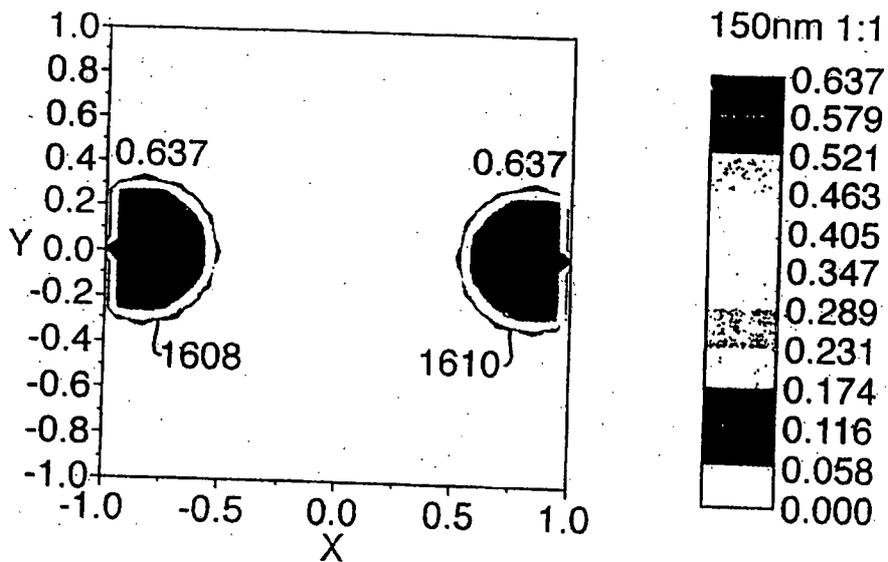


Fig.17(A).

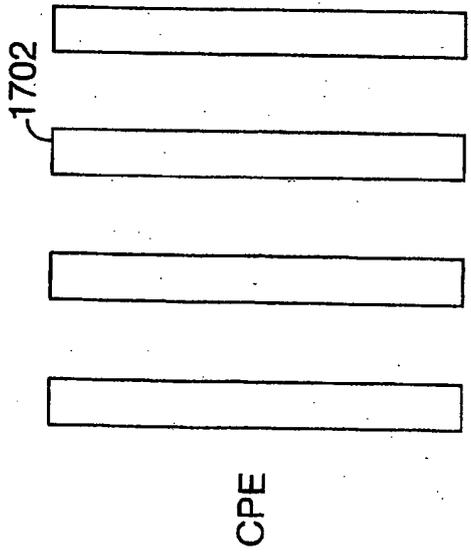


Fig.17(C).

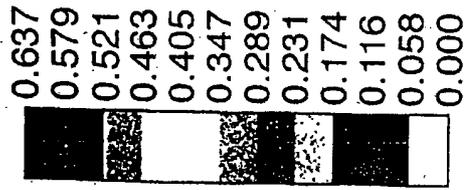
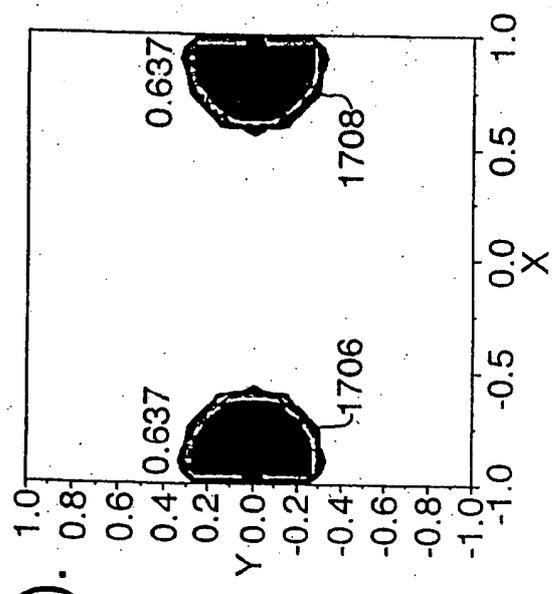


Fig.17(B).

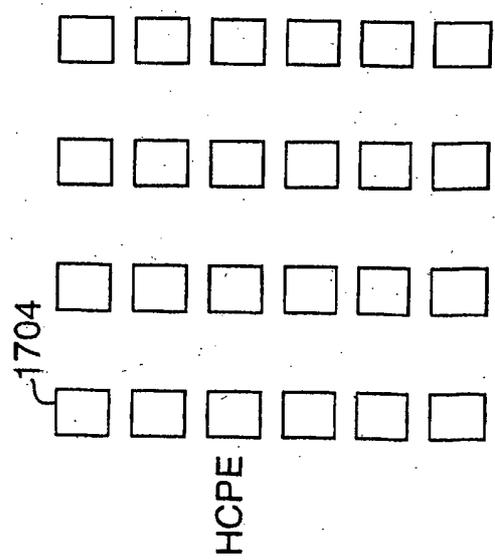


Fig.17(D).

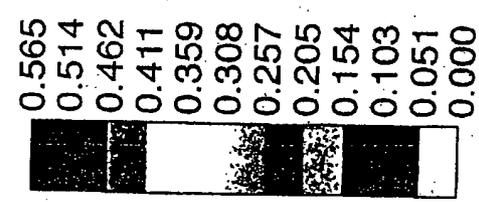
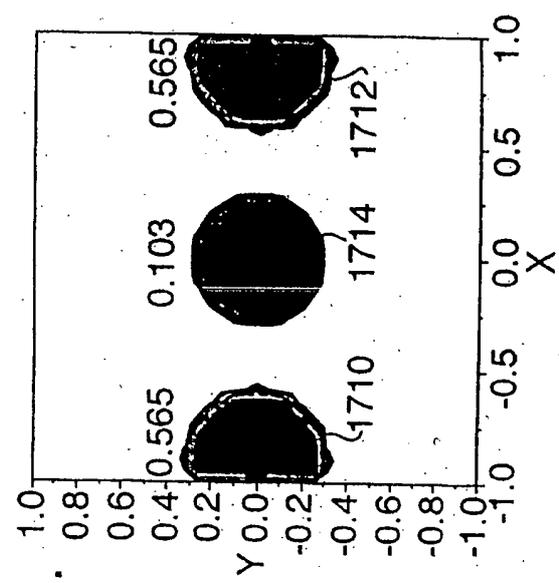
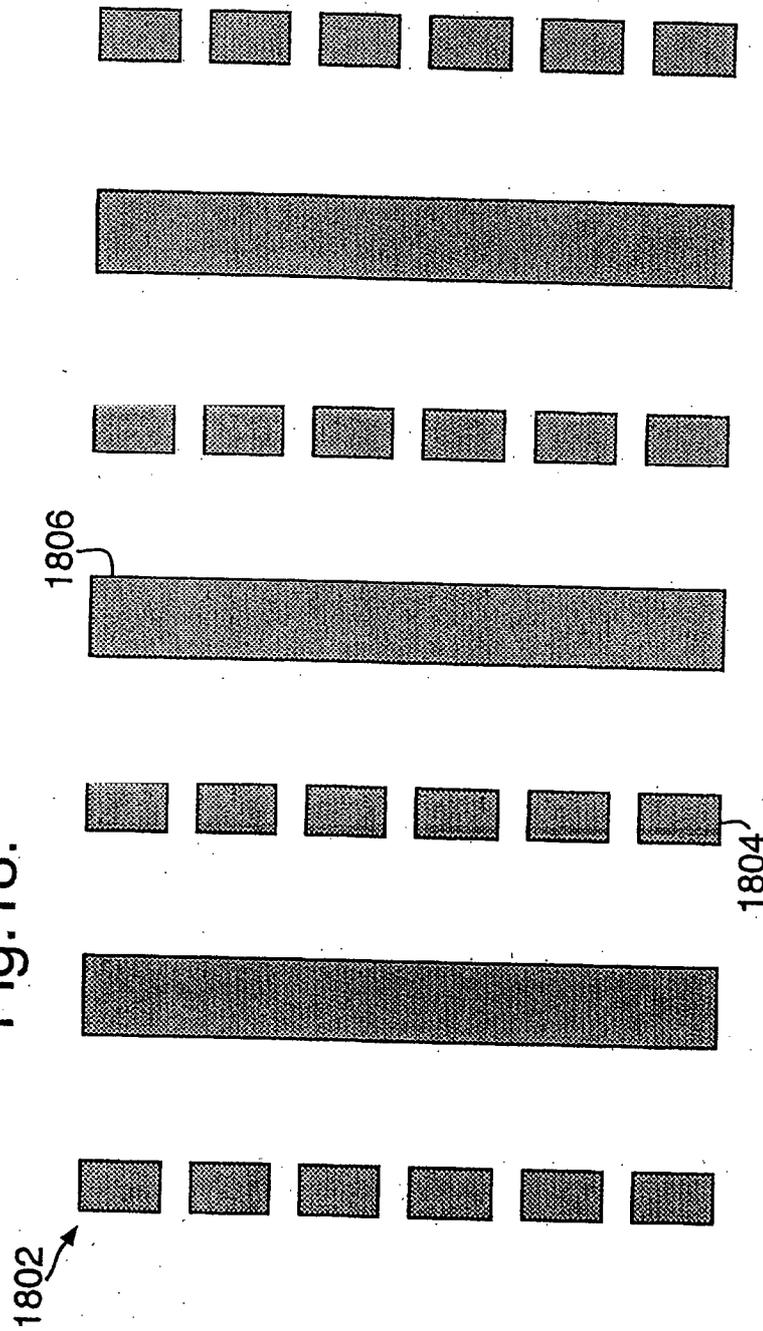


Fig. 18.



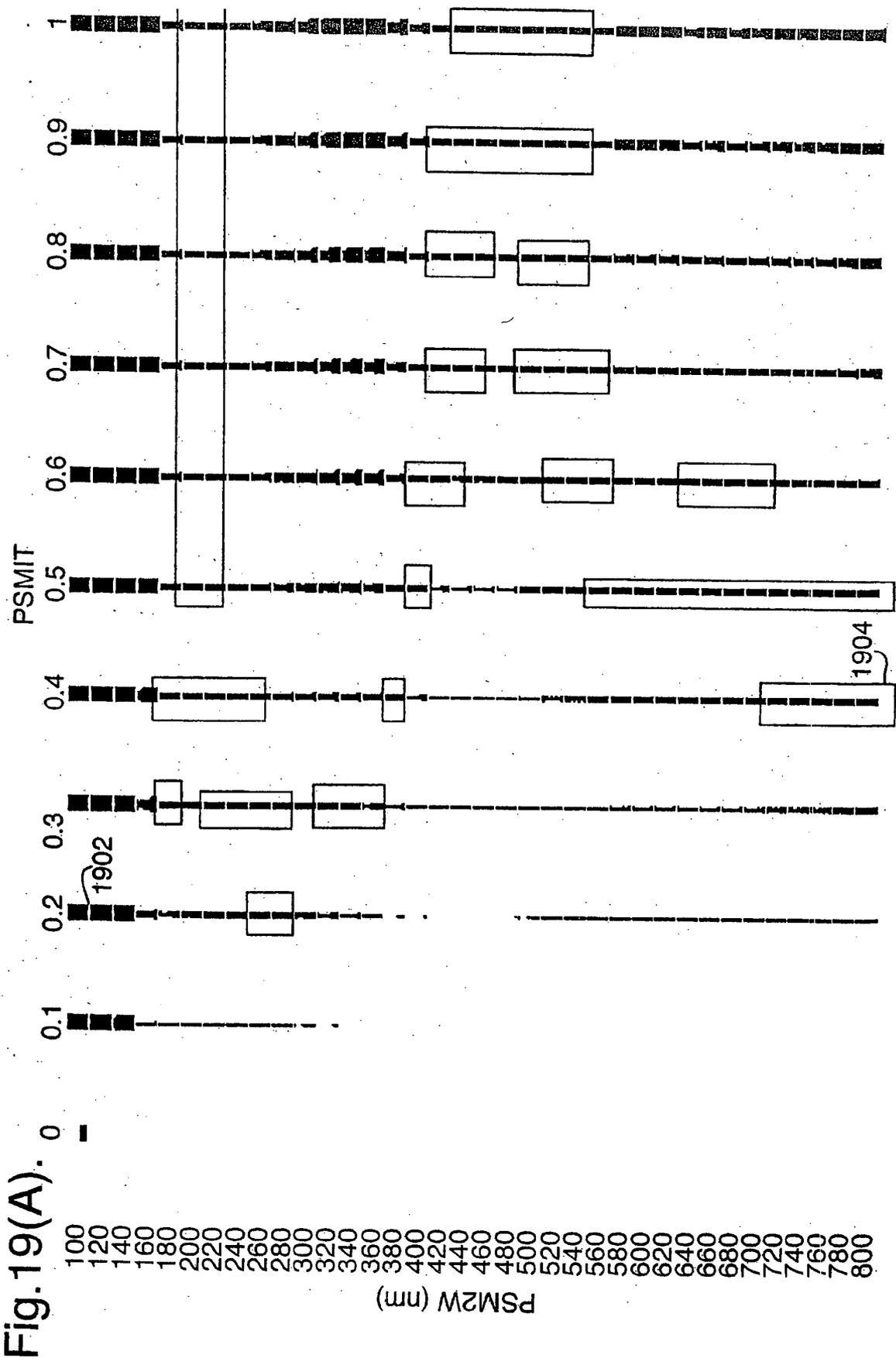


Fig.19(B).

22mJ/-0.15 μm

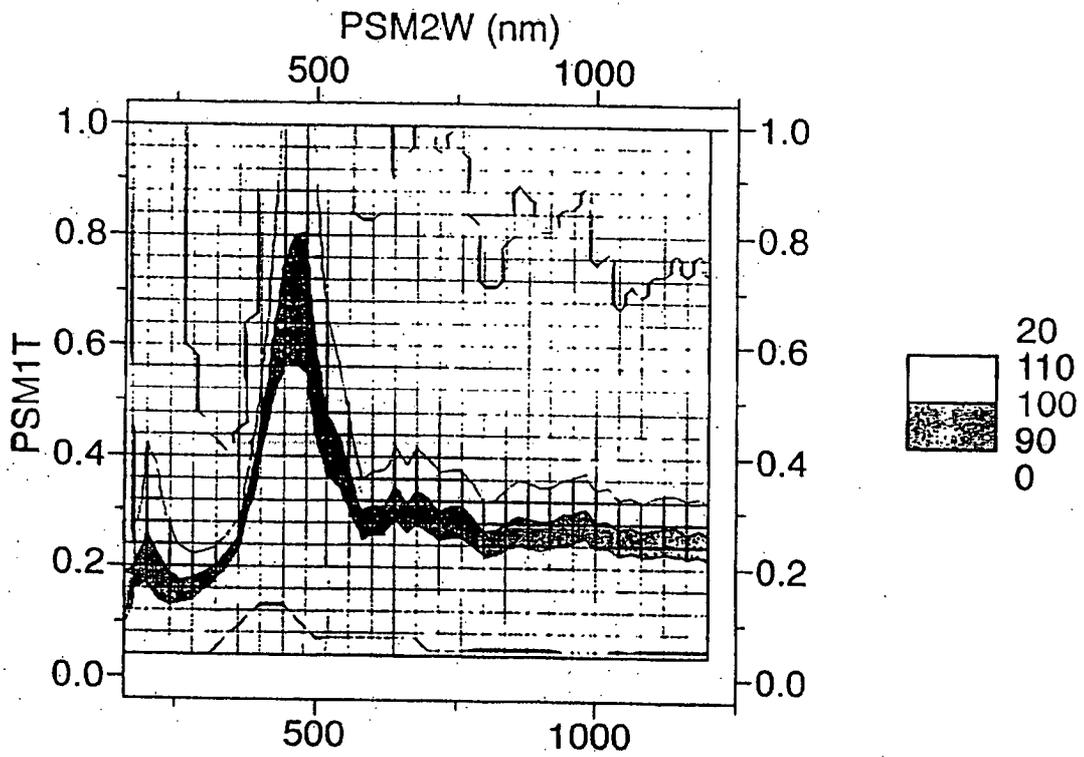


Fig.19(C).

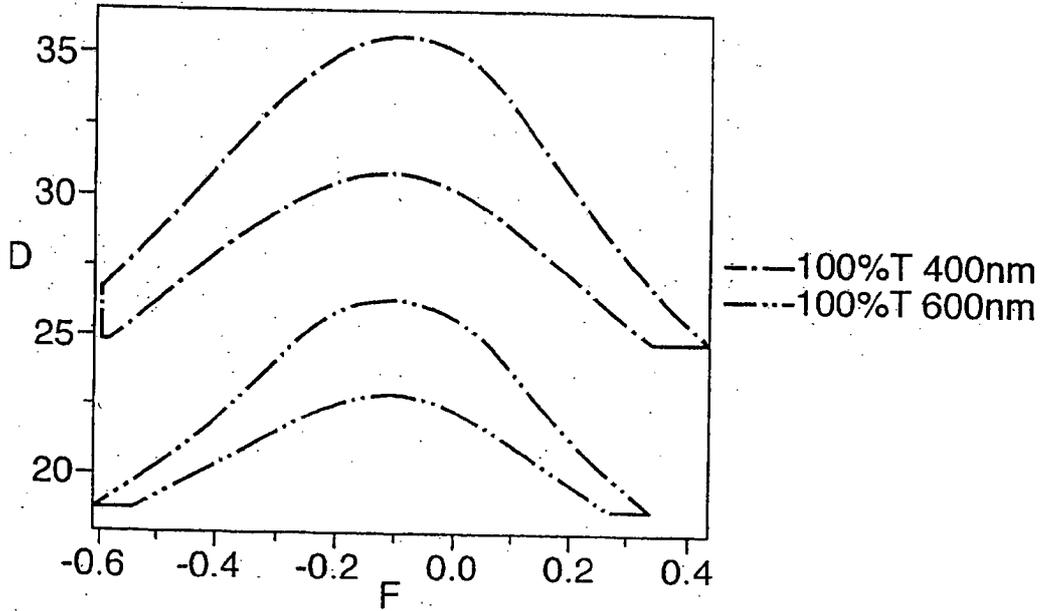


Fig.19(D).

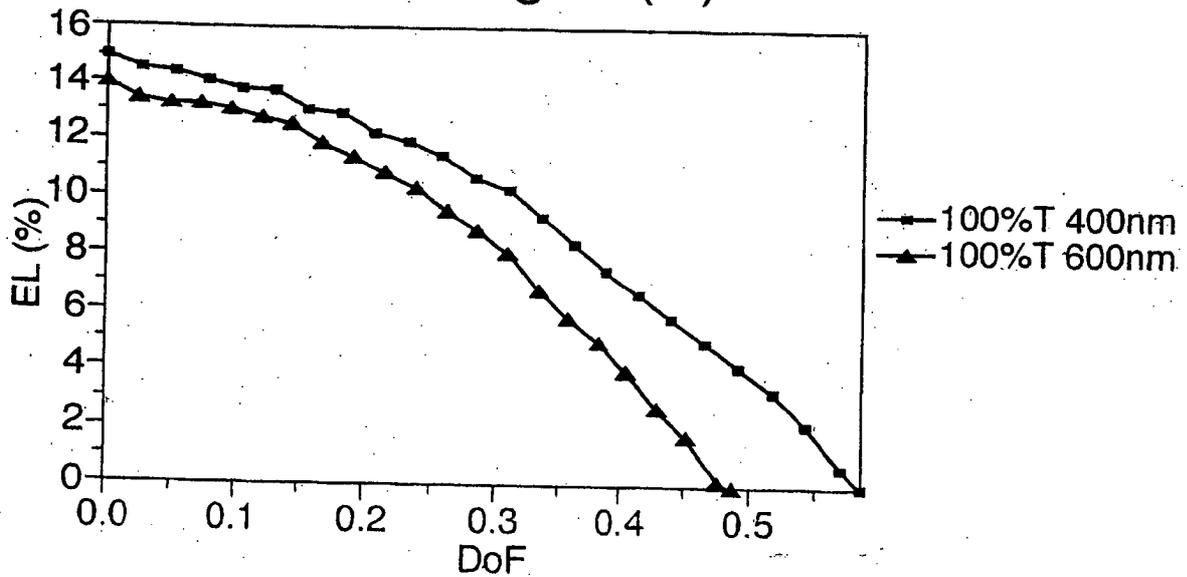


Fig.20(A).

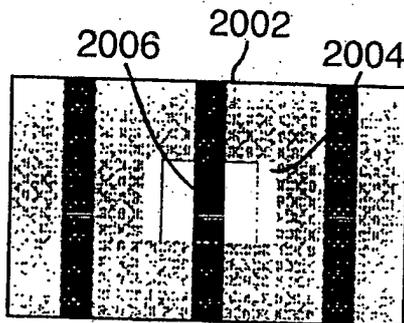


Fig.20(B).

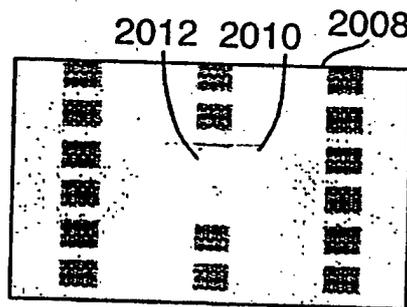


Fig.20(C).

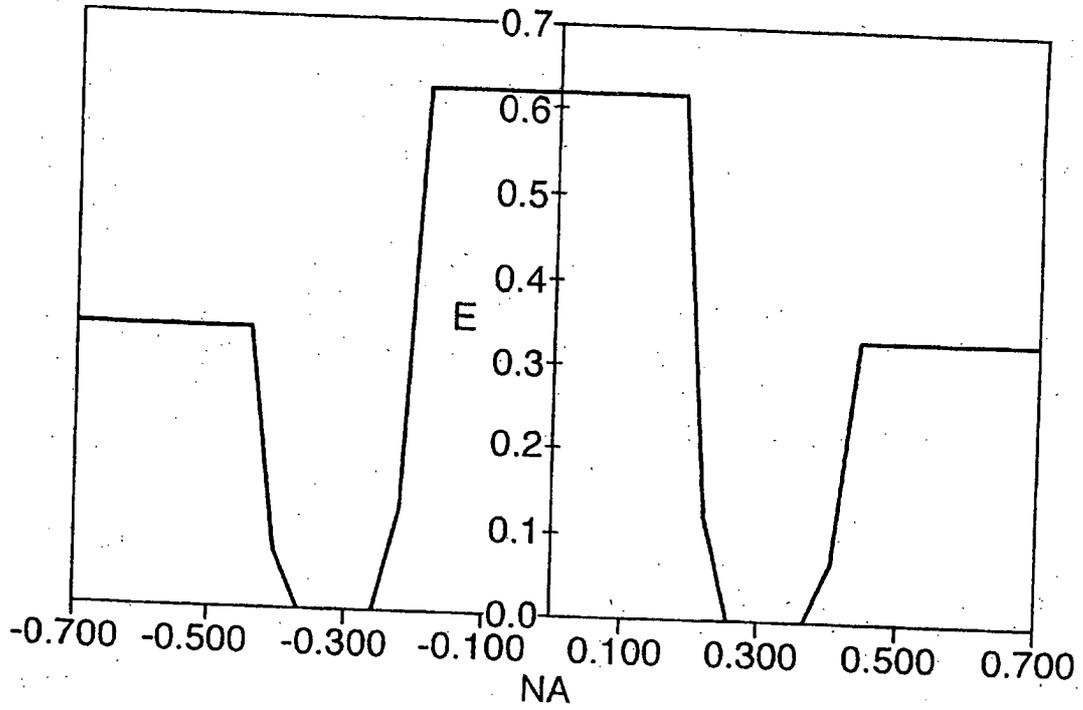


Fig.20(D).

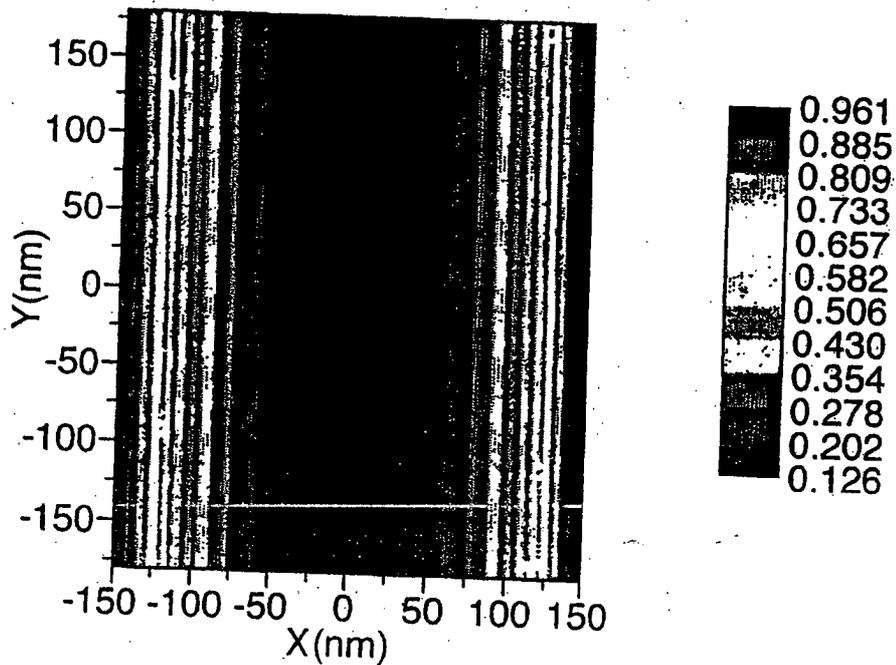


Fig.20(E).

26%T att PSM

400p 26%T

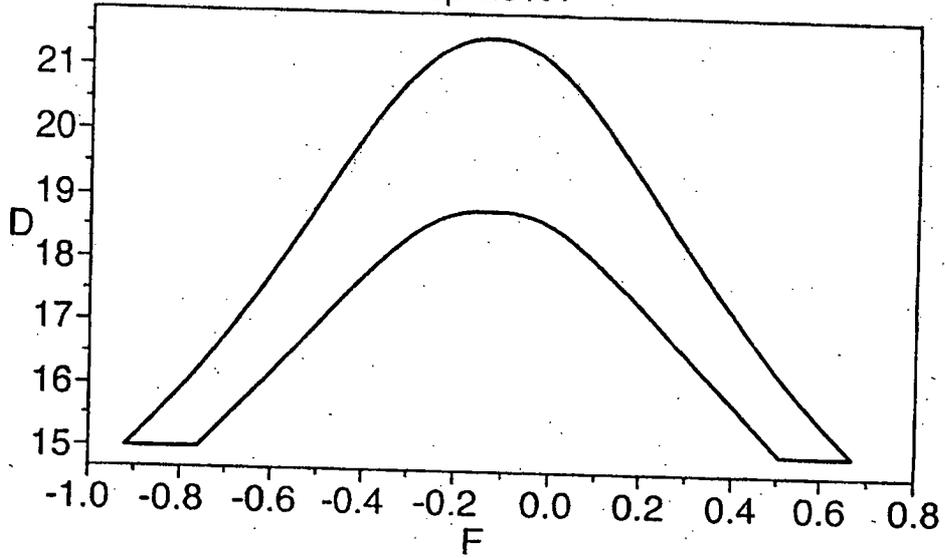


Fig.20(F).

100%T HT PSM

400p 115nm 180nm htp 67%

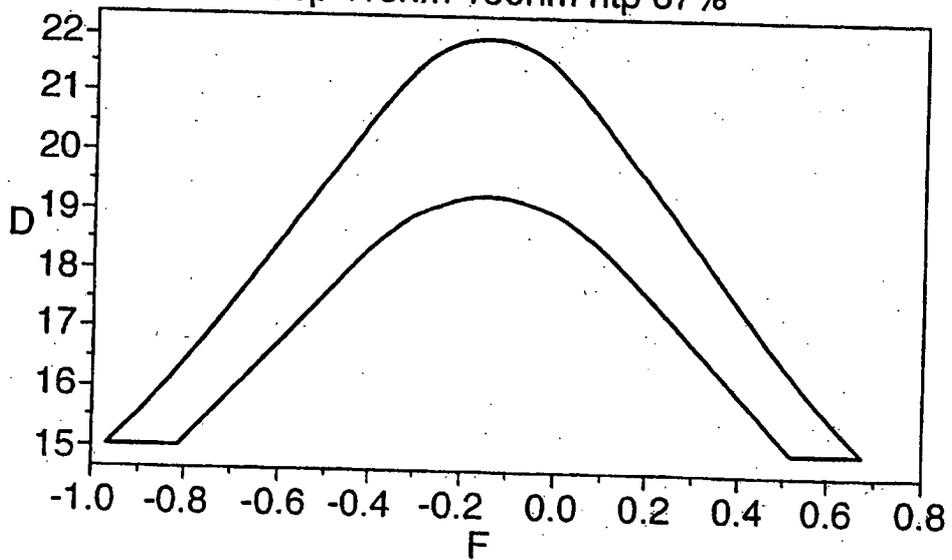


Fig.20(G).

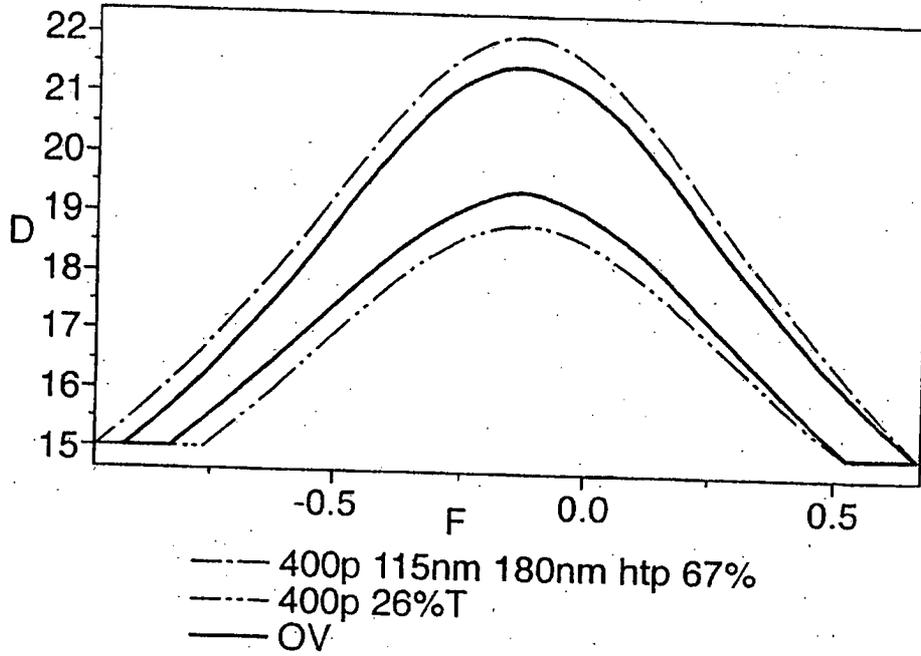


Fig.20(H).

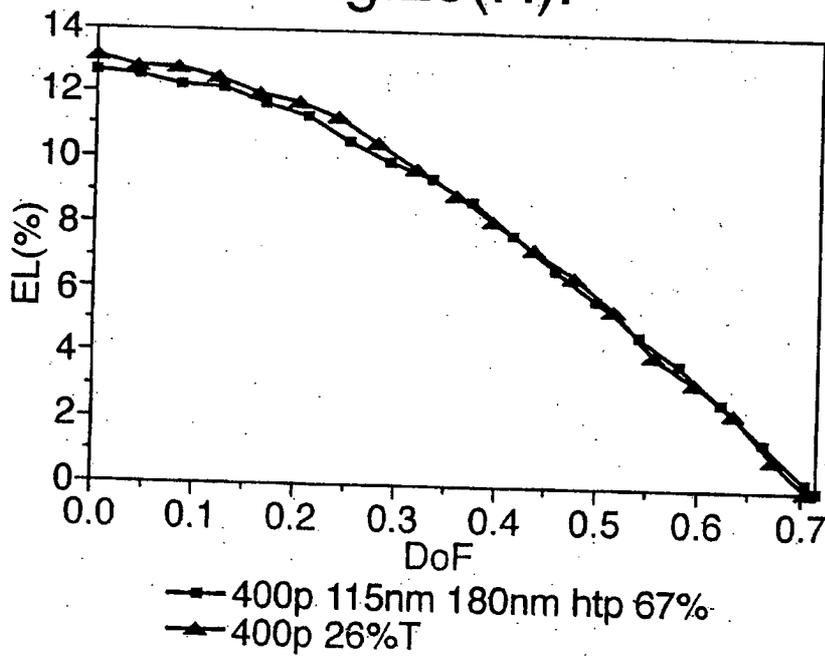


Fig.21(A).

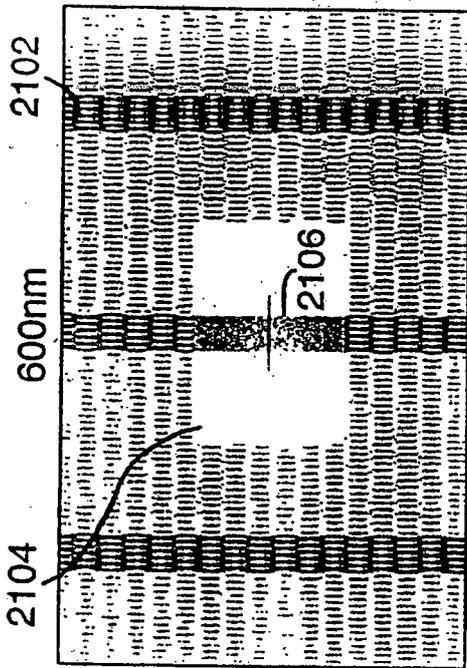


Fig.21(B).

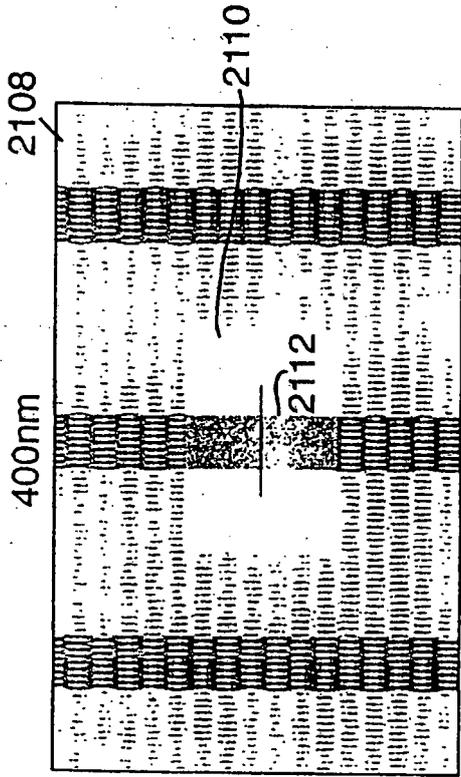


Fig.21(C).

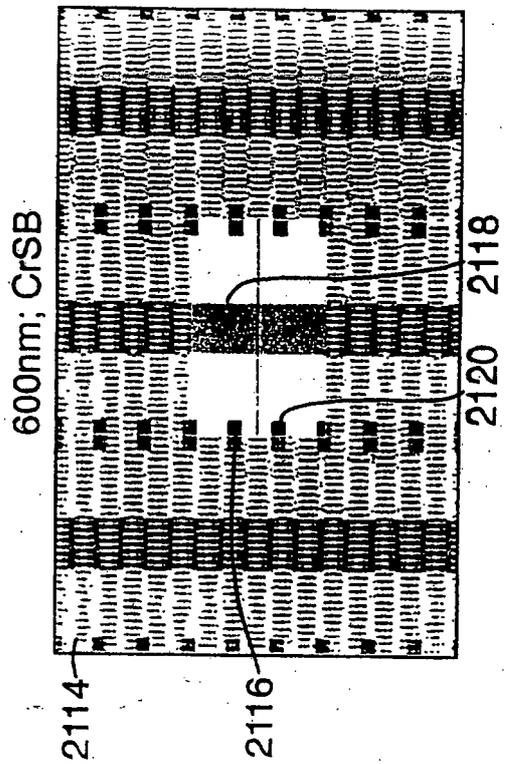


Fig.21(D).

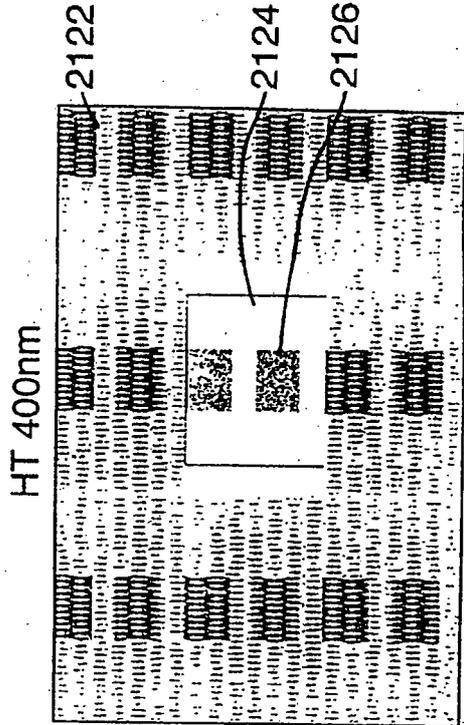


Fig.21(E).

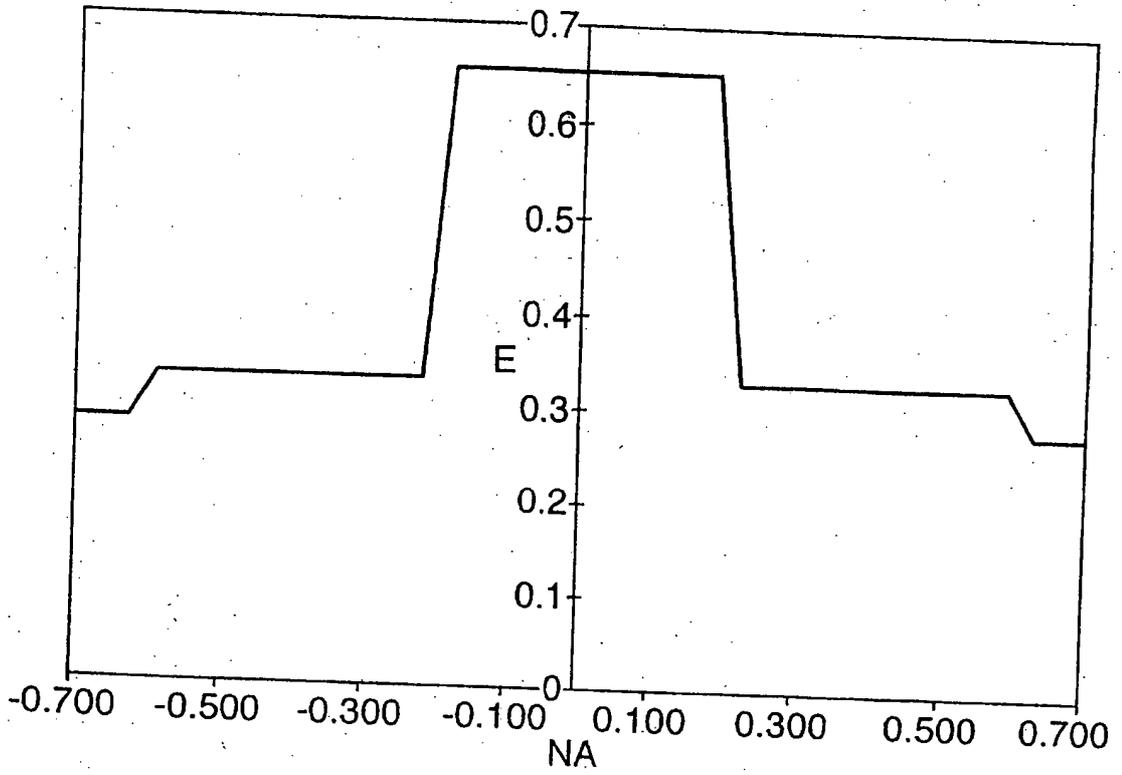


Fig.21(F).

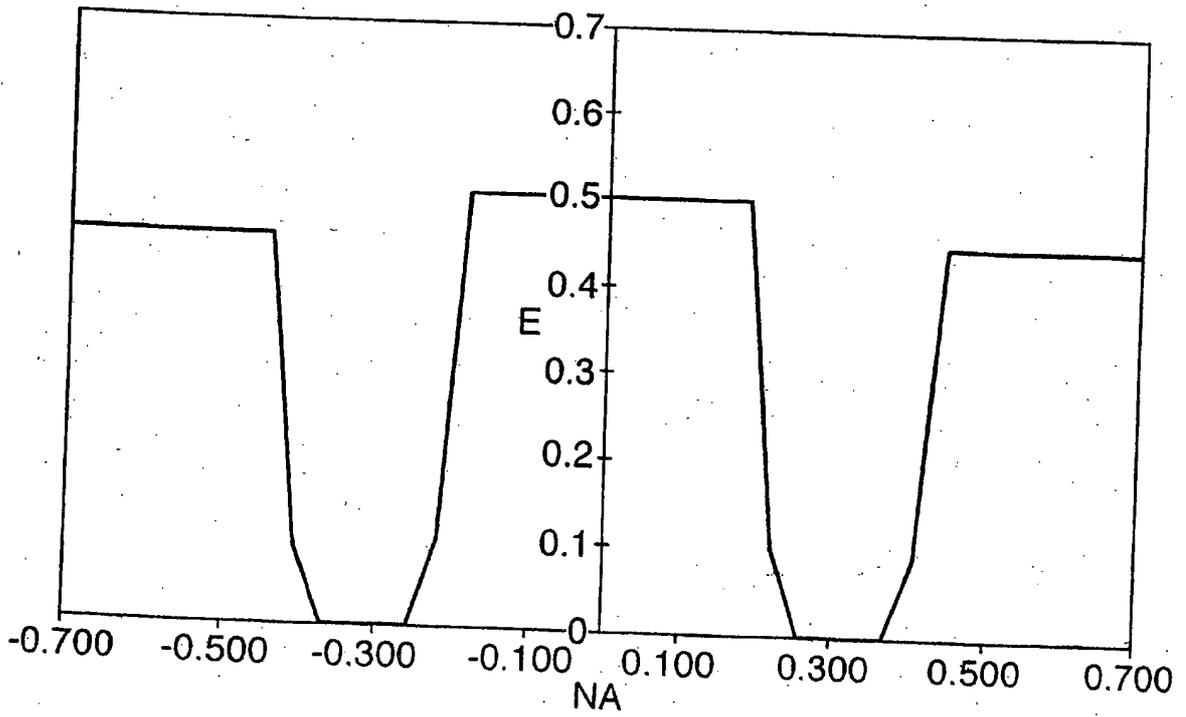


Fig.21(G).

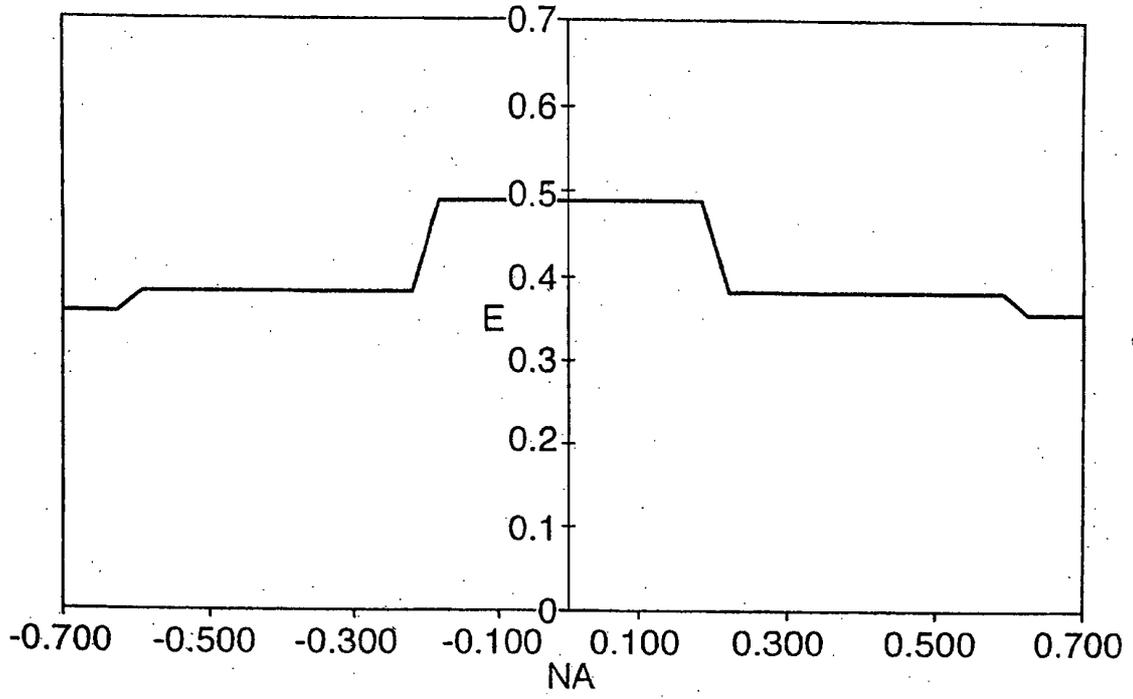


Fig.21(H).

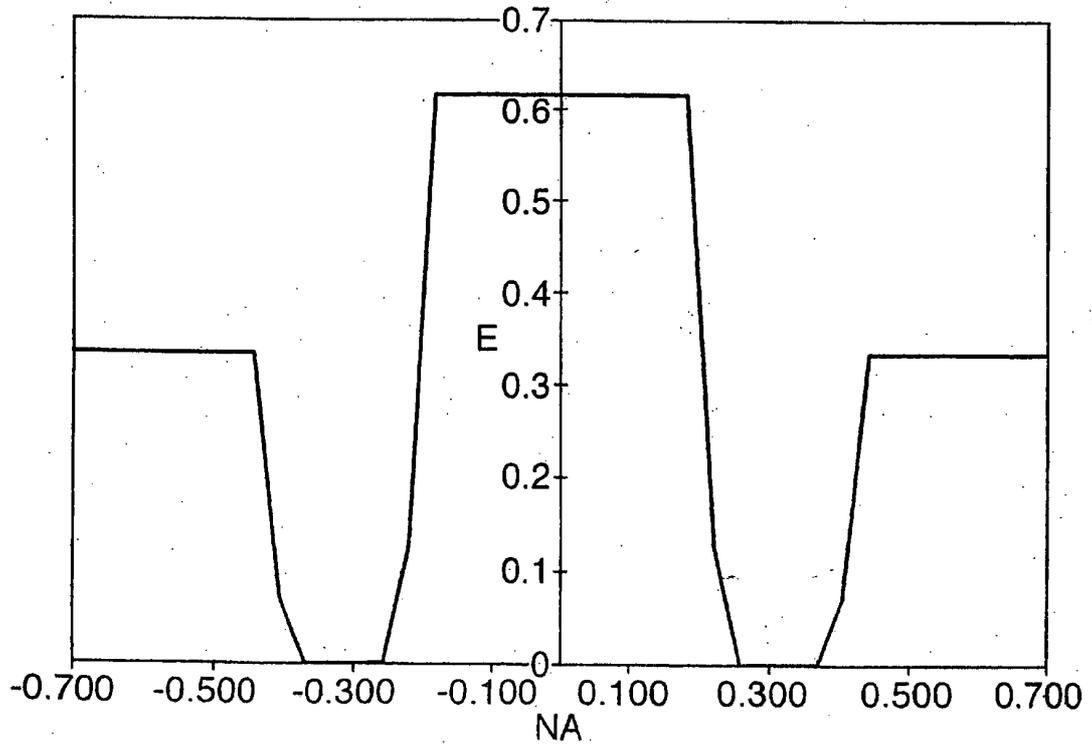


Fig.21(I).

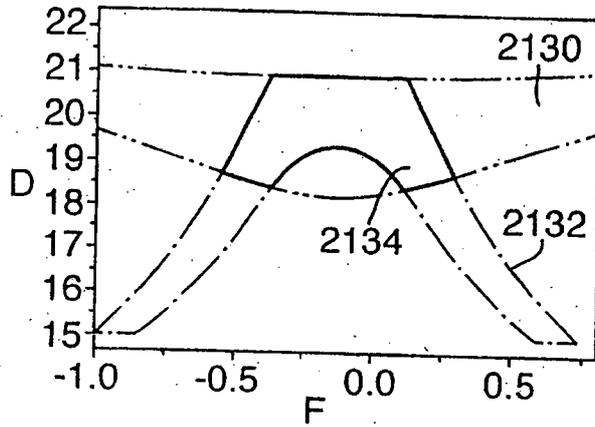


Fig.21(J).

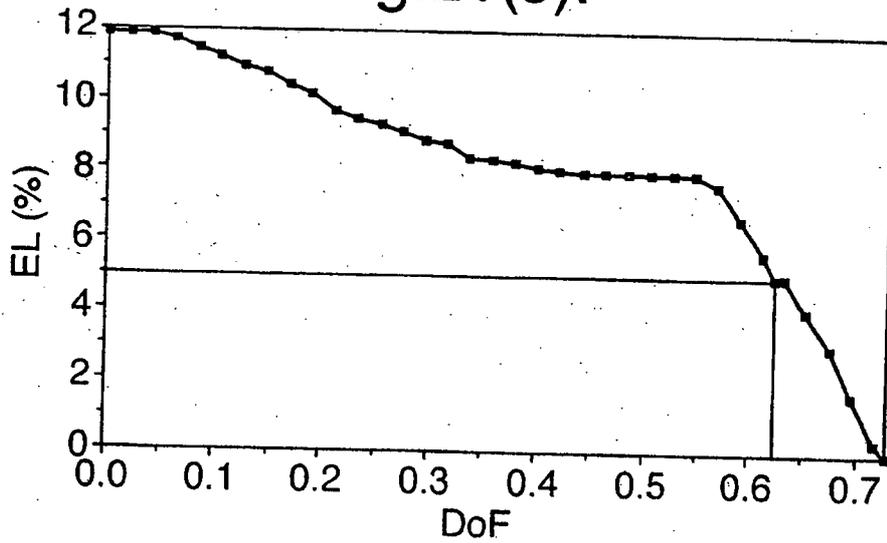


Fig.22(A).

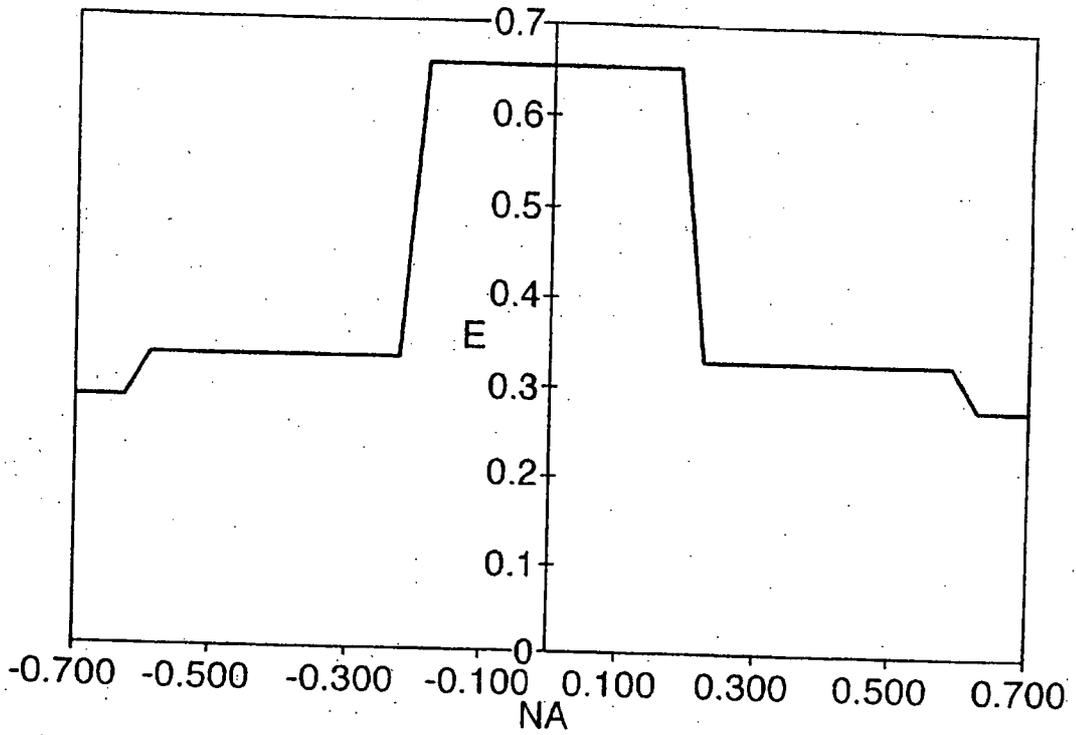


Fig.22(B).

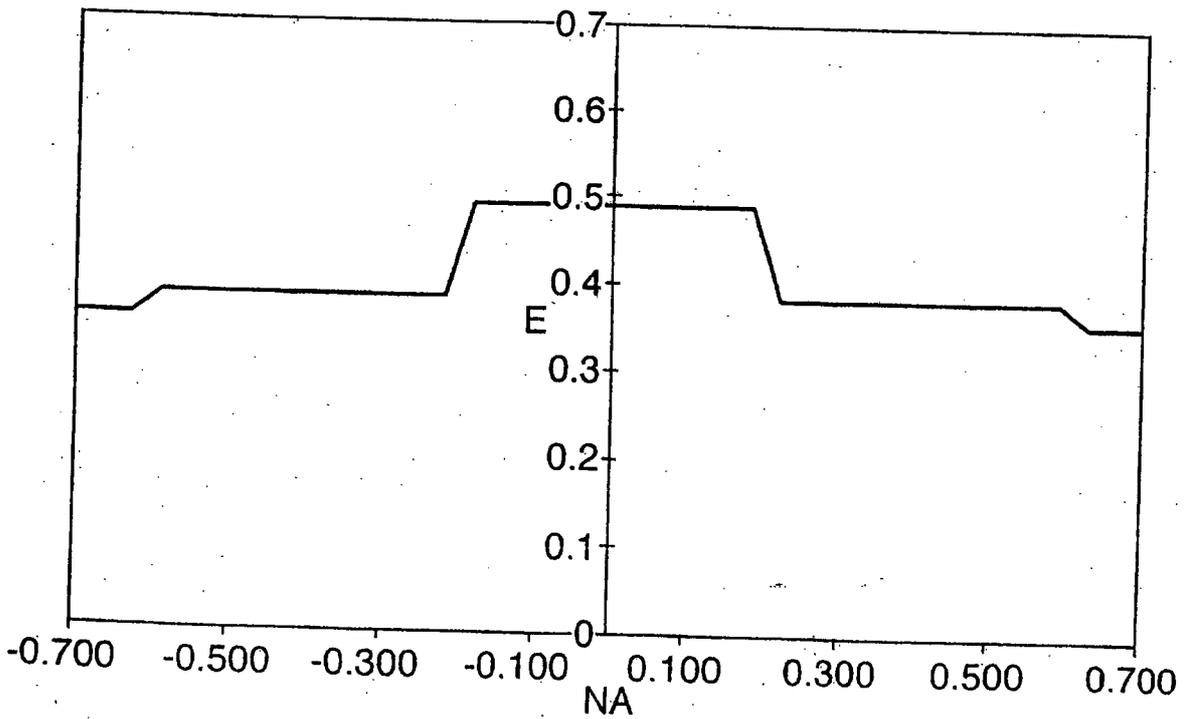


Fig.22(C).

DoF=0.4 μm

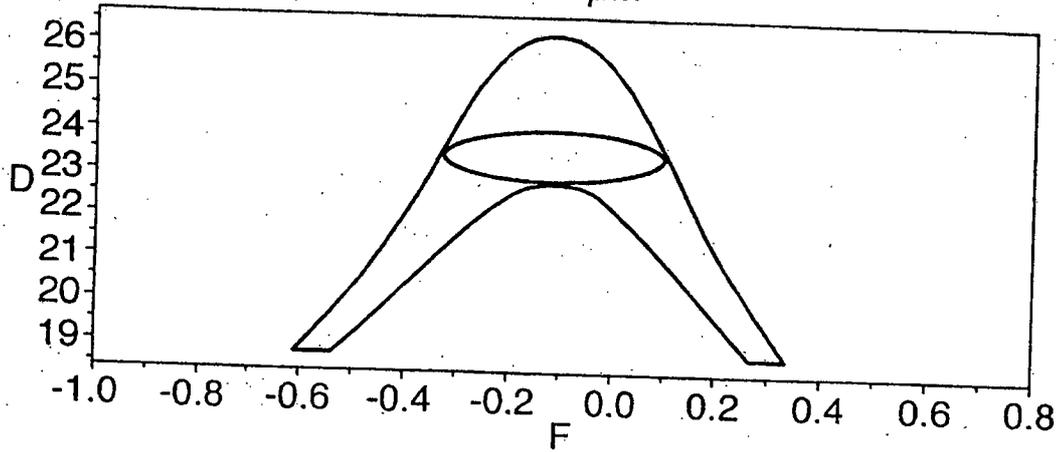


Fig.22(D).

DoF=1.7 μm

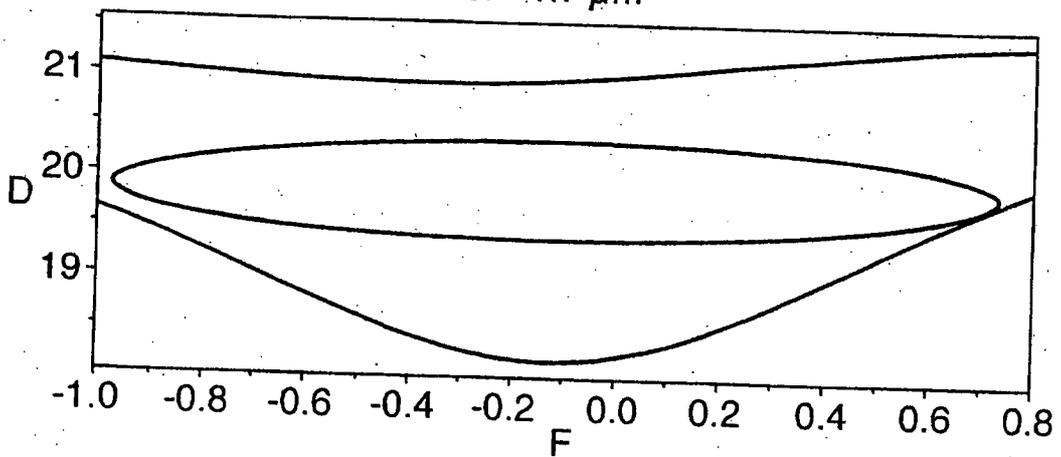


Fig.23(A).

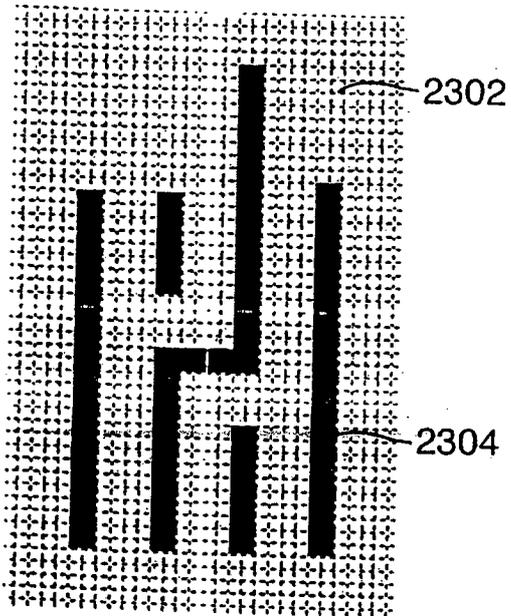


Fig.23(B).

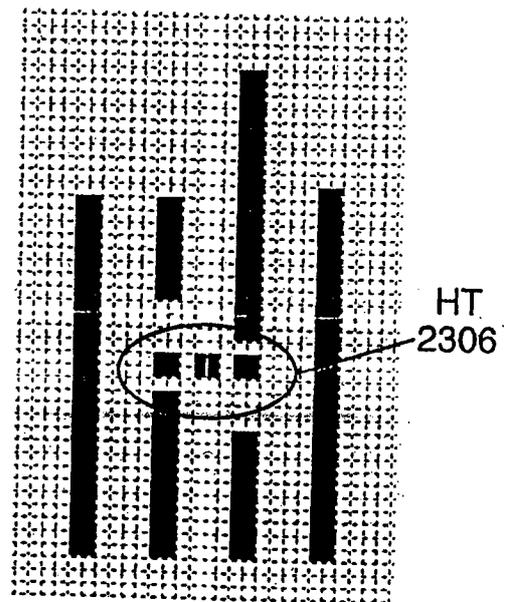


Fig.23(C). 0.68 NA, $\lambda=248\text{nm}$, 0 F

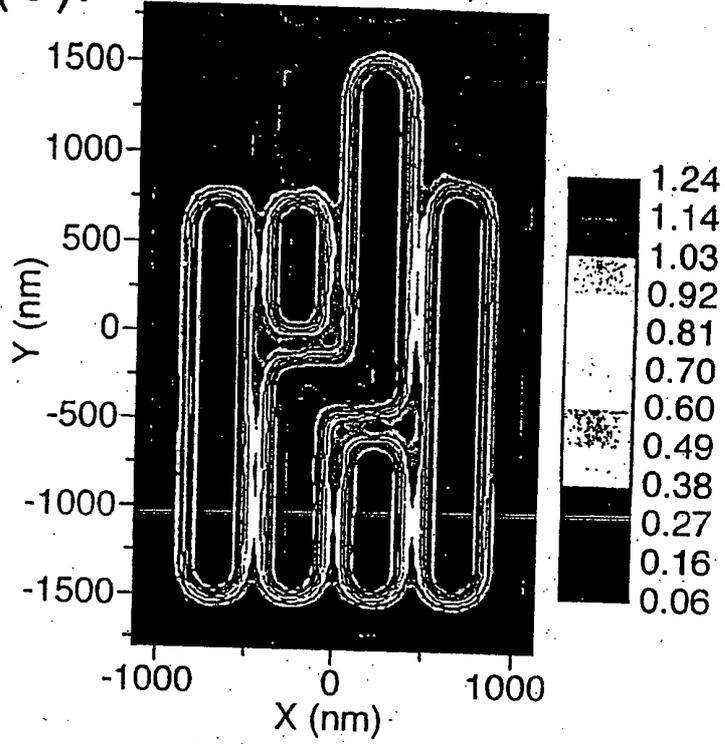


Fig.23(D). 0.68 NA, $\lambda=248\text{nm}$, 0 F

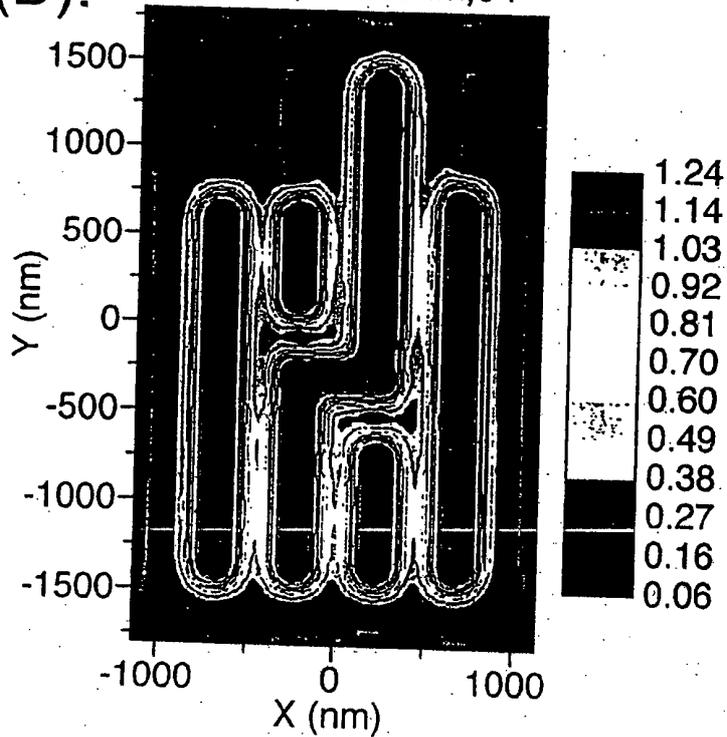


Fig.23(E).

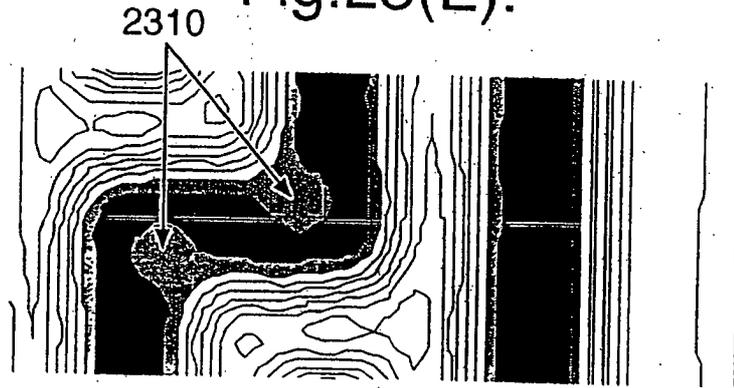


Fig.23(F).

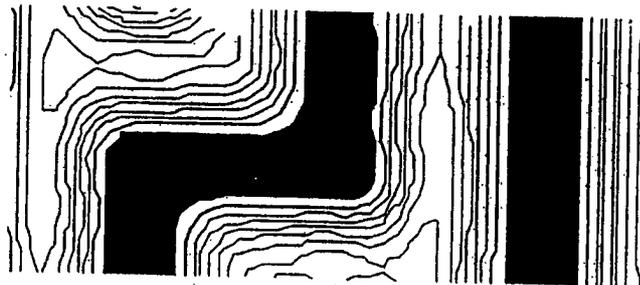


Fig.24.

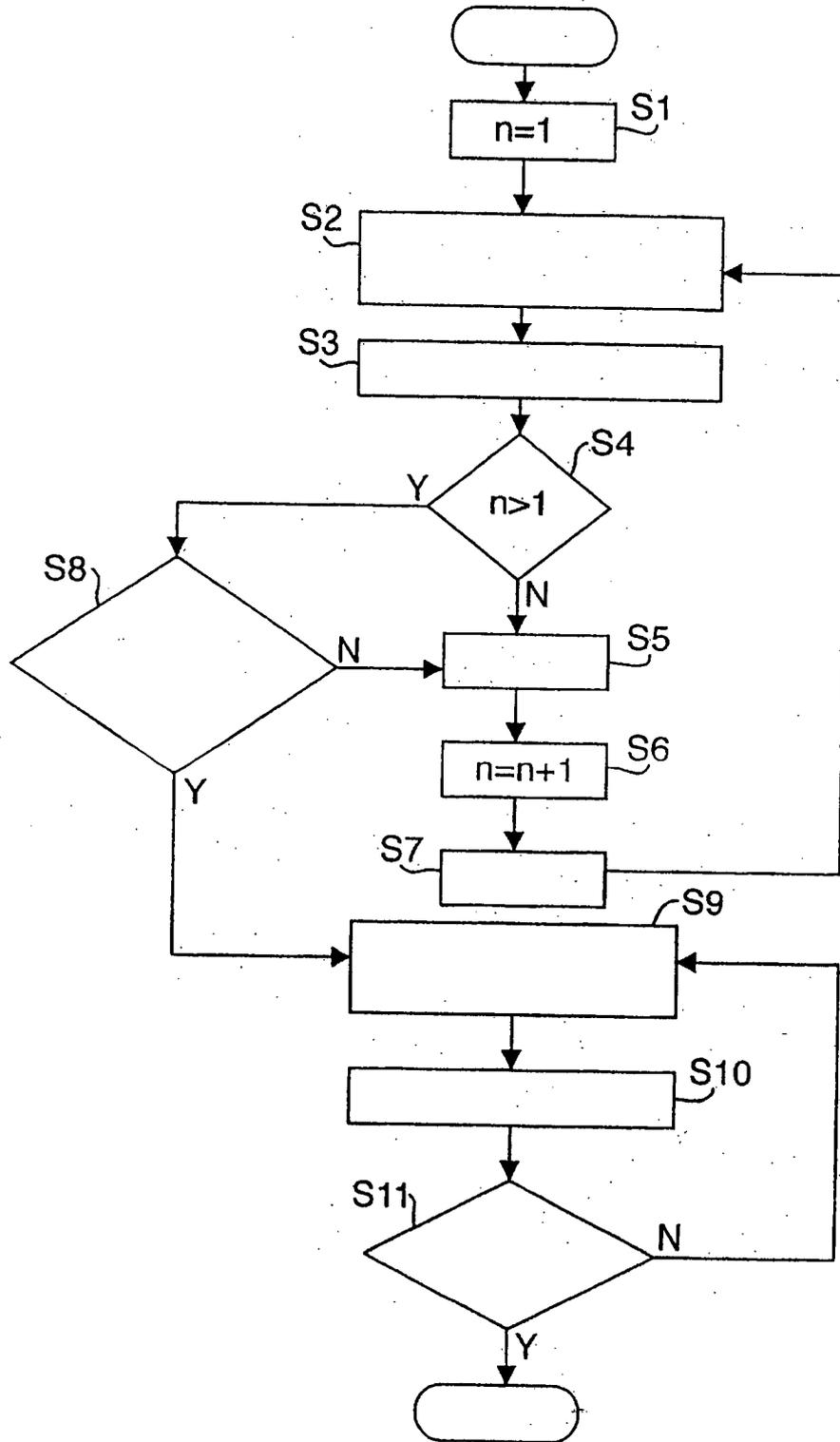


Fig.25.

