



(19)  
Bundesrepublik Deutschland  
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 10 2006 038 398 A1** 2008.02.21

(12)

## Offenlegungsschrift

(21) Aktenzeichen: **10 2006 038 398.2**

(22) Anmeldetag: **15.08.2006**

(43) Offenlegungstag: **21.02.2008**

(51) Int Cl.<sup>8</sup>: **G02B 13/14** (2006.01)

**G02B 3/00** (2006.01)

**G03F 7/20** (2006.01)

(71) Anmelder:

**Carl Zeiss SMT AG, 73447 Oberkochen, DE**

(72) Erfinder:

**Krähmer, Daniel, 73431 Aalen, DE; Ruoff,  
Johannes, 73447 Oberkochen, DE**

(56) Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht  
gezogene Druckschriften:

**US2004/01 45 806 A1**

**US2003/00 11 896 A1**

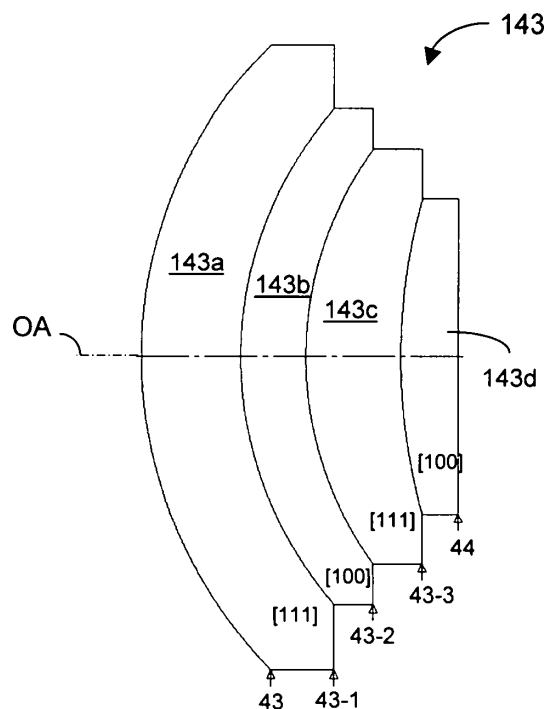
**WO 2006/0 89 919 A1**

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

Prüfungsantrag gemäß § 44 PatG ist gestellt.

(54) Bezeichnung: **Projektionsobjektiv einer mikrolithographischen Projektionsbelichtungsanlage**

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft ein Projektionsobjektiv einer mikrolithographischen Projektionsbelichtungsanlage zur Abbildung einer in einer Objektebene positionierbaren Maske auf eine in einer Bildebene positionierbare lichtempfindliche Schicht, welches eine optische Achse (OA) aufweist. Um den Einsatz hochbrechender Kristallmaterialien bei Begrenzung des negativen Einflusses der intrinsischen Doppelbrechung zu ermöglichen, weist ein Projektionsobjektiv gemäß einem Aspekt der Erfindung wenigstens eine Linse (143, 255) auf, welche wenigstens eine gekrümmte Linsenfläche aufweist und aus wenigstens vier Linsenelementen (143a-143d, 255a-255d) aus intrinsisch doppelbrechendem Material zusammengesetzt ist, die entlang der optischen Achse (OA) hintereinander angeordnet sind, wobei paarweise jeweils zwei dieser vier Linsenelemente (143a-143d, 255a-255d) den gleichen Kristallschnitt aufweisen und um die optische Achse gegeneinander verdreht angeordnet sind und wobei diese vier Linsenelemente (143a-143d, 255a-255d) in einer in Bezug auf den Kristallschnitt abwechselnden Reihenfolge angeordnet sind.



**Beschreibung**

**[0001]** Die Erfindung betrifft ein Projektionsobjektiv einer mikrolithographischen Projektionsbelichtungsanlage.

**[0002]** Mikrolithographische Projektionsbelichtungsanlagen werden zur Herstellung mikrostrukturierter Bauelemente, wie beispielsweise integrierter Schaltkreise oder LCD's, angewendet. Eine solche Projektionsbelichtungsanlage weist eine Beleuchtungseinrichtung und ein Projektionsobjektiv auf. Im Mikrolithographieprozess wird das Bild einer mit Hilfe der Beleuchtungseinrichtung beleuchteten Maske (= Retikel) mittels des Projektionsobjektivs auf ein mit einer lichtempfindlichen Schicht (Photoresist) beschichtetes und in der Bildebene des Projektionsobjektivs angeordnetes Substrat (z.B. ein Siliziumwafer) projiziert, um die Maskenstruktur auf die lichtempfindliche Schicht zu übertragen.

**[0003]** In gegenwärtigen Mikrolithographie-Objektiven, insbesondere Immersionsobjektiven mit einem Wert der numerischen Apertur (NA) von mehr als 1.4, besteht in zunehmendem Maße ein Bedarf nach dem Einsatz von Materialien mit hohem Brechungsindex, insbesondere für das bildseitig letzte optische Element. Als „hoch“ wird hier ein Brechungsindex bezeichnet, wenn sein Wert bei der gegebenen Wellenlänge den von Quarz, mit einem Wert von ca. 1.56 bei einer Wellenlänge von 193 nm, übersteigt. Ein in Frage kommendes Material ist beispielsweise Lutetiumaluminiumgranat ( $\text{Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ , LuAG), dessen Brechungsindex bei 193 nm etwa 2.14 beträgt. Ein Problem beim Einsatz dieser Materialien als Linsenelemente besteht darin, dass sie durch ihre kubische Kristallstruktur intrinsische Doppelbrechung (= IDB) aufweisen, die mit niedriger Wellenlänge ansteigt, wobei z.B. Messungen für Lutetiumaluminiumgranat eine maximale IDB-bedingte Verzögerung von 30.1 nm/cm ergeben haben. Mit „Verzögerung“ wird die Differenz der optischen Wege zweier orthogonaler (senkrecht zueinander stehender) Polarisationszustände bezeichnet.

**[0004]** Aus WO 02/093209 A2 ist es zur Reduzierung des negativen Einflusses der intrinsischen Doppelbrechung in Fluoridkristall-Linsen auf die optische Abbildung unter anderem bekannt, Fluoridkristall-Linsen des gleichen Kristallschnitts (z.B. 100-Orientierung oder 111-Orientierung) gegeneinander verdreht anzuordnen (sogenanntes „Clocking“) sowie zusätzlich auch mehrere Gruppen solcher Anordnungen mit unterschiedlichen Kristallschnitten (z.B. (aus [100]-Linsen und [111]-Linsen) miteinander zu kombinieren.

**[0005]** Aus WO 02/099500 A2 ist es u.a. bekannt, eine oder mehrere Linsen vom 100-Kristallschnitt oder 110-Kristallschnitt entlang sphärischer Trennflächen zu teilen und gegeneinander verdreht wieder zusammenzufügen.

**[0006]** Eine Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist es, ein Projektionsobjektiv einer mikrolithographischen Projektionsbelichtungsanlage bereitzustellen, welches den Einsatz hochbrechender Kristallmaterialien bei Begrenzung des negativen Einflusses der intrinsischen Doppelbrechung ermöglicht.

**[0007]** Gemäß einem ersten Aspekt der Erfindung weist ein Projektionsobjektiv wenigstens eine Linse auf, welche wenigstens eine gekrümmte Linsenfläche aufweist und aus wenigstens vier Linsenelementen aus intrinsisch doppelbrechendem Material zusammengesetzt ist, die entlang der optischen Achse hintereinander angeordnet sind, wobei paarweise jeweils zwei dieser vier Linsenelemente den gleichen Kristallschnitt aufweisen und um die optische Achse gegeneinander verdreht angeordnet sind, und wobei diese vier Linsenelemente in einer in Bezug auf den Kristallschnitt abwechselnden Reihenfolge angeordnet sind.

**[0008]** Unter „optischer Achse“ wird im Rahmen der vorliegenden Anmeldung eine gerade Linie oder eine Aufeinanderfolge von geraden Linienabschnitten verstanden, die durch die Krümmungsmittelpunkte der rotationssymmetrischen optischen Komponenten des Projektionsobjektivs verläuft.

**[0009]** Durch die erfindungsgemäße Zusammensetzung einer Linse aus wenigstens vier Linsenelementen unter Anwendung von Linsenclocking wird zunächst eine Kompensation der intrinsischen Doppelbrechung erreicht, die insbesondere bei einer bildebenenseitig letzten Linse mit relativ großer Dicke und hohem Brechungsindex besonders effektiv ist. Dadurch, dass die erfindungsgemäß eingesetzte Linse gewissermaßen „zwiebelartig“ aus mehreren Schalen aufgebaut ist, kann in Verbindung mit der zuvor genannten Anordnung dieser Schalen eine Kompensation der intrinsischen Doppelbrechung bereits in der betreffenden Linse selbst (d.h. im Wesentlichen auch ohne Erfordernis einer anderenorts im Projektionsobjektiv erfolgenden weiteren Kompensation) erreicht werden.

**[0010]** Hinsichtlich der Anordnung dieser Schalen liegt der Erfindung die weitere Erkenntnis zugrunde, dass

sich durch die gewählte, in Bezug auf den Kristallschnitt abwechselnde Reihenfolge der Linsenelemente eine Verringerung des Restfehlers bei der IDB-Kompensation erreichen lässt, die im Vergleich zu einer Anordnung, bei der Linsenelemente mit gleichem Kristallschnitt aufeinander folgend gruppiert sind, typischerweise in der Größenordnung eines Faktors von ca. 2 liegt. Dieser in seiner quantitativen Auswirkung überraschend deutliche Effekt lässt sich physikalisch darauf zurückführen, dass die zur Beschreibung der durch die intrinsische Doppelbrechung geeigneten Jones-Matrizen mathematisch nicht „vertauschen“, d.h. bei Multiplikation nicht bezüglich ihrer Reihenfolge ohne Änderung des Ergebnisses austauschbar sind (d.h.  $(A \cdot B) \neq (B \cdot A)$ ).

**[0011]** Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform weist die erfindungsgemäße Linse eine objektenebenenseitig konvex gekrümmte Linsenfläche auf. Eine solche Linsenfläche ermöglicht Strahlen mit hohem Öffnungswinkel und ist deshalb insbesondere bei hochaperturigen Systemen von Vorteil. Insbesondere handelt es sich vorzugsweise um eine Plankonvexlinse, die in einem Immersionsobjektiv als bildebenenseitig letzte Linse mit ihrer planen Lichtaustrittsfläche an das Immersionsmedium angrenzt.

**[0012]** Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform ist diese Linse eine bildebenenseitig letzte Linse des Projektionsobjektivs. Gerade in der bildebenenseitig letzte Linse ist die Verwendung relativ hochbrechender Materialien und damit bei den in Frage kommenden Materialien auch die Kompensation einer relativ ausgeprägten intrinsischen Doppelbrechung von besonderer Bedeutung, so dass der erfindungsgemäße Aufbau in einer solchen Linse besonders vorteilhaft zur Geltung kommt.

**[0013]** Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform sind die Linsenelemente aus einem Material hergestellt, welches aus der Gruppe ausgewählt ist, die Granate, insbesondere Lutetiumaluminiumgranat ( $\text{Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ ) und Yttriumaluminiumgranat ( $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ ), Lithiumbariumfluorid ( $\text{LiBaF}_3$ ) und Spinell, insbesondere Magnesiumspinell ( $\text{MgAl}_2\text{O}_4$ ), enthält. Bei diesen Materialien mit relativ ausgeprägter intrinsischer Doppelbrechung kommt der erfindungsgemäße Aufbau besonders vorteilhaft zur Geltung, so dass vergleichsweise hochbrechende Materialien mit effektiver Kompensation der intrinsischen Doppelbrechung eingesetzt werden können.

**[0014]** Gemäß einer Ausführungsform sind wenigstens zwei der wenigstens vier Linsenelemente optisch nahtlos aneinandergefügt. Auf diese Weise wirken die in der zwiebelartig aufgebauten Linse schalenartig zusammengefügt Elemente hinsichtlich der skalaren Phase bzw. der Wellenfront wiederum als einzige Linse, so dass unerwünschte, grenzflächenbedingte Strahlablenkungen am Übergang zwischen den Linsenelementen vermieden werden.

**[0015]** Gemäß einer weiteren Ausführungsform sind wenigstens zwei der wenigstens vier Linsenelemente durch einen Spalt voneinander getrennt, so dass im Vergleich zu einem Ansprengen der Linsenelemente der fertigungstechnische Aufwand reduziert wird. In diesem Falle ist dieser Spalt zur Vermeidung unerwünschter, grenzflächenbedingter Strahlablenkungen vorzugsweise mit einer Flüssigkeit gefüllt, welche eine Brechzahl aufweist, die sich um nicht mehr als 30%, bevorzugt nicht mehr als 20%, weiter bevorzugt nicht mehr als 10% von den Brechzahlen der Materialien der angrenzenden Linsenelemente unterscheidet. Je nach Brechzahlen der Materialien der angrenzenden Linsenelemente sind geeignete Flüssigkeiten etwa sogenannte High-Index-Flüssigkeiten, wie sie auch als Immersionsflüssigkeiten angrenzend an die Waferebene verwendet werden, wie beispielsweise Cyclohexan ( $n \approx 1.57$  bei 193 nm) oder Dekalin ( $n \approx 1.65$  bei 193 nm).

**[0016]** Gemäß einer Ausführungsform weisen zwei der vier Linsenelemente einen [111]-Kristallschnitt auf, und die anderen zwei dieser vier Linsenelemente weisen einen [100]-Kristallschnitt auf. In diesem Falle kann das in Lichtausbreitungsrichtung erste der vier Linsenelemente einen [111]-Kristallschnitt oder auch einen [100]-Kristallschnitt aufweisen.

**[0017]** Die vier Linsenelemente können jeweils sphärische Linsenflächen aufweisen, wodurch eine relativ einfache Fertigung sowie Anpassung der Linsenelemente erreicht wird. Ferner kann auch wenigstens eines der vier Linsenelemente eine asphärische (jedoch bevorzugt weiterhin rotationssymmetrische) Linsenfläche aufweisen. In diesem Falle ist zwar der fertigungstechnische Aufwand größer, es kann jedoch durch die infolge der Asphärisierung hinzugewonnene Anzahl an Freiheitsgraden eine noch höhere polarisationsoptische Optimierung, d.h. weitere Reduzierung der IDB-bedingten Restverzögerung erreicht werden.

**[0018]** Gemäß einem weiteren Aspekt der Erfindung weist ein Projektionsobjektiv einer mikrolithographischen Projektionsbelichtungsanlage, zur Abbildung einer in einer Objektebene positionierbaren Maske auf eine in einer Bildebene positionierbare lichtempfindliche Schicht, eine optische Achse auf und umfasst wenigstens eine Linse, welche aus wenigstens vier Linsenelementen aus intrinsisch doppelbrechendem Material zusammengesetzt ist, die entlang der optischen Achse hintereinander angeordnet sind, wobei für wenigstens eines dieser

vier Linsenelemente die optische Achse parallel zu einer Kristallorientierung dieses Linsenelementes ist, welche sich von der [100]-Kristallorientierung, der [110]-Kristallorientierung und der [111]-Kristallorientierung, sowie den hierzu jeweils äquivalenten Kristallorientierungen, unterscheidet.

**[0019]** Gemäß diesem Aspekt betrifft die Erfindung somit ein Projektionsobjektiv mit einer aus wenigstens vier Linsenelementen zusammengesetzten Linse, wobei wenigstens eines dieser Linsenelemente eine „freie“ Kristallorientierung aufweist, somit also nicht in einem der Hauptkristallschnitte [100], [110] und [111] vorliegt. Durch diese „freie“ Kristallorientierung werden zusätzliche Freiheitsgrade eingeführt, wodurch (analog etwa zur Ersetzung einer sphärischen Linsenfläche durch eine asphärische Linsenfläche) die Optimierungsmöglichkeiten verbessert werden. Des Weiteren konnte bei dem erfindungsgemäßen Übergang zu einer „freien“ Kristallorientierung eine Reduzierung der Phase der (1,1)-Jones-Pupille erreicht werden, wodurch gegebenenfalls auch spezielle weitere Anforderungen an die optische Abbildung besser erfüllt werden können.

**[0020]** Zu bevorzugten Ausgestaltungen und Vorteilen gelten die vorstehenden Ausführungen entsprechend.

**[0021]** Die Erfindung betrifft ferner eine Linse mit den oben beschriebenen Merkmalen, wobei zu bevorzugten Ausgestaltungen und Vorteilen auf die vorstehenden Ausführungen hinsichtlich des Projektionsobjektivs verwiesen wird. Die Erfindung betrifft auch eine mikrolithographische Projektionsbelichtungsanlage, ein Verfahren zur mikrolithographischen Herstellung mikrostrukturierter Bauelemente sowie ein mikrostrukturiertes Bauelement.

**[0022]** Weitere Ausgestaltungen der Erfindung sind der Beschreibung sowie den Unteransprüchen zu entnehmen.

**[0023]** Die Erfindung wird nachstehend anhand von in den beigefügten Abbildungen dargestellten Ausführungsbeispielen näher erläutert.

**[0024]** Es zeigen:

**[0025]** [Fig. 1](#) einen Meridional-Gesamtschnitt durch ein vollständiges katadioptrisches Projektionsobjektiv gemäß einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung;

**[0026]** [Fig. 2](#) einen detaillierten Linsenschnitt der bildseitig letzten Linse des Projektionsobjektivs von [Fig. 1](#);

**[0027]** [Fig. 3](#) einen detaillierten Linsenschnitt einer bildseitig letzten Linse gemäß einer weiteren Ausführungsform;

**[0028]** [Fig. 4](#) die Verzögerung (in nm) einer Linse mit [111]-Orientierung von herkömmlichem Aufbau ohne gegeneinander verdrehte Linsenelemente;

**[0029]** [Fig. 5](#) die Verzögerung (in nm) einer Linse mit [100]-Orientierung von herkömmlichem Aufbau ohne gegeneinander verdrehte Linsenelemente;

**[0030]** [Fig. 6a, b](#) die resultierende Verzögerung (in nm) unter Berücksichtigung der erfindungsgemäßen Ausgestaltung der bildseitig letzten Linse mit dem in [Fig. 2](#) gezeigten Aufbau in dem Projektionsobjektiv von [Fig. 1](#) für ein von der Objektfeldmitte ([Fig. 6a](#)) ausgehendes Strahlenbündel und für ein vom Objektfeldrand ausgehendes Strahlenbündel ([Fig. 6b](#));

**[0031]** [Fig. 7a, b](#) die resultierende Verzögerung (in nm) unter Berücksichtigung einer erfindungsgemäßen Ausgestaltung der bildseitig letzten Linse mit dem in [Fig. 3](#) gezeigten Aufbau in dem Projektionsobjektiv von [Fig. 1](#) für ein von der Objektfeldmitte ([Fig. 7a](#)) ausgehendes Strahlenbündel und für ein vom Objektfeldrand ausgehendes Strahlenbündel ([Fig. 7b](#));

**[0032]** [Fig. 8–Fig. 9](#) jeweils einen detaillierten Linsenschnitt einer bildseitig letzten Linse mit nicht-alternierendem Aufbau der einzelnen Linsenelemente;

**[0033]** [Fig. 10a, b](#) die resultierende Verzögerung (in nm) bei Verwendung einer Linse mit dem in [Fig. 8](#) gezeigten Aufbau für ein von der Objektfeldmitte ([Fig. 10a](#)) ausgehendes Strahlenbündel und für ein vom Objektfeldrand ausgehendes Strahlenbündel ([Fig. 10b](#));

**[0034]** Fig. 11a, b die resultierende Verzögerung (in nm) bei Verwendung einer Linse mit dem in Fig. 9 gezeigten Aufbau für ein von der Objektfeldmitte (Fig. 11a) ausgehendes Strahlenbündel und für ein vom Objektfeldrand ausgehendes Strahlenbündel (Fig. 11b);

**[0035]** Fig. 12 einen detaillierten Linsenschnitt einer bildseitig letzten Linse gemäß einer Ausführungsform der Erfindung mit freien Kristallorientierungen;

**[0036]** Fig. 13a–c für die erfindungsgemäße Linse mit freien Kristallorientierungen gemäß Fig. 12 für ein von der Objektfeldmitte ausgehendes Strahlenbündel die resultierende Verzögerung (Fig. 13a, in nm) sowie die Phase (Fig. 13b, in nm) und Amplitude (Fig. 13c) der (1,1)-Jones-Pupille;

**[0037]** Fig. 14a–c für eine erfindungsgemäße Linse mit freien Kristallorientierungen gemäß Fig. 12 für ein vom Objektfeldrand ausgehendes Strahlenbündel die resultierende Verzögerung (Fig. 14a, in nm) sowie die Phase (Fig. 14b, in nm) und Amplitude (Fig. 14c) der (1,1)-Jones-Pupille; und

**[0038]** Fig. 15 eine schematische Darstellung des Aufbaus einer mikrolithographischen Projektionsbelichtungsanlage.

**[0039]** Gemäß Fig. 1 ist ein Projektionsobjektiv 100 gemäß einer ersten Ausführungsform der vorliegenden Erfindung dargestellt. Die Designdaten dieses Projektionsobjektivs 100 sind in Tabelle 1 aufgeführt. Dabei ist in Spalte 1 die Nummer der jeweiligen brechenden oder in anderer Weise ausgezeichneten optischen Fläche, in Spalte 2 der Radius  $r$  dieser Fläche (in mm), in Spalte 3 der als Dicke bezeichnete Abstand dieser Fläche zur nachfolgenden Fläche (in mm), in Spalte 4 das auf die jeweilige Fläche folgende Material, in Spalte 5 die Brechzahl dieses Materials bei  $\lambda = 193$  nm und in Spalte 6 der optisch nutzbare freie halbe Durchmesser der optischen Komponente angegeben. Radien, Dicken und halbe Durchmesser sind in Millimetern angegeben.

**[0040]** Die in Fig. 1 mit kurzen waagerechten Strichen gekennzeichneten und in Tabelle 2 spezifizierten Flächen sind asphärisch gekrümmt, wobei die Krümmung dieser Flächen durch die nachfolgende Asphärenformel gegeben ist:

$$P(h) = \frac{(1/r) \cdot h^2}{1 + \sqrt{1 - (1 + cc)(1/r)^2 h^2}} + C_1 h^4 + C_2 h^6 + \dots \quad (1)$$

**[0041]** Dabei sind  $P$  die Pfeilhöhe der betreffenden Fläche parallel zur optischen Achse,  $h$  der radiale Abstand von der optischen Achse,  $r$  der Krümmungsradius der betreffenden Fläche,  $cc$  die (in Tabelle 2 mit  $K$  bezeichnete) konische Konstante und  $C_1, C_2, \dots$  die in Tabelle 2 aufgeführten Asphärenkonstanten.

**[0042]** Gemäß Fig. 1 weist das Projektionsobjektiv 100 in einem katadioptrischen Aufbau ein erstes optisches Teilsystem 110, ein zweites optisches Teilsystem 120 und ein drittes optisches Teilsystem 130 auf. Im Sinne der vorliegenden Anmeldung ist unter einem „Teilsystem“ stets eine solche Anordnung optischer Elemente zu verstehen, durch die ein reales Objekt in ein reales Bild oder Zwischenbild abgebildet wird. Mit anderen Worten umfasst jedes Teilsystem, ausgehend von einer bestimmten Objekt- oder Zwischenbildebene, stets sämtliche optischen Elemente bis zum nächsten realen Bild oder Zwischenbild.

**[0043]** Das erste optische Teilsystem 110 umfasst eine Anordnung von refraktiven Linsen 111–118 und bildet die Objektebene "OP" in ein erstes Zwischenbild IMI1 ab, dessen ungefähre Lage in Fig. 1 durch einen Pfeil angedeutet ist. Dieses erste Zwischenbild IMI1 wird durch das zweite optische Teilsystem 120 in ein zweites Zwischenbild IMI2 abgebildet, dessen ungefähre Lage in Fig. 1 ebenfalls durch einen Pfeil angedeutet ist. Das zweite optische Teilsystem 120 umfasst einen ersten Konkavspiegel 121 und einen zweiten Konkavspiegel 122, welche jeweils in zur optischen Achse senkrechter Richtung so „abgeschnitten“ sind, dass eine Lichtausbreitung jeweils von den reflektierenden Flächen der Konkavspiegel 121, 122 bis hin zur Bildebene „IP“ erfolgen kann. Das zweite Zwischenbild IMI2 wird durch das dritte optische Teilsystem 130 in die Bildebene IP abgebildet.

**[0044]** Das dritte optische Teilsystem 130 umfasst eine Anordnung von refraktiven Linsen 131–143. Dabei handelt es sich bei der bildebenenseitig letzten Linse 143 um eine Plankonvexlinse mit objektebenenseitig konvex gekrümmter Linsenfläche. Diese Linse 143 ist gemäß der vorliegenden Erfindung aus insgesamt vier Linsenelementen zusammengesetzt, wie nachfolgend unter Bezugnahme auf Fig. 2 erläutert wird. Zwischen der Lichtaustrittsfläche der Linse 143 und der in der Bildebene IP im Betrieb des Projektionsobjektivs 100 angeordneten lichtempfindlichen Schicht befindet sich eine Immersionsflüssigkeit, die im Ausführungsbeispiel bei

einer Arbeitswellenlänge von 193 nm einen Brechungsindex von  $n_{\text{Imm}} \approx 1.65$  aufweist. Eine zu diesem Zweck beispielsweise geeignete Immersionsflüssigkeit trägt die Bezeichnung „Dekalin“. Eine weitere geeignete Immersionsflüssigkeit ist Cyclohexan ( $n_{\text{Imm}} \approx 1.57$  bei 193 nm).

[0045] In [Fig. 2](#) ist ein detaillierter Linsenschnitt der bildseitig letzten Linse **143** des Projektionsobjektivs **100** von [Fig. 1](#) dargestellt. Die Linse **143** ist aus insgesamt vier Linsenelementen **143a**, **143b**, **143c** und **143d** zusammengesetzt, die entlang der optischen Achse OA hintereinander angeordnet sind. Die Linsenelemente **143a–143d** sind jeweils aus Lutetiumaluminiumgranat ( $\text{Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ , LuAG) hergestellt, dessen maximale intrinsische Doppelbrechung bei einer Wellenlänge von 193 nm 30,1 nm/cm beträgt. Die Linsenflächen bzw. optischen Wirkflächen der einzelnen Linsenelemente **143a–143d** sind in dem Ausführungsbeispiel unter fertigungstechnologischen Aspekten sphärisch gewählt, können jedoch alternativ auch asphärisch sein, um durch die hierdurch hinzugewonnene Anzahl an Freiheitsgraden eine noch weitergehende polarisationsoptische Optimierung, d.h. weitere Reduzierung der Restverzögerung zu erreichen.

[0046] Ferner befinden sich die jeweils aufeinander folgenden Linsenelemente **143a–143d** der Linse **143** in dem Ausführungsbeispiel in unmittelbarem Kontakt miteinander, indem sie etwa durch Ansprengen optisch nahtlos aneinander gefügt sind. Alternativ können diese Linsenelemente jedoch auch durch einen Spalt getrennt sein, wobei dieser Spalt dann vorzugsweise mit einer Flüssigkeit gefüllt ist, die eine Brechzahl aufweist, die sich von der jeweiligen Brechzahl der Materialien der angrenzenden Linsenelemente um nicht mehr als 30%, bevorzugt nicht mehr als 20%, weiter bevorzugt nicht mehr als 10% unterscheidet.

[0047] Aus Tabelle 3 sind die einzelnen Linsenparameter der Linsenelemente **143a–143d** ersichtlich. Dabei ist in Spalte 1 die Nummer der jeweiligen Linsenelementfläche, in Spalte 2 der Radius  $r$  dieser Fläche (in mm), in Spalte 3 der als Dicke bezeichnete Abstand dieser Fläche zur nachfolgenden Fläche (in mm), in Spalte 4 der optisch nutzbare freie halbe Durchmesser des auf die Fläche folgenden Linsenelementes und in Spalte 5 die Orientierung (bzw. der Kristallschnitt) dieses Linsenelementes angegeben. Radien, Dicken und halbe Durchmesser sind wiederum jeweils in Millimetern angegeben.

[0048] Gemäß dem Ausführungsbeispiel von [Fig. 2](#) und Tabelle 3 weisen von den Linsenelementen **143a–143d** paarweise jeweils zwei dieser Linsenelemente den gleichen Kristallschnitt auf und sind um die optische Achse OA gegeneinander verdreht angeordnet. Genauer weisen das entlang der optischen Achse OA bzw. in Lichtausbreitungsrichtung erste Linsenelement **143a** und das dritte Linsenelement **143c** einen [111]-Kristallschnitt auf, d.h. in diesen Linsenelementen ist die [111]-Kristallachse parallel zur optischen Achse OA des Projektionsobjektivs **100**. Das entlang der optischen Achse OA bzw. in Lichtausbreitungsrichtung zweite Linsenelement **143b** und das vierte Linsenelement **143d** weisen einen [100]-Kristallschnitt auf, d.h. in diesen Linsenelementen ist die [100]-Kristallachse parallel zur optischen Achse OA des Projektionsobjektivs **100**. Die vier Linsenelemente **143a–143d** sind somit in einer in Bezug auf den Kristallschnitt abwechselnden Reihenfolge angeordnet. Des Weiteren sind die im [111]-Kristallschnitt vorliegenden Linsen **143a** und **143c** um einen Winkel von  $60^\circ$  um die optische Achse OA gegeneinander verdreht („geclockt“), und die im [100]-Kristallschnitt vorliegenden Linsen **143b** und **143d** sind um einen Winkel von  $45^\circ$  um die optische Achse OA gegeneinander verdreht.

[0049] Wenngleich die zuvor genannten Drehwinkel („Clockingwinkel“) der im [111]-Kristallschnitt vorliegenden Linsen (von  $60^\circ$ ) bzw. der im [100]-Kristallschnitt vorliegenden Linsen (von  $45^\circ$ ) die für die gewählte Anordnung im Hinblick auf die Minimierung der IDB-bedingten Restverzögerung optimalen Werte darstellen, ist die Erfindung selbstverständlich nicht auf diese Winkel beschränkt, da auch bei abweichenden Drehwinkeln bereits eine Teilkompensation erreicht werden kann.

[0050] Ein weiteres Ausführungsbeispiel einer in dem Projektionsobjektiv **100** von [Fig. 1](#) erfindungsgemäß als bildebenenseitig letzte Linse einsetzbaren Linse **255** ist in [Fig. 3](#) dargestellt und aus Linsenelementen **255a–255d** zusammengesetzt, wobei die Linsenparameter dieser Linsenelemente **255a–255d** aus Tabelle 4 ersichtlich sind. Die Linsenelemente **255a–255d** sind ebenfalls jeweils aus Lutetiumaluminiumgranat ( $\text{Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ , LuAG) hergestellt.

[0051] Gemäß dem Ausführungsbeispiel von [Fig. 3](#) und Tabelle 4 weisen von den Linsenelementen **255a–255d** ebenfalls paarweise jeweils zwei dieser Linsenelemente den gleichen Kristallschnitt auf und sind um die optische Achse OA gegeneinander verdreht angeordnet. Genauer weisen das entlang der optischen Achse bzw. in Lichtausbreitungsrichtung erste Linsenelement **255a** und das dritte Linsenelement **255c** einen [100]-Kristallschnitt auf, d.h. in diesen Linsenelementen ist die [100]-Kristallachse parallel zur optischen Achse OA des Projektionsobjektivs. Das entlang der optischen Achse bzw. in Lichtausbreitungsrichtung zweite Lin-



senelement **255b** und das vierte Linsenelement **255d** weisen einen [111]-Kristallschnitt auf, d.h. in diesen Linsenelementen ist die [111]-Kristallachse parallel zur optischen Achse OA des Projektionsobjektivs **100**. Die vier Linsenelemente sind somit ebenfalls in einer in Bezug auf den Kristallschnitt abwechselnden Reihenfolge angeordnet. Des Weiteren sind, insoweit analog zu der Ausführungsform von [Fig. 2](#), die im [100]-Kristallschnitt vorliegenden Linsen **255a** und **255c** um einen Winkel von 45° um die optische Achse OA gegeneinander verdreht, und die im [111]-Kristallschnitt vorliegenden Linsen **255b** und **255d** sind um einen Winkel von 60° um die optische Achse OA gegeneinander verdreht.

**[0052]** Die Erfindung ist nicht auf die bei den Ausführungsbeispielen von [Fig. 2](#) und [Fig. 3](#) vorliegenden Kristallschnitte [100] bzw. [111] beschränkt. Vielmehr können in Abwandlung dieser Ausführungsformen die wenigstens vier Linsenelemente, aus denen die erfindungsgemäß aufgebaute Linse zusammengesetzt sind, auch paarweise jeweils einen zueinander übereinstimmenden, jedoch vom [100]- und/oder [111]-Kristallschnitt verschiedenen Kristallschnitt aufweisen und um die optische Achse gegeneinander verdreht angeordnet sein, wobei -insoweit analog zu [Fig. 2](#) und [Fig. 3](#)- die Linsenelemente in einer in Bezug auf den Kristallschnitt abwechselnden Reihenfolge angeordnet sind.

**[0053]** In [Fig. 6a, b](#) ist die resultierende Verzögerung unter Berücksichtigung der erfindungsgemäßen Ausgestaltung der bildebenenseitig letzten Linse mit dem in [Fig. 2](#) gezeigten Aufbau in dem Projektionsobjektiv von [Fig. 1](#) für ein von der Objektfeldmitte ([Fig. 6a](#)) ausgehendes Strahlenbündel und für ein vom Objektfeldrand ausgehendes Strahlenbündel ([Fig. 6b](#)) dargestellt. Zum Vergleich zeigt [Fig. 4](#) die Verzögerung einer Linse mit [111]-Kristallschnitt von herkömmlichem Aufbau, d.h. ohne den erfindungsgemäßen Aufbau aus wenigstens vier gegeneinander verdrehten Linsenelementen.

**[0054]** In [Fig. 7a, b](#) ist die resultierende Verzögerung unter Berücksichtigung der erfindungsgemäßen Ausgestaltung der bildseitig letzten Linse mit dem in [Fig. 3](#) gezeigten Aufbau in dem Projektionsobjektiv von [Fig. 1](#) für ein von der Objektfeldmitte ([Fig. 7a](#)) ausgehendes Strahlenbündel und für ein vom Objektfeldrand ausgehendes Strahlenbündel ([Fig. 7b](#)) dargestellt. Zum Vergleich zeigt [Fig. 5](#) die Verzögerung einer Linse mit [100]-Kristallschnitt von herkömmlichem Aufbau, d.h. ohne den erfindungsgemäßen Aufbau aus wenigstens vier gegeneinander verdrehten Linsenelementen.

**[0055]** Aus dem Vergleich der Ergebnisse von [Fig. 4–Fig. 5](#) einerseits mit denjenigen von [Fig. 6–Fig. 7](#) andererseits ist zunächst ersichtlich, dass durch den erfindungsgemäßen Aufbau aus wenigstens vier gegeneinander verdrehten Linsenelementen eine wesentliche Reduzierung der Restverzögerung im Vergleich zu einem herkömmlichen Aufbau einer Linse mit [111]- oder [100]-Kristallschnitt erreicht wird.

**[0056]** In [Fig. 8](#) und [Fig. 9](#) sind zum Vergleich mit der erfindungsgemäßen Ausgestaltung weitere detaillierte Linsenschnitte einer letzten Linse **360** bzw. **470** dargestellt. Diese Linsen sind ebenfalls aus insgesamt vier entlang der optischen Achse OA hintereinander angeordneten Linsenelementen **360a–360d** bzw. **470a–470d** zusammengesetzt. Dabei ist jedoch die Reihenfolge dieser Linsenelemente in Bezug auf den Kristallschnitt nicht-alternierend gewählt, d.h. die Linsenelemente gleichen Kristallschnittes sind paarweise benachbart zueinander angeordnet. Dabei liegt in der Linse **360** gemäß [Fig. 8](#) das erste Paar von Linsenelementen **360a** und **360b** im [111]-Kristallschnitt vor, wohingegen in der Linse **470** gemäß [Fig. 9](#) das erste Paar von Linsenelementen **470a** und **470b** im [100]-Kristallschnitt vorliegt. Aus Tabelle 5 und 6 sind die einzelnen Linsenparameter der Linsenelemente **360a–360d** bzw. **470a–470d** ersichtlich.

**[0057]** In [Fig. 10a, b](#) ist die resultierende Verzögerung bei Verwendung einer Linse mit dem in [Fig. 8](#) gezeigten Aufbau für ein von der Objektfeldmitte ([Fig. 10a](#)) ausgehendes Strahlenbündel und für ein vom Objektfeldrand ausgehendes Strahlenbündel ([Fig. 10b](#)) dargestellt. In [Fig. 11, b](#) ist die resultierende Verzögerung bei Verwendung einer Linse mit dem in [Fig. 9](#) gezeigten Aufbau für ein von der Objektfeldmitte ([Fig. 11a](#)) ausgehendes Strahlenbündel und für ein vom Objektfeldrand ausgehendes Strahlenbündel ([Fig. 11b](#)) dargestellt.

**[0058]** Ein Vergleich der Ergebnisse von [Fig. 6, Fig. 7](#) einerseits mit denjenigen von [Fig. 10, Fig. 11](#) andererseits zeigt, dass ausgehend von einem Aufbau der Linse aus wenigstens vier gegeneinander verdrehten Linsenelementen bei der erfindungsgemäßen, in Bezug auf die Kristallorientierung alternierenden Anordnung dieser Linsenelemente (vgl. [Fig. 6, Fig. 7](#)) um etwa einen Faktor 2 geringere Werte der Verzögerung erreicht werden im Vergleich zu einer in Bezug auf die Kristallorientierung nicht-alternierenden, d.h. paarweisen Anordnung dieser Linsenelemente (vgl. [Fig. 10, Fig. 11](#)).

**[0059]** Gemäß einer weiteren Ausführungsform können eines oder sämtliche der Linsenelemente der erfindungsgemäß aufgebauten Linse auch freie Kristallorientierungen aufweisen, wie im Weiteren unter Bezugnah-

me auf [Fig. 12](#) bis [Fig. 14](#) erläutert wird.

**[0060]** In [Fig. 12](#) ist ein detaillierter Linsenschnitt einer bildseitig letzten Linse **580** dargestellt, welche ebenfalls in einem Projektionsobjektiv mit z.B. einem Aufbau analog zu dem von [Fig. 1](#) einsetzbar ist. Die Linse **580** ist wiederum aus insgesamt vier Linsenelementen **580a**, **580b**, **580c** und **580d** zusammengesetzt, die entlang der optischen Achse OA hintereinander angeordnet sind. Die Linsenelemente **580a–580d** sind ebenfalls jeweils aus Lutetiumaluminiumgranat ( $\text{Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ , LuAG) hergestellt. Die Linsenflächen bzw. optischen Wirkflächen der einzelnen Linsenelemente **580a–580d** sind in dem Ausführungsbeispiel wiederum unter fertigungstechnologischen Aspekten sphärisch gewählt, können jedoch alternativ auch asphärisch sein, um durch die hierdurch hinzugewonnene Anzahl an Freiheitsgraden eine noch weitergehende polarisationsoptische Optimierung, d.h. weitere Reduzierung der Restverzögerung zu erreichen. Ferner befinden sich die jeweils aufeinander folgenden Linsenelemente **580a–580d** der Linse **580** wiederum in dem Ausführungsbeispiel in unmittelbarem Kontakt miteinander, indem sie etwa durch Ansprengen optisch nahtlos aneinander gefügt sind. Alternativ können diese Linsenelemente jedoch auch durch einen, z.B. wie bereits oben beschrieben mit einer Flüssigkeit gefüllten, Spalt getrennt sein.

**[0061]** Aus Tabelle 7 sind die einzelnen Linsenparameter der Linsenelemente **580a–580d** ersichtlich. Dabei ist in Spalte 1 die Nummer der jeweiligen Linsenelementfläche, in Spalte 2 der Radius  $r$  dieser Fläche (in mm), in Spalte 3 der als Dicke bezeichnete Abstand dieser Fläche zur nachfolgenden Fläche (in mm), in Spalte 4 der optisch nutzbare freie halbe Durchmesser des auf die Fläche folgenden Linsenelementes und in Spalte 5 die Kristallorientierung dieses Linsenelementes angegeben. Radien, Dicken und halbe Durchmesser sind wiederum jeweils in Millimetern angegeben. Die Kristallorientierung wird in Tabelle 7 über die drei Euler-Winkel  $\varphi$ ,  $\theta$ ,  $\psi$  angegeben, welche wie folgt definiert sind: Ein anfangs mit dem raumfesten Mediensystem  $(x, y, z)$  identisches Koordinatensystem wird durch die nachfolgenden Koordinatensystemdrehungen in das Hauptachsensystem  $(x', y', z')$  des Kristalls gedreht: 1. Drehung um z-Achse um den Winkel  $\varphi$ , 2. Drehung um x-Achse um den Winkel  $\theta$ , 3. Drehung um z-Achse um den Winkel  $\psi$ . Ein Kristall mit [100]-Orientierung lässt sich demnach beschreiben durch die Euler-Winkel  $\varphi = 0^\circ$ ,  $\theta = 0^\circ$ ,  $\psi = \text{beliebig}$ , während ein Kristall mit [111]-Orientierung beschrieben wird durch die Euler-Winkel  $\varphi = 45^\circ$ ,  $\theta = 54.736^\circ$ ,  $\psi = \text{beliebig}$ .

**[0062]** Anders als in den zuvor beschriebenen Ausführungsbeispielen weist die optische Systemachse OA bei den Linsenelementen **580a–580d** der Linse **580** nicht in Richtung der [100]-Kristallorientierung, der [110]-Kristallorientierung, der [111]-Kristallorientierung oder in Richtung von einer zu diesen Kristallorientierungen (aufgrund der Symmetrieeigenschaften kubischer Kristalle) äquivalenten Hauptkristallorientierung. Wenngleich diese Abweichung der Kristallorientierung von einer der zuvor genannten Hauptkristallorientierungen bei dem Ausführungsbeispiel von [Fig. 12](#) für sämtliche der Linsenelemente **580a–580d** gegeben ist (lediglich das Linsenelement **580a** liegt annähernd in einem [111]-Kristallschnitt vor), ist die Erfindung nicht hierauf beschränkt, sondern umfasst in Abwandlung von dem konkreten Beispiel von [Fig. 12](#) auch alle Fälle, in denen zumindest für eines der wenigstens vier Linsenelemente die optische Systemachse nicht parallel zu einer der o.g. Hauptkristallorientierungen ist.

**[0063]** In [Fig. 13a–c](#) sind für die Linse **580** mit freien Kristallorientierungen für ein von der Objektfeldmitte ausgehendes Strahlenbündel die resultierende Verzögerung ([Fig. 13a](#)) sowie die Phase ([Fig. 13b](#)) und Amplitude ([Fig. 13c](#)) der (1,1)-Jones-Pupille dargestellt. Entsprechend sind in [Fig. 14a–c](#) für die Linse **580** für ein vom Objektfeldrand ausgehendes Strahlenbündel die resultierende Verzögerung ([Fig. 14a](#)) sowie die Phase ([Fig. 14b](#)) und Amplitude ([Fig. 14c](#)) der (1,1)-Jones-Pupille dargestellt. Wie aus [Fig. 13b](#) und [14b](#) ersichtlich, wird im Ausführungsbeispiel die Phase auf sehr kleine Werte im Bereich von maximal 1.5 nm reduziert. Gemäß [Fig. 13a](#) und [14c](#) erreicht zwar die Amplitude in den Quadranten (unter den  $45^\circ$ -Positionen) Werte im Bereich bis etwa 0.9. Hiervon sind jedoch Abbildungen, bei denen vorrangig die Bereiche der x- und y-Achse in der Pupille genutzt werden, nur wenig beeinträchtigt.

**[0064]** [Fig. 15](#) zeigt eine schematische Darstellung des Aufbaus einer mikrolithographischen Projektionsbelichtungsanlage.

**[0065]** Gemäß [Fig. 15](#) weist eine Projektionsbelichtungsanlage **600** eine Beleuchtungseinrichtung **601** und ein Projektionsobjektiv **602** auf. Das Projektionsobjektiv **602** umfasst eine lediglich schematisch angedeutete Linsenanordnung **603**, durch die eine optische Achse OA definiert wird. Zwischen der Beleuchtungseinrichtung **601** und dem Projektionsobjektiv **602** ist eine Maske **604** angeordnet, die mittels eines Maskenhalters **605** im Strahlengang gehalten wird. Die Maske **604** weist eine Struktur im Mikrometer- bis Nanometer-Bereich auf, die mittels des Projektionsobjektives **602** beispielsweise um den Faktor 4 oder 5 verkleinert auf eine Bildebene IP abgebildet wird. In der Bildebene IP wird ein durch einen Substrathalter **607** positioniertes lichtempfindliches



Substrat **606**, bzw. ein Wafer, gehalten.

**[0066]** Wenn die Erfindung auch anhand spezieller Ausführungsformen beschrieben wurde, erschließen sich für den Fachmann zahlreiche Variationen und alternative Ausführungsformen, z.B. durch Kombination und/oder Austausch von Merkmalen einzelner Ausführungsformen. Dementsprechend versteht es sich für den Fachmann, dass derartige Variationen und alternative Ausführungsformen von der vorliegenden Erfindung mit umfasst sind, und die Reichweite der Erfindung nur im Sinne der beigefügten Patentansprüche und deren Äquivalente beschränkt ist.

Tabelle 1 (DESIGNDATEN zu Fig. 1):

(NA = 1.55; Wellenlänge 193 nm)

FLÄCHE	RADIUS	DICKE	MATERIAL	BRECHZAHL	HALBDURCH- MESSER
0	0,000000	52,291526			62,5
1	185,414915	36,606310	SILUV	1,560364	93,9
2	-2368,330782	103,305956			94,5
3	1135,440971	81,730311	SILUV	1,560364	101,4
4	-836,574481	7,626264			101,9
5	642,761068	10,166290	SILUV	1,560364	94,3
6	-28777,50989 3	17,021812			92,4
7	374,784051	23,493394	SILUV	1,560364	88,9
8	-739,574652	12,599110			86,7
9	0,000000	0,000000	SILUV	1,560364	82,0
10	0,000000	35,701682			82,0
11	-287,062457	8,020868	SILUV	1,560364	87,6
12	-260,605102	8,348886			89,8
13	356,037256	34,761348	SILUV	1,560364	102,3
14	-1139,573155	45,988038			103,0
15	-297,853763	10,898517	SILUV	1,560364	100,8
16	-286,492576	442,012212			102,4
17	-186,492728	-232,661918	REFL		162,7
18	213,357562	272,661219	REFL		150,8
19	186,190755	63,407664	SILUV	1,560364	143,4
20	559,595962	102,212676			138,9
21	336,987586	10,146122	SILUV	1,560364	98,0
22	98,067417	59,917522			83,0
23	2014,227818	10,231531	SILUV	1,560364	83,9
24	209,706892	5,218396			88,7
25	187,199398	16,497859	SILUV	1,560364	90,5
26	563,378273	25,195888			92,4
27	-358,535155	9,999385	SILUV	1,560364	95,4
28	-369,270277	4,329131			104,5
29	6342,575536	49,942200	SILUV	1,560364	124,0
30	-323,631832	0,997442			127,3

31	-503,301175	35,880564	SILUV	1,560364	129,5
32	-236,865310	0,997844			132,5
33	-1601,468501	29,219759	SILUV	1,560364	133,0
34	-298,758201	1,000000			134,0
35	808,661277	24,892404	SILUV	1,560364	130,1
36	-2015,744411	1,000000			128,8
37	232,975060	41,179286	SILUV	1,560364	120,7
38	2382,195206	1,000000			116,6
39	192,288001	45,336304	SILUV	1,560364	110,2
40	-1085,511304	1,000000			107,6
41	139,778134	25,996093	SILUV	1,560364	84,0
42	482,429105	1,000000			78,8
43	83,925256	60,000000	LUAG	2,143500	60,2
44	0,000000	3,100000	HIINDEX	1,650000	24,1
45	0,000000	0,000000			15,6

Tabelle 2: (ASPHÄRISCHE KONSTANTEN zu Fig. 1):

Fläche	1	4	6	8	12
K	0	0	0	0	0
C1	-6,447148E-08	-1,825065E-07	7,288539E-08	1,468587E-07	-8,341858E-09
C2	3,904192E-12	1,875167E-12	4,464300E-12	-6,136079E-12	3,035481E-12
C3	-1,742805E-16	9,471479E-16	-3,280221E-16	-6,664138E-16	1,950958E-16
C4	-2,099949E-21	-3,417617E-20	-1,914887E-20	-1,246213E-20	6,966650E-21
C5	1,526611E-24	-3,618274E-24	5,811541E-24	4,088277E-24	1,855444E-24
C6	-1,341115E-28	3,456865E-28	-6,504073E-28	7,614765E-29	-1,407831E-28
C7	3,864081E-33	-8,427102E-33	3,066152E-32	-1,622968E-32	-3,044932E-33
Fläche	14	15	17	18	20
K	0	0	-1,9096	-0,5377	0
C1	-5,818454E-08	-3,254341E-08	-2,658999E-08	-1,536262E-10	-8,785831E-09
C2	-2,919573E-13	3,968952E-13	1,561056E-13	-2,682680E-15	5,646919E-13
C3	3,209102E-17	-2,807842E-17	-4,132973E-18	-3,645198E-20	-6,454482E-18
C4	3,126755E-22	4,190647E-21	5,067872E-23	1,499409E-24	-2,410154E-22
C5	3,818902E-25	-3,741144E-25	-9,622504E-28	1,222432E-28	1,104073E-26
C6	-8,486242E-30	3,532694E-29	1,189984E-32	-6,277586E-33	-2,437139E-31
C7	-2,419178E-34	-1,204525E-33	-1,166383E-37	1,594458E-37	2,163229E-36

Fläche	21	23	25	28	29
K	0	0	0	0	0
C1	6,965245E-08	-9,869141E-08	-3,835477E-08	1,214957E-07	5,348537E-08
C2	-2,619816E-13	3,468310E-12	-7,670508E-12	1,647962E-12	2,629539E-12
C3	9,867326E-18	-1,114544E-15	7,876676E-16	-5,350727E-16	-5,067530E-16
C4	-6,513277E-21	1,484338E-19	-1,643323E-19	3,115581E-20	4,241183E-20
C5	1,222326E-25	-2,541221E-23	1,862076E-23	-6,028858E-24	-2,286931E-24
C6	-7,772178E-30	2,753259E-27	-1,538795E-27	5,836667E-28	6,869266E-29
C7	-1,760691E-33	-1,058751E-31	6,396967E-32	-1,784413E-32	-8,391190E-34
Fläche	31	33	36	38	40
K	0	0	0	0	0
C1	3,570488E-09	-1,108288E-08	1,098120E-08	3,498535E-09	4,009017E-08
C2	-2,899790E-13	-5,556755E-13	-8,319264E-13	1,277784E-12	-5,714125E-12
C3	1,081327E-16	-3,884368E-18	3,311901E-17	-7,357487E-17	6,202718E-16
C4	-1,172829E-20	1,842426E-21	7,733186E-23	1,115535E-21	-5,344939E-20
C5	2,404194E-25	3,001406E-27	-1,051458E-26	2,894369E-25	3,354852E-24
C6	1,461820E-29	-7,804121E-30	-4,556477E-30	-1,579978E-29	-1,359158E-28
C7	-5,103661E-34	2,042295E-34	1,779547E-34	3,499951E-34	2,690400E-33
Fläche	42				
K	0				
C1	6,190270E-09				
C2	1,866031E-11				
C3	-3,186549E-15				
C4	5,219881E-19				
C5	-6,008898E-23				
C6	4,502251E-27				
C7	-1,632255E-31				

Tabelle 3: (DESIGNDATEN zu Fig. 2)

FLÄCHE	RADIUS	DICKE	HALBDURCH- MESSER	ORIENTIERUNG
43	83,925256	18,811177	59,352000	[111], 0°
43-1	71,231464	12,333822	47,005000	[100], 0°
43-2	67,178888	17,981551	39,406000	[111], 60°
43-3	112,134029	10,873450	29,975000	[100], 45°

Tabelle 4: (DESIGNDATEN zu Fig. 3)

FLÄCHE	RADIUS	DICKE	HALBDURCH- MESSER	ORIENTIERUNG
55	83,925256	12,607042	59,352000	[100], 0°
55-1	77,135134	17,932508	51,420000	[111], 0°
55-2	69,245362	12,671515	40,045000	[100], 45°
55-3	83,666266	16,788934	33,150000	[111], 60°

Tabelle 5: (DESIGNDATEN zu Fig. 8)

FLÄCHE	RADIUS	DICKE	HALBDURCH- MESSER	ORIENTIERUNG
60	83,925256	19,035457	59,352000	[111], 0°
60-1	76,747847	18,570918	47,807000	[111], 60°
60-2	79,720372	11,251608	36,706000	[100], 0°
60-3	89,328649	11,142019	29,359000	[100], 45°

Tabelle 6: (DESIGNDATEN zu Fig. 9)

FLÄCHE	RADIUS	DICKE	HALBDURCH- MESSER	ORIENTIERUNG
70	83,925256	12,393240	59,352000	[100], 0°
70-1	76,816691	13,261777	51,476000	[100], 45°
70-2	77,973028	17,501591	44,111000	[111], 0°
70-3	82,294822	16,843390	33,101000	[111], 60°

Tabelle 7: (DESIGNDATEN zu Fig. 12)

FLÄCHE	RADIUS	DICKE	HALB- DURCH- MESSER	Euler-Winkel $\varphi$ , $\theta$ , $\psi$
80	83.925255	18.511684	59.352	45.00°, 54.74°, 0°
80-1	88.452895	10.271444	49.77	68.67°, -1.62°, -64.28°
80-2	88.273071	15.476090	43.292	43.54°, 55.62°, 61.84°
80-3	67.128546	15.740778	31.226	31.43°, 4.97°, 14.66°

### Patentansprüche

1. Projektionsobjektiv einer mikrolithographischen Projektionsbelichtungsanlage, zur Abbildung einer in einer Objektebene positionierbaren Maske auf eine in einer Bildebene positionierbare lichtempfindliche Schicht, welches eine optische Achse (OA) aufweist, mit:

- wenigstens einer Linse (**143**, **255**), welche wenigstens eine gekrümmte Linsenfläche aufweist und aus wenigstens vier Linsenelementen (**143a–143d**, **255a–255d**) aus intrinsisch doppelbrechendem Material zusammengesetzt ist, die entlang der optischen Achse (OA) hintereinander angeordnet sind;
- wobei paarweise jeweils zwei dieser vier Linsenelemente den gleichen Kristallschnitt aufweisen und um die optische Achse gegeneinander verdreht angeordnet sind; und
- wobei diese vier Linsenelemente (**143a–143d**, **255a–255d**) in einer in Bezug auf den Kristallschnitt abweich-

selnden Reihenfolge angeordnet sind.

2. Projektionsobjektiv einer mikrolithographischen Projektionsbelichtungsanlage, zur Abbildung einer in einer Objektebene positionierbaren Maske auf eine in einer Bildebene positionierbare lichtempfindliche Schicht, welches eine optische Achse (OA) aufweist, mit:

- wenigstens einer Linse (**580**), welche aus wenigstens vier Linsenelementen (**580a–580d**) aus intrinsisch doppelbrechendem Material zusammengesetzt ist, die entlang der optischen Achse (OA) hintereinander angeordnet sind;
- wobei für wenigstens eines dieser vier Linsenelemente (**580a–580d**) die optische Achse (OA) parallel zu einer Kristallorientierung dieses Linsenelementes (**580a–580d**) ist, welche sich von der [100]-Kristallorientierung, der [110]-Kristallorientierung und der [111]-Kristallorientierung, sowie den hierzu jeweils äquivalenten Kristallorientierungen, unterscheidet.

3. Projektionsobjektiv nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass diese Linse (**143, 255, 580**) eine objektebenenseitig konvex gekrümmte Linsenfläche (**43, 55, 80**) aufweist.

4. Projektionsobjektiv nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, dass diese Linse (**143, 255, 580**) eine Plankonvexlinse ist.

5. Projektionsobjektiv nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass diese Linse (**143, 255, 580**) eine bildebenenseitig letzte Linse des Projektionsobjektivs (**100**) ist.

6. Projektionsobjektiv nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass diese Linsenelemente (**143a–143d, 255a–255d, 580a–580d**) aus einem Material hergestellt sind, welches aus der Gruppe ausgewählt ist, die Granate, insbesondere Lutetiumaluminiumgranat ( $\text{Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ ) und Yttriumaluminiumgranat ( $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ ), Lithiumbariumfluorid ( $\text{LiBaF}_3$ ) und Spinell, insbesondere Magnesiumspinell ( $\text{MgAl}_2\text{O}_4$ ), enthält.

7. Projektionsobjektiv nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass wenigstens zwei, insbesondere sämtliche, der wenigstens vier Linsenelemente (**143a–143d, 255a–255d, 580a–580d**) optisch nahtlos aneinandergefügt sind.

8. Projektionsobjektiv nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass wenigstens zwei der wenigstens vier Linsenelemente durch einen Spalt voneinander getrennt sind.

9. Projektionsobjektiv nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, dass dieser Spalt mit einer Flüssigkeit gefüllt ist.

10. Projektionsobjektiv nach Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet, dass diese Flüssigkeit eine Brechzahl aufweist, die sich um nicht mehr als 30%, insbesondere 20%, weiter insbesondere 10% von den Brechzahlen der Materialien der angrenzenden Linsenelemente unterscheidet.

11. Projektionsobjektiv nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die wenigstens vier Linsenelemente (**143a–143d, 255a–255d, 580a–580d**) jeweils sphärische Linsenflächen aufweisen.

12. Projektionsobjektiv nach einem der Ansprüche 1 bis 10, dadurch gekennzeichnet, dass wenigstens eines der wenigstens vier Linsenelemente eine asphärische Linsenfläche aufweist.

13. Projektionsobjektiv nach Anspruch 1 oder einem der Ansprüche 3 bis 12, dadurch gekennzeichnet, dass zwei dieser vier Linsenelemente (**143a–143d, 255a–255d**) einen [111]-Kristallschnitt aufweisen und die anderen zwei dieser vier Linsenelemente einen [100]-Kristallschnitt aufweisen.

14. Projektionsobjektiv nach einem der Ansprüche 2 bis 12, dadurch gekennzeichnet, dass für sämtliche dieser wenigstens vier Linsenelemente (**580a–580d**) die optische Achse (OA) parallel zu einer Kristallorientierung des jeweiligen Linsenelementes ist, welche sich von der [100]-Kristallorientierung, der [110]-Kristallorientierung und der [111]-Kristallorientierung, sowie den hierzu jeweils äquivalenten Kristallorientierungen, unterscheidet.

15. Linse für ein Objektiv, insbesondere für ein Projektionsobjektiv einer mikrolithographischen Projekti-

onsbelichtungsanlage, wobei die Linse (**143, 255**) um eine Linsenachse rotationssymmetrisch ist, wenigstens eine gekrümmte Linsenfläche aufweist und aus wenigstens vier Linsenelementen (**143a–143d, 255a–255d**) aus intrinsisch doppelbrechendem Material zusammengesetzt ist, die entlang der Linsenachse hintereinander angeordnet sind;

- wobei paarweise jeweils zwei dieser vier Linsenelemente (**143a–143d, 255a–255d**) den gleichen Kristallschnitt aufweisen und um die Linsenachse gegeneinander verdreht angeordnet sind; und
- wobei diese vier Linsenelemente (**143a–143d, 255a–255d**) in einer in Bezug auf den Kristallschnitt abwechselnden Reihenfolge angeordnet sind.

16. Linse nach Anspruch 15, dadurch gekennzeichnet, dass zwei dieser vier Linsenelemente (**143a–143d, 255a–255d**) einen [111]-Kristallschnitt aufweisen und die anderen zwei dieser vier Linsenelemente einen [100]-Kristallschnitt aufweisen.

17. Linse für ein Objektiv, insbesondere für ein Projektionsobjektiv einer mikrolithographischen Projektionsbelichtungsanlage, wobei die Linse (**580**) um eine Linsenachse rotationssymmetrisch ist und aus wenigstens vier Linsenelementen (**580a–580d**) aus intrinsisch doppelbrechendem Material zusammengesetzt ist, die entlang der Linsenachse hintereinander angeordnet sind;

- wobei für wenigstens eines dieser vier Linsenelemente (**580a–580d**) die Linsenachse parallel zu einer Kristallorientierung dieses Linsenelementes ist, welche sich von der [100]-Kristallorientierung, der [110]-Kristallorientierung und der [111]-Kristallorientierung, sowie den hierzu jeweils äquivalenten Kristallorientierungen, unterscheidet.

18. Linse nach Anspruch 17, dass für sämtliche dieser vier Linsenelemente (**580a–580d**) die Linsenachse parallel zu einer Kristallorientierung des jeweiligen Linsenelementes ist, welche sich von der [100]-Kristallorientierung, der [110]-Kristallorientierung und der [111]-Kristallorientierung, sowie den hierzu jeweils äquivalenten Kristallorientierungen, unterscheidet.

19. Mikrolithographische Projektionsbelichtungsanlage mit einer Beleuchtungseinrichtung und einem Projektionsobjektiv, wobei das Projektionsobjektiv (**100**) nach einem der Ansprüche 1 bis 14 ausgebildet ist.

20. Verfahren zur mikrolithographischen Herstellung mikrostrukturierter Bauelemente mit folgenden Schritten:

- Bereitstellen eines Substrats (**606**), auf das zumindest teilweise eine Schicht aus einem lichtempfindlichen Material aufgebracht ist;
- Bereitstellen einer Maske (**604**), die abzubildende Strukturen aufweist;
- Bereitstellen einer Projektionsbelichtungsanlage (**600**) nach Anspruch 19; und
- Projizieren wenigstens eines Teils der Maske (**604**) auf einen Bereich der Schicht mit Hilfe der Projektionsbelichtungsanlage (**600**).

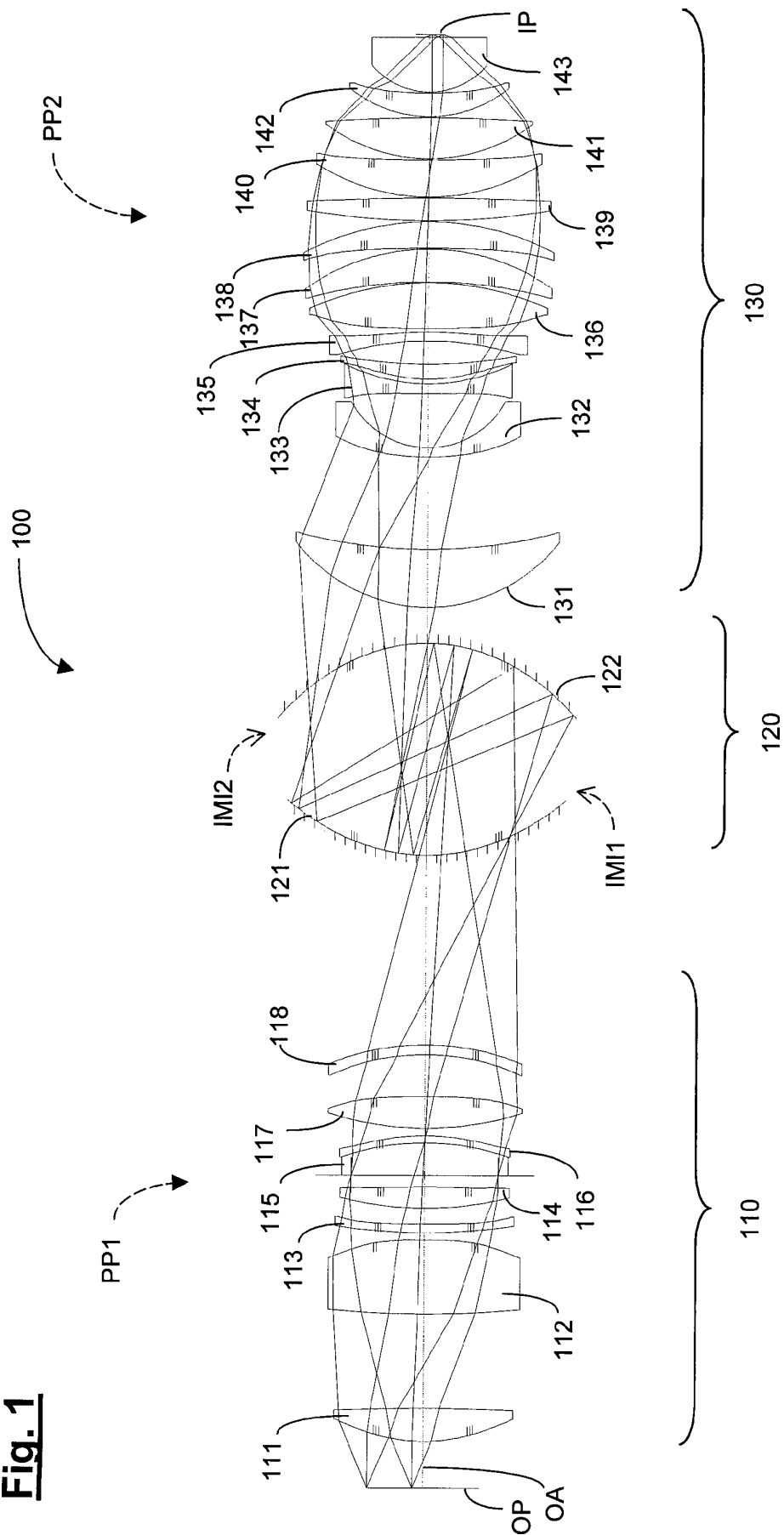
21. Mikrostrukturiertes Bauelement, das nach einem Verfahren gemäß Anspruch 20 hergestellt ist.

Es folgen 13 Blatt Zeichnungen

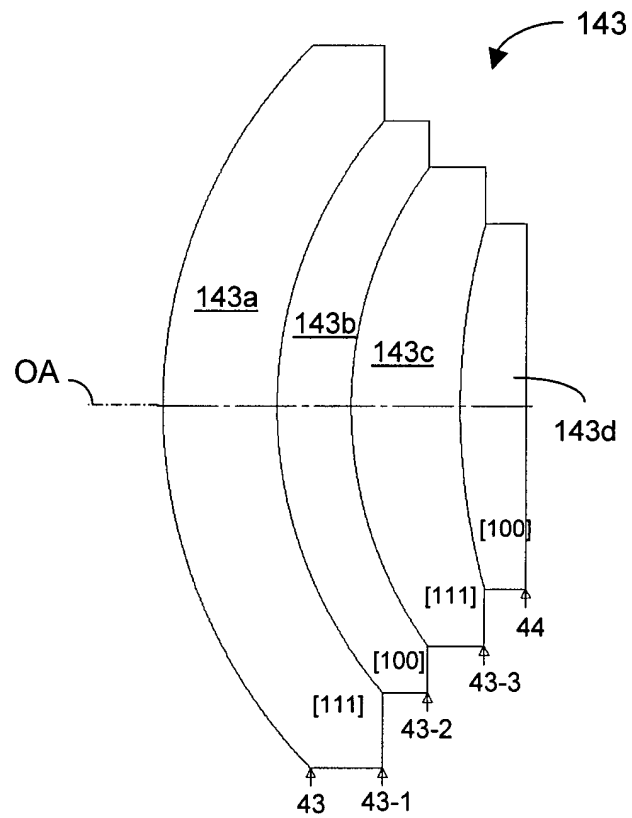


Anhängende Zeichnungen

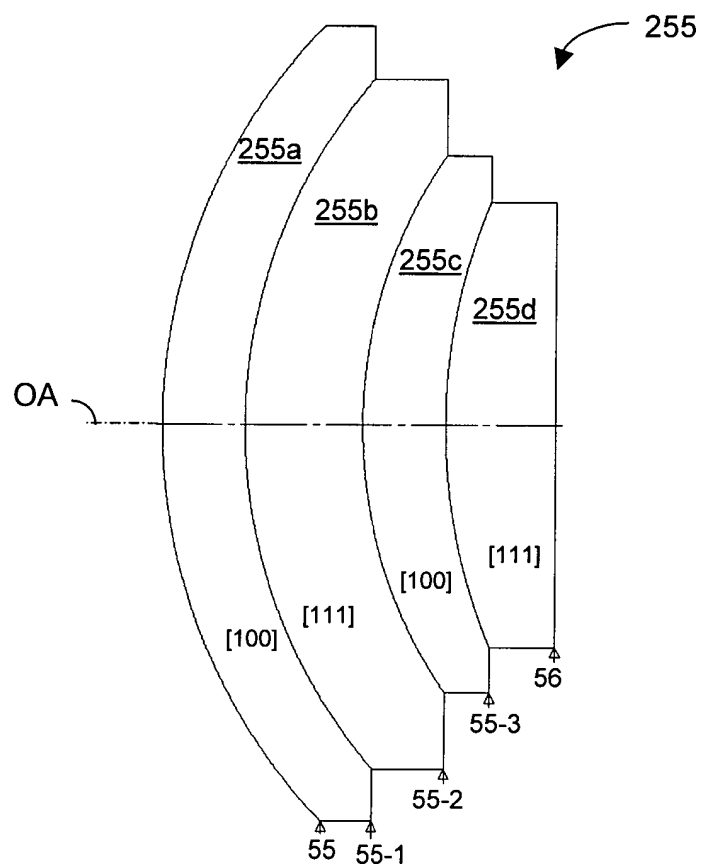
**Fig. 1**



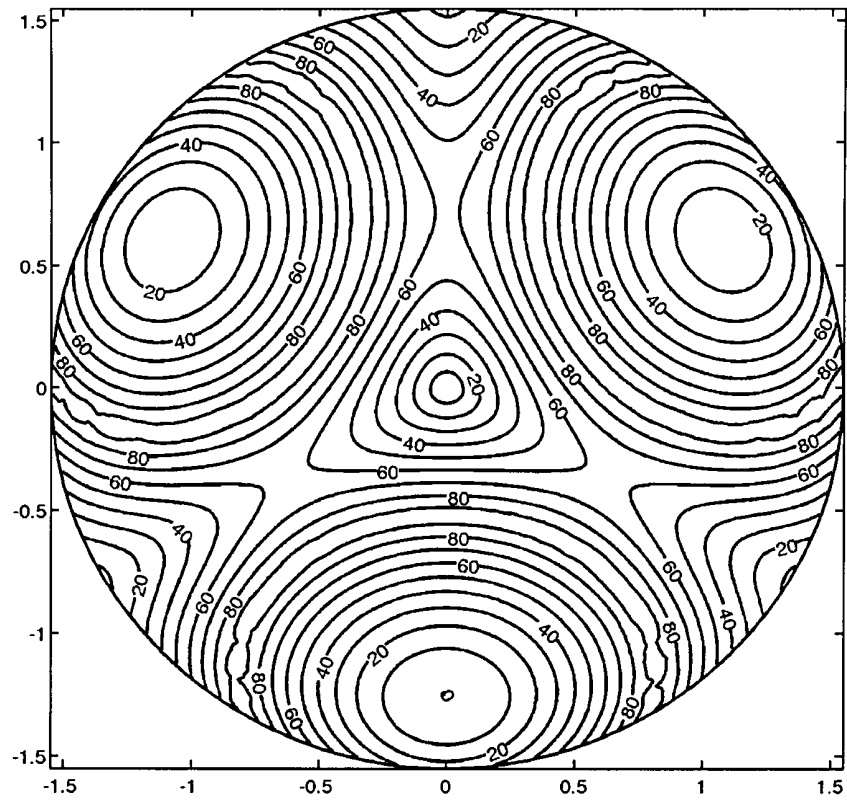
**Fig. 2**



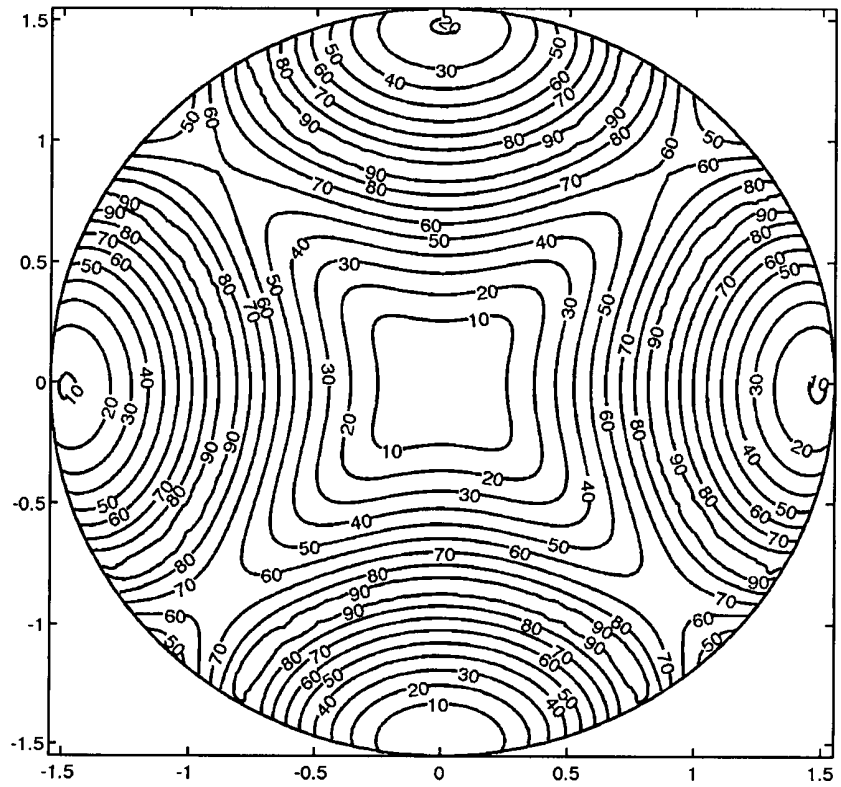
**Fig. 3**



**Fig. 4**

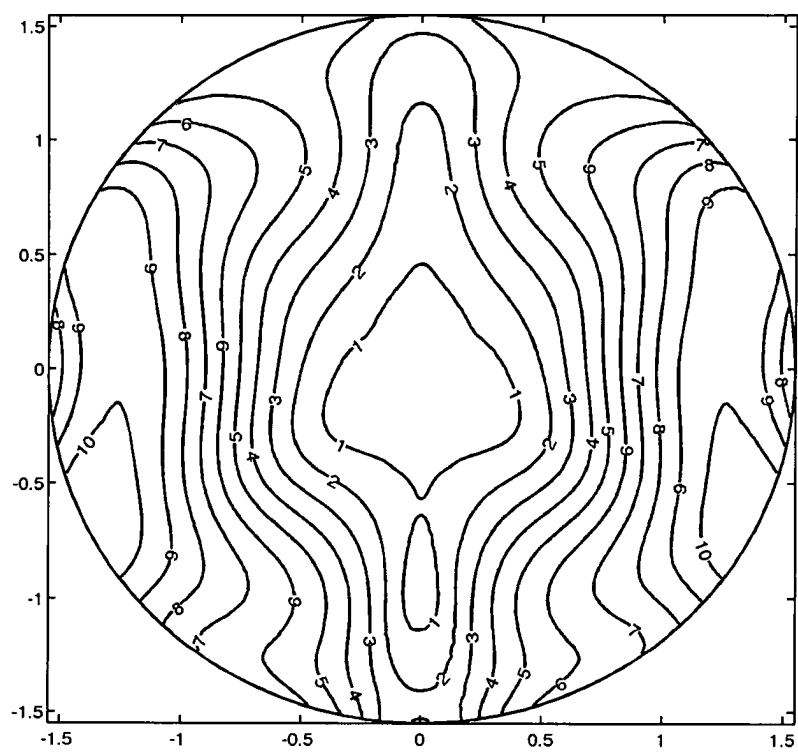


**Fig. 5**

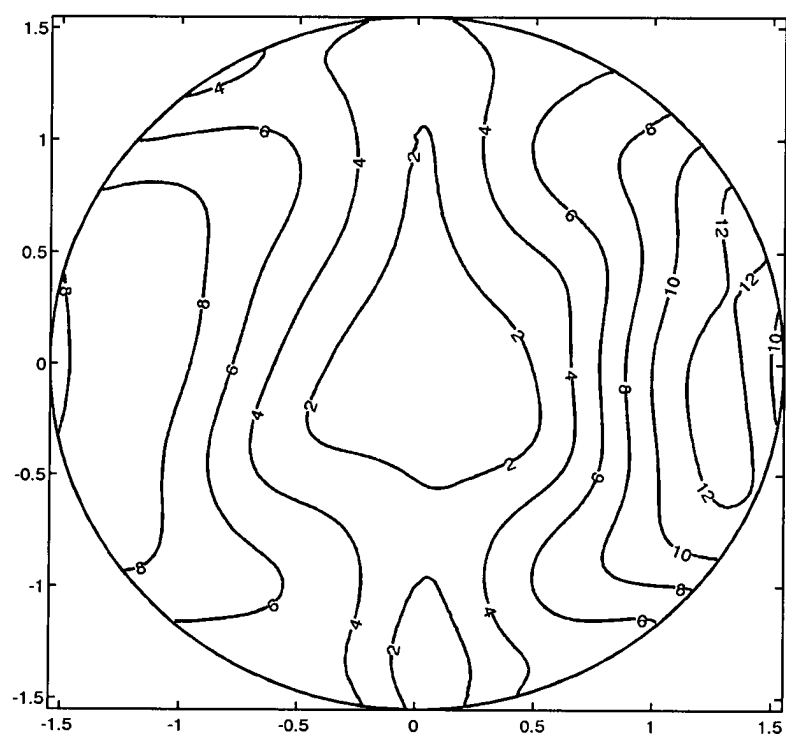


**Fig. 6**

**a)**

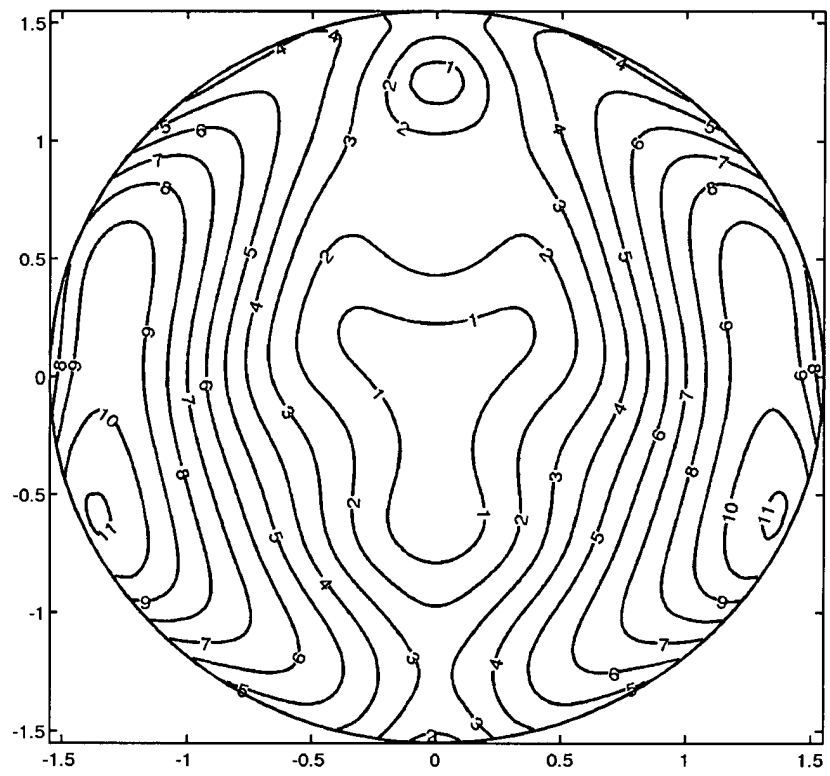


**b)**

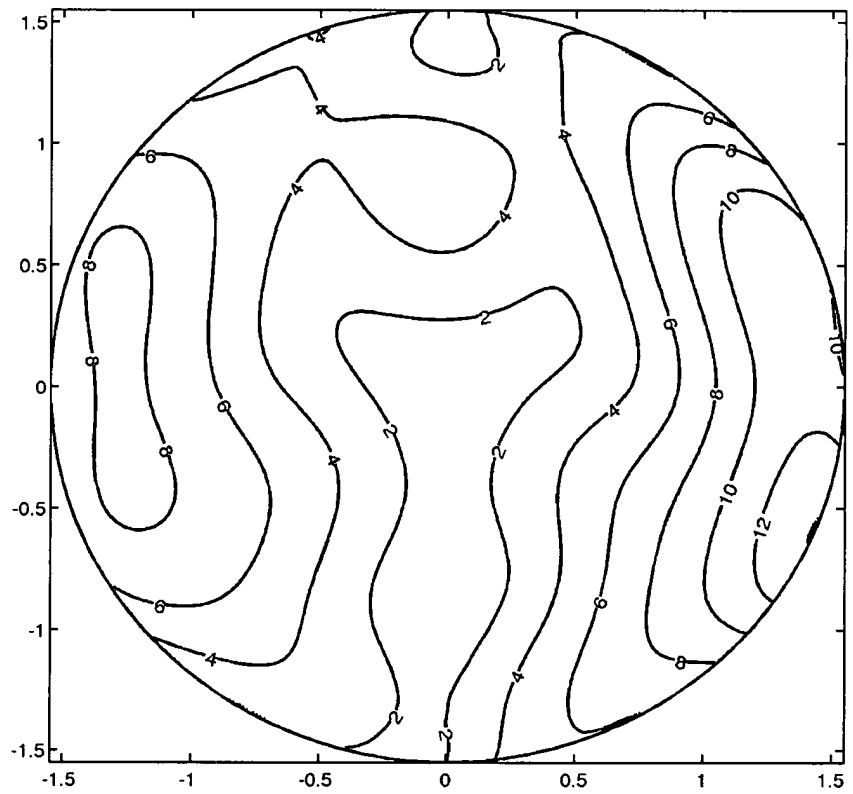


**Fig. 7**

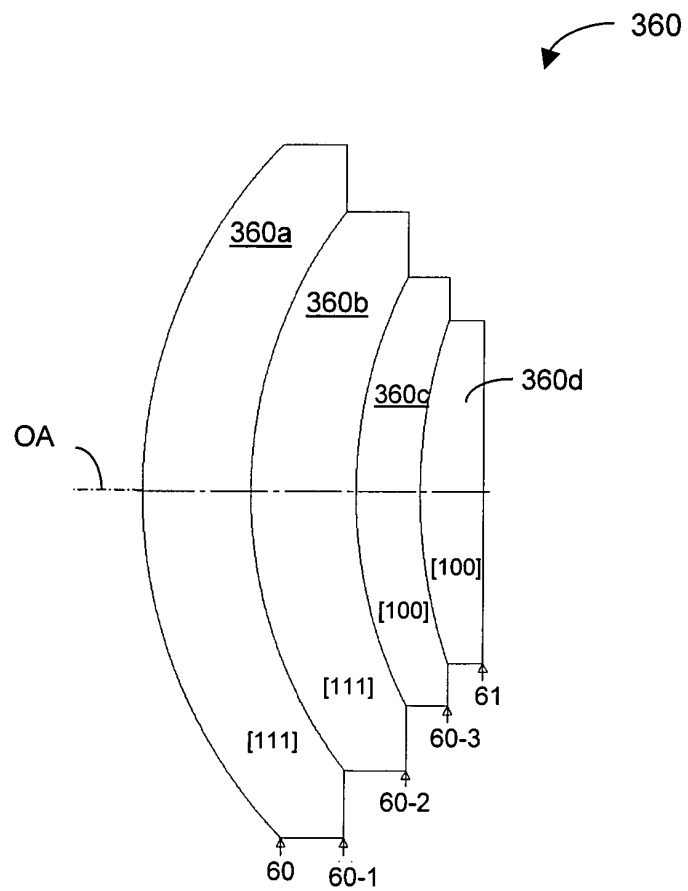
**a)**



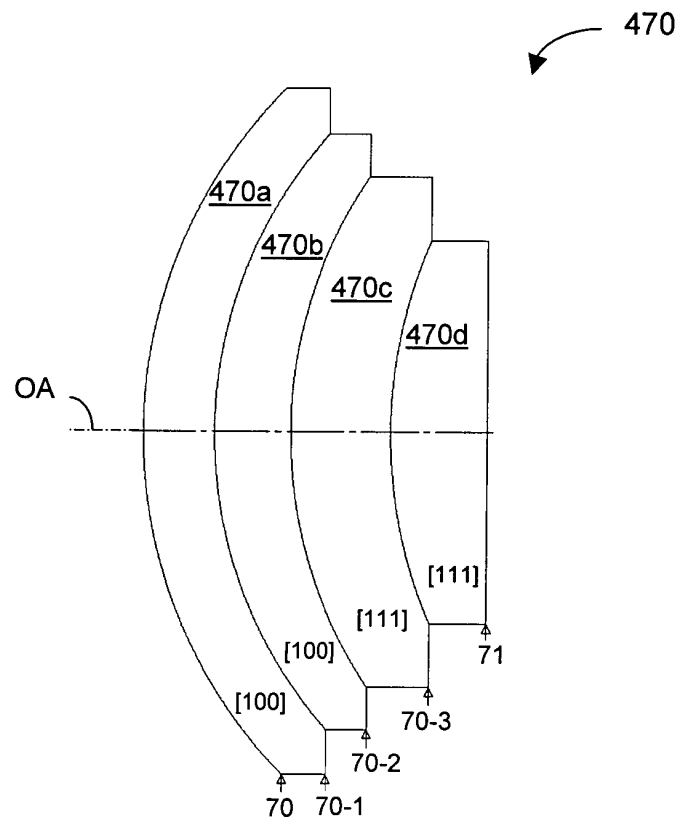
**b)**



**Fig. 8**



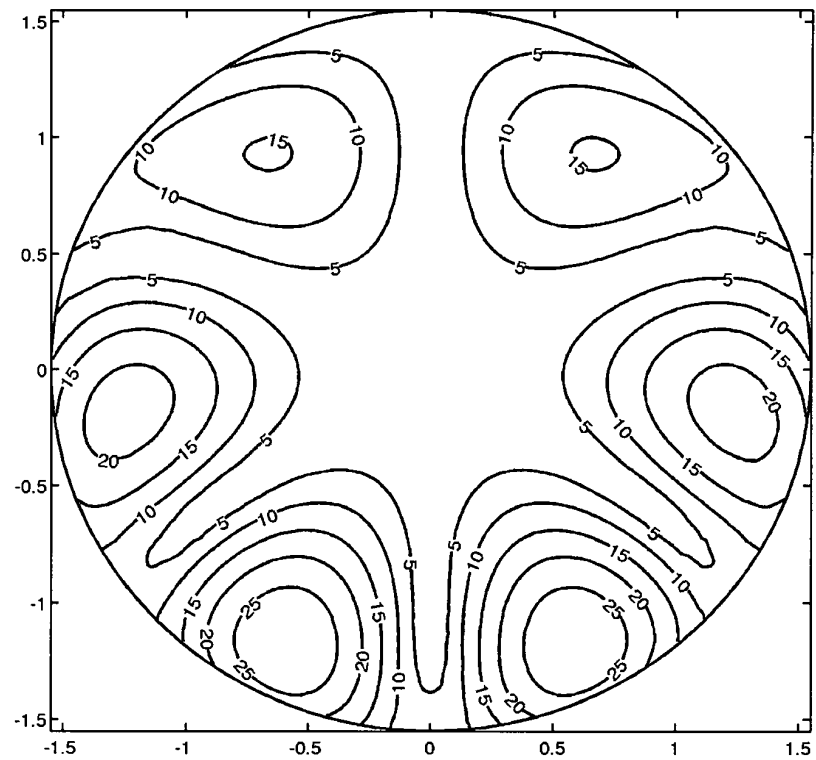
**Fig. 9**



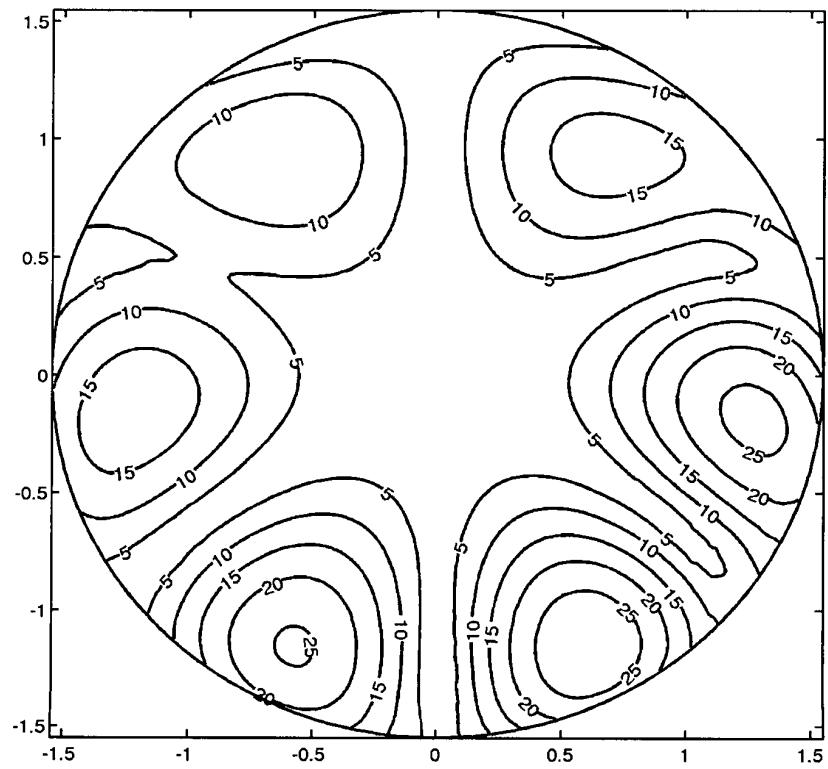


**Fig. 10**

**a)**

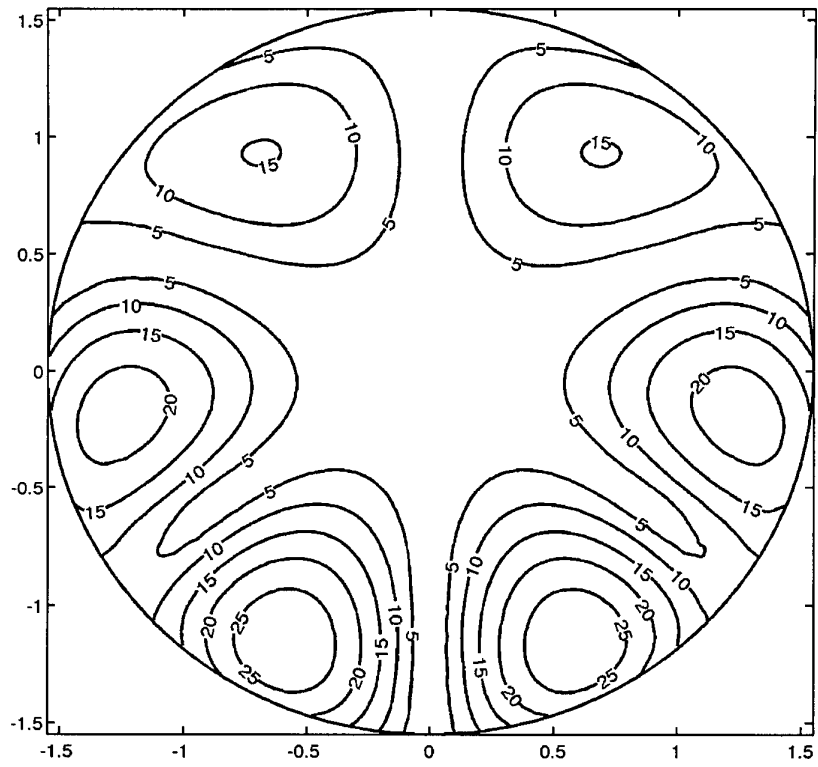


**b)**

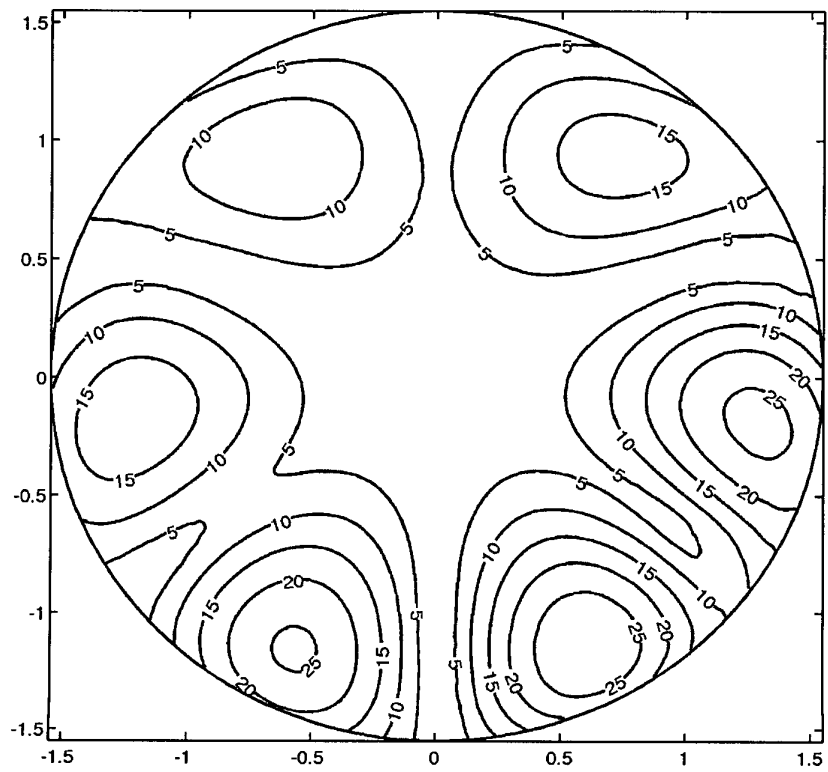


**Fig. 11**

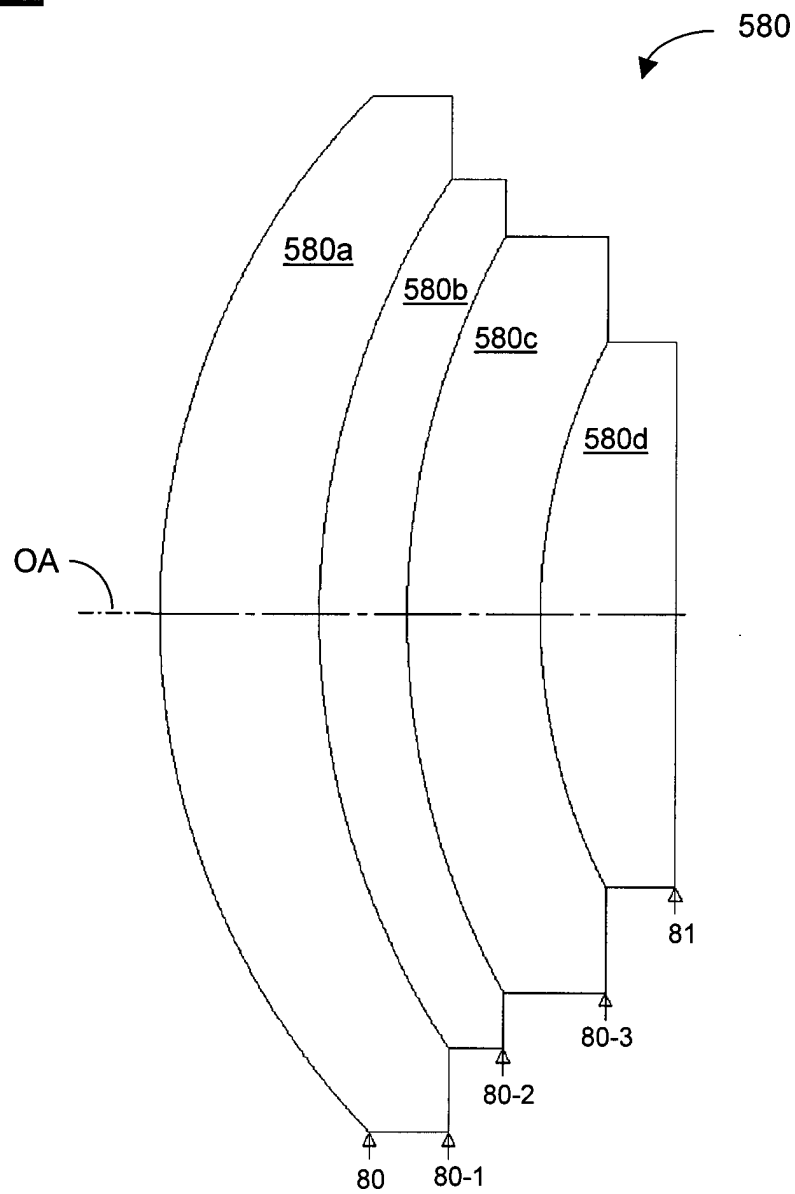
**a)**



**b)**

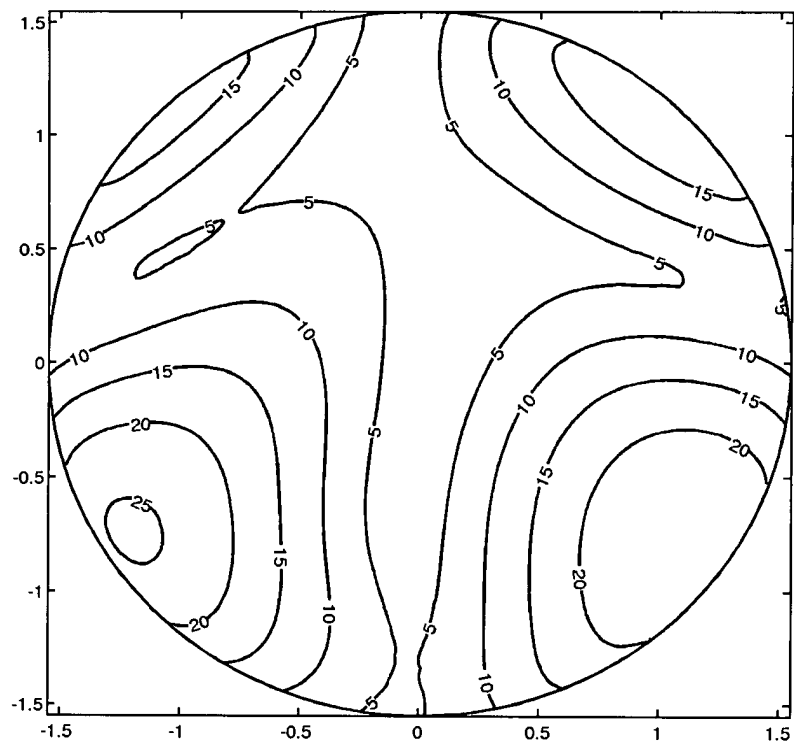


**Fig. 12**

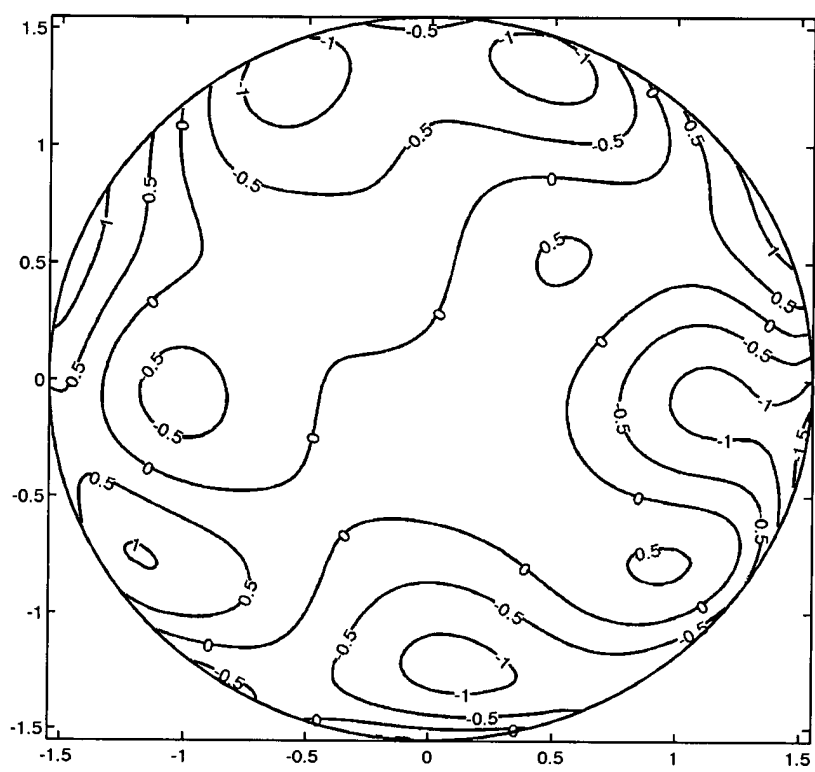


**Fig. 13**

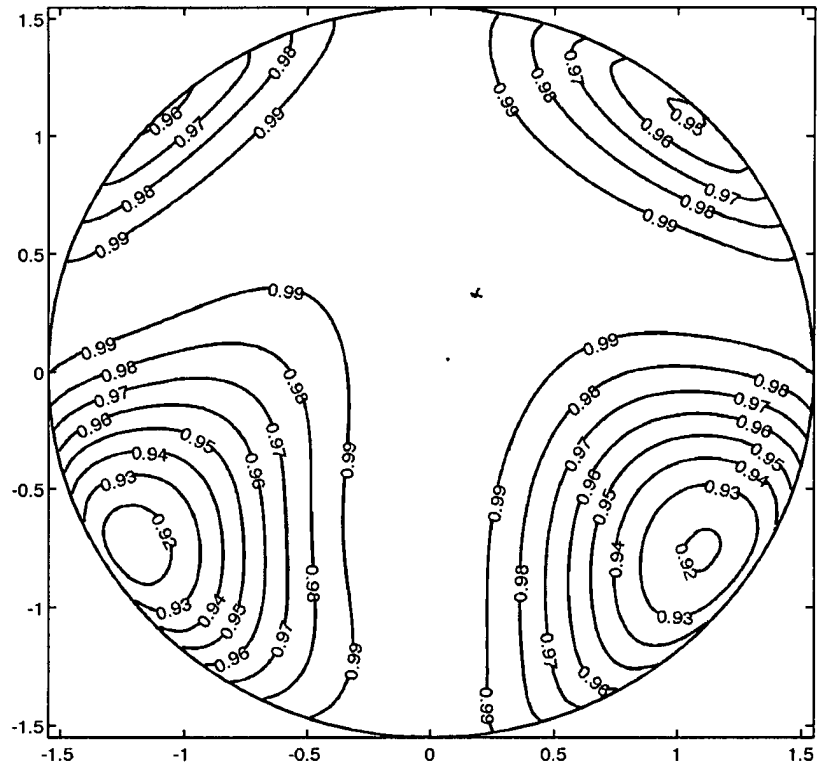
**a)**



**b)**

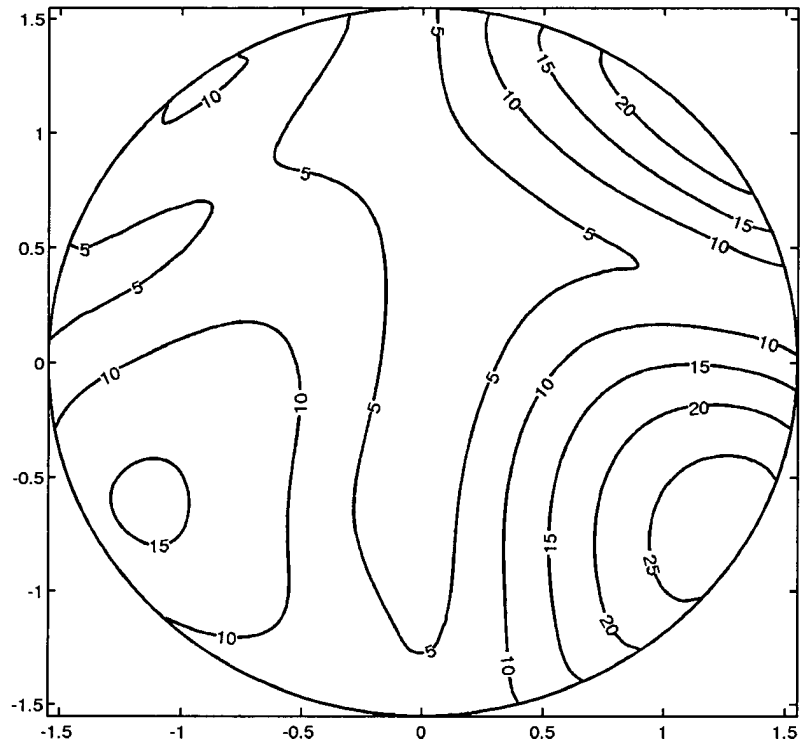


**c)**

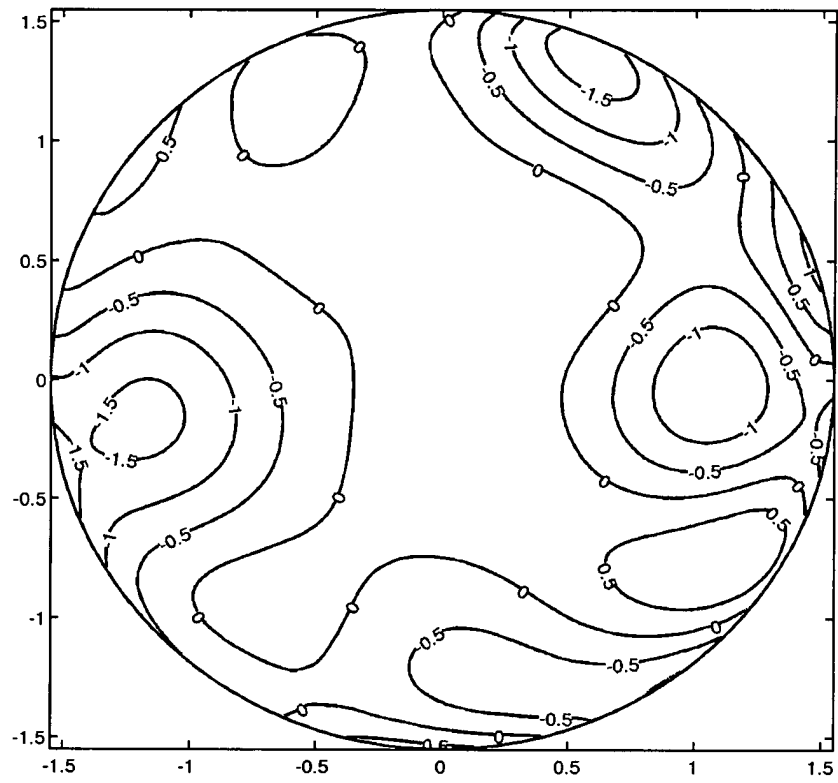


**Fig. 14**

**a)**



**b)**



**c)**

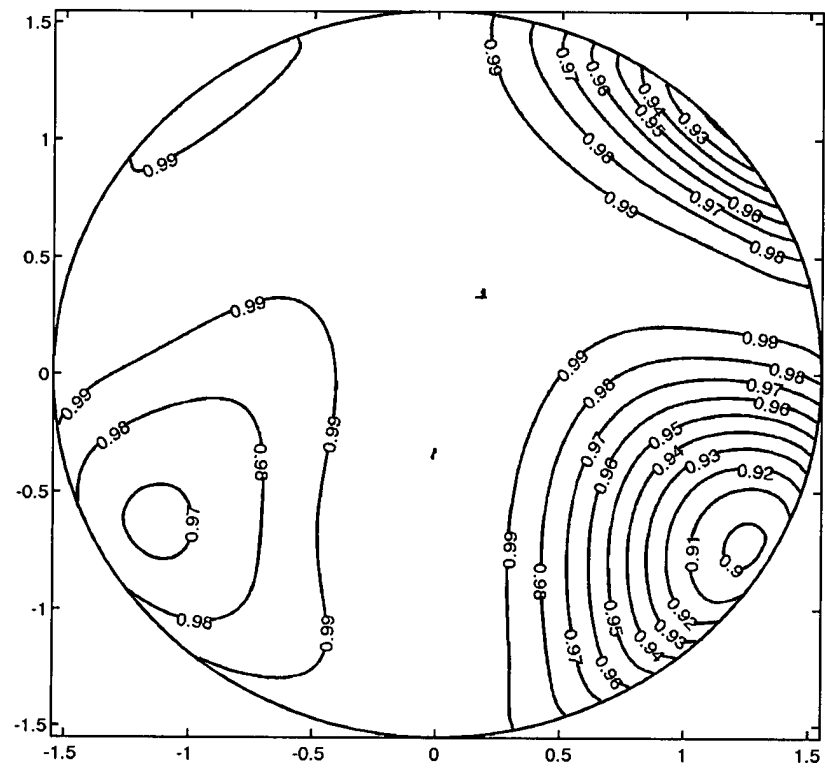




Fig. 15

