

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第5086299号
(P5086299)

(45) 発行日 平成24年11月28日(2012.11.28)

(24) 登録日 平成24年9月14日(2012.9.14)

(51) Int.Cl.	F I
GO2B 13/14 (2006.01)	GO2B 13/14
GO2B 13/00 (2006.01)	GO2B 13/00
GO2B 17/08 (2006.01)	GO2B 17/08 A
HO1L 21/027 (2006.01)	HO1L 21/30 515D

請求項の数 9 外国語出願 (全 60 頁)

(21) 出願番号	特願2009-108151 (P2009-108151)	(73) 特許権者	504151804
(22) 出願日	平成21年4月27日(2009.4.27)		エーエスエムエル ネザーランズ ビー.
(62) 分割の表示	特願2003-502557 (P2003-502557)		ブイ.
原出願日	平成14年5月31日(2002.5.31)		オランダ国 ヴェルトホーフエン 550
(65) 公開番号	特開2009-169431 (P2009-169431A)	(74) 代理人	100079108
(43) 公開日	平成21年7月30日(2009.7.30)		弁理士 稲葉 良幸
審査請求日	平成21年4月27日(2009.4.27)	(74) 代理人	100109346
(31) 優先権主張番号	60/295, 212		弁理士 大貫 敏史
(32) 優先日	平成13年6月1日(2001.6.1)	(72) 発明者	ホフマン、 ジェフリイ エム.
(33) 優先権主張国	米国 (US)		アメリカ合衆国 85705 アリゾナ州
(31) 優先権主張番号	60/296, 694		トゥーソン ノース セCOND アヴェ
(32) 優先日	平成13年6月6日(2001.6.6)		ニュー 1番 927
(33) 優先権主張国	米国 (US)		

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 立方晶系光学系における複屈折の補正

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

光学系であって、

共通の光軸の近くを伝播する光のリターダンスを軽減するように、それぞれの [1 1 0] 格子方向が共通の光軸に沿わせて揃えられ、かつそれぞれの結晶格子が相互に前記光軸の周りを回転させられた少なくとも2つの [1 1 0] 立方晶系光学要素と、

前記 [1 1 0] 立方晶系光学要素の残留リターダンスを補償するように、前記共通の光軸に沿って揃えられ、大きさが中心から縁部へと大きくなる応力誘起複屈折を含む他の光学要素とを含む、光学系。

【請求項 2】

前記応力誘起複屈折は、前記他の光学要素内で半径方向に二次関数的に変化する、請求項 1 に記載の光学系。

【請求項 3】

前記他の光学要素は、非立方晶系材料で形成されている、請求項 1 又は請求項 2 に記載の光学系。

【請求項 4】

前記他の光学要素は、波長板である、請求項 1 乃至請求項 3 のうち何れか 1 項に記載の光学系。

【請求項 5】

請求項 1 乃至請求項 4 のうち何れか 1 項に記載の光学系を含むフォトリソグラフィッ

ル。

【請求項 6】

前記共通の光軸に沿って揃えられた光学要素と、
集光器光学系と、
レチクル及びフォトマスクの一方の上に形成されたマスクパターンと、
光源と、を更に有し、
前記フォトリソグラフィツールは、前記マスクパターンを、前記光学系を通して基板上に投影するように構成されている、請求項 5に記載のフォトリソグラフィツール。

【請求項 7】

前記光源は、248 nm以下の波長を有する光を生成する、請求項 6に記載のフォトリソグラフィツール。

10

【請求項 8】

半導体装置を形成する方法であって、
共通の光軸の近くを伝播する光のリターダンスを軽減するように、それぞれの[110]格子方向が共通の光軸に沿わせて揃えられ、かつそれぞれの結晶格子が相互に前記光軸の周りで回転させられた少なくとも2つの[110]立方晶系光学要素と、前記[110]立方晶系光学要素の残留リターダンスを補償するように、前記共通の光軸に沿って揃えられ、大きさが中心から縁部へと大きくなる応力誘起複屈折を含む他の光学要素とを含む、光学系を含むフォトリソグラフィツールを設けることと、
マスクパターン及び基板を前記光学系に対して一定の位置に位置させることと、
光源を照明させ、それによって前記マスクパターンを、前記光学系を通して前記基板上に投影させることと、を含む方法。

20

【請求項 9】

前記マスクパターンはレチクル上に形成され、前記基板は、その上に感光性コーティングを有し、
前記位置させることは、前記レチクルを前記光学系の物体視野に配置し、前記半導体ウエハを前記光学系の像視野に配置することを含み、
前記照明することは、前記感光性コーティングに露光パターンを形成することを含み、
前記方法は、前記露光パターンを現像することを更に含む、請求項 8に記載の方法。

30

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、より一般的には、高性能の光学系及びリソグラフィ方法に関する。特に、本発明は、立方晶系光学要素を用いて光学系における固有の複屈折の影響を補償する装置及び方法に関する。

【背景技術】

【0002】

集積回路及びその他の半導体装置のデバイス集積度を高めるために、より小さな寸法を有するデバイスフィーチャを製造することが目標とされている。今日の急速に進歩する半導体製造産業には、このようなデバイスフィーチャを信頼できかつ反復可能な方法で製造するという関連する目標がある。

40

【0003】

光学リソグラフィシステムは、半導体基板上にデバイスパターンの画像を形成する製造プロセスで一般に使用されている。このシステムの分解能は、露光波長に比例し、したがって、できるだけ短い露光波長を用いた方が有利である。サブミクロンリソグラフィの場合、248 nm(ナノメートル)以下の波長を有する深紫外線光が一般に使用されている。関心のある波長には193 nm及び157 nmが含まれる。

【0004】

紫外線波長または深紫外線波長では、リソグラフィシステムのレンズ、窓、及びその他の光学要素を形成するのに用いられる材料が非常に重要である。このような光学要素は、

50

これらのリソグラフィシステムに用いられる短波長光に適合しなければならない。

【0005】

フッ化カルシウム、及びフッ化バリウム、フッ化リチウム、フッ化ストロンチウムのよ
うなその他の立方晶系材料は、たとえば157nmリソグラフィ用の光学要素として使用
される材料として開発されている材料のいくつかを代表するものである。これらの単結晶
フッ化物材料は、通常の光学ガラスと比べて望ましくは高い透過率を有し、かなり均質に
製造することができる。

【0006】

したがって、このような立方晶系材料は、半導体製造産業で用いられる半導体ウェハや
その他のウェハなどの基板上に小さなフィーチャを作製するのに用いられるウェハステッ
パやその他の投影プリンタなどの短波長光学系における光学要素として有用である。特に
、フッ化カルシウムは、それが容易に得られる立方晶系材料であり、大きな高純度単結晶
を成長させることができるという点で特に有利である。

【0007】

深紫外線リソグラフィシステムにおける光学要素に立方晶系材料を使用する場合の主要
な問題は、立方晶系材料に固有の屈折率の異方性である。これを「固有複屈折」と呼ぶ。
最近、フッ化カルシウムなどの立方晶系材料が、光学系に用いられる光の波長の2乗の逆
数に比例する固有複屈折を示すことが報告されている [J. Burnett, Z. H. Levine, and
E. Shipley, "Intrinsic Birefringence in 157 nm materials (158 nm材料における
固有複屈折)," Proc. 2nd Intl. Symp on 157 nm Lithography, Austin, Intl SEMATEC,
ed. R. Harbison, 2001]。この複屈折の大きさは、光波長が250nmよりも短くなり
、特に100nmに近づいたときに特に顕著になる。特に重要なのは、157nmの波長
、すなわち、半導体製造産業で好んで用いられているF₂エキシマレーザによって生成さ
れる光の波長における固有複屈折の影響である。

【0008】

複屈折、すなわち二重屈折は、屈折率が異方性である屈折材料の性質である。光が複屈
折材料内を通して伝搬する場合、屈折率は、伝搬方向に対する偏光及び材料の配向の関数
として変化する。偏光されていない光は、一般に、複屈折材料内を通ると、直交偏光状態
を有する2条のビームに分離される。

【0009】

光が単位長の複屈折材料を通過すると、2つの光路の屈折率の差によって光路差または
リターダンス(位相差; retardance)が起こる。複屈折は無単位量である。ただし、リソ
グラフィ業界では、複屈折をnm/cmの単位で表すのが一般的な慣習である。複屈折は
材料の性質であり、一方、リターダンスは偏光状態同士の間での光学遅延である。光学系を
通る所与の光線のリターダンスは、nm単位で表すか、または特定の波長での波の数で表
すことができる。

【0010】

フッ化マグネシウムや水晶などの一軸性結晶では、2条の屈折されたビームが同じ速度
で伝わる複屈折材料内を通る方向は、複屈折軸と呼ばれる。語「光軸」は一般に、単結晶
を扱うときには複屈折軸と相互交換可能に使用される。レンズ要素の系(システム)では
、語「光軸」は、通常、レンズ系の対称軸のことを指す。混乱を避けるために、語「光軸
」は以下では、レンズ系における対称軸のみを指すものとする。複屈折軸以外の、材料内
を通る方向については、2条の屈折されたビームは互いに異なる速度で伝わる。複屈折媒
体に対する所与の入射光線については、2条の屈折された光線は一般に、常光線及び異常
光線と呼ばれる。常光線は、複屈折軸に対して垂直に偏光され、スネルの法則に従って屈
折し、異常光線は、常光線に対して垂直に偏光され、入射光線に対する複屈折軸の方向と
複屈折の量に依存する角度で屈折する。一軸性結晶では、複屈折軸は単一の方向に沿って
配向させられ、複屈折の大きさは材料全体にわたって一定である。一軸性結晶は一般に、
リターデーション板や偏光子などの光学要素に使用される。

【0011】

しかし、これに対して、立方晶系結晶は、複屈折軸配向と複屈折値の両方が、結晶格子の配向に対する光の伝搬方向に応じて変化することが分かっている。2つの固有偏光に見られる屈折率の差である複屈折だけでなく、平均屈折率も入射角の関数として変化し、したがって、偏光に依存しない位相誤差が生じる。

【0012】

結晶軸の方向及び結晶面については、ここでは、共通の約数を有さない整数であり、結晶軸に沿った結晶面の切片に反比例するミラー指数を用いて説明する。格子面は、たとえば、 (100) のように、括弧内のミラー指数によって与えられ、直接格子内の軸方向は、たとえば、 $[111]$ のように角括弧内に与えられる。結晶格子方向、たとえば、 $[111]$ は、材料または光学要素の $[111]$ 結晶軸と呼ぶこともできる。 (100) 面、 (010) 面、及び (001) 面は、立方晶系結晶において同等であり、まとめて $\{100\}$ 面と呼ばれる。たとえば、 $[110]$ 結晶軸に沿って例示的な立方晶系光学要素内を

10

通って伝搬する光は、最大の複屈折を受け、一方、 $[100]$ 結晶軸に沿って伝搬する光は複屈折を受けない。

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0013】

したがって、波面が、立方晶系材料で構成された光学要素内を通過して伝搬する際、波面は、光学要素の固有複屈折のために遅延させられる可能性がある。リターダンスの大きさ及び配向は、材料内を通る局所伝搬角度が波面全体にわたって異なるため変化する。このような変化は「リターダンス収差」と呼ばれることがある。リターダンス収差によって、一様に偏光された波面は直交偏光を有する2つの波面に分割される。各直交波面は異なる屈折率を受け、異なる波面収差が生じる。これらの収差は、画像解像度を著しく低下させ、特に半導体製造におけるサブミクロン投影リソグラフィの場合、 157nm のような興味のある波長で像視野の歪を導入する。したがって、当技術分野では、特に深紫外線範囲の波長を有する光を用いる投影リソグラフィシステムにおいて、画像解像度を低下させ画像視野を歪曲させる可能性のある立方晶系光学要素の固有複屈折によって生じる波面収差を補償する必要があることが分かる。

20

【課題を解決するための手段】

【0014】

これら及びその他の要件に対処するために、本発明は、その目的を考慮して、立方晶系光学系における固有複屈折によって波面収差が生じるのを防止する方法及び装置を提供する。立方晶系レンズ要素の結晶軸は、個々のレンズ要素からのリターダンス寄与を相殺することによって正味リターダンスを最小限に抑えるように配向させられる。

30

【0015】

例示的な一実施態様では、本発明は、複数の光学要素から構成された投影レンズを有し、その光学要素のうち2以上が立方晶系材料で構成され、小さな角度で伝搬する光のリターダンスを軽減するように、系の光軸に対してその $[110]$ 立方晶系結晶格子方向を系の光軸に沿わせると共に光軸の周りに相対的に回転させることによって配向させられており、1以上の要素が、系の光軸に対してより大きな角度で伝搬するオフアクシス光のリターダンスを軽減するように、光軸をほぼ $[100]$ 立方晶系結晶格子方向に沿わせて配向させられている、光学系を提供する。

40

【0016】

他の例示的な実施態様では、本発明は、立方晶系材料で構成され、光軸をほぼ光学要素の $[110]$ 立方晶系結晶格子方向に沿わせて配向させられた4つの光学要素を含む光学系を提供する。これらの光学要素は、系の光軸に対して小さな角度で伝搬する光のリターダンスを軽減するように光軸の周りに配向させられている。光学系は、系の光軸に対してより大きな角度で伝搬する光のリターダンスを軽減するように、要素の $[100]$ 結晶格子方向をほぼ光軸に沿わせて配向させられた光学要素を、さらに含んでいる。

【0017】

50

他の例示的な実施態様では、本発明は、複数の光学要素を含み、そのうちの2以上が、立方晶系材料で構成され、かつその[110]立方晶系結晶格子方向に対して小さな角度で伝搬する光のリターダンスを軽減するように、その[110]立方晶系結晶格子方向を光学系の光軸に沿わせると共に光軸の周りに相対回転させることによって配向させられた、光学系を提供する。光学系の残留リターダンスを軽減するために、応力誘起複屈折が、[110]立方晶系光学要素、または非立方晶系要素や[100]光学要素のような他の光学要素に作用させられる。

【0018】

他の例示的な実施態様では、本発明は、レンズ系を設け、2以上の要素を、光軸をほぼ要素の[110]立方晶系結晶格子方向に沿わせて配向させ、1以上の要素を、光軸をほぼ要素の[100]立方晶系結晶格子方向に沿わせて配向させ、光軸の周りでの要素の最適化された相対回転を行わせることによって、固有複屈折によって生じるリターダンス収差を軽減する方法及び装置を提供する。

10

【0019】

他の例示的な実施態様では、本発明は、レンズ規定によって定められるレンズ系を設け、次に、レンズ規定によって定められる全体的な要素寸法を維持しつつ、レンズ系の少なくとも1つの要素を、リターダンス収差を軽減するように配向させられた複数の立方晶系成分に分割することによって、固有複屈折によって生じるリターダンス収差を軽減する方法及び装置を提供する。

【0020】

またさらなる例示的な実施態様では、本発明は、少なくとも2つの立方晶系光学要素を有するレンズ系を設け、応力誘起複屈折を少なくとも1つの光学要素に与えて残留リターダンスの変化を小さくすることによって、固有複屈折によって生じるリターダンス収差を軽減する方法及び装置を提供する。

20

【0021】

本発明の他の態様は、互いに直交する方向においてベース曲率半径が互いに異なる少なくとも1つの光学要素を用いることによって、立方晶系光学要素の平均屈折率の変化による残留非点収差を補償する装置及び方法を提供する。

【0022】

他の例示的な実施態様では、本発明は、1つの上述の光学系を含むフォトリソグラフィツールを提供する。

30

【0023】

他の例示的な実施態様では、本発明は、選択的に配向させられた結晶レンズ要素を使用して、半導体製造産業に用いられる半導体基板上に半導体装置を形成する方法及び装置を提供する。

【0024】

他の例示的な実施態様では、本発明は、選択的に配向させられた立方晶系レンズ要素を含むリソグラフィツールを用いて形成された半導体装置を提供する。

【0025】

本発明は、以下の詳細な説明を添付の図面に関連付けて読んだときに最もよく明らかになろう。一般的な慣習として、図面の様々なフィーチャが一定の比例で描かれていないことに留意されたい。逆に、様々なフィーチャの寸法は図面を明確にするために任意に拡大または縮小されている。図面には後述の図が含まれている。

40

【図面の簡単な説明】

【0026】

【図1】例示的なリソグラフィシステムの投影光学系の概略図である。

【図2】例示的なリソグラフィシステムの概略図である。

【図3】図3Aは立方晶系結晶格子に対する複屈折軸配向の変化を表したグラフであり、図3Bは立方晶系結晶格子に対する複屈折値の変化を表したグラフである。

【図4】例示的な立方晶系結晶格子内を通る種々な方向間の角度関係を示す斜視図である

50

。【図5】図5 Aは $[110]$ 格子方向に対する立方晶系物質の角度空間における複屈折値と複屈折軸配向を示す図であって、オフアクシスピーク複屈折ロープの方位(アジマス)配向(azimuth orientation)を示し、図5 Bは $[100]$ 格子方向に対する立方晶系物質の角度空間における複屈折値と複屈折軸配向を示す図であって、オフアクシスピーク複屈折ロープの方位配向を示し、図5 Cは $[111]$ 格子方向に対する立方晶系物質の角度空間における複屈折値と複屈折軸配向を示す図であって、オフアクシスピーク複屈折ロープの方位配向を示す。

【図6】集束ビームの焦点の周りに同心に3つの立方晶系要素を有する例示的な光学系の概略図である。

10

【図7】図7 Aは光軸が各要素ごとに $[110]$ 格子方向に沿って延びており、すべての要素の結晶軸がまったく同じに配向させられている、図6に示されている光学系の例示的な実施形態の瞳(ひとみ)にわたる正味リターダンスの大きさと配向を示す図であり、図7 Bは光軸が各要素ごとに $[100]$ 格子方向に沿って延びており、すべての要素の結晶軸がまったく同じに配向させられている、図6に示されている光学系の例示的な実施形態の瞳にわたる正味リターダンスの大きさと配向を示す図であり、図7 Cは光軸が各要素ごとに $[100]$ 格子方向に沿って延びており、すべての要素の結晶軸がまったく同じに配向させられている、図6に示されている光学系の例示的な実施形態の瞳にわたる正味リターダンスの大きさと配向を示す図である。

【図8】図8 Aは第1の要素が、 $[110]$ 光学要素であり、水平に配向したリターダンスが光軸に沿って生じるように光軸の周りを回転させられている、図6に示されている光学系の第1の要素の瞳にわたるリターダンスに対する個々の寄与を示すグラフであり、図8 Bは第2の要素が、 $[110]$ 光学要素であり、垂直に配向したリターダンスが光軸に沿って生じるように光軸の周りを回転させられている、図6に示されている光学系の第2の要素の瞳にわたるリターダンスに対する個々の寄与を示すグラフであり、図8 Cは $[100]$ 光学要素であり、ピークリターダンスが瞳対角線に配向させられている、図6に示されている光学系の第3の要素の瞳にわたるリターダンスに対する個々の寄与を示すグラフである。

20

【図9】図9 Aは最初の2つの要素が $[110]$ 立方晶系光学要素であり、第3の要素が $[100]$ 立方晶系光学要素である、例示的な実施形態による図6に示されている光学系の第1及び第2の要素の瞳にわたる合成リターダンスを示すグラフであり、図9 Bは最初の2つの要素が $[110]$ 立方晶系光学要素であり、第3の要素が $[100]$ 立方晶系光学要素である、例示的な実施形態による図6に示されている光学系の瞳にわたる正味のリターダンスを示すグラフであり、図9 Cは最初の2つの要素が $[110]$ 立方晶系光学要素であり、第3の要素が $[100]$ 立方晶系光学要素であり、第3の要素が正味のRMS(自乗和平方)リターダンスを最小限に抑える厚さとして選択された厚さを含む、他の例示的な実施形態による図6に示されている光学系の瞳にわたる正味リターダンスを示すグラフであり、図9 Dは圧縮フープ応力が第1の要素の周囲に沿って印加されたときの、図6に示されている光学系の第1の要素を横切る半径方向のリターダンスをプロットしたグラフであり、図9 Eは例示的な引張りフープ応力が、要素の周囲に沿って、固有複屈折によって生じるリターダンスを含まないように、印加されたときの、図6に示されている光学系の第1の要素の瞳にわたるリターダンスに対する個々の寄与を示すグラフであり、図9 Fは例示的な引張りフープ応力が、正味のRMSリターダンスを最小限に抑えるように第1の要素の周囲に沿って印加されたときの、図6に示されている光学系の瞳にわたる正味のリターダンスを示すグラフである。

30

40

【図10】集束ビームの焦点の周りに同心に5つの立方晶系要素を有する例示的な光学系の概略図である。

【図11】図11 Aは光軸が各要素の $[110]$ 格子方向に沿っており、すべての要素の結晶軸が同一に配向させられている、図10に示されている光学系の例示的な実施形態の瞳にわたる正味のリターダンスの大きさと配向を示すグラフであり、図11 Bは光軸が各

50

要素の [1 1 1] 格子方向に沿っており、すべての要素の結晶軸が同一に配向させられている、図 1 0 に示されている光学系の例示的な実施形態の瞳にわたる正味のリターダンスの大きさと配向を示すグラフであり、図 1 1 C は光軸が各要素の [1 1 1] 格子方向に沿っており、すべての要素の結晶軸が同一に配向させられている、図 1 0 に示されている光学系の例示的な実施形態の瞳にわたる正味リターダンスの大きさと配向を示すグラフである。

【図 1 2】最初の 4 つの要素が [1 1 0] 立方晶系光学要素であり、第 5 の要素が [1 0 0] 立方晶系光学要素である、図 1 0 に示されている光学系のリターダンスの大きさと配向を示すグラフであって、図 1 2 A は光軸に沿ったリターダンスが水平に対して 17.632° 回転させられている、第 1 の要素の瞳にわたるリターダンスに対する個々の寄与を示すグラフであり、図 1 2 B は光軸に沿ったリターダンスが水平に対して -17.632° 回転させられている、第 2 の要素の瞳にわたるリターダンスに対する個々の寄与を示すグラフであり、図 1 2 C は光軸に沿ったリターダンスが水平に対して 72.368° 回転させられている、第 3 の要素の瞳にわたるリターダンスに対する個々の寄与を示すグラフであり、図 1 2 D は光軸に沿ったリターダンスが水平に対して -72.368° 回転させられている、第 4 の要素の瞳にわたるリターダンスに対する個々の寄与を示すグラフである。

10

【図 1 3】最初の 4 つの要素が [1 1 0] 立方晶系光学要素であり、第 5 の要素が [1 0 0] 立方晶系光学要素である、図 1 0 に示されている光学系のリターダンスの大きさと配向を示すグラフであって、図 1 3 A は互いに重なり合った第 1 の要素と第 3 の要素の瞳にわたるリターダンスを示すグラフであり、図 1 3 B は第 1 の要素と第 3 の要素の瞳にわたる正味のリターダンスを示す図であり、図 1 3 C は第 2 の要素と第 4 の要素の瞳にわたる正味のリターダンスを示す図である。

20

【図 1 4】最初の 4 つの要素が [1 1 0] 立方晶系光学要素であり、第 5 の要素が [1 0 0] 立方晶系光学要素である、図 1 0 に示されている光学系のリターダンスの大きさと配向を示すグラフであって、図 1 4 A は最初の 4 つの要素の瞳にわたる正味リターダンスを示すグラフであり、図 1 4 B は第 5 の要素の瞳にわたるリターダンスに対する個々の寄与を示すグラフであり、図 1 4 C は瞳にわたる正味のリターダンスを示す図である。

【図 1 5】例示的な大フォーマットの屈折投影レンズの概略図である。

【図 1 6】図 1 6 A 及び図 1 6 B は単一層反射防止コーティングによる、それぞれ中心視野点(center field point)及び極端視野点(extreme field point)における図 1 5 に示されている例示的なレンズの瞳にわたるリターダンスを示すグラフである。

30

【図 1 7】図 1 7 A 及び図 1 7 B は単一層反射防止コーティングによる、それぞれ中心視野点及び極端視野点における図 1 5 に示されている例示的なレンズの瞳にわたるダイアテニュエーション(diattenuation)を示すグラフである。

【図 1 8】図 1 5 に示されている例示的なレンズの残留波面誤差を示す等高線図であって、図 1 8 A は中心視野点に対する X 方向において射出瞳アナライザと一緒に用いた場合の X 方向の入力偏光に対する波面誤差を示すプロットであり、図 1 8 B は極端視野点に対する X 方向において射出瞳アナライザと一緒に用いた場合の X 方向の入力偏光に対する波面誤差を示すプロットであり、図 1 8 C は中心視野点に対する Y 方向において射出瞳アナライザと一緒に用いた場合の Y 方向の入力偏光に対する波面誤差を示すプロットであり、図 1 8 D は図 1 5 に示されている例示的なレンズの残留波面誤差を示す等高線図であって、極端視野点に対する Y 方向において射出瞳アナライザと一緒に用いた場合の Y 方向の入力偏光に対する波面誤差を示すプロットである。

40

【図 1 9】図 1 9 A 及び図 1 9 B はすべての要素が、三次元において同一に揃えられた立方晶系結晶であって、光軸が [1 1 0] 結晶格子方向に沿って延び、ピーク複屈折値が、波長が 157 nm のときのフッ化カルシウムのピーク複屈折値に対応する場合における、それぞれ中心視野点及び極端視野点における図 1 5 に示されている例示的なレンズの瞳にわたるリターダンスを示すグラフである。

【図 2 0】図 2 0 A 及び図 2 0 B はすべての要素が、三次元において同一に揃えられた立

50

方晶系結晶であって、光軸が $[100]$ 結晶格子方向に沿って延び、ピーク複屈折値が、波長が 157 nm のときのフッ化カルシウムのピーク複屈折値に対応する場合における、それぞれ中心視野点及び極端視野点における図15に示されている例示的なレンズの瞳にわたるリターダンスを示すグラフである。

【図21】図21A及び図21Bはすべての要素が、三次元において同一に揃えられた立方晶系結晶であって、光軸が $[111]$ 結晶格子方向に沿って延び、ピーク複屈折値が、波長が 157 nm のときのフッ化カルシウムのピーク複屈折値に対応する場合における、それぞれ中心視野点及び極端視野点における図15に示されている例示的なレンズの瞳にわたるリターダンスを示すグラフである。

【図22】要素の結晶軸として固有複屈折を補償するような結晶軸が選択され、かつそのように配向させられている、図15に示されている例示的なレンズを示す概略図であって、斜線(ハッチング)が付された要素が $[100]$ 立方晶系光学要素であり、他のすべての要素が $[100]$ 立方晶系光学要素である図である。

【図23】図23A及び図23Bはすべての要素の反射防止コーティング及び固有複屈折による、それぞれ中心視野点及び極端視野点における図22に示されている例示的なレンズの瞳にわたるリターダンスを示すグラフである。

【図24】図22に示されている例示的なレンズの残留波面誤差を示す等高線図であって、図24Aは中心視野点に対するX方向において射出瞳アナライザと一緒に用いた場合のX方向の入力偏光に対する波面誤差を示すプロットであり、図24Bは極端視野点に対するX方向において射出瞳アナライザと一緒に用いた場合のX方向の入力偏光に対する波面誤差を示すプロットであり、図24Cは中心視野点に対するY方向において射出瞳アナライザと一緒に用いた場合のY方向の入力偏光に対する波面誤差を示すプロットであり、図24Dは極端視野点に対するY方向において射出瞳アナライザと一緒に用いた場合のY方向の入力偏光に対する波面誤差を示すプロットである。

【図25】図25A及び図25Bは単一層反射防止コーティングによる、それぞれ中心視野点及び極端視野点における図1に示されている例示的なレンズの瞳にわたるリターダンスを示すグラフである。

【図26】図26A及び図26Bは単一層反射防止コーティングによる、それぞれ中心視野点及び極端視野点における図1に示されている例示的なレンズの瞳にわたるダイアテニエーションを示すグラフである。

【図27】図1に示されている例示的なレンズの残留波面誤差を示す等高線図であって図27Aは中心視野点に対するX方向において射出瞳アナライザと一緒に用いた場合のX方向の入力偏光に対する波面誤差を示すプロットであり、図27Bは極端視野点に対するX方向において射出瞳アナライザと一緒に用いた場合のX方向の入力偏光に対する波面誤差を示すプロットであり、図27Cは中心視野点に対するY方向において射出瞳アナライザと一緒に用いた場合のY方向の入力偏光に対する波面誤差を示すプロットであり、図27Dは極端視野点に対するY方向において射出瞳アナライザと一緒に用いた場合のY方向の入力偏光に対する波面誤差を示すプロットである。

【図28】図28A及び図28Bはすべての要素が三次元において同一に揃えられ、光軸が $[110]$ 結晶格子方向に沿って延び、ピーク複屈折値が、波長が 157 nm のときのフッ化カルシウムのピーク複屈折値に対応する場合における、それぞれ中心視野点及び極端視野点における図1に示されている例示的なレンズの瞳にわたるリターダンスを示すグラフである。

【図29】図29A及び図29Bはすべての要素が、三次元において同一に揃えられた立方晶系結晶であって、光軸が $[100]$ 結晶格子方向に沿って延び、ピーク複屈折値が、波長が 157 nm のときのフッ化カルシウムのピーク複屈折値に対応する場合における、それぞれ中心視野点及び極端視野点における図1に示されている例示的なレンズの瞳にわたるリターダンスを示すグラフである。

【図30】図30A及び図30Bはすべての要素が、三次元において同一に揃えられた立方晶系結晶であって、光軸が $[111]$ 結晶格子方向に沿って延び、ピーク複屈折値が、

10

20

30

40

50

波長が 157 nm のときのフッ化カルシウムのピーク複屈折値に対応する場合における、それぞれ中心視野点及び極端視野点における図 1 に示されているレンズの瞳にわたるリターダンスを示すグラフである。

【図 3 1】最後の 2 つの要素が、光軸の周りにそれぞれの異なる相対的な回転を有する 2 つのセグメントに分割され、要素の光軸が固有複屈折を補償するように配向させられている、図 1 に示されている例示的なレンズを示す概略図であって、斜線が付された要素は光軸に沿った [100] 結晶格子方向を有し、他のすべての要素は光軸に沿った [110] 結晶格子方向を有している図である。

【図 3 2】図 3 2 A 及び図 3 2 B は反射防止コーティング及びすべての要素の固有複屈折による、それぞれ中心視野点及び縁部視野点における図 3 1 に示されている例示的なレンズの瞳にわたるリターダンスを示すグラフである。

10

【図 3 3】図 3 1 に示されている例示的なレンズの残留波面誤差を示す等高線図であって、図 3 3 A は中心視野点に対する X 方向において射出瞳アナライザと一緒に用いた場合の X 方向の入力偏光に対する波面誤差を示すプロットであり、図 3 3 B は極端視野点に対する X 方向において射出瞳アナライザと一緒に用いた場合の X 方向の入力偏光に対する波面誤差を示すプロットであり、図 3 3 C は中心視野点に対する Y 方向において射出瞳アナライザと一緒に用いた場合の Y 方向の入力偏光に対する波面誤差を示すプロットであり、図 3 3 D は極端視野点に対する Y 方向において射出瞳アナライザと一緒に用いた場合の Y 方向の入力偏光に対する波面誤差を示すプロットである。

【図 3 4】例示的な大フォーマットの反射屈折投影レンズの概略図である。

20

【図 3 5】図 3 5 A 及び図 3 5 B は単一層反射防止コーティングによる、それぞれ中心視野点及び縁部視野点における図 3 4 に示されているレンズの瞳にわたるリターダンスを示すグラフである。

【図 3 6】図 3 4 に示されているレンズの残留波面誤差を示す等高線図であって、図 3 6 A は中心視野点に対する X 方向において射出瞳アナライザと一緒に用いた場合の X 方向の入力偏光に対する波面誤差を示すプロットであり、図 3 6 B は極端視野点に対する X 方向において射出瞳アナライザと一緒に用いた場合の X 方向の入力偏光に対する波面誤差を示すプロットであり、図 3 6 C は中心視野点に対する Y 方向において射出瞳アナライザと一緒に用いた場合の Y 方向の入力偏光に対する波面誤差を示すプロットであり、図 3 6 D は極端視野点に対する Y 方向において射出瞳アナライザと一緒に用いた場合の Y 方向の入力偏光に対する波面誤差を示すプロットである。

30

【図 3 7】図 3 7 A 及び図 3 7 B は第 2 の波長板 (wave plate) と画像面 (image plane) との間のすべての要素が、光軸が [110] 結晶格子方向に沿って延び、ピーク複屈折値が、波長が 157 nm のときのフッ化カルシウムのピーク複屈折値に対応する場合に例示的な実施形態における、それぞれ中心視野点及び極端視野点における図 3 4 に示されている例示的なレンズの瞳にわたるリターダンスを示すグラフである。

【図 3 8】図 3 8 A 及び図 3 8 B は第 2 の波長板と画像面との間のすべての要素が、光軸が [100] 結晶格子方向に沿って延び、ピーク複屈折値が、波長が 157 nm のときのフッ化カルシウムのピーク複屈折値に対応する場合に例示的な実施形態における、それぞれ中心視野点及び極端視野点における図 3 4 に示されている例示的なレンズの瞳にわたるリターダンスを示すグラフである。

40

【図 3 9】図 3 9 A 及び図 3 9 B は第 2 の波長板と画像面との間のすべての要素が、光軸が [111] 結晶格子方向に沿って延び、ピーク複屈折値が、波長が 157 nm のときのフッ化カルシウムのピーク複屈折値に対応する場合に例示的な実施形態における、それぞれ中心視野点及び極端視野点における図 3 4 に示されている例示的なレンズの瞳にわたるリターダンスを示すグラフである。

【図 4 0】最後の要素が 2 つのセグメントに分割されている、図 3 4 に示されている例示的なレンズを示す概略図であって、斜線の要素が [110] 立方晶系光学要素であり、他のすべての要素が [100] 立方晶系光学要素である図である。

【図 4 1】図 4 1 A 及び図 4 1 B は前方の 6 つの要素の結晶格子方向が水平方向及び垂直

50

方向に沿ったリターダンスの変化を最小限に抑えるように選択された場合における、反射防止コーティング及び前方の6つの要素の固有複屈折による、それぞれ中心視野点及び縁部視野点における図40に示されている例示的なレンズの瞳にわたるリターダンスを示すグラフである。

【図42】図42A及び図42Bは反射防止コーティングと、第2の波長板と画像面との間の一群の要素の固有複屈折とによる、それぞれ中心視野点及び縁部視野点における図40に示されているレンズの瞳にわたるリターダンスを示すグラフである。

【図43】図43A及び図43Bは反射防止コーティング及びすべての要素の固有複屈折による、それぞれ中心視野点及び縁部視野点における図40に示されているレンズの瞳にわたるリターダンスを示すグラフである。

10

【図44】図40に示されているレンズの残留波面誤差を示す等高線図であって、図44Aは中心視野点に対するX方向において射出瞳アナライザと一緒に用いた場合のX方向の入力偏光に対する波面誤差を示すプロットであり、図44Bは極端視野点に対するX方向において射出瞳アナライザと一緒に用いた場合のX方向の入力偏光に対する波面誤差を示すプロットであり、図44Cは中心視野点に対するY方向において射出瞳アナライザと一緒に用いた場合のY方向の入力偏光に対する波面誤差を示すプロットであり、図44Dは極端視野点に対するY方向において射出瞳アナライザと一緒に用いた場合のY方向の入力偏光に対する波面誤差を示すプロットである。

【図45】集束ビームの焦点の周りに同心に2つの立方晶系要素を有する例示的な光学系の概略図である。

20

【図46】図46Aは例示的な圧縮フープ応力が、要素の周囲に沿って、固有複屈折によって生じるリターダンスを含まないように印加されたときの、図45に示されている光学系の第1の要素の瞳にわたるリターダンスに対する個々の寄与を示すグラフであり、図46Bは例示的な圧縮フープ応力が、正味のRMSリターダンスを最小限に抑えるように要素の周囲に沿って印加されたときの、図45に示されている光学系の瞳にわたる正味のリターダンスを示すグラフである。

【発明を実施するための形態】

【0027】

半導体製造産業で用いられるフォトリソグラフィックツールなどの高性能リソグラフィシステムに好んで用いられている立方晶系材料は、固有複屈折、すなわち屈折率における固有の異方性を示すことが当技術分野で公知である。光学系の要素を構成するために用いられると、このような立方晶系材料の複屈折特性によって、像解像度を著しく低下させ視野歪を導入する波面収差が生じる可能性がある。このことは、集積度の向上及びフィーチャサイズの縮小を重視する今日の半導体製造産業における高い解像度及びオーバーレイ要件に特に当てはまる。

30

【0028】

本発明は、立方晶系光学要素について複屈折の方向と大きさの両方を求めることができ、かつ各光学要素を、個々の要素の固有複屈折寄与によって生じるリターダンス収差を相殺または補償するように形成し揃えることができるという概念を利用する。たとえば、三次元格子配向内の固有複屈折の変化をこれらの材料について求めることができる。さらに、複数の立方晶系光学要素が、各光学要素が共通の光軸に対して指定された三次元格子配向を有するように揃えられるとき、複数の揃えられた光学要素は、公知のように変化する正味リターダンスを有する。

40

【0029】

本発明は、立方晶系光学要素を使用する光学系における固有複屈折の影響を補償する技術に関する。この補償は、個々の光学要素の結晶軸方向を適切に選択することによって行われ、偏光されたまたは偏光されない放射を用いて光学系に適用することができる。例示的な一実施形態では、補償は、光軸を光学要素の[110]結晶格子方向に沿わせた十分な数の立方晶系光学要素を利用することによって行うことができる。本発明は、様々な例示的な立方晶系光学要素における平均屈折率の変化による残留非点収差を補償することも

50

可能にする。例示的な一実施形態では、この補償は、互いに直交する方向において、少なくとも1つの光学要素のベース曲率半径を変えることによって行うことができる。

【0030】

半導体基板上に収差のないパターンを形成する様々な例示的な立方晶系光学系及び方法は、フィーチャサイズがますます小さくなり、パターンを作製するのに用いられている光の波長の2分の1に近づいているため特に有利である。このような技術は、大きな開口数(NA)レンズ系において特に有利であるが、本発明の様々な態様は、比較的大きな開口数を有する光学系と比較的小さな開口数を有する光学系の両方に適用することができる。

【0031】

図1は、例示的なリソグラフィシステムの例示的な投影光学系部を示す概略図である。図1に示されている光学系は、2001年4月10日にK. Omuraに発行され、内容が引用によって本明細書に組み込まれるヨーロッパ特許第EP 1 1 3 9 1 3 8 A 1号の第7の実施形態に示され記載された光学系とほぼ同様である。この例示的な光学系は、NA 0.75、ピーク波長193.3 nm、及び4×縮小率で動作する大フォーマット屈折投影レンズであってよい。このような光学系は、例示的なものに過ぎず、他の光学系を他の例示的な実施形態に用いることができる。例示的な光学系2は、例示的な実施形態ではリソグラフィツール4の投影光学系部であってよい。例示的な実施形態では、光学系2は、例示的なレチクル6と基板12との間に配置された投影レンズである。レチクル6は物体視野を含み、像視野が基板12上に形成されるとみなすことができる。

【0032】

光学系2は、一般にまとめて「レンズ」と呼ばれ、複数の個々のレンズ要素Lと、光軸10と、開口絞り(AS)9とで構成されたレンズ系である。レチクル6は、基板12の表面13上に投影されるマスクパターンを含んでいる。例示的な実施形態によれば、基板12は半導体製造産業で用いられる半導体ウェハであってよく、表面13を、半導体製造産業で一般に用いられているフォトレジストなどの感光性材料で被覆することができる。他の例示的な実施形態によれば他の基板を使用することができる。様々なマイクロリソグラフィツール内の他の例示的な実施形態によれば、レチクル6はフォトマスクであってよい。一般的に言えば、以下ではまとめてレチクル6と呼ぶレチクルまたはフォトマスクは、物体視野を形成する透明部分と不透明部分のパターンを含む媒体である。光はパターンを通して投影され、パターンはレンズ系を通して基板12の表面13上に投影される。レチクル6から基板表面13上に投影されたパターンは、様々な例示的な実施形態によって、10:1、5:1、4:1のような様々な比率でサイズを一様に縮小することができる。例示的なシステムは、0.75の開口数NAを含んでよいが、0.60から0.90の範囲内のような他の開口数を有するシステムを使用してもよい。

【0033】

複数のレンズ要素Lの構成は例示的なものに過ぎず、他の例示的な実施形態によれば、様々な形状を有する個々のレンズ要素の他の様々な構成を使用することができる。要素の厚さ、間隔、曲率半径、非球面係数などは、レンズ規定(lens prescription)とみなされる。本発明のレンズ系または「レンズ」は、1以上のレンズ要素を立方晶系材料で構成することのできる、複数の個々のレンズ要素Lで形成することが好ましい。フッ化ストロンチウムや、フッ化バリウムや、フッ化カルシウムなどの立方晶系材料を使用することができる。フッ化カルシウムは好ましい材料である。例示的な実施形態では、各立方晶系光学要素は同じ立方晶系材料で形成される。レンズは、乾燥溶融シリカとも呼ばれる低OH溶融シリカなどの非立方晶系材料で形成されたレンズ要素Lを含んでよい。個々の各レンズ要素は、共通の光軸10に沿って配置されている。例示的な実施形態では、光軸10は直線状である。

【0034】

図2は、リソグラフィツール4内の投影光学系部として機能する光学系2を示す概略図である。図2は、光源8及び基板12を示している。レチクル6は、集光器光学系14と投影光学系2との間に配置され、基板12上に投影されるパターンを含んでいる。レチク

10

20

30

40

50

ル6の光学視野は様々な寸法を有してよい。投影光学系2及び集光器光学系14のそれぞれは、開口絞りと、複数のレンズ要素、窓、その他の屈折部材及び反射部材とを含んでよい。図2に示されている光学系は線形光軸10を含み、リソグラフィツール4は、ウェハステッパ、投影プリンタ、半導体産業で用いられるその他のフォトリソグラフィツールまたはマイクロリソグラフィツールであってよい。リソグラフィツール4は、同様に、走査光学装置、ステップアンドリピート式光学装置、あるいはその他のマイクロリソグラフィ光学装置または投影光学装置であってよい。走査型光学装置では、レチクル6上のパターンが基板12の表面13の対応する部分に投影され走査される。従来のウェハステッパなどのステップアンドリピート式光学装置では、レチクル6上のパターンは、複数の別々の動作において表面13の複数の異なる部分に投影される。レチクル6は、リソグラフィツール4の物体視野にあるとみなされる。レチクルパターンは、表面13上に同時に投影される様々な視野点を含んでいる。

10

【0035】

例示的な実施形態では、基板12上に形成されている集積回路デバイスの表面13上に、レチクル6上に印刷されたパターンを用いて、回路パターンが作製される。例示的な実施形態によれば、パターンは、露光パターンを形成するように、表面13上に形成された感光性材料上に投影することができる。従来の手段を用いて露光パターンを形成し、感光性材料にフォトパターンを作製することができる。フォトパターンは、エッチングまたはその他の手段によって基板に移すことができる。他の例示的な実施形態によれば、基板12は、それに形成された一連の材料層を含んでよい。この実施形態では、表面13は、1つの層であってよく、この層上にフォトパターンを形成することができる。エッチングまたはその他の手段を用いて、フォトパターンを層に移すことができる。互いに同様に形成されたフォトパターンを用いて、イオン注入のような公知の方法を用いた空間的に選択的なドーピングを可能にすることができる。このように、本発明の技術を用いた複数のフォトリソグラフィック動作を用いて様々な層に様々な回路パターンを形成し、集積回路のような完全な半導体装置を作製することができる。本発明の利点は、基板上に形成される像が、より小さなサイズを有する、厳密な寸法を有しかつ厳密に揃えられたデバイスフィーチャを形成できるようにするのに十分な、少ない収差を有することである。

20

【0036】

例示的な走査光学装置では、基板表面上に投影され走査されるレチクル6の光学視野は、高さが26mm、幅が数ミリメートルであってよい。他の例示的な実施形態によれば、投影光学系が含まれるリソグラフィツールの種類に応じて、他の視野寸法を用いてよい。

30

【0037】

光源8は、後で集光器(コンデンサ)レンズ14によって成形され条件付けされる光を生成する。光源8の光波長は、様々であってよく、例示的な実施形態では248nm以下である。例示的な一実施形態では、約157nmの波長を有する光を使用することができる。例示的な実施形態では、光源8は直線偏光された光を生成することができる。直線偏光された光を生成する1つの光源はエキシマレーザである。他の例示的な実施形態によれば、光源8は偏光されない光を生成することができる。様々な例示的な実施形態によれば、約248nmで動作するKrFエキシマレーザ、約193nmで動作するArFエキシマレーザ、約157nmで動作するF₂エキシマレーザを、光源8として使用することができる。

40

【0038】

光源によって生成され、集光器レンズによって成形され条件付けされ、レチクルまたはフォトマスクからの画像を基板上に投影するのに用いられる光は、複数の光線で構成された光ビームと表すことができる。レチクルまたはフォトマスク上の個々の物体視野点から放出された光線は、投影レンズによって、基板上の対応する像視野点に投影される波面を形成する。主光線は、開口絞りを及び系の瞳(ひとみ)の中心を通過する所与の視野点からの光線である。光軸がレチクルと交差する場所に位置する物体視野点の場合、主光線は光軸に沿って伝わる。したがって、像視野全体は、複数の波面によって生成される。

50

【 0 0 3 9 】

半導体産業において基板をパターンングするために用いられるリソグラフィツールに関連して説明したが、本発明の様々な例示的な光学系は、パターンが光学系を通じて基板上に投影されるあらゆる用途で有用である。

【 0 0 4 0 】

図 3 A は、立方晶系結晶格子を有する材料内での複屈折軸配向の空間変化を示す三次元ベクトルプロットである。立方晶系結晶格子は、一実施形態ではフッ化カルシウムの立方晶系結晶格子であってよい。図 3 B は、図 3 A に示されているベクトルプロットの象限に対応し、固有複屈折の対応する大きさを示す 3 D (3 次元) プロットである。複屈折の局所的な大きさ及び軸は、空間的に、結晶全体にわたって、公知のように変化することが分かる。光がこのような立方晶系材料内を通過して伝わる方向に応じて、複屈折値及び伝搬方向に対する複屈折軸の配向が変化することも分かる。図 3 B は、結晶格子の八分円を表しており、この図を結晶内を通過するすべての可能な方向に拡張すると、最大複屈折または複屈折ローブに関する 1 2 個の方向が得られる。

10

【 0 0 4 1 】

図 3 A 及び 3 B に示されている結晶軸方向は、結晶軸に沿った結晶面の切片に反比例するとともに共通の因数を有さない整数であるミラー指数を用いて表されている。格子面は、たとえば、(1 0 1) のように、括弧内のミラー指数によって与えられ、結晶格子内の軸方向は、たとえば、[1 1 1] のように角括弧内に与えられる。結晶格子方向、たとえば、[1 1 0] は、要素または材料の [1 1 0] 結晶軸と呼ぶこともでき、光学要素の [1 1 0] 結晶軸を系の光軸に沿わせて配置された立方晶系光学要素を [1 1 0] 光学要素と呼ぶことができる。(1 0 0) 面、(0 1 0) 面、及び(0 0 1) 面は、立方晶系において等価であり、まとめて{ 1 0 0 } 面と呼ばれる。

20

【 0 0 4 2 】

したがって、結晶材料は有利なことに、所与の面に沿って切断し、その面に垂直な光が選択された軸方向に沿って伝わるように配置することができる。たとえば、(1 0 0) 結晶格子面に垂直に配向している [1 0 0] 結晶軸 1 8 に沿って(すなわち、[1 0 0] 結晶格子方向に沿って)伝わる光は、一定の確定的で局所的な固有複屈折を受ける。したがって、所与の光線が受ける複屈折値及び複屈折軸方向は、光線が結晶内を通過する方向の関数として変化する。

30

【 0 0 4 3 】

図 4 は、例示的な立方晶系結晶格子内を通過する様々な方向間の角度関係を示す斜視図である。立方晶系結晶格子は、たとえばフッ化カルシウムの立方晶系結晶格子であってよい。図 4 は、それぞれ線 2 2、2 4、2 6 で示されている [1 0 1] 格子方向、[1 1 0] 格子方向及び [0 1 1] 格子方向に沿ったピーク固有複屈折方向を含んでいる。線 2 0 は、固有複屈折なしに結晶内を通過する方向に対応する [1 1 1] 結晶軸方向を表している。

【 0 0 4 4 】

図 5 A、5 B、5 C は、図 4 に示されている立方晶系構造の、それぞれ、[1 1 0] 格子方向、[1 0 0] 格子方向及び [1 1 1] 格子方向に沿った光軸配向についての角度空間における複屈折値及び複屈折軸配向の変化の概略図である。プロットの中心は、上記で指摘した結晶軸に沿って図の平面に垂直に伝わる光線が受ける複屈折を表している。中心からの半径方向距離の増大に従って示されている複屈折は、光軸に対する光線の伝搬角度が大きくなる場合の複屈折を表している。図 5 A ~ 5 C の各々では、局所的な複屈折軸は、方形格子に描かれた線の方向によって示され、大きさは線の相対的な長さによって示されている。

40

【 0 0 4 5 】

図 5 A ~ 5 C における複屈折値の変化は、ノードとも呼ばれ、複屈折が最大になる方位角に分散されるいくつかのローブによって特徴付けられる。図 5 A ~ 5 C はそれぞれ、様々な結晶軸方向に対するピーク固有複屈折ローブと、図 4 に示されている立方晶系結晶格子とを示している。立方晶系結晶格子の空間配向は、矢印によって示されている他の関連

50

する結晶格子方向によって示されている。たとえば、中心が、 $[110]$ 結晶軸に沿って伝わる光線が受ける複屈折を表す図5Aでは、 $[101]$ 格子方向に沿って伝わる光線は、 $[111]$ 格子方向に沿って伝わる光線よりも $[110]$ 結晶軸に対する角度が大きく、これらの光線角度は、それぞれ、 60° 及び 35.3° である。このことは、中心からの半径方向距離が $[111]$ 矢頭よりも遠くに位置する $[101]$ 矢頭によって示されている。上記で指摘した $[100]$ 格子方向、 $[101]$ 格子方向、及び $[111]$ 格子方向の相対方位角方向は図4に示されている。この方向は図5B及び5Cにも当てはまる。

【0046】

図5A～5Cを参照すると、それぞれの場合に、上記で指摘した結晶軸は、図の平面に垂直でそれぞれの図の中心に位置する方向である。図5Aは、各々が $[110]$ 結晶軸方向に対して 60° の角度を形成するピーク固有複屈折ローブ29A、29B、29C、29Dを含む、 $[110]$ 格子方向に対する固有複屈折を示している。固有 $[110]$ 複屈折は中心複屈折ノード29Eも含んでいる。図5Bは、各々が $[100]$ 結晶軸方向に対して 45° の角度を形成するピーク複屈折ローブ31A、31B、31C、31Dを含む、 $[100]$ 格子方向に対する固有複屈折を示している。図示されていない、 90° の対角線に沿ったピークもある。図5Cは、各々が $[111]$ 結晶軸方向に対して 35.3° の角度を形成するピーク複屈折ローブ33A、33B、33Cを含む、 $[111]$ 格子方向に沿った固有複屈折を示している。

【0047】

図5A～5Cに示されているような結晶軸に対する結晶格子及び結果として得られる固有複屈折ローブは、立方晶系結晶が負の立方晶系結晶である例示的な実施形態の場合のものであり、すなわち、常光線の屈折率は異常光線の屈折率よりも大きく、したがって、複屈折 $n_o - n_e$ は負である。フッ化カルシウムは例示的な負立方晶系結晶である。正の立方晶系結晶の場合、線がそれぞれその中点の周りに 90° 回転させられることを除いて、パターンはほぼ同様である。フッ化バリウム、フッ化リチウム、フッ化ストロンチウムのような他の立方晶系光学要素を本発明の他の例示的な実施形態における光学要素として使用できることを理解されたい。使用される任意の立方晶系材料に関して、固有複屈折の方向及び大きさの変化を、測定するか、またはコンピュータモデリングを用いて算出することができる。さらに、光学材料の固有複屈折の方向及び大きさの変化も測定することができる。図5A～5Cに示されているのと同様の、複屈折値及び軸配向の変化の図を前述の立方晶系材料のそれぞれについて同様に生成することができる。

【0048】

再び図1を参照すると、個々のレンズ要素Lがそれぞれ、フッ化カルシウムのような同じ立方晶系光学要素で形成されており、個々のレンズ要素Lまたは光学要素がそれぞれ、共通の光軸に沿って配置され、かつ立方晶系材料で構成された個々のレンズ要素Lがそれぞれ光軸10に対してほぼ同じ三次元格子配向を含むように揃えられた場合、レンズ系(すなわち光学系2)の正味リターダンスは、図5A～5Cに概略的に示されている固有複屈折の角度変化と同様に、系の射出瞳にわたって変化するリターダンスを有する。

【0049】

実施形態1：

図6は、固有複屈折の影響を軽減する基本技術を示すために用いられる光学系の例示的な構成を示している。この例示的な光学系は、開口数0.707で焦点の方へ集束し、各要素において 45° の最大光線角度を与える収差のない光ビームから成っている。ビームは、曲率半径としてビームの焦点40と同心の曲率半径が指定された3つの立方晶系要素42、44、46を通過する。立方晶系要素42、44、46はそれぞれ、厚さ43、45、47を有している。例示的な実施形態では、各厚さ43、45、47は5mmであり、立方晶系要素42、44、46は、内容が引用によって本明細書に組み込まれるD. Kraemer, "Intrinsic Birefringence in CaF_2 (CaF_2 における固有複屈折)," Calcium Fluoride Birefringence Workshop, Intl SEMATECH, 2001年7月18日で提案されたように波長157nmで測定されたフッ化カルシウムの固有複屈折に対応する複屈折値 n_o 。

- $n_o = -1.2 \times 10^{-7}$ を有すると仮定することができる。この例示的な構成では、要素は、固有複屈折によって生じるリターダンス収差以外の波面収差を集束ビームにもたらずことはない。この例の場合、波長は 157.63 nm であり、常屈折率は 1.5587 と仮定される。

【0050】

例示的な一実施形態では、図 6 に示されている光学系は、各要素 42、44、46 が共通の光軸に沿って配置され、かつ各要素の三次元結晶格子が同一に揃えられるように配置することができる。図 7A、7B、7C は、光軸が、それぞれ、[110] 格子方向、[100] 格子方向及び [111] 格子方向に沿っており、各要素の三次元結晶格子が同一に揃えられている場合の射出瞳上でリターダンスがどのように変化するかを示している。

10

【0051】

図 7A、7B、7C は、それぞれ、図 6 に示されている例示的な光学系の瞳にわたる正味リターダンスの大きさ及び配向のグラフである。これらのプロット、及び以下のリターダンス瞳マップでは、リターダンスは、対象とする光学系のシステム射出瞳にわたる方形格子上に示されており、一般に、場合によっては固有偏光状態（すなわち、光学系内の所与の瞳座標を通して伝搬する光線については変化しない偏光状態）を示す線になる楕円によって表される。所与の瞳座標における楕円のサイズまたは線の長さは、リターダンスの相対強度に比例し、角度はリターダンス軸の角度に関係している。

【0052】

さらに、本明細書で説明するレンズ及び対応するリターダンスマップ実施形態のそれぞれについて、系の光軸が物体から画像面の方への +Z 方向であり、+Y 軸が垂直方向であり、+X 方向が Y 軸及び Z 軸に直交するように、右手座標系を用いて座標が定義されている。本明細書で示されるすべての射出瞳リターダンス及び波面マップについて、プロットは、X 座標及び Y 座標が主光線に垂直な平面上に投影される基準球上の座標であるデカルト座標系を用いて、所与の視野点についての射出瞳基準球に対する変化を表している。

20

【0053】

図 7A、7B、7C に戻ると、それぞれの場合に、ピークリターダンスは約 0.11 波であり、RMS（二乗平均平方根）リターダンスは、157 nm 波長において、約 0.029 波であることが分かる。したがって、例示的な共通に整列された系において、結晶格子内を通る光軸方向のそれぞれについて顕著な量のリターダンスが生じる。

30

【0054】

本発明では、系の光軸に対する個々の要素の結晶軸及び相対回転として、個々の要素の固有複屈折によって生じるリターダンスが、系内を通して伝わる光が受ける正味リターダンスを最小限に抑えるように組み合わせられるような結晶軸及び相対回転が選択される。立方晶系光学要素は、それぞれの個々の立方晶系光学要素の固有複屈折によって生じるリターダンスの和よりも少ない正味リターダンスを生じさせるように配向させられクロッキングされる。

【0055】

一実施形態では、本発明は、少なくとも 3 つの光学要素を提供し、そのうち少なくとも 2 つの要素は、その [110] 結晶軸が光軸に沿わせて配向させられ、また少なくとも 1 つの要素は、その [100] 結晶軸を系の光軸に沿わせて配向させられる。この実施形態は、図 6 に示されている例示的な光学系に適用することができる。本発明の実施形態 1 では、最初の 2 つの要素 46、44 は、[110] 立方晶系結晶格子方向に沿って配向させられ、第 3 の要素 42 は、[100] 格子方向に沿って配向させられる。ただし、他の例示的な実施形態では要素のこの特定の順序を変更することができる。さらに、第 1 の要素 46 及び第 2 の要素 44 の [110] 結晶格子は、光軸に垂直な平面内で互いに対して 90° 回転させられている。光軸の周りでのこの回転は「クロッキング(clocking)」として知られている。

40

【0056】

図 8A、8B、8C は、上述のように図 6 に示されている光学系の第 1 の例示的な実施

50

形態の構成における個々の要素の瞳上のリターダンスの大きさ及び配向を示すグラフである。図 8 A、8 B、8 C は、それぞれ、第 1 の結晶格子光学要素 4 6、第 2 の結晶格子光学要素 4 4、及び第 3 の結晶格子光学要素 4 2 に対する個々のリターダンス寄与を表している。第 1 の要素 4 6 は、[1 1 0] 光学要素と呼ばれ、図 8 A に示されているように、光軸に沿ったリターダンスが水平に配向させられるように、その [1 1 0] 結晶軸を系の光軸に沿わせて配向させられている。第 2 の要素 4 4 は、[1 1 0] 光学要素と呼ばれ、図 8 B に示されているように、光軸に沿ったリターダンスが垂直に配向させられるように、その [1 1 0] 結晶軸をシステム光軸に沿わせて配向させられている。第 3 の要素 4 2 は、[1 0 0] 光学要素と呼ばれ、図 8 C に示されているように、ピーク複屈折が瞳対角線に沿って $\pm 45^\circ$ の方位角で起こるように、その [1 0 0] 結晶軸を光軸に沿わせて配向させられている。以下では、[X Y Z] 光学要素と呼ばれる光学要素は、その [X Y Z] 格子方向またはその [X Y Z] 結晶軸が系の光軸に沿わせて配向させられた光学要素であると理解される。

【 0 0 5 7 】

最初の 2 つの光学要素を、その [1 1 0] 結晶軸を光軸に沿わせ、しかも共通の系の光軸の周りを相互に 90° 回転させて配向させることによって、光が光軸の近くを伝搬する場合に第 1 の要素 4 6 によって生じる水平に配向させられたリターダンスを、第 2 の要素 4 4 によって生じる垂直に配向させられたリターダンスによって相殺することができる。第 2 の要素のリターダンス配向は第 1 の要素のリターダンス配向に直交しており、かつ大きさが等しいので、上記の効果として、瞳の中心近くのリターダンス収差が補正され、正味リターダンスがほぼゼロになる。言い換えれば、第 1 の要素 4 6 と第 2 の要素 4 4 によって生じる個々のリターダンスが互いに打ち消しあって正味リターダンスがほぼゼロになる。したがって、最初の 2 つの光学要素の三次元結晶格子は、光軸の周りで相互に一定の回転角に位置している。各要素は、それぞれの複屈折ローブがそれぞれの異なる三次元位置に揃えられるように、最適にクロッキングされる。言い換えれば、最初の 2 つの [1 1 0] 光学要素 4 6、4 4 のピーク複屈折ローブは、互いに対して回転させられる。他の例示的な実施形態によれば、[1 1 0] 光学要素を 90° 以外の角度だけ回転させることができ、また他の例示的な実施形態では、他の立方晶系光学要素を用いて光軸の周りにかつ互いに対して回転させるかまたはクロッキングすることができ、したがって、それらのそれぞれの三次元格子方向は同一に揃えられるわけではなく、各要素の三次元結晶格子がほぼ同じに揃えられる構成と比べて正味リターダンスが少なくなる。

【 0 0 5 8 】

図 9 A は、図 6 に示されかつ上記で説明した光学系の第 1 の例示的な実施形態の第 1 の要素及び第 2 の要素の正味リターダンスを示している。図示のように、リターダンスは、瞳の中心近くでゼロに補正されるとともに、瞳を二等分する水平部分及び垂直部分に沿ってほぼゼロに補正される。しかし、瞳対角線に沿って残留リターダンスが示されており、瞳の中心の方へ向けて概ね $\pm 45^\circ$ に配向させられている。

【 0 0 5 9 】

図 8 C に戻ると、要素の [1 0 0] 結晶軸を光軸に沿わせて配向させられた、図 6 に示されている光学系の第 1 の例示的な実施形態の第 3 の要素 4 2 によって生じるリターダンスは、瞳の対角線に沿ってピークリターダンスを有するが、リターダンスの大きさは、図 9 A に示されているように第 1 及び第 2 の要素 4 6 及び 4 4 によって生じる正味リターダンスと符号が反対である。例示的な実施形態では、[1 0 0] 光学要素は、ピーク複屈折ローブが、 90° クロッキングされた 2 つの [1 1 0] 光学要素の [1 1 0] 結晶軸に沿って局所複屈折軸の方向に対してほぼ 45° 回転させられるように、共通の光軸の周りを回転させられる。したがって、第 3 の要素の寄与についてのリターダンス配向 (図 8 C) は、第 1 の要素及び第 2 の要素からの正味寄与 (図 9 A) に概ね直交することが分かる。

【 0 0 6 0 】

図 9 A は、光軸の周りで 90° 相対的に回転された 2 つの [1 1 0] 光学要素が、対角線に沿って残留リターダンス誤差を生じさせるが、瞳の中心を通る水平スライス及び垂直

10

20

30

40

50

スライスに沿ったリターダンスの補正を与えることを示している。同じ原則を使用して、
[1 0 0] 光学要素を用いてリターダンス全体をさらに軽減することができる。

【 0 0 6 1 】

図 9 B は、図 6 に示されている光学系の第 1 の例示的な実施形態のすべての 3 つの要素からの寄与による正味リターダンスを示している。[1 0 0] 光学要素が第 1 の要素 4 6 であっても、第 2 の要素 4 4 であっても、第 3 の要素 4 2 であってもよく、基本的に同じ結果が得られることを理解されたい。残留正味リターダンスは、概ね方位角によって配向させられ、瞳の中心におけるゼロから瞳の縁部におけるピークまで増えていく。ピークリターダンスは約 0 . 0 1 9 波であり、瞳上の RMS リターダンスは約 0 . 0 0 5 波である。各々のピークリターダンスが約 0 . 1 1 波であり RMS リターダンスが約 0 . 0 2 9 波である図 7 A、7 B、及び 7 C に示されている補正されていない複屈折と比べて、ピークリターダンスが概ね 6 の係数で軽減していることが理解できる。

10

【 0 0 6 2 】

第 3 の要素 4 2 の厚さが約 2 . 3 mm である他の例示的な実施形態によれば、ピークリターダンスを 0 . 0 1 3 9 波まで軽減し、RMS リターダンスを 0 . 0 0 4 1 波にすることができる。このリターダンスは図 9 C に示されている。この例示的な実施形態によれば、ピークリターダンスが約 8 の係数で軽減した。他の例示的な実施形態によれば、要素 4 2、4 4、4 6 に他の厚さを用いてそれぞれの異なるリターダンス値を生成することができる。

【 0 0 6 3 】

他の例示的な実施形態によれば、図 9 B の残留誤差は、大きさが要素の中心から縁部に向かって大きくなる半径方向に配向させられたリターダンスを生じさせる複屈折要素によって、さらに小さくすることができる。このような要素は、メニスカス光学要素の縁部にフープ応力をかけることによって作製し、図 6 に示されているような第 1 の実施形態の例示的な光学系に付加することで、作製できる。応力がかかることによって、空間的に変化する複屈折が起こり、図 9 B に示されているような光学系内の算出または測定された複屈折変化を補償する。空間的に変化する複屈折を起こすためには、様々な光学要素に様々な応力を印加することができる。応力をかけられる光学要素は、レンズ要素または窓であってもよく、光軸に沿って揃えることができる。応力を印加するためには様々な技術を用いることができる。

20

30

【 0 0 6 4 】

図 9 D は、1 平方インチ (約 2 . 5 4 c m × 約 2 . 5 4 c m) 当たり 1 0 0 0 ポンド (約 4 5 4 k g) の例示的な圧縮フープ応力を図 6 の第 1 の要素 4 6 にかけることによって生じさせた空間的な半径方向リターダンスの変化を示している。この例示的な実施形態では、要素 4 6 は、曲率半径が 4 0 及び 3 5 mm であり中心厚さが 5 mm である。互いに異なる形状の要素はそれぞれの異なる半径方向リターダンス変化を有し、このことを使用して、図 9 B に示されているようなリターダンス寄与をほぼ打ち消すことができる。応力によって誘起される複屈折は、要素上で空間的に変化する、これは、結晶軸に対する光線の角度の関数として変化する固有複屈折からのリターダンスとは、基本的に異なっている。これによって、系のリターダンスを軽減する他の重要な手段が得られる。

40

【 0 0 6 5 】

最初の 2 つの要素 4 6、4 4 が [1 1 0] 立方晶系光学要素であり、第 3 の要素 4 2 が [1 0 0] 立方晶系光学要素であり、すべての要素の厚さが 5 mm である図 6 に示されている例示的な実施形態によれば、第 1 の要素 4 6 は、要素の周囲に沿って印加される約 2 4 ポンド (約 1 0 . 9 0 k g) / 平方インチの引張りフープ応力を含んでよい。光学要素 4 2、4 4、4 6 の相対的な結晶格子の配向は上述のとおりである。

【 0 0 6 6 】

図 9 E は、図 6 に示されている第 1 の要素 4 6 の応力誘起複屈折による個々のリターダンス寄与を示すグラフである。図 9 E は、約 2 4 ポンド / 平方インチの引張りフープ応力が、要素の周囲に沿って印加され、かつ固有複屈折によって生じるリターダンスを含まな

50

いときの、第1の要素46の瞳にわたるリターダンスに対する個々の寄与を示している。図9Eは、0.0170波のピークリターダンス及び0.0055波のRMSリターダンスを示している。この例示的な実施形態では、応力要素によって生じる半径方向に配向させられたリターダンスが、図9Bに示されている応力誘起複屈折を用いずに、実施形態の残留リターダンスを補償する。

【0067】

図9Fは、第1の要素46の応力誘起複屈折を含む例示的な実施形態の瞳にわたる正味リターダンスを示すグラフである。約24ポンド/平方インチの引張り応力が第1の要素46に印加された場合、この光学系については、最大残留リターダンスは0.0073波になり、RMSリターダンスは0.0024波になる。これは、図9Bに示されているような、応力誘起複屈折を第1の要素46に作用させない場合に得られる、それぞれ0.019波及び0.005波のピークリターダンス値及びRMSリターダンス値に対する顕著な向上を表している。印加される応力は例示的なものに過ぎず、立方晶系光学要素の数及び種類、光学要素の配向及び厚さなどに依存する系の残留リターダンスに応じて、互いに異なる大きさの様々な他の応力を使用することができる。

10

【0068】

最初の2つの要素46、44が[110]立方晶系光学要素であり、第3の要素42が非立方晶系非複屈折要素である他の例示的な実施形態では、上記の原則を用いてRMSリターダンスを最小限に抑えるように、第3の要素42の周囲に沿って引張りフープ応力を印加することができる。様々な応力値を適用することができる。

20

【0069】

本発明の他の態様は、光学系のリターダンスを測定するかまたはコンピュータモデリングを用いて光学系のリターダンスを求め、応力誘起複屈折を作用させる光学要素を識別し、次に、フープ応力またはその他の応力としての圧縮応力または引張り応力をかけ、上述のように応力誘起複屈折を生じさせ、残留リターダンスを軽減する方法である。

【0070】

一定であるかまたは補正後に変化する残留リターダンスを有する他の例示的な実施形態によれば、様々な複屈折要素を付加して残留リターダンスを補正することができる。例示的な実施形態では、系に波長板(wave plate)を付加して一定のリターダンスを補正ことができ、この波長板は、平行な板に応力をかけることによって構成することができる。他の例示的な実施形態によれば、一定の複屈折値を有する被駆動(powered)複屈折要素を用いてリターダンスの残留変化を補償することができる。被駆動要素は、一軸性結晶材料であってよく、上記のように応力誘起複屈折を含んでもよい。上記に加えてまたは上記の代わりに、応力誘起複屈折を有する他の光学要素を用いて、残留リターダンスの変化を補正することができる。様々な例示的な光学要素は、光軸にほぼ直交する軸に沿って、要素全体にわたって線形に変化するかまたは半径方向に二次関数的に変化する応力を含んでよい。複屈折要素としては、上記のような補正後に系内に残留する一定または可変のリターダンスを補正する要素が選択され、かつそのように位置させられる。

30

【0071】

実施形態2：

例示的な実施形態2によれば、本発明は、少なくとも4つの[110]光学要素及び少なくとも1つの[100]光学要素を用いることによってリターダンスを軽減する装置を提供する。図10に示されている図示の実施形態では、本発明は、それぞれの[110]結晶軸を系の光軸に沿わせた4つの要素と、その[100]結晶軸を系の光軸に沿わせた1つの要素とを有する装置を提供する。

40

【0072】

光軸に垂直な平面内の格子方向の相対的配向を[110]光学要素に対して調整することができる。この技術は、共通の光軸に沿って揃えられた各要素の結晶格子配向を「クローキング」し、すなわち回転させることとして、公知である。相対的配向は、オフアクセスピーク複屈折ロープの方位配向に関係する特定の方法で選択することができる。

50

【 0 0 7 3 】

図 4 を参照すると、[0 1 1] 方向及び [1 0 1] 方向に対応する、[1 1 0] 結晶軸に対する 60° のピーク複屈折ローブ（と図 4 には示されていない他の 2 つのローブ）がある。

【 0 0 7 4 】

図 5 A は、[1 1 0] 光学要素のリターダンス瞳マップを示している。図示のように、4 つの外側複屈折ローブは、互いに等しい方位角に分散しているわけではない。結晶格子を、負の複屈折値 $n_e - n_o$ に対して光軸に沿って水平に配向させられたリターダンスを生じさせるように形成した場合、ピークは方位角 $\pm 35.26^\circ$ 及び $\pm 144.74^\circ$ に位置する。

10

【 0 0 7 5 】

図 1 0 は、第 2 の例示的な実施形態による光学系を示している。この例示的な 5 要素の光学系は、開口数が 0.707 で焦点 50 の方へ集束する収差のない光ビームから成り、各要素において 45° の最大光線角度をもたらす。立方晶系要素 52、54、56、58、60 は、光軸 51 に沿って整列している。光ビームは、半径曲率がそれぞれビームの焦点 50 と同心である 5 つの立方晶系要素 52、54、56、58、60 を通過する。例示的な実施形態では、要素は、それぞれ、約 2.5 mm の厚さを有し、かつそれぞれ、波長が 157 nm のときに測定されたフッ化カルシウムの固有複屈折に対応する、複屈折値 $n_e - n_o = -1.2 \times 10^{-7}$ を有すると仮定される。他の例示的な実施形態によれば、他の厚さを使用することができる。この構成では、各要素が、固有複屈折によって生じるリターダンス収差以外の波面収差を集束ビームにもたらすことはない。例示的な実施形態によれば、光の波長は 157.63 nm であり、常屈折率は 1.5587 であってよい。他の例示的な実施形態では他の波長及び屈折率を使用することができる。

20

【 0 0 7 6 】

図 1 1 A、1 1 B、1 1 C は、図 1 0 の要素 52、54、56、58、60 が各々が、[1 1 0] 光学要素、[1 0 0] 光学要素及び [1 1 1] 光学要素であり、各要素の三次元格子が同一に揃えられる場合に、射出瞳上でリターダンスがどのように変化するかを示すグラフである。それぞれの場合に、上記で指摘した波長 157 nm のとき、ピークリターダンスは約 0.095 波であり、RMS リターダンスは約 0.024 波である。したがって、結晶格子内を通る各光軸方向について顕著な量のリターダンスが生じる。

30

【 0 0 7 7 】

図 1 0 に示されている例示的な光学系に適用される第 2 の例示的な実施形態によれば、最初の 4 つの要素 52、54、56、58 は、その [1 1 0] 結晶軸を光軸 51 に沿わせて配向させられ、第 5 の要素は、その [1 0 0] 結晶軸を光軸 51 に沿わせて配向させられる。他の例示的な実施形態によれば、要素のこの特定の順序を変更することができる。第 2 の例示的な実施形態によれば、光軸を [1 1 0] 方向に沿わせた 4 つの要素 52、54、56、58 の相対的なクロッキングは、それぞれ、順番に、 17.632° 、 -17.632° 、 72.368° 、 -72.368° であってよい。第 5 の [1 0 0] 要素 60 は、ピーク複屈折ローブが $\pm 45^\circ$ の方位角に位置するように、配向させられている。

40

【 0 0 7 8 】

図 1 2 A ~ 1 2 D は、4 つの [1 1 0] 光学要素が上述のようにクロッキングされる、これら 4 つの光学要素についての個々の要素の寄与に関するリターダンスマップである。

【 0 0 7 9 】

水平に配向させられたリターダンスを光軸に沿ってもたらす要素クロッキングに対して、第 1 の要素 52 は、 17.632° 回転させられ、それによってピーク複屈折ローブは 52.897° 、 162.368° 、 -17.632° 、 -127.104° の方位角に位置させられる。第 1 の要素 52 からのリターダンス寄与のリターダンスマップは、図 1 2 A に示されている。

【 0 0 8 0 】

図 1 2 B は、ピーク複屈折ローブを 17.632° 、 127.104° 、 -52.89

50

7°、-162.368°の方位角に位置させるように、-17.632°回転させられた第2の要素54のリターダンス寄与を示している。

【0081】

図12Cは、ピーク複屈折ローブを107.632°、37.104°、-72.368°、-142.896°の方位角に位置させるように、-72.368°回転させられた第3の要素56のリターダンス寄与を示している。

【0082】

図12Dは、ピーク複屈折ローブを72.368°、142.896°、-37.104°、-107.632°の方位角に位置させるように、-72.368°回転させられた第4の要素58のリターダンス寄与を示している。光軸を[110]格子方向に沿わせた4つの要素の相対的なクロッキングは、図5Aに示されている方位角の2分の1、すなわち±17.632°または±(90-17.632)°に関係している。

10

【0083】

図12A及び12Dに示されているように、第1の要素52のリターダンス寄与は、瞳の中心61近くでは第4の要素58に直交している。同様に、図12B及び12Cは、第2の要素54のリターダンス寄与が、瞳の中心61近くで第3の要素56に直交することを示している。

【0084】

図13Aは、互いに重なり合った第1の要素52及び第3の要素56の個々のリターダンス寄与を示している。瞳の中心部62上で、各リターダンス配向は概ね45°の平均角度で交差している。瞳の外側縁部に沿った位置64及び-45°対角線に沿った位置64では、各リターダンス配向は同じである。

20

【0085】

図13Bは、第1の要素52と第3の要素56の組合せの正味リターダンスを示している。45°対角線に沿った瞳の広い領域にわたって、リターダンスは45°の角度に配向させられている。-45°対角線に沿った瞳の縁部では、リターダンスは-45°に配向させられている。同様に図13Cは、図13Bに示されているような第1及び第3の要素の正味リターダンスに概ね直交するリターダンス配向を瞳上にもたらず、第2の要素54及び第4の要素58の正味リターダンスを示している。

【0086】

図14Aは、それぞれの[110]結晶軸を光軸51に沿わせさせられ、上述のように配向させられた4つの要素52、54、56、58の正味リターダンスを示している。最大リターダンスは0.0181波であり、RMSリターダンスは0.0049波であり、これは、図11A、11B、11Cに示されているようなすべての要素結晶格子が三次元において同一に揃えられる場合と比べて、リターダンスが概ね5の係数で軽減したことに相当する。残留リターダンス配向は半径方向であり、より大きなリターダンスの大きさは±45°対角線に沿って位置している。

30

【0087】

[100]格子方向を光軸に沿わせるように配向させられた第5の要素60のリターダンス寄与が、図14Bに示されている。図示のように、リターダンスは、図14Aに示されている最初の4つの要素52、54、56、58の残留正味リターダンスに大きさが類似しており、瞳を横切って配向は概ね垂直である。これによって、リターダンスをほぼ完全に補正するかまたは打ち消すことができる。最初の4つの[110]光学要素52、54、56、58が光軸51に沿って揃えられ、図14Aに示されている正味リターダンスを有し、第5の光学要素60がその[100]結晶軸を光軸51に沿わせるように揃えられる第2の例示的な実施形態によれば、5つすべての要素の正味のリターダンスは、図14Cに示されているように、最大値が約0.0007波であり、RMSリターダンスが0.0002波である。

40

【0088】

したがって、第2の例示的な実施形態は、同一の厚さ及び光線角度を有する4つの[1

50

10] 光学要素及び1つの[100]光学要素は、すべての要素が同一に配向させられた[110]要素であるときの0.0952波からピークリターダンスを0.0007波のピーク値まで軽減するように揃えられ、RMSリターダンスは0.0229波から0.0002波まで軽減され、すなわち、いずれの場合も軽減の係数は、100よりも大きい。
【0089】

2つの[110]光学要素及び1つの[100]光学要素を有する第1の実施形態と4つの[110]光学要素及び1つの[100]光学要素を有する第2の実施形態とは例示的なものに過ぎず、各要素の個々の固有複屈折寄与を相殺して正味複屈折及びリターダンスを軽減するという前述の原則にしたがって、様々な数の光学要素を用いてクロッキングできることを理解されたい。このような原則は、立方晶系レンズ要素のみを含むレンズ系に適用しても、立方晶系レンズ要素及びその他のレンズ要素を含むレンズ系に適用してもよい。

【0090】

さらに、実施形態1に関連して説明したような1以上の応力複屈折要素、波長板、またはそれらの組合せを用いて、上述の系の補正が行われた後に残る残留複屈折変化及び一定の残留リターダンスをさらに補正することができる。

【0091】

発明の概念：

それぞれ図6及び10に示されている例示的なレンズ構成に対応する第1及び第2の例示的な実施形態に適用される固有複屈折の影響を補償するのに用いられる基本原則は、他の例示的な実施形態でフォトリソグラフィに用いられるような他の様々な高性能多開口数光学系における固有複屈折効果の影響を補償するように拡張することができる。この原則は、屈折レンズ系と反射屈折レンズ系の両方に適用され、新しいレンズ系を構成する際または公知のレンズ規定を改善するために用いることができる。

【0092】

他の例示的な屈折レンズ系及び反射屈折レンズ系によれば、個々のレンズ要素の厚さ、曲率半径、非球面係数及び光線角度は、要素ごとに著しく異なることがある。他の非立方晶系レンズ要素を任意に含めることができる。それにもかかわらず、前述の実施形態と同様な以下の実施形態には、複屈折したリターダンスを軽減するように、各要素の結晶配向及び相対クロッキングを選択できることが示される。図示の実施形態は、固有複屈折によって生じるリターダンス収差を相殺するかまたは打ち消すように、[110]結晶軸を光軸に沿わせた光学要素を、[100]結晶軸を光軸に沿わせた光学要素と一緒に使用することを示している。本発明の一般的な概念は、複数の光学要素で形成された投影レンズを含む光学系を提供することであり、その投影レンズでは、2以上の光学要素が、システム光軸に対して小さな角度で伝搬する光のリターダンスを軽減するように、立方晶系材料で構成され、かつその[110]立方晶系結晶格子方向を系の光軸に沿わせるとともに光軸の周りに相対回転させて配向させられ、1以上の光学要素が、系の光軸に対してより大きな角度で、すなわち、光軸からずれた位置を伝搬する光のリターダンスを軽減するように、光軸を[100]立方晶系結晶格子方向に沿わせて配向させられている。

【0093】

他の実施形態では、[110]実施形態及び[100]実施形態について説明したのと同じ原則を用いて視野全体にわたってリターダンスをほぼ打ち消すのに、図5Cに示されているように、[111]結晶軸が光軸に沿って揃えられた要素を他の要素の組合せと一緒に用いることができる。様々な例示的な実施形態では、レンズ設計ソフトウェアを用いて、個々のレンズ要素の位置と、厚さ、曲率半径、非球面係数などを含むレンズ規定を生成することができる。一実施形態では、各視野点における瞳格子上的RMSリターダンスを算出し、市販のレンズソフトウェア、たとえばCODE Vを用いて、減速最小自乗最適化の評価関数(merit function)として使用することができる。コンピュータを用いて系内の各要素の配向及びクロッキングを最適化することができる。

【0094】

10

20

30

40

50

立方晶系要素における平均屈折率の変化によって導入される非点収差などの位相収差は、互いに直交する方向に沿って異なる曲率半径を有する1以上の表面を用いて補償することができる。[100]光学要素によって生じる平均屈折率の変化は、一般に、平均屈折率の変化が光軸に対する伝搬角度の関数として徐々に起こるため、[110]光学要素によって生じる変化よりも容易に補償することができる。したがって、有利なことに、十分に多い数の[100]光学レンズ要素を光軸に沿って用いて、平均屈折率の高次変化を最小限に抑えることができる。

【0095】

他の例示的な実施形態によれば、要素の厚さ、各要素間の間隔、ならびにレンズ要素の曲率半径及び非球面係数を、同様に、視野にわたって収差を相殺しリターダンスを軽減するように最適化することができる。他の例示的な実施形態によれば、他のレンズ要素と符号が反対である複屈折値を有する要素と一緒に用いて、固有複屈折によって生じるリターダンスを打ち消し、視野全体にわたって正味リターダンスをほぼゼロにすることができる。たとえば、視野全体にわたるリターダンスがほぼ打ち消されるように、(負の複屈折値を有する)フッ化カルシウムレンズ要素を(正の複屈折値を有する)フッ化バリウムレンズ要素と一緒に使用して、同じ結晶格子方向に沿って揃えることができる。

10

【0096】

第3、第4及び第5の実施形態は、当技術分野で公開されているレンズ規定に基づく実施形態である。このような実施形態は例示的なものに過ぎず、本発明の原則及び概念は他の様々なレンズ構成のどれにでも適用することができる。本発明の適用は、F₂エキシマレーザによって生成されるような157nmに近い露光波長におけるフォトリソグラフィ用の大開口数光学系に、特に、重要である。当技術分野で発表されている利用可能な光学系の多くは、開口数がより小さく、193nmのようなより長い波長で動作するので、本発明の技術は、フォトリソグラフィで一般に用いられているArFエキシマレーザによって生成される波長に対応する193nmに近い露光波長向けに構成された例示的な公知の光学系に適用することによって例示されている。しかし、本発明の原則及び技術が、大開口数システム及び157nmで動作するシステムにも同様に適用されることを理解されたい。

20

【0097】

屈折要素が主としてフッ化カルシウムで構成された157nmの中心波長向けに構成された大開口数レンズにおける固有複屈折の影響を評価する場合、様々な実施形態において溶解シリカまたはフッ化カルシウムで構成することのできる以下の実施形態における各要素は、波長157nmで測定されるフッ化カルシウムのピーク固有複屈折と概ね同等なピーク固有複屈折($n_e - n_o$) = -1.2×10^{-7} を有すると仮定される。

30

【0098】

このように、157nm向けに構成された互いに類似した大開口数レンズの固有複屈折を補償する方法は、193nmの中心波長を出発点として設計された公知の例示的なレンズ規定を用いて実証することができる。中心波長を変えることによって、屈折要素の屈折率を変化させることができ、フッ化カルシウムなどのフッ化物材料を使用することの妥当性が証明されるが、使用される要素の種類及び所与の開口数についての光線角度の分布は、特に157nmの中心波長での大開口数レンズにおける固有複屈折の影響を軽減する本発明の技術を実証するのに193nmの中心波長向けに設計されたレンズを使用できるほど類似している。

40

【0099】

以下の実施形態3、4、5の説明では、各屈折表面は、要素の屈折率の平方根に等しい屈折率と、波長193.3nmの四分の一波の光学厚さとを有する仮想的な単一層反射防止コーティングを有すると仮定される。各実施形態で用いられるフッ化カルシウム及び溶解シリカの屈折率は、波長193.3nmで、それぞれ、1.501455及び1.560326と仮定される。互いに異なるコーティングは、それぞれの異なるリターダンス及

50

び位相収差を導入し、わずかに異なる補償を必要とする。しかし、単一の仮想的なコーティングに関して実証された方法を他の様々な物理的コーティングを有する系に適用できることを理解されたい。

【0100】

以下の実施形態3~5のそれぞれでは、補正される光学系は所与のレンズ規定に基づいている。所与のレンズ規定を維持することができ、上述の技術を用い、それに加えてまたはその代わりに所与のレンズ規定の1以上のレンズ要素を2以上のサブ要素に分割することによって、固有複屈折の影響を補償することができる。しかし、有利なことに、本発明の原則は、設計中の他の様々な新しいレンズ規定に適用することができ、本発明の利点をレンズ設計に組み込むことができる。

10

【0101】

さらに、実施形態1及び2に関連して説明したような1以上の複屈折要素、波長板、またはそれらの組合せを用いて、実施形態3、4、5で説明するように、上述の補正が系に対して行われた後に残る残留複屈折変化及び一定の残留リターダンスをさらに補正することができる。

【0102】

実施形態3：

固有複屈折の補償技術を適用する第3の例示的な実施形態については、フォトリソグラフィに用いられる例示的な全屈折投影レンズに関連して説明することができる。このような例示的なレンズは、内容が引用によって本明細書に組み込まれる、Y. Omuraのヨーロッパ特許第1139138号の第5の実施形態で与えられている。この例示的なレンズは図15の概略図に示されている。この例示的なシステムは、中心波長193.3nmで動作するように構成され、開口数0.75で4x縮小を行い、27.5mmの像視野直径を有している。この例示的な構造は、フッ化カルシウム及び溶融シリカで構成された6個の非球面表面を有する20個の要素Eを使用するが、以下の基線(baseline)計算では、各要素が -1.2×10^{-7} の固有複屈折を有すると仮定する。

20

【0103】

射出瞳上のRMS及び最大リターダンス及びダイアテニュエーション(diattenuation)が、相対視野高さ0、0.7及び1.0について、固有複屈折の影響を含まない公称設計に関し、表1に列挙されている。相対視野高さは、半視野高さによって正規化された実際の視野高さとして定義される。したがって、光軸上に位置する像はゼロ視野高さを有し、このレンズにおいて13.75mmに位置する像は単位相対視野高さに対応する。リターダンス及びダイアテニュエーションは、モデルに用いられる単一層反射防止コーティングによって生じる。図16A及び16Bはそれぞれ、視野の中心及び縁部における視野点についての反射防止コーティングによるシステム射出瞳にわたるリターダンスを示している。リターダンスは、半径方向に配向し、瞳の縁部で最大になる。反射防止コーティングのみによるリターダンスは比較的小さい。

30

【0104】

【表1】

相対視野高さ	リターダンス ($\lambda_0 = 193.3 \text{ nm}$ における波)		ダイアットェネーション	
	RMS	最大値	RMS	最大値
0.0	0.0033	0.0125	0.0053	0.0217
0.7	0.0034	0.0132	0.0053	0.0230
1.0	0.0035	0.0149	0.0057	0.0247

40

【0105】

図17A及び17Bは、図15に示されている光学系についての、それぞれ視野の中心

50

及び縁部に対する瞳にわたるダイアテニュエーションの変化を示している。ダイアテニュエーションは、直交偏光状態同士の間での最大透過差の測度として表すことができる。

【0106】

固有複屈折の影響のない公称設計についてのRMS及び山対谷(ピーク・ツー・バリー; peak-to-valley)波面誤差が、表2に列挙されている。波面誤差は、Y方向における相対視野高さ0、0.7、及び1.0について与えられ、2つの直交偏光成分について記載されている。X成分は、システム射出瞳におけるX方向に沿った線形偏光子を仮定した場合の、X方向の入力偏光に対する波面誤差を表している。Y成分は、射出瞳におけるY方向に沿った線形偏光子を仮定した場合の、Y方向の入力偏光に対する波面誤差を表している。図示のようにこの公称設計は、約0.003波のピークRMS波面誤差を含んでいる。

10

【0107】

【表2】

相対視野高さ	RMS 波面誤差 ($\lambda_0 = 193.3 \text{ nm}$ における波)		山対谷 波面誤差 ($\lambda_0 = 193.3 \text{ nm}$ における波)	
	X 成分	Y 成分	X 成分	Y 成分
0.0	0.002	0.002	0.012	0.012
0.7	0.003	0.002	0.020	0.020
1.0	0.003	0.002	0.018	0.012

20

【0108】

図18A、18B、18C、18Dでは、波長193.3nmにおける波面誤差がシステム射出瞳において等高線図として描かれている。図18A及び18Bは、(視野高さに垂直な)X方向の入力偏光に対応する、それぞれ中心視野点及び極端視野点のX方向における射出瞳アナライザと一緒に用いた場合の、図15に示されているレンズの残留波面誤差の等高線図である。図18Aに示されている中心視野点における波面誤差の場合、最大山対谷光路差は0.012波であり、図18Bに示されている極端視野における波面誤差の場合、最大山対谷光路差は約0.018波である。図18C及び18Dは、(視野高さと平行な)Y方向での入力偏光に対応する、それぞれ中心視野点及び極端視野点のY方向における射出瞳アナライザと一緒に用いた場合の、図15に示されているレンズの残留波面誤差の等高線図である。図18C及び18Dに示されているそれぞれ中心視野点及び極端視野点における波面誤差の場合、山対谷光路差は約0.012波である。

30

【0109】

点拡散関数に基づいて算出されたこの公称設計の重心歪み及びY方向におけるテレセントリシティ誤差が、相対視野高さ0、0.7及び1.0において、以下の表3に記載されている。

【0110】

【表3】

相対視野高さ	X PSF 重心歪み (nm)	Y PSF 重心歪み (nm)	Y テレセントリシティ 誤差 (mrad)
0.0	0.00	0.00	0.00
0.7	0.00	4.05	0.28
1.0	0.00	3.45	1.28

40

【0111】

立方晶系レンズ材料に関連する固有複屈折の影響を考慮すると、システム性能は著しく低下する。図19A及び19Bは、図15に示されているすべてのレンズ要素Eが三次元

50

において同一に揃えられ、それらの[110]結晶軸を光軸65に沿わせた、任意に指定される例示的な実施形態による、それぞれ視野の中心及び縁部における視野点のシステム射出瞳にわたる正味リターダンスを示すグラフである。図19A及び19Bは、固有複屈折の影響を含んでいる。図19Aにおける物体視野高さは0mmであり、図19Bにおける物体視野高さは5.5mmであり、それぞれ中心視野点及び縁部視野点に対応する。図19A及び19Bに与えられているリターダンス瞳図、及び正味リターダンスの大きさが0.5波を超える以下の図では、リターダンスは「モジュロ0.5波」として描かれている。したがって、リターダンス配向は、二分の一波間隔で90°回転させられ、すなわち、0°での0.75波リターダ(retarder)の影響は90°での0.25波リターダと同じである。したがって、この例示的な構成における固有複屈折によるピーク複屈折は、波長193.3nmで約1.5波であり、物体視野高さがわずかに変化する。

10

【0112】

図20A及び20Bは、図15に示されているレンズ系の結晶格子配向の他の例示的な実施形態のリターダンスの図である。図20A及び20Bでは、固有複屈折の影響を含むシステム射出瞳にわたる正味のリターダンスが、視野の中心及び縁部における視野点について示されており、ここで、すべての要素は任意に、三次元において同一に揃えられ、その[100]結晶軸は光軸に沿っている。この場合も、リターダンス配向は、二分の一波間隔で90°回転させられ、したがって、この例における固有複屈折によるピーク複屈折は、波長193.3nmで約0.9波である。

【0113】

20

図21A及び21Bは、図15に示されているレンズ系の結晶格子方向の他の例示的な実施形態のリターダンスを示すグラフである。図21A及び21Bでは、システム射出瞳にわたる正味リターダンスは、視野の中心及び縁部における視野点について示されており、すべての要素は任意に、[111]光学要素について、三次元において同一に揃えられている。この例示的な構成では、固有複屈折によるピーク複屈折は、波長193.3nmで約0.5波であり、視野高さの変化は小さい。

【0114】

図19A～21Cに示されている3つの前述の例は、それぞれ、各要素を光軸に対してまったく同じに配向させると、固有複屈折によって非常に大きなリターダンス収差、したがって大きな波面収差が生じることを示している。補償をしなければ、この収差は、フォトリソグラフィに対する許容波面誤差を大きく超えることになる。

30

【0115】

本発明の本実施形態では、上述の固有複屈折によって生じるリターダンスを補償するのに用いられる変数は、光軸に対する各要素の結晶軸の配向と、光軸の周りでのこれらの要素の相対回転である。回転対称面を有するレンズ要素のその光軸の周りでの回転は、ときには、要素「クロッキング」と呼ばれる。

【0116】

本発明の一態様は、光軸に沿って揃えられた少なくとも2つの[110]光学要素及び少なくとも1つの[100]光学要素を使用することである。これによって、個々の要素のリターダンス寄与を相殺して、波面補正を行い、固有複屈折によって生じる正味リターダンスを、大開口数リソグラフィシステムに受け入れられるレベルまで軽減することができる。このことは、第1の実施形態に記載されており、以下に示すように実施形態3に適用することもできる。

40

【0117】

図22は、すでに図15に示されている光学系に適用される本発明の第3の実施形態を示している。図22は、レンズの概略側面図である。この実施形態では、物体面70に対して番号付けされた要素E1、E5、E6、E13、E14、E15、E18は、その[100]結晶軸を光軸75に沿わせて揃えられ、他のすべての要素Eは、その[110]結晶軸を光軸75に沿わせて揃えられている。図22では、各[100]光学要素(E1、E5、E6、E13、E14、E15、E18)に斜線が付されている。

50

【 0 1 1 8 】

第3の例示的な実施形態についての各要素の結晶格子及びクロッキングの方向が、以下の表4に与えられている。要素の[110]光軸を光軸75に沿わせて配向させられた[110]光学要素の場合、各要素のクロッキングは、リターダンス軸をX軸（水平、指定された視野に垂直な方向）にほぼ平行にして配向させられたピーク複屈折を光軸に沿って生じさせる配向に対して行われる。要素の[100]結晶軸を光軸75に沿わせて配向させられた[100]光学要素の場合、各要素のクロッキングは、X-Y平面及びY-Z平面において（半径方向角度0°、90°、180°及び270°で）ピーク複屈折ローブを生じさせる配向に対して行われる。このような例が例示的なものに過ぎず、要素の相対的なクロッキングを様々な任意の基準位置のいずれかに対して表すことができることを理解されたい。

10

【 0 1 1 9 】

【表4】

要素	光学軸に沿う 結晶軸	要素クロッキング (度)
E1	[100]	14.20
E2	[110]	-45.84
E3	[110]	35.47
E4	[110]	-52.88
E5	[100]	28.30
E6	[100]	28.69
E7	[110]	72.03
E8	[110]	-28.62
E9	[110]	63.44
E10	[110]	5.06
E11	[110]	79.87
E12	[110]	5.73
E13	[100]	30.26
E13, 表面 S2	---	-52.00
E14	[100]	10.01
E15	[100]	15.09
E16	[110]	-26.15
E17	[110]	-105.71
E18	[100]	1.69
E19	[110]	145.51
E20	[110]	35.55
像	---	0.0000133

20

30

40

【 0 1 2 0 】

システムの正味固有複屈折は、表4に示されているような要素配向の結果として、著しく軽減される。

50

【 0 1 2 1 】

立方晶系結晶格子における固有複屈折による他の影響は、立方晶系材料内を通る光線角度の関数としての平均屈折率の変化である。上記のような固有複屈折によるリターダンス誤差が補償された後、平均屈折率の変化による残留波面収差及び歪みも補償できることが望ましい。平均屈折率のこのような変化によって、通常、波面の非点収差が起こり、かつ光学設計で相殺することのできる像の歪みが起こる可能性がある。この歪みには、像のずれ、像の回転、倍率誤差、またはより高次の歪みを含めてよい。

【 0 1 2 2 】

第3の例示的な実施形態では、光学設計に他の修正を施すことによって、平均屈折率の変化の影響を補償する。要素E13の表面S2、すなわち開口絞り72のすぐ前の表面は、非回転対称であるか、または曲率の非対称的な変化を含んでいる。例示的な実施形態では、要素E13の表面S2は、互いに直交する方向における曲率半径が表面のクロッキングに応じて変化するトロイダル表面である。表5は、局所X方向におけるS2の曲率半径が局所Y方向におけるS2の曲率半径と異なることを示している。最後の7つの表面の曲率半径は、残留歪みを相殺するように調整され、画像面は、残留像回転を除去するように回転させられる。修正された曲率半径は以下の表5に記載され、画像面の回転は上記の表4に与えられている。例示的な実施形態では、非回転対称要素は[100]光学要素であるが、他の実施形態では、トロイダル表面またはその他の非回転対象表面を他の立方晶系光学要素または非立方晶系光学要素上で用いることができる。様々な例示的な実施形態では、光学要素は、各々が曲率の非対称的な変化を有する一対の表面を含んでよい。

【 0 1 2 3 】

【表5】

表面	曲率半径 (mm)
E13, 表面 S2, 局所 X 方向	-913.123746
E13, 表面 S2, 局所 Y 方向	-913.128860
E17, 表面 S1	179.985780
E17, 表面 S2	309.315227
E18, 表面 S1	150.015302
E18, 表面 S2	225.037081
E19, 表面 S1	114.371026
E19, 表面 S2	390.970966
E20, 表面 S1	-7083.652132
E20, 表面 S2	無限大

【 0 1 2 4 】

本発明の一態様は、高性能光学系で行うことのできるリターダンス補償が、視野内の各要素内を通る光線角度の変化の影響を比較的受けないことである。図4を参照すると、外側ピーク複屈折ローブは、それぞれ、[110]結晶軸に対して60°の角度を有している。この角度は、やはり図4に示されているように、それぞれ[100]結晶軸及び[111]結晶軸の対応する角度45°及び35.26°と比べて特に大きい。したがって、かなりの数の要素に[110]結晶軸を選択すると、大きな視野にわたってリターダンス補正を行うことができる。

【 0 1 2 5 】

図23A及び23Bは、上記で詳しく説明し表4及び5に表した補償されたシステムのシステム射出瞳にわたるリターダンスを示すグラフである。リターダンスは、固有複屈折と反射防止コーティングによって生じる。すでに図16A及び16Bに示されているように、コーティングによる寄与は比較的小さく、したがって、リターダンス収差の大部分は

固有複屈折によって生じる。図 2 3 A は中心視野点におけるリターダンスを示し、図 2 3 B は縁部視野点におけるリターダンスを示している。

【 0 1 2 6 】

相対視野高さ 0、0.7 及び 1.0 についての、射出瞳上の RMS リターダンス及び最大リターダンスが、以下の表 6 に記載されている。これらのリターダンスは、固有複屈折及びモデルに用いられている単一層反射防止コーティングの影響を含んでいる。相対視野高さ 0.0 は、図 2 3 A に示されている中心視野点に対応し、相対視野点 1.0 は、図 2 3 B に示されている縁部視野点に対応する。RMS リターダンスは、 $\lambda_0 = 193.3 \text{ nm}$ で 0.0086 波から 0.0105 波の範囲である。

【 0 1 2 7 】

【表 6】

相対視野高さ	リターダンス ($\lambda_0 = 193.3 \text{ nm}$ における波)	
	RMS	最大値
0.0	0.0086	0.0524
0.7	0.0093	0.0529
1.0	0.0105	0.0597

【 0 1 2 8 】

第 3 の実施形態の例示的な補正されたシステムの RMS 波面誤差及び山対谷波面誤差が、固有複屈折の影響を含む補償されたシステムについて、以下の表 7 に記載されている。これらのデータは、それぞれ図 2 3 A 及び 2 3 B において、相対視野高さ 0.0 及び 1.0 について、グラフとして示されている。波面誤差は、Y 方向における相対視野高さ 0、0.7 及び 1.0 について与えられ、2 つの直交偏光成分について記載されている。X 成分は、システム射出瞳における X 方向に沿った線形偏光子を仮定した場合の、X 方向の入力偏光に対する波面誤差を表している。Y 成分は、射出瞳における Y 方向に沿った線形偏光子を仮定した場合の、Y 方向の入力偏光に対する波面誤差を表している。固有複屈折の影響を含めることによって、補正技術のために、視野全体にわたって 0.008 波から 0.010 波まで変化する RMS 波面誤差が生じている。山対谷波面誤差は、すべての要素を [1 1 0] 格子方向に沿って揃えた場合と比べて、約 2.7 の係数だけ小さくなっている。したがって、この実施形態は、固有複屈折の影響を、大開口数リソグラフィに受け入れられるレベルまで軽減できることを実証する。

【 0 1 2 9 】

【表 7】

相対視野高さ	RMS 波面誤差 ($\lambda_0 = 193.3 \text{ nm}$ における波)		山対谷 波面誤差 ($\lambda_0 = 193.3 \text{ nm}$ における波)	
	X 成分	Y 成分	X 成分	Y 成分
0.0	0.009	0.010	0.057	0.041
0.7	0.008	0.009	0.056	0.046
1.0	0.008	0.010	0.051	0.055

【 0 1 3 0 】

図 2 4 A、2 4 B、2 4 C 及び 2 4 D では、システム射出瞳に等高線図として描かれた波面誤差を示している。図 2 4 A 及び 2 4 B は、(視野高さに垂直な) X 方向での入力偏光に対応する、それぞれ中心視野点及び極端視野点の X 方向における射出瞳アナライザと一緒に用いた場合の、図 2 2 に示されている例示的なレンズの残留波面誤差の等高線図である。図 2 4 A に示されている中心視野点における波面誤差の場合、最大山対谷光路差は

波長 193.3 nm で約 0.057 波であり、図 24B に示されている極端視野における波面誤差の場合、最大山対谷光路差は約 0.051 波である。図 24C 及び 24D は、(視野高さと平行な) Y 方向での入力偏光に対応する、それぞれ中心視野点及び極端視野点の Y 方向における射出瞳アナライザと一緒に用いた場合の、図 22 に示されているレンズの残留波面誤差の等高線図である。図 24C に示されている中心視野点における波面誤差の場合、最大山対谷光路差は波長 193.3 nm で約 0.041 波であり、図 24D に示されている極端視野における波面誤差の場合、最大山対谷光路差は約 0.055 波である。

【0131】

点拡散関数に基づいて算出された、固有複屈折を有する補償された構造の重心歪み、及び Y 方向におけるテレセントリシティ誤差が、相対視野高さ 0、0.7、及び 1.0 において以下の表 8 に記載されている。テレセントリシティ誤差は、画像面における光線のコーンの正常入射からの偏差である。図示のように、X 方向及び Y 方向における残留歪みは十分に 0.1 nm 以内であり、157 nm リソグラフィに適している。この歪みは、表 3 に表されている公称設計の歪みと比べても著しく軽減されている。公称設計に対するテレセントリシティ誤差の変化は無視することができる。

【0132】

【表 8】

相対視野高さ	X PSF 重心歪み (nm)	Y PSF 重心歪み (nm)	Y テレセントリシティ誤差 (mrad)
0.0	0.00	0.00	0.00
0.7	-0.06	-0.05	0.28
1.0	0.08	-0.05	1.28

【0133】

表 9 は、ストレール (Strehl) 比で表したこの構造の性能の概要を示している。ストレール比は、収差のないシステムの点拡散係数のピーク強度に対する点拡散係数のピーク強度を表す。この計算には、偏光及びアポダイゼーション (apodization) の影響が、波面収差とともに含まれる。開口数が高いとき、相互に大きな角度を有する光線同士の干渉による偏光の変化によって、収差のない光学系は、完全なストレール比、すなわち値 1 を有さない。本例では、ストレール比の値は、点拡散関数上に中心をおく視野点で算出され、すなわち、歪みの影響は考慮しなかった。

【0134】

表 9 は、0.75 NA を有しストレール比が 0.8434 である、収差のないシステムを示している。固有複屈折の影響のない公称設計の性能は、収差のない理想的なレンズの性能に非常に類似しており、ストレール比は -0.0004 から +0.0005 の範囲で異なる。物理的なレンズモデルと理想的なレンズモデルとの違いによって、ストレール比が完全なレンズのストレール比を超えることを理解されたい。

【0135】

固有複屈折を有する補償されたシステムの場合、ストレール比は、固有複屈折を考慮しない公称設計のストレール比に類似しており、理想的な 0.75 NA 無収差システムにも類似している。

【0136】

10

20

30

40

【表 9】

設計レイアウト	ストレール比		
	オンアキス視野	70%視野	極端視野
無収差レンズ (0.75 NA)	0.8434	0.8434	0.8434
公称、複屈折を考慮しない	0.8436	0.8439	0.8430
補償のために各要素が揃えられている	0.8389	0.8377	0.8361

【0137】

簡単に言えば、この第3の実施形態は、7個の[100]光学要素及び13個の[110]光学要素を有するレンズを表している。各要素の相対的なクロッキングが表4に与えられている。結晶内を通る光線角度が光軸に対して小さい空間で用いられた場合、光軸が材料の[100]結晶軸に沿っていると、要素によって導入されるリターダンスは小さくなる。したがって、このような要素は一般にクロッキングの影響を受けず、かつこれらの要素のクロッキングを用いて、非回転対称欠陥のような製造時の製造誤差を補償することが可能である。たとえば、他の例示的な実施形態によれば、性能をそれほど損なわずに最初の6つの[100]光学要素のクロッキングを変えることができる。したがって、他の例示的な実施形態では、レンズ要素上の非回転対称指数誤差による残留収差を、複数の[100]光学要素を用いて、より多くの[110]立方晶系要素を有するレンズ及びより少ない[100]立方晶系要素を有するレンズよりも容易に補償することができる。

【0138】

実施形態4：

固有複屈折の補償技術を適用する第4の例示的な実施形態については、他の例示的な全屈折投影レンズに関連して説明することができる。このような例示的なレンズはフォトリソグラフィに用いることができ、特に、半導体製造産業で用いることができる。このような例示的なレンズは、Y. Omuraへのヨーロッパ特許第1139138A1号で開示された第7の実施形態で与えられている。この例示的なレンズは図1に示されている。このレンズは、中心波長193.3nmで動作するように設計され、開口数0.75で4×縮小を行い、27.5mmの像視野直径を有している。この設計は、フッ化カルシウム及び溶融シリカで構成された3個の非球面表面を有する28個の光学要素を使用するが、本発明の原則を示すのに用いられる以下の計算では、各要素は -1.2×10^{-7} の固有複屈折を有すると仮定する。他の例示的な実施形態によれば、いくつかのレンズ要素を非立方晶系材料で形成するか、または非立方晶系材料で形成された追加のレンズ要素を使用することができる。乾燥溶融シリカのような様々な適切な非立方晶系材料を使用することができる。

【0139】

固有複屈折の影響を含まない公称設計に関する、相対視野高さ0、0.7及び1.0についての、射出瞳上のRMS及び最大リターダンス及びダイアテニュエーションが、表10に記載されている。リターダンス及びダイアテニュエーションは、モデルに用いられる単一層反射防止コーティングによって生じる。

【0140】

10

20

30

40

【表 1 0】

相対視野高さ	リターダンス ($\lambda_0 = 193.3 \text{ nm}$ における波)		ダイアツテネーション	
	RMS	最大値	RMS	最大値
0.0	0.0048	0.0177	0.0068	0.0273
0.7	0.0052	0.0202	0.0074	0.0296
1.0	0.0055	0.0239	0.0080	0.0358

10

【 0 1 4 1 】

図 2 5 A 及び 2 5 B は、それぞれ、視野の中心及び縁部における視野点についての反射防止コーティングによるシステム射出瞳にわたるリターダンスを示している。リターダンスは、半径方向に配向し、瞳の縁部で最大になる。図 2 6 A 及び 2 6 B は、それぞれ視野の中心及び縁部の瞳にわたるダイアツテネーション変化を示すグラフである。

【 0 1 4 2 】

表 1 1 は、固有複屈折の影響を有さない公称設計の R M S 波面誤差及び山対谷波面誤差を示している。波面誤差は、Y 方向における相対視野高さ 0、0.7 及び 1.0 について与えられ、2 つの直交偏光成分について記載されている。X 成分は、システム射出瞳における X 方向に沿った線形偏光子を仮定した場合の、X 方向での入力偏光に対する波面誤差を表している。Y 成分は、射出瞳における Y 方向に沿った線形偏光子を仮定した場合の、Y 方向での入力偏光に対する波面誤差を表している。立方晶系光学要素がないか、または固有複屈折の影響を考慮しない場合、公称設計は、0.004 波のピーク R M S 波面誤差を含む。

20

【 0 1 4 3 】

【表 1 1】

相対視野高さ	RMS 波面誤差 ($\lambda_0 = 193.3 \text{ nm}$ における波)		山対谷 波面誤差 ($\lambda_0 = 193.3 \text{ nm}$ における波)	
	X 成分	Y 成分	X 成分	Y 成分
0.0	0.003	0.003	0.017	0.017
0.7	0.003	0.004	0.022	0.033
1.0	0.003	0.004	0.022	0.029

30

【 0 1 4 4 】

図 2 7 A、2 7 B、2 7 C 及び 2 7 D は、固有複屈折を含まない公称設計に対する波面誤差を、システム射出瞳に描かれた等高線図として示している。図 2 7 A 及び 2 7 B は、視野高さに垂直な X 方向での入力偏光に対応する、それぞれ中心視野点及び極端視野点の X 方向における射出瞳アナライザと一緒に用いた場合の、図 1 に示されている例示的なレンズの残留波面誤差の等高線図である。中心視野点における波面誤差の場合、最大山対谷光路差は波長 193.3 nm で約 0.017 波であり、極端視野における波面誤差の場合、最大山対谷光路差は約 0.022 波である。図 2 7 C 及び 2 7 D は、視野高さと同様な Y 方向での入力偏光に対応する、それぞれ中心視野点及び極端視野点の Y 方向における射出瞳アナライザと一緒に用いた場合の、図 1 に示されているレンズの残留波面誤差の等高線図である。中心視野点における波面誤差の場合、最大山対谷光路差は波長 193.3 nm で約 0.017 波であり、縁部視野における波面誤差の場合、最大山対谷光路差は約 0.029 波である。

40

【 0 1 4 5 】

表 1 2 は、相対視野高さ 0、0.7 及び 1.0 における、点拡散関数に基づいて算出さ

50

れた、公称設計の重心歪み、及びY方向におけるテレセントリシティ誤差を示している。

【0146】

【表12】

相対視野高さ	X PSF 重心歪み (nm)	Y PSF 重心歪み (nm)	Y テレセントリシティ 誤差 (mrad)
0.0	0.00	0.00	0.00
0.7	0.00	7.70	0.11
1.0	0.00	10.70	0.51

10

【0147】

概略的に図1に示されているレンズ規定を用いた、立方晶系光学要素を含む実際のレンズ設計には、固有複屈折が含まれる。固有複屈折の影響を含めた場合、性能は著しく低下する。図28A及び28Bは、すべての要素が三次元において同一に揃えられ、要素の[110]結晶軸が光軸10に沿っている例示的な実施形態による、視野の中心及び縁部(物体視野高さ0mm及び55mm)における視野点のシステム射出瞳にわたる正味のリターダンスを示している。これらのプロットでは、リターダンス配向は二分の一波間隔で90°回転させられ、すなわち、0°での0.75波リターダの影響は90°での0.25波リターダと同じである。したがって、この例における固有複屈折によるピーク複屈折は、波長193.3nmで約2.1波である。

20

【0148】

図29A及び29Bは、すべての要素が三次元において同一に揃えられ、要素の[100]結晶軸が光軸10に沿っている、他の例示的な実施形態による、それぞれ視野の中心及び縁部における視野点のシステム射出瞳にわたる正味リターダンスを示している。この場合も、リターダンス配向は二分の一波間隔で90°回転させられ、したがって、この例における固有複屈折によるピーク複屈折は、波長193.3nmで約1.5波である。

【0149】

図30A及び30Bは、すべての要素が三次元において同一に揃えられ、要素の[111]結晶軸が光軸10に沿っている他の例示的な実施形態による、それぞれ視野の中心及び縁部における視野点のシステム射出瞳にわたる正味リターダンスを示している。この例示的な構成では、固有複屈折によるピーク複屈折は、波長193.3nmで約0.8波である。

30

【0150】

すべての要素がその[110]結晶軸、[100]結晶軸、または[111]結晶軸を光軸10に沿わせて揃えられ、三次元において同一に配向させられた場合、固有複屈折によって生じるリターダンスは、非常に大きな波面収差を生じさせる。補償を行わない場合、この収差は、フォトリソグラフィプロセス、特に今日の半導体製造産業で小さなフィーチャサイズを作製するのに用いられるフォトリソグラフィプロセスに必要な望ましい波面誤差を大幅に超える。

【0151】

第4の例示的な実施形態は、システムの固有複屈折を補正するように、各要素の光軸に対する各要素の立方晶系結晶格子の配向と光軸の周りでのこれらの要素の相対回転とを規定することにより、固有複屈折によって生じるリターダンスを補償する。さらに、図31に示されるような第4の実施形態では、図1の例示的なレンズ系の2つの要素は、それぞれ、同じ総厚さ及び倍率(power)を有する2つのセグメントに分割され、2つのセグメントの厚さ及びそれらの間の埋め込み表面の曲率は、正味のシステムリターダンスを最小限に抑えるように最適化されている。このような追加の自由度は、レンズの再設計を必要とせず実現可能なリターダンス補償を改善することが分かる。

40

【0152】

第4の実施形態によれば、個々の要素のリターダンス寄与が互いにほぼ打ち消しあうの

50

を可能にし、かつ大開口数リソグラフィシステムに受け入れられる全体的な波面補正を行うために、[110]光学要素と[100]光学要素との組合せが用いられる。

【0153】

図31は、改良されたレンズの概略側面図である。レンズ100は、レチクルまたはフォトマスクであってよい物体面80と、その上に像が形成される基板であってよい画像面82と、光軸85と、開口絞りAS89とを含んでいる。[100]光学要素L28A及びL28Bには斜線が付されている。この実施形態では、他のすべての要素L1~L27Bは、その[110]結晶軸を光軸85に沿わせて揃えられた[110]光学要素である。

【0154】

第4の実施形態は、表13に与えられた結晶軸及びクロッキングを有するレンズ要素L1~L28を含む図31に示されているレンズ100を提供する。[110]光学要素の場合、各要素のクロッキングは、X軸（水平、すなわち指定された視野に垂直な方向）にほぼ平行なリターダンス軸に配向させられたピーク複屈折を光軸に沿って生じさせる配向に対して行われる。[100]光学要素の場合、各要素のクロッキングは、X-Y平面及びY-Z平面における半径方向角度0°、90°、180°及び270°でピーク複屈折ローブを生じさせる配向に対して行われる。

【0155】

【表 1 3】

要素	光学軸に沿う 結晶軸	要素クロッキング (度)	
L1	[110]	51.93	
L2	[110]	-82.04	
L3	[110]	-33.00	
L4	[110]	71.75	
L5	[110]	-35.37	10
L6	[110]	27.46	
L7	[110]	21.75	
L8	[110]	-70.79	
L9	[110]	-43.04	
L10	[110]	-39.84	
L11	[110]	35.04	
L12	[110]	-63.29	
L13	[110]	58.42	20
L14	[110]	-3.10	
L15	[110]	67.64	
L16	[110]	58.53	
L17	[110]	49.69	
L18	[110]	68.53	
L19	[110]	29.79	
L20	[110]	-75.69	
L20, 表面 2	ゼルニケ表面	-75.69	30
L21	[110]	-25.98	
L22	[110]	54.09	
L23	[110]	42.29	
L24	[110]	54.60	
L25	[110]	-21.99	
L26	[110]	15.35	
L27A	[110]	-57.40	
L27B	[110]	68.88	40
L28A	[100]	40.25	
L28B	[100]	82.87	
像	---	-0.00000199	

【 0 1 5 6 】

第 4 の例示的な実施形態は、本発明の他の態様、すなわち、公知のレンズ系の固有複屈折及びリターダンスを軽減することを示している。本発明のこの態様は、良好な光学特性を有する所与のレンズ規定を設けることと、複数の個々のレンズ要素を含めることとを含む。この所与のレンズ規定の場合、個々のレンズ要素のうちの少なくとも 1 つは、2 以上のサブ要素と交換されるか、またはそのようなサブ要素に分割される。サブ要素は、レン

ズ規定の全体的な光学特性が悪影響を受けないように、それぞれ同じ全体的な曲率半径を含み同じ厚さを含んでいる。個々の各要素を交換する場合、各サブ要素は、それらが組み合わされて置き換わる個々のレンズ要素を用いて実現できるリターダンス補正に対して正味のシステムリターダンスを軽減するように配向させられる。

【 0 1 5 7 】

例示的な一実施形態では、各サブ要素を、光軸に沿った同じ結晶軸に揃えることができ、かつ各サブ要素を相互にクロッキングすることができる。たとえば、各サブ要素は [1 1 0] 光学要素や [1 0 0] 光学要素であってよい。他の例示的な実施形態では、各要素は、光軸に沿って揃えられたそれぞれの異なる結晶軸を含んでよく、たとえば、 [1 0 0] 光学要素と [1 1 0] 光学要素とであってよい。この概念は、図 1 のレンズ 2 と図 3 1 に示されているレンズ 1 0 0 を比較することによって示される。図 1 に示されているレンズ 2 は、レンズ要素 L 1 0 1、L 1 0 2 を含む複数のレンズ要素を含んでいる。図 3 1 のレンズ 1 0 0 は、図 1 のレンズ要素 L 1 0 1 が 2 つのサブ要素、すなわち、図 3 1 のレンズサブ要素 L 2 7 A、L 2 7 B と交換され、図 1 のレンズ 2 のレンズ要素 L 1 0 2 が 2 つのレンズ要素、すなわち、図 3 1 に示されているレンズサブ要素 L 2 8 A、L 2 8 B と交換されていることを除いて、図 1 のレンズ 2 にほぼ類似している。

10

【 0 1 5 8 】

立方晶系結晶格子における固有複屈折による他の影響は、結晶内を通る光線角度の関数としての平均屈折率の変化である。本発明は、固有複屈折によるリターダンス誤差を補償するだけでなく、平均屈折率の変化による残留波面収差及び歪みを補正する。補正されない場合、平均複屈折のこのような変化によって、波面の非点収差が起こる可能性があり、像の歪みが起こる可能性がある。この歪みには、像のずれ、像の回転、倍率誤差、またはより高次の歪みを含めてよい。

20

【 0 1 5 9 】

このため、第 4 の実施形態では、光学設計は、平均複屈折の変化の影響を補償する、図 1 のレンズ 2 に対する修正を含む。レンズ要素 L 2 0 の表面 S 2、すなわち開口絞り 8 9 のすぐ後のレンズ要素の右側の表面は、後述のようなゼルニケ (Zernike) 多項式によって定義される形状を含んでいる。ゼルニケ係数は、残留非点収差を補償するように調整される。他の例示的な実施形態では、ゼルニケ係数を用いて他の要素の表面形状を調整することができ、かつ曲率が非対称的に変化する 1 以上の表面を利用することができる。さらに、残留歪みを相殺するように 1 0 個の表面の曲率半径が調整され、残留画像回転を除去するように画像面の回転が行われる。結果として得られる曲率半径及びゼルニケ表面係数 C_j が表 1 4 に記載され、画像面の回転が表 1 3 に与えられている。

30

【 0 1 6 0 】

ゼルニケ多項式 Z_j は、記載された正規化半径を有する円に対して定義される。その積分が表面を表す表面たるみ (サグ; sag) $Z(x, y)$ は、以下の式によって表される。

【 0 1 6 1 】

【 数 1 】

$$Z(x, y) = \frac{c(x^2 + y^2)}{1 + \sqrt{1 - c^2(x^2 + y^2)}} + \sum_{j=1}^4 C_j Z_j$$

40

【 0 1 6 2 】

ここで c は、曲率 = $1 / (\text{曲率半径})$ であり、 x 及び y は、表面上のデカルト座標である。

【 0 1 6 3 】

【表 1 4】

表面	曲率半径 (mm)	
L24, 表面 S1	277.35519	
L24, 表面 S2	1289.10376	
L25, 表面 S1	179.54899	
L25, 表面 S2	446.44705	
L26, 表面 S1	182.12274	
L26, 表面 S2	558.39223	10
L27A, 表面 S1	-10831.04108	
L27A, 表面 S2	154.82711	
L27B, 表面 S1	154.82711	
L27B, 表面 S2	322.35847	
L28A, 表面 S1	399.66226	
L28A, 表面 S2	-2608.81885	
L28B, 表面 S1	-2608.81885	20
L28B, 表面 S2	-1902.32780	

パラメータ	ゼルニケ多項式, Z_j	ゼルニケ係数, C_j	
C_1	$x^2 - y^2$	-1.7603×10^{-6}	
C_2	$2xy$	-2.5077×10^{-5}	
C_3	$[4(x^2 + y^2) - 3](x^2 - y^2)$	1.0700×10^{-5}	
C_4	$2[4(x^2 + y^2) - 3]xy$	1.1000×10^{-6}	30
正規化半径	---	136.1 mm	

【0164】

簡単に言えば、第4の実施形態では、2つの要素、すなわち、図1に示されている例示的なレンズ規定のレンズ要素L101及びL102をそれぞれレンズサブ要素L27A及びL27Bとレンズサブ要素L28A及びL28Bに分割し、改良されたリターダンス収差補正を行った。それぞれの場合に、総要素厚さを最初のレンズ要素に対して一定に維持しながら、2つのサブ要素の間に形成された埋め込み表面の曲率半径及び2つのサブ要素の厚さを変えた。言い換えれば、図31のレンズサブ要素L28A及びL28Bの組合せ厚さは、図1のレンズ要素L102の厚さとほぼ同じである。補償を微調整するために、図1の要素L101は、図31の2つの[110]光学サブ要素L27A及びL27Bに分割される。埋め込み表面83の厚さ及び曲率半径は、瞳の中心及び縁部におけるリターダンス収差を制御する。方位角補償を微調整するために、図1の要素L102は、図31の2つの[100]光学サブ要素L28A及びL28Bに分割される。各[100]サブ要素は、光軸に対する光線角度の関数として同じ複屈折を有し、方位角依存性のみが要素クロッキングに応じて変化する。

【0165】

表15は、要素L101及びL102を分割することによって作製された光学サブ要素の曲率半径及び厚さを記載した表である。

【0166】

10

20

30

40

50

【表 15】

要素	ゼロ クローキング に対する 結晶軸方向	要素 クローキング (度)	前部曲率半径 (mm)	後部曲率半径 (mm)	厚さ (mm)
L27A	[110]	-57.40	-10831.04108	154.82711	17.96182
L27B	[110]	68.88	154.82711	322.35847	32.03818
L28A	[100]	40.25	399.66226	-2608.81885	17.66426
L28B	[100]	82.87	-2608.81885	-1902.32780	32.33575

10

【0167】

図32A及び32Bは、それぞれ視野の中心及び縁部における視野点についての、固有複屈折及び反射防止コーティングによって生じる、補償されたシステムのシステム射出瞳にわたるリターダンスを示すグラフである。図25A及び25Bに示されているように、コーティングによる寄与は、最大残留リターダンス収差と同じオーダーであり、したがって、どのコーティングを選択するかはシステム性能に顕著な影響を及ぼすことがある。コーティング構造が異なる場合、最高の性能を得るにはレンズを再最適化することが必要になることがある。補償されないシステムでは、コーティングによる寄与は比較的小さく、リターダンス収差の大部分は固有複屈折によって生じる。

20

【0168】

相対視野高さ0、0.7及び1.0についての、射出瞳上のRMSリターダンス及び最大リターダンスが、表16に記載されている。これらのリターダンスは、固有複屈折及び単一層反射防止コーティングの影響を含む。RMSリターダンスは、 $\lambda_0 = 193.3 \text{ nm}$ で0.0029波から0.0054波の範囲である。この補償されたシステムは、固有複屈折の影響がない場合の反射防止コーティングによるRMSリターダンスにおける0.0048波から0.0055波の範囲と比べて軽減されたリターダンスを含む。

【0169】

【表 16】

相対視野高さ	リターダンス ($\lambda_0 = 193.3 \text{ nm}$ における波)	
	RMS	最大値
0.0	0.0029	0.0144
0.7	0.0037	0.0266
1.0	0.0054	0.0326

30

【0170】

固有複屈折の影響を含む補償された設計についてのRMS波面誤差及び山対谷波面誤差が、表17に記載されている。波面誤差は、Y方向における相対視野高さ0、0.7及び1.0について与えられ、2つの直交偏光成分について記載されている。X成分は、システム射出瞳におけるX方向に沿った線形偏光子を仮定した場合の、X方向での入力偏光に対する波面誤差を表している。Y成分は、射出瞳におけるY方向に沿った線形偏光子を仮定した場合の、Y方向での入力偏光に対する波面誤差を表している。視野全体にわたって0.003波から0.007波の範囲のRMS波面誤差が実現される。山対谷波面誤差は、すべての要素がほぼ同一に配向させられた[110]光学要素、[100]光学要素または[111]光学要素である例示的なレンズと比べて、約47から124の範囲の係数だけ軽減される。したがって、この実施形態は、固有複屈折の影響を、大開口数リソグラフィに受け入れられるレベルまで軽減できることを実証する。

40

【0171】

【表 17】

相対視野高さ	RMS 波面誤差 ($\lambda_0 = 193.3 \text{ nm}$ における波)		山対谷 波面誤差 ($\lambda_0 = 193.3 \text{ nm}$ における波)	
	X 成分	Y 成分	X 成分	Y 成分
0.0	0.006	0.003	0.025	0.017
0.7	0.007	0.006	0.038	0.031
1.0	0.006	0.007	0.045	0.040

10

【0172】

図33A、33B、33C及び33Dでは、波面誤差がシステム射出瞳において等高線図として描かれている。図33A及び33Bは、視野高さに垂直なX方向での入力偏光に対応する、それぞれ中心視野点及び極端視野点のX方向における射出瞳アナライザと一緒に用いた場合の、図31に示されているレンズの残留波面誤差の等高線図である。中心視野点の場合、最大山対谷光路差は波長193.3nmで約0.025波であり、極端視野では、最大山対谷光路差は約0.045波である。図33C及び33Dは、視野高さと同方向なY方向での入力偏光に対応する、それぞれ中心視野点及び極端視野点のY方向における射出瞳アナライザと一緒に用いた場合の、図31に示されているレンズの残留波面誤差の等高線図である。中心視野点の場合、最大山対谷光路差は波長193.3nmで約0.017波であり、極端視野では、最大山対谷光路差は約0.040波である。

20

【0173】

点拡散関数に基づいて算出された、固有複屈折を有する補償される設計での重心歪み、及びY方向におけるテレセントリシティ誤差が、相対視野高さ0、0.7及び1.0に関して、以下の表18に記載されている。図示のように、X方向及びY方向における残留歪みは0.07nm以内であり、157nmリソグラフィに適している。この歪みは、表12に与えられている補正なしの公称設計の歪みと比べても著しく軽減されている。公称設計に対するテレセントリシティ誤差の変化は、無視することができる。

【0174】

【表 18】

相対視野高さ	X PSF 重心歪み (nm)	Y PSF 重心歪み (nm)	Y テレセントリシティ 誤差 (mrad)
0.0	0.00	0.00	0.00
0.7	0.03	0.01	0.11
1.0	0.00	0.00	0.51

30

【0175】

表19は、図31のレンズ100の設計のストレール比の概要を示している。ストレール比の値は、点拡散関数を中心としている視野点で算出され、すなわち、歪みの影響は考慮しなかった。表19に示されているように、0.75NAを有する収差のないシステムのストレール比は0.8434である。固有複屈折の影響のない公称設計の性能は、理想的な0.75NAレンズの性能をわずかに0.0004から0.0017だけ上回る。

40

【0176】

固有複屈折を有する補償されたシステムの場合、ストレール比は、収差のない0.75NAシステムと比べて、固有複屈折の影響を考慮しない公称設計のストレール比に類似している。

【0177】

【表 19】

設計レイアウト	オン軸視野	70% 視野	極端視野
無収差レンズ (0.75 NA)	0.8434	0.8434	0.8434
公称設計、複屈折なし	0.8439	0.8447	0.8451
補償のために各要素が揃えられている	0.8435	0.8430	0.8428

【0178】

実施形態 5 :

固有複屈折の補償技術を適用する第 5 の例示的な実施形態については、偏光ビームスプリッタを用いるフォトリソグラフィ用の投影レンズなどの反射屈折光学系に関連して説明することができる。このような例示的なレンズは、内容が引用によって本明細書に組み込まれる Y. Omura の米国特許第 6 0 8 1 3 8 2 号の第 2 の実施形態として開示されている。この例示的なレンズは、図 3 4 の概略図に示されている。このシステムは有利なことに、中心波長 $\lambda_0 = 193.3 \text{ nm}$ 及び開口数 0.80 で動作する。画像視野は $8 \times 25 \text{ mm}$ 矩形スリット視野であり、レンズは $4 \times$ 縮小を行う。例示的な実施形態では、すべてのレンズが溶融シリカで構成されているが、他の例示的な実施形態では他の材料を用いることができる。

【0179】

偏光ビームスプリッタを使用し偏光された入力放射を利用する光学系の場合、システム内のそれぞれの異なる光路を通るビームの偏光状態を考慮すると有用である。実施形態 5 では、入力偏光は直線であり、X 軸の方向に沿って向いている。この偏光は、ビームスプリッタ 2 4 0 の偏光選択表面 2 0 8 での反射時の s 偏光に対応する。X 軸指定は任意であり、入射光線の光軸が Z 方向として指定され、X 軸が水平方向に平行であるデカルト座標系に対して定義される。ビームスプリッタ 2 4 0 は、s 偏光の反射及び p 偏光の透過を最大にするように、コーティングされることできる。

【0180】

例示的なレンズ系は、物体視野 2 3 0、像視野 3 2 1、光軸 2 4 8 及び開口絞り 2 3 3 を含んでいる。ビーム 2 4 9 は、第 1 のパスでビームスプリッタ 2 4 0 のプリズム 2 0 7 に入り、偏光選択表面 2 0 8 で反射され、プリズム 2 0 7 内を通過して下向きに伝わる。ビーム 2 4 9 は、ビームスプリッタ 2 4 0 のプリズム 2 0 7 から出ると、四分の 1 波長板 2 0 9 及び屈折要素 2 1 0 を通過し、球面鏡 2 1 2 の反射面 2 1 1 から反射され、屈折要素 2 1 0 及び四分の 1 波長板 2 0 9 を通過して戻る。第 1 の四分の 1 波長板 2 0 9 は、複屈折軸が両方のパスでビーム 2 4 9 の偏光配向に対して 45° の角度を有するように配向させられる。波長板を 2 回通過し、反射面 2 1 1 から反射することによって、ビームの偏光状態が回転し、したがって、ビームは、ビームスプリッタ 2 4 0 内を通る第 2 のパスで偏光選択表面 2 0 8 を透過する。ビーム 2 4 9 は、プリズム 2 0 7 を再び通過した後、ビームスプリッタ 2 4 0 のプリズム 2 1 3 を通過し、偏光状態を円偏光に変換するビームの偏光配向に対して 45° に配向させられた複屈折軸を有する第 2 の四分の 1 波長板 2 1 4 を通過する。このことは米国特許第 6 0 8 1 3 8 2 号に記載されている。

【0181】

固有複屈折の影響のない公称設計に関し、 $16 \times 100 \text{ mm}$ 物体視野 2 3 0 上の 5 つの位置についての、射出瞳上の二乗平均平方根 (RMS) リターダンス及び最大リターダンスが、表 2 0 に記載されている。これらの結果は、モデルに用いられている単一層反射防止コーティング及び四分の 1 波長板によって生じ、s 偏光が完全に反射し p 偏光が完全に透過すると仮定すると、ビームスプリッタ 2 4 0 の偏光選択表面 2 0 8 の影響もモデルに含められる。

【0182】

10

20

30

40

【表 2 0】

物体視野 (X, Y) mm 単位で	リターダンス ($\lambda_0 = 193.3 \text{ nm}$ における波)	
	RMS	最大値
(-50, -4)	0.0054	0.0274
(-35, 0)	0.0045	0.0243
(0, 0)	0.0044	0.0237
(35, 0)	0.0045	0.0245
(50, 4)	0.0042	0.0233

10

【 0 1 8 3】

図 3 5 A 及び 3 5 B は、図 3 4 に示されている例示的なレンズの、それぞれ視野（物体視野 2 3 0 において $X = 50 \text{ mm}$ 及び $Y = 4 \text{ mm}$ ）の中心及び極端コーナーにおける視野点についての、反射防止コーティング及び波長板によるシステム射出瞳にわたるリターダンスを示している。図 3 5 A は、視野の中心では、リターダンスが瞳の中心でゼロであり、瞳の縁部の方へ全体的に大きくなっていくことを示している。矩形視野の極端コーナーでは、リターダンスは、図 3 5 B に示されているように、射出瞳を横切って垂直に配向させられた概ね一定の線形成分を示す。

【 0 1 8 4】

20

図 3 6 A、3 6 B、3 6 C 及び 3 6 D は、システム射出瞳に等高線図として描かれた固有複屈折の影響のない公称設計での波面誤差を示している。図 3 6 A 及び 3 6 B は、X 方向での入力偏光の、それぞれ視野（レチクルにおいて $X = 50 \text{ mm}$ 及び $Y = 4 \text{ mm}$ ）の中心及び極端コーナーの X 方向における射出瞳アナライザと一緒に用いた場合に対応する、図 3 4 に示されているレンズの残留波面誤差の等高線図である。図 3 6 A に示されている中心視野点における波面誤差の場合、最大山対谷光路差は波長 193.3 nm で約 0.099 波であり、図 3 6 B に示されている極端視野における波面誤差の場合、最大山対谷光路差は約 0.160 波である。図 3 6 C 及び 3 6 D は、Y 方向での入力偏光に対応する、それぞれ中心視野点及び極端視野点の Y 方向における射出瞳アナライザと一緒に用いた場合の、図 3 4 に示されているレンズの残留波面誤差の等高線図である。図 3 6 C に示されている中心視野点における波面誤差の場合、最大山対谷光路差は波長 193.3 nm で約 0.093 波であり、図 3 6 D に示されている極端視野における波面誤差の場合、最大山対谷光路差は約 0.152 波である。

30

【 0 1 8 5】

固有複屈折の影響のない公称設計についての、5 つの例示的な視野点における RMS 波面誤差及び山対谷波面誤差が、以下の表 2 1 に記載されている。これらの値は、最適焦点における波面誤差を表し、チルト（傾き）項は、計算において各画像点を波面の中心に配置するために除去されている。結果は、2 つの直交偏光成分について得られている。X 成分は、システム射出瞳における X 方向に沿った線形偏光子を仮定した場合の波面誤差を表し、Y 成分は、射出瞳における Y 方向に沿った線形偏光子を仮定した場合の波面誤差を表している。RMS 波面誤差は、 $\lambda = 193 \text{ nm}$ のとき視野全体にわたって 0.011 波から 0.016 波まで変化することが分かる。

40

【 0 1 8 6】

【表 2 1】

物体視野 (X, Y) mm 単位で	RMS 波面誤差 ($\lambda_0 = 193.3$ nmにおける波)		山対谷 波面誤差 ($\lambda_0 = 193.3$ nmにおける波)	
	X 成分	Y 成分	X 成分	Y 成分
(-50, -4)	0.015	0.015	0.161	0.149
(-35, 0)	0.016	0.016	0.157	0.162
(0, 0)	0.011	0.011	0.099	0.093
(35, 0)	0.016	0.016	0.161	0.153
(50, 4)	0.015	0.015	0.160	0.152

10

【0187】

表 2 2 は、同じ 5 つの例示的な視野点についての、点拡散関数 (PSF; point spread function) に基づいて算出された公称設計の重心歪みを示している。最大画像歪みは約 27.1 nm である。視野全体にわたる主光線テレセントリシティ誤差は 0.4 mrad 以内である。

【0188】

【表 2 2】

物体視野 (X, Y) mm 単位で	X PSF 重心歪み (nm)	Y PSF 重心歪み (nm)
(-50, -4)	-24.21	-3.38
(-35, 0)	-27.13	-1.35
(0, 0)	0.00	-0.03
(35, 0)	27.13	1.36
(50, 4)	24.19	3.45

20

【0189】

偏光選択表面を有する反射屈折システムは、一般に、単一の入力偏光状態のときにうまく働く。設計入力偏光状態に直交する偏光状態は、偏光選択表面で失われる。したがって、入力偏光が一定である場合、偏光選択表面に至る前のリターダンス収差は、光をシステムの外部に結合し、透過されたビームのアポダイゼーションを起し、透過された波面に一定の位相を与える。そのため、有利なことに、効率及び高性能イメージングを維持するように、アポダイゼーションは最小限に抑えられる。これは、偏光選択表面に至る前のリターダンス収差が入力偏光状態に沿っているかまたは直交しているときに実現することができる。したがって、この反射屈折実施形態では、有利なことに、第 2 の波長板 214 のような第 2 の波長板の後のレンズ要素を適切に配向させ成形することによって、リターダンス収差が最小限に抑えられる。偏光選択表面 208 よりも前の表面の場合、有利なことに、リターダンス収差の、設計偏光状態に沿わずかつ直交しない成分は、最小限に抑えられる。この手法は、偏光選択表面よりも前のレンズ要素におけるリターダンスを最小限に抑える上で、より有用である場合がある。相対的な語「前」及び「後」は、明細書全体にわたって物体面から画像面まで伝わるビームの経路に関して用いられている。

30

40

【0190】

図 37A 及び 37B は、193.3 nm の波長を有する、図 34 に示されている反射屈折光学系において、第 2 の波長板 214 よりも前の要素が固有複屈折を持たないと仮定され、第 2 の波長板 214 よりも後の要素が三次元において同一に揃えられた [110] 光学要素である例示的な実施形態における、それぞれ視野 (レチクルにおいて X = 50 mm 及び Y = 4 mm) の中心及び極端コーナーの X 方向における視野点のシステム射出瞳にわたる正味のリターダンスを示している。図 37A 及び 37B のリターダンスプロット及び

50

同様の図では、リターダンス配向は二分の一波間隔で 90° 回転させられ、すなわち、 0° での 0.75 波リターダの影響は 90° での 0.25 波リターダと同じである。したがって、図37A及び37Bで説明する例示的な実施形態の固有複屈折によるピーク複屈折は、波長 193.3 nm で約 0.75 波であり、物体視野高さがわずかに変化する。

【0191】

図38A及び38Bには、 193.3 nm の波長を有する、図34に示されている反射屈折光学系において、第2の波長板214よりも前の要素が固有複屈折を有しないと仮定され、第2の波長板214よりも後の要素が三次元において同一に揃えられた $[100]$ 光学要素である例示的な実施形態における、それぞれ視野の中心及び極端コーナーにおける視野点についてのシステム射出瞳にわたる正味のリターダンスが示されている。この例における固有複屈折によるピーク複屈折は、波長 193.3 nm で約 0.60 波であり、物体視野高さがわずかに変化する。

【0192】

図39A及び39Bは、 193.3 nm の波長を有する、図34に示されている反射屈折光学系において、第2の波長板214よりも前の要素が固有複屈折を有しないと仮定され、第2の波長板214よりも後の要素が三次元において同一に揃えられた $[111]$ 光学要素である例示的な実施形態における、それぞれ視野の中心及び極端コーナーにおける視野点のシステム射出瞳にわたる正味のリターダンスを示している。この例における固有複屈折によるピーク複屈折は、波長 193.3 nm で約 0.90 波である。

【0193】

他の性能低下は、第2の波長板214よりも前の要素によって生じるリターダンス収差によって起こることがある。特に、偏光選択表面208よりも前の要素によって生じるリターダンス収差は、一般に、光をシステムの外部に結合させ、瞳強度を非一様にする可能性があり、これはまた、透過された波面を変化させる可能性がある。

【0194】

第2の四分の一波長板214よりも後の要素が、その $[110]$ 結晶軸、 $[100]$ 結晶軸または $[111]$ 結晶軸が光軸248に沿って位置するように三次元において同一に揃えられた場合、固有複屈折によって、前述の図に示されているように、非常に大きなリターダンス収差が生じ、さらに波面収差が生じる。補償を行わない場合、この受け入れられない大きな収差は、高性能フォトリソグラフィ、特に、今日の半導体製造産業で必要とされる歪みのないパターンを作製するのに用いられるフォトリソグラフィにおける許容波面誤差を大きく上回る。

【0195】

本実施形態で説明するような反射屈折システムにおける固有複屈折の影響を補償する場合、実施形態3及び4で説明したような全屈折システムにおける補償と比べて性能を最適化するための追加の要件がある。

【0196】

図40は、各 $[110]$ 光学要素203~206、218~220、222~224、226~227Aに斜線が付されている例示的な実施形態5によるレンズの概略側面図である。例示的な実施形態5によるレンズは、図34に示されているレンズとほぼ同様であり、目立った違いは、屈折レンズ要素が有利なことにその結晶格子に対して配向されており、図34のレンズの要素227が、図40に示されている第5の実施形態のレンズにおける2つのレンズ要素227A及び227Bに分割されていることである。この例示的な反射屈折システムは、NAが約 0.80 であり、有利なことに、集積回路を製造するのに用いることができる。具体的には、このシステムは、半導体製造産業において、集積回路またはその他の半導体装置を製造する場合に基板上にパターンの並びを作製するために用いられるステップ、投影プリンタなどのリソグラフィツールに用いることができる。

【0197】

第5の例示的な実施形態の例示的な反射屈折システムでは偏光選択表面208が用いられるので、いくつかの異なる要素群によって生じるリターダンスを最小限に抑えると有用

10

20

30

40

50

である。前部要素群 242 は、ビームスプリッタ 240 よりも前のレンズ要素 201 ~ 206 と、ビームスプリッタ 240 のプリズム 207 を通って偏光選択表面 208 に至る第 1 のパスとを含んでいる。第 2 の群 244 は、偏光選択表面 208 によって反射された後ビームスプリッタ 240 のプリズム 207、第 1 の四分の一波長板 209、屈折レンズ要素 210、及び球面鏡の表面 211 を通る第 2 の光路と、プリズム 207 を通る偏光選択表面 208 への戻り光路とを有している。第 3 の群 240 は、偏光選択表面 208 を透過した後のビームスプリッタ 240 のプリズム 213 と、第 2 の四分の一波長板 214 と、ビームスプリッタ 240 の像側とも呼ばれるビームスプリッタとウェハとの間の要素 215、218 ~ 227B を有している。要素 201 ~ 206 は、ビームスプリッタ 240 の物体側に配置されている。

10

【0198】

例示的な実施形態によれば、入力ビーム 249 は、X 軸に平行であって矩形の物体視野の長手方向である水平方向に直線偏光される。所与の光線の場合、固有複屈折は一般に、入力偏光に対する結晶材料の局所複屈折軸の配向に応じて、光線を互いに直交する偏光配向を有する 2 つの光線に分割させる。したがって、前部要素群 242 における複屈折によって、垂直に偏光された光がビームスプリッタで反射されずにむしろ透過するため、光は偏光選択表面 208 で失われる。複屈折の大きさ及び軸の配向は結晶内を通る伝搬方向に応じて変化するので、システム射出瞳にわたって強度が非一様になる。

【0199】

本実施形態では、入力ビーム 249 の直線偏光を利用して前部群 242 における固有複屈折の影響を最小限に抑えることができる。所与のレンズ要素がその [110] 結晶軸を共通の光軸 248 に沿わせて配向させられ (図 5A 参照)、光軸に沿った光線の局所複屈折軸が水平に (すなわち、入力偏光に平行に) 配向させられている場合、光軸に対して小さな角度を有する光線は異常光線に相当し、垂直偏光状態に結合されるエネルギーはほとんどない。

20

【0200】

同様に、要素がその [110] 結晶軸を共通の光軸 248 に沿わせて配向させられ、光軸に沿った局所複屈折軸が垂直に配向させられている場合、光軸に対して小さな角度を有する光線は常光線に相当し、水平偏光状態に結合されるエネルギーはほとんどない。

【0201】

[100] 光学要素の場合、複屈折の大きさは、光軸に対する角度が小さい光線の場合には比較的小さい。各レンズ要素は、リターダンスの、入力偏光状態に平行でなくまた入力偏光状態に直交しない成分を最小限に抑えるために、屈折率ローブの方位角が 0°、90°、180° 及び 270° (図 5B 参照) になるように揃えることができる。

30

【0202】

この実施形態では、前部群 242 の各要素の結晶格子配向は、リターダンスの水平方向の変化と垂直方向の変化の両方を最小限に抑えるように 3 つの結晶格子配向から選択される。円入力偏光が使用され、ビームの偏光を直線偏光に変換するためにビームスプリッタのすぐ前に四分の一波長板が用いられる、互いに類似した反射屈折要素の他の例示的な実施形態によれば、有利なことに、RMS リターダンスを最小限に抑えるように各光学要素をクロッキングすることができ、あるいは、入力偏光状態に一致する円残留リターダンス収差を生じる。引き続き図 40 を参照すると、最初の 2 つのレンズ要素 201 及び 202 は、例示的な実施形態では 0°、90°、180° 及び 270° の方位角に配向させられた複屈折ローブを有するようにクロッキングされた [100] 光学要素である。レンズ要素 203、204、205 及び 206 は、光軸がそれらの [110] 格子方向に沿って位置し、光軸に沿った水平複屈折軸を形成する配向に対する相対的なクロッキングが 0°、90°、90° 及び 0° になるように、配向させられている。

40

【0203】

ビームスプリッタ 240 のプリズム 207 は、その [100] 結晶軸が入力ビーム 249 の第 1 のパスについて光軸 248 に沿って位置し、かつこの場合も、複屈折ローブが 0

50

°、90°、180°、270°の方位角に向けられるように配向させられている。ビームは、45°偏光選択表面208から反射した後、結晶内において同等の方向を維持する。他の実施形態によれば、ビームスプリッタ240は、立方晶系で形成され、その[110]格子方向がほぼ光軸248に沿って位置するように配向させられた偏光ビームスプリッタであってよく、光軸に沿ってビームスプリッタに入射する光線の局所複屈折軸は、ビームが45°偏光選択表面208から反射した後、結晶内において同等の方向を維持するように、水平すなわち入力偏光配向に平行に配向させられている。

【0204】

物体視野230上の5つの位置についての、射出瞳上のRMSリターダンス及び最大リターダンスが表23に記載されている。これらは、ビームスプリッタ240よりも前の要素201~206及びビームスプリッタ240のセグメント207から球面鏡212の反射面211までにおける固有複屈折の影響と、モデルに用いられている単一反射防止コーティングによるリターダンスを含んでいる。ビームスプリッタの四分の一波長板及び偏光選択表面の影響は含まれない。

【0205】

【表23】

X 物体視野高さ (mm)	Y 物体視野高さ (mm)	リターダンス ($\lambda_0 = 193.3 \text{ nm}$ における波)	
		RMS	最大値
-50	-4	0.0135	0.0799
-35	0	0.0155	0.0681
0	0	0.0087	0.0350
35	0	0.0138	0.0617
50	4	0.0096	0.0604

【0206】

図41A及び41Bは、それぞれ視野(レチクルにおいて $X = 50 \text{ mm}$ 及び $Y = 4 \text{ mm}$)の中心及び極端コーナーにおける視野点についての、前部群242の固有複屈折及び反射防止コーティングによるシステム射出瞳にわたるリターダンスを示している。図41Aは、視野の中心において、リターダンスは、瞳の中心でゼロであり、瞳の縁部の方へ大きさが増加していくことを示している。視野の外側コーナーでは、図41Bは、リターダンスが、瞳上で概ね水平に配向させられた線形成分を含むことを示している。

【0207】

視野の中心の場合、システム透過率は、瞳の中心での正規化値1.0から瞳の縁部での最小値約0.930まで変化する。視野の極端コーナーまたは外側コーナーの場合、正規化システム透過率は、瞳の中心での正規化値1.0から瞳の縁部での最小値約0.915まで変化する。ビームが反射面211から反射し、ビームスプリッタ240の偏光選択表面208に戻る第2の要素群244では、リターダンスを最小限に抑えるための自由度が比較的低い。したがって、この要素群では、個々の各レンズ要素をその[100]結晶軸を光軸に沿わせて揃え、ピーク複屈折ローブを0°、90°、180°及び270°の方位角に配向させることができる。これによって、リターダンスの、入力偏光状態に平行でなくまた入力偏光状態に直交しない成分が最小限に抑えられる。光軸に対する光線角度が比較的小さく(光軸から11°以内)、かつビームスプリッタ光路内の複屈折ローブが優先的に配向させられるので、固有複屈折の影響は最小限に抑えられる。

【0208】

光軸に対する光線角度が小さく(6°以内)、かつこの場合も複屈折ローブが優先的に配向させられているので、ビームスプリッタの偏光選択表面208の透過の後、ビームスプリッタ240のプリズム213はさらに、固有複屈折の影響を最小限に抑えるように、

[1 0 0] 光学要素として働くように配向させられるとともに、 0° 、 90° 、 180° 、及び 270° に複屈折ローブを有するように配向させられている。

【 0 2 0 9 】

他の実施形態によれば、ビームスプリッタ 2 4 0 のプリズム 2 1 3 は、その [1 1 0] 格子方向がほぼ光軸 2 4 8 に沿って位置し、かつ光軸に沿って伝わりプリズム 2 1 3 に入射する光線の局所複屈折軸が光線の偏光方向にほぼ垂直になるように、整列させることができる。この実施形態は、たとえば、正味リターダンスを最小限に抑えるように、プリズムの [1 1 0] 格子方向がほぼ光軸 2 4 8 に沿って位置し、かつ光軸に沿って伝わる入力光線の局所複屈折軸が入力偏光方向にほぼ平行になるように配向させられた立方晶系プリズム 2 0 7 と一緒に使用することができる。

10

【 0 2 1 0 】

本実施形態では、ビームスプリッタ 2 4 0 は、入力ビームが、偏光選択表面 2 0 8 における s 偏光に対応するように水平に偏光されるように配向させることができ、偏光選択表面 2 0 8 は、s 偏光を優先的に反射するように被覆されている。他の例示的な実施形態では、ビームスプリッタは、ビームスプリッタを通る第 1 のパスでビームを透過させ、第 2 のパスでビームを反射させるように設計することができ、各セグメントの結晶配向としては、この場合も、正味のリターダンスを最小限に抑え、反射時に光軸に沿った同等の格子方向を維持するような結晶配向が選択される。

【 0 2 1 1 】

第 3 の群 2 4 6 は、要素 2 1 3 ~ 2 2 7 B を含む。第 3 の要素群 2 4 6 の場合、固有複屈折によって生じるリターダンスの補償は、この場合も、各レンズの結晶軸アライメントを光軸に対して選択的に配向させ、これらの要素を光軸の周りで相対回転させ、かつ図 3 4 に示されている例示的なレンズ実施形態の最後の要素 2 2 7 を、同じ総厚さ及びパワーを与えるがリターダンスを最小限に抑えるように最適化された個々の厚さ及び要素間の埋め込み表面 2 5 0 の曲率を含む 2 つのサブ要素 2 2 7 A 及び 2 2 7 B に分割することによって行われる。前述の実施形態と同様に、第 3 の要素群 2 4 6 の個々の要素のリターダンス寄与を相殺するのを可能にし、それによって固有複屈折を補正し、リターダンスを軽減するために、[1 1 0] 光学要素と [1 0 0] 光学要素の組合せが利用される。

20

【 0 2 1 2 】

この実施形態では、要素 2 1 5、2 2 1 及び 2 2 5 ならびに四分の一波長板 2 0 9 及び 2 1 4 は、ピーク複屈折ローブが 0° 、 90° 、 180° 及び 270° の方位角に向けられるように配向させられた [1 0 0] 光学要素である。さらに、2 つのサブ要素には、要素の [1 1 0] 結晶軸を光軸 2 4 8 に沿わせて配向させられた第 1 のサブ要素 2 2 7 B と、要素の [1 0 0] 結晶軸を光軸 2 4 8 に沿わせて第 2 のサブ要素 2 2 7 B とが含まれる。各要素の結晶軸配向及びクロッキングは以下の表 2 4 に与えられている。この表は、屈折レンズ要素 2 0 1 ~ 2 0 6、2 1 0、2 1 5、2 1 8 ~ 2 2 6、2 2 7 A 及び 2 2 7 B と、ビームスプリッタ・プリズム 2 0 7 及び 2 1 3 と、波長板 2 0 9 及び 2 1 4 とを含んでいる。[1 1 0] 光学要素の場合、各要素のクロッキングは、X 軸（水平すなわち指定された視野の長手方向）にほぼ平行なリターダンス軸によって配向させられた光軸に沿ってピーク複屈折を生じさせる配向に対して与えられている。[1 0 0] 光学要素の場合、各要素のクロッキングは、X - Z 平面及び Y - Z 平面内で 0° 、 90° 、 180° 及び 270° の方位角にピーク複屈折を生じさせる配向に対して与えられている。

30

40

【 0 2 1 3 】

【表 2 4】

要素	光学軸に沿った 結晶軸方向	要素クロッキング (度)	
201	[100]	0	
202	[100]	0	
203	[110]	0	
204	[110]	90	
205	[110]	90	10
206	[110]	0	
プリズム 207, セグメント 1	[100]	0	
プリズム 207, セグメント 2	[100]	0	
波長板 209, パス 1	[100]	0	
210, パス 1	[100]	0	
210, パス 2	[100]	0	
波長板 209, パス 2	[100]	0	
プリズム 207, セグメント 3	[100]	0	20
プリズム 213, セグメント 4	[100]	0	
波長板 214	[100]	0	
215	[100]	126.80	
218	[110]	51.77	
218, トロイダル後部表面 S2	—	-30.00	
219	[110]	149.94	
220	[110]	-81.22	
221	[100]	179.17	30
222	[110]	-0.27	
223	[110]	60.98	
224	[110]	45.86	
225	[100]	-69.14	
226	[110]	90.29	
227A	[110]	-30.24	
227B	[100]	11.80	

【0 2 1 4】

40

5つの例示的に視野位置についての、射出瞳上のRMSリターダンス及び最大リターダンスが、以下の表25に記載されており、これらのリターダンスには、第2の四分の一波長板214よりも後の要素の固有複屈折とモデルに用いられている単一層反射防止コーティングとの影響が含まれる。RMSリターダンスは、視野全体にわたって、 $\sigma = 193.3 \text{ nm}$ で0.0062波から0.0084波の範囲である。

【0 2 1 5】

【表 2 5】

X 物体視野高さ (mm)	Y 物体視野高さ (mm)	リターダンス ($\lambda_0 = 193.3 \text{ nm}$ における波)	
		RMS	最大値
-50	-4	0.0084	0.0518
-35	0	0.0078	0.0473
0	0	0.0062	0.0390
35	0	0.0078	0.0473
50	4	0.0084	0.0518

10

【0 2 1 6】

図 4 2 A 及び 4 2 B は、(第 3 の群 2 1 6 内の) 第 2 の波長板 2 1 4 よりも後の要素群の固有複屈折によって生じるとともに反射防止コーティングのために生じる、表 2 4 に詳しく示されている補償されたシステムについての、それぞれ視野 (レチクルにおいて $X = 50 \text{ mm}$ 及び $Y = 4 \text{ mm}$) の中心及び極端コーナーにおける視野点のシステム射出瞳にわたるリターダンスを示している。

【0 2 1 7】

すべての要素の固有複屈折とモデルに用いられている単一層反射防止コーティングとの影響を含む、上記で指摘した 5 つの視野位置についての、射出瞳上の総 RMS リターダンス及び最大リターダンスが、以下の表 2 6 に記載されている。RMS リターダンスは、 $\lambda_0 = 193.3 \text{ nm}$ で 0.0076 波から 0.0123 波の範囲である。一実施形態では、総リターダンスではなく、第 2 の波長板よりも後の要素群における RMS リターダンスを最小限に抑えることができる。リターダンスをこのように軽減すると、すべての要素群に対して同じ最適化を行う必要なしに、システム全体のリターダンスレベルを十分に低下させることができる。

20

【0 2 1 8】

【表 2 6】

X 物体視野高さ (mm)	Y 物体視野高さ (mm)	リターダンス ($\lambda_0 = 193.3 \text{ nm}$ における波)	
		RMS	最大値
-50	-4	0.0123	0.0824
-35	0	0.0105	0.0689
0	0	0.0076	0.0493
35	0	0.0113	0.0733
50	4	0.0130	0.0828

30

40

【0 2 1 9】

図 4 3 A 及び 4 3 B は、表 2 4 に詳しく示されている補償されたシステムについての、それぞれ視野 (レチクルにおいて $X = 50 \text{ mm}$ 及び $Y = 4 \text{ mm}$) の中心及び極端コーナーに対してすべての要素の固有複屈折と単一層反射防止コーティングとの影響によって生じる視野点のシステム射出瞳にわたるリターダンスを示している。

【0 2 2 0】

実施形態 3 の屈折例と同様に、開口絞り 2 3 3 のすぐ前の屈折光学要素 2 1 8 の表面 S 2 は、互いに直交する方向の曲率半径が、平均屈折率の変化による非点収差を補償するように表面のクロッキングと一緒に変化するトロイダル表面である。このトロイダル表面の曲率半径は、以下の表 2 7 に記載されており、表面の局所 X 軸及び Y 軸は、光軸の周りを

50

システム X 軸及び Y 軸に対して - 30° だけ回転させられる。

【0221】

【表27】

表面	曲率半径 (mm)
218, 表面 S2, 局所 X 方向	1543.4724
218, 表面 S2, 局所 Y 方向	1543.4659

【0222】

第5の例示的な実施形態は、改善されたリターダンス収差補正を行うために、図34に示され公知のレンズ規定に基づく例示的なレンズの最後の要素227が、図40に示されているサブ要素227A及び227Bに分割されたことも示している。単一の要素227に対する総厚さを変えずに、各要素間の埋め込み表面250の曲率半径及び2つのセグメントの厚さを変えた。表28は、2つのセグメントの曲率半径と厚さを与えている。

10

【0223】

【表28】

要素	ゼロ クロッキング に対する 結晶軸方向	要素 クロッキング (度)	前部曲率半径 (mm)	後部曲率半径 (mm)	厚さ (mm)
227A	[110]	-30.24	92.4548	263.3382	47.9615
227B	[100]	11.80	263.3382	-4239.8801	5.0385

20

【0224】

図44A、44B、44C及び44Dは、図40に示されている光学系の射出瞳に描かれた波面誤差の等高線図である。図44A及び44Bは、X方向での入力偏光に対応する、それぞれ視野(レチクルにおいてX = 50 mm及びY = 4 mm)の中心及び極端コーナーのX方向における射出瞳アナライザと一緒に用いた場合の、残留波面誤差の等高線図である。図44Aに示されている中心視野点における波面誤差の場合、最大山対谷光路差は波長193.3 nmで約0.125波であり、図44Bに示されている極端視野における波面誤差の場合、最大山対谷光路差は約0.191波である。図44C及び44Dは、Y方向での入力偏光に対応する、それぞれ中心視野点及び縁部視野点のY方向における射出瞳アナライザと一緒に用いた場合の、残留波面誤差の等高線図である。図44Cに示されている中心視野点における波面誤差の場合、最大山対谷光路差は波長193.3 nmで約0.117波であり、図44Dに示されている極端視野における波面誤差の場合、最大山対谷光路差は約0.192波である。

30

【0225】

5つの視野点における、固有複屈折の影響を含む、補償された構造についてのRMS波面誤差及び山対谷波面誤差が、表29に記載されている。これらの値は、最適焦点における波面誤差を表しているが、チルト項は、各画像点を点拡散関数の中心に配置するために除去されている。結果は、2つの直交偏光成分について得られている。X成分は、システム射出瞳におけるX方向に沿った線形偏光子を仮定した場合の波面誤差を表し、Y成分は、射出瞳におけるY方向に沿った線形偏光子を仮定した場合の波面誤差を表している。

40

【0226】

【表 2 9】

物体視野 (X, Y) mm 単位で	RMS 波面誤差 ($\lambda_0 = 193.3$ nmにおける波)		山対谷 波面誤差 ($\lambda_0 = 193.3$ nmにおける波)	
	X 成分	Y 成分	X 成分	Y 成分
(-50, -4)	0.018	0.016	0.185	0.189
(-35, 0)	0.019	0.017	0.176	0.180
(0, 0)	0.012	0.011	0.125	0.117
(35, 0)	0.018	0.017	0.177	0.184
(50, 4)	0.018	0.016	0.191	0.192

10

【0 2 2 7】

表 2 9 は、RMS 波面誤差が、 $\lambda_0 = 193$ nm のとき視野全体にわたって 0.011 波から 0.019 波まで変化することを示している。これは、固有複屈折の影響を考慮せずに算出された公称設計実施形態についての表 2 1 に記載された 0.011 波から 0.016 波の範囲と同等である。固有複屈折の影響を考慮せずに算出された公称設計実施形態に対する RMS 波面誤差の最大変化は 0.003 波である。本発明の技術によって、固有複屈折のために生じる波面誤差が著しく補償されることが分かる。これに対して、第 2 の波長板よりも後のすべての要素が同じ三次元結晶格子方向によって配向させられた [110] 光学要素である例示的な比較実施形態によれば、図 3 7 A 及び 3 7 B に示されているように、ピークリターダンスは約 0.75 波である。固有複屈折を有する補償された構造の最大山対谷波面誤差は 0.192 波であり、固有複屈折のない公称設計の最大山対谷波面誤差 0.162 波と同等である。

20

【0 2 2 8】

表 3 0 は、上述のように固有複屈折の影響が補償された例示的な実施形態の重心歪みを示している。この重心歪みは、点拡散関数に基づいて算出されたものであり、5 つの例示的な視野点について記載されている。最大画像歪は約 -38.5 nm であり、公称設計に対する歪の最大変化は約 -13.8 nm である。この実施形態では歪みを考慮しなかったが、実施形態 3 及び 4 に関連して論じたような他の設計変数を用いて、補償されたシステムにおける固有複屈折の影響による歪みの変化を相殺することができる。視野全体にわたる主光線テレセントリシティ誤差は 0.4 mrad であり、主光線テレセントリシティ誤差の変化は無視することができる。

30

【0 2 2 9】

【表 3 0】

物体視野 (X, Y) mm 単位で	X PSF 重心歪み (nm)	Y PSF 重心歪み (nm)
(-50, -4)	-38.01	-5.48
(-35, 0)	-38.53	-1.18
(0, 0)	-0.11	-0.05
(35, 0)	38.26	1.13
(50, 4)	37.70	5.53

40

【0 2 3 0】

表 3 1 は、ストレーン比に関する例示的なシステムの性能の概要を示している。表 3 1 のストレーン比の値は、射出瞳の波面を中心とする視野点で算出された値である（すなわち、波面歪の影響を除外した）。

【0 2 3 1】

表 3 1 に示されているように、収差のないシステムは、開口数 0.80 でストレーン比

50

0.8178を有する。固有複屈折の影響を考慮しない公称設計の場合、ストレール比は最大で値0.0084だけ小さくなる。固有複屈折を有する補償されたシステムの場合、ストレール比は、収差のないシステムのストレール比よりも最大で値0.0051だけ小さくなる。

【0232】

【表31】

設計レイアウト	物体視野 (X, Y) mm 単位で				
	(-50, -4)	(-35, 0)	(0, 0)	(35, 0)	(50, 4)
無収差レンズ (0.80 NA)	0.8178	0.8178	0.8178	0.8178	0.8178
公称、複屈折を 考慮しない	0.8102	0.8096	0.8134	0.8094	0.8101
補償のために各要素 が揃えられている	0.8056	0.8063	0.8110	0.8045	0.8027

10

【0233】

さらに前述の実施形態に関連して説明したように、1または複数の応力複屈折要素、波長板、またはそれらの屈折率を用いて、上述の補正が系に対して行われた後に残る残留複屈折変化及び一定の残留リターダンスをさらに補正することができる。

20

【0234】

再び図40を参照すると、他の例示的な実施形態によって、互いに直交する方向においてベース曲率半径を変えるように鏡面211または216のような反射要素に応力をかけることができる。この応力は、例示的な反射屈折光学系における残留非点収差を補正することができる。実施形態3に関連して説明したように、上記に加えてまたは上記の代わりに、互いに直交する方向においてベース曲率半径が異なる少なくとも1つの光学要素を用いて、立方晶系光学要素における平均屈折率の変化による残留非点収差を補償することができる。

30

【0235】

他の例示的な反射屈折実施形態によれば、いくつかのレンズ要素を非立方晶系材料で形成するか、または非立方晶系材料で形成された追加のレンズ要素を使用することができる。乾燥溶融シリカのような様々な適切な非立方晶系材料を使用することができる。

【0236】

他の反射屈折実施形態によれば、内容が引用によって本明細書に組み込まれるOmura等への米国特許第6195213号に記載されたような、ビームスプリッタも波長板も含まない反射屈折システムに適用することができる。

【0237】

簡単に言えば、実施形態5は、本発明の原則を反射屈折光学系に適して、固有複屈折の影響及びシステムリターダンスを、大開口数リソグラフィに受け入れられるレベルまで顕著に軽減できることを実証する。

40

【0238】

実施形態6：

図45は、応力誘起複屈折を含む要素を用いて固有複屈折の影響を軽減する基本的な技術を実証するのに用いられる光学系の例示的な構成を示している。この図示の光学系は、集束ビームの焦点310と同心の2つの立方晶系光学要素から成っている。ビームは、曲率半径が焦点310と同心になるように指定された2つの立方晶系要素302及び306を通過する。立方晶系光学要素302及び306はそれぞれ厚さ304及び308を有している。例示的な実施形態では、厚さ304及び308はそれぞれ5mmであってよく、

50

立方晶系要素 302 及び 306 は、波長 157 nm で測定されたフッ化カルシウムの固有複屈折に対応する複屈折値 $n_e - n_o = -1.2 \times 10^{-7}$ を有すると仮定することができる。立方晶系光学要素 302 及び 306 はそれぞれ、共通の光軸 312 に沿って揃えられ、光軸 312 の周りを相対的に 90° クロッキングされた [110] 立方晶系光学要素であつてよい。他の例示的な実施形態によれば、各要素の相対クローキングを変えることができ、各要素の結晶配向を変えることができ、かつ追加の要素を含めることができる。

【0239】

第 1 の光学要素 302 は、系の正味の RMS リターダンスを最小化するために、要素の周囲に沿って印加される約 19 ポンド (約 8.62 kg) / 平方インチの圧縮フープ応力を含んでいる。要素に応力を加えるために様々な技術を用いることができ、他の例示的な実施形態では様々な他の大きさの引張り応力及び圧縮応力を用いることができる。

10

【0240】

図 46A は、固有複屈折の影響を除外した、第 1 の要素 302 の応力誘起複屈折による個々のリターダンス寄与を示すグラフである。図 46A は、0.0142 波のピークリターダンスと 0.0047 波の RMS リターダンスとを含んでいる。

【0241】

図 46B は、応力誘起複屈折を含むこの例示的な実施形態の光学系の正味リターダンスを示し、0.0186 波の最大残留リターダンスと 0.0065 波の RMS リターダンスとを示している。図 46B に示されている、瞳上で生じるリターダンス変化は、厚さが 2.3 mm の [100] 立方晶系第 3 光学要素を追加した結果として図 9C に示されているリターダンス変化に類似している。応力誘起複屈折を使用する実施形態によれば、最大ピークリターダンス値及び RMS 正味リターダンス値は、図 9C に表された実施形態のそれぞれの値 0.0139 波及び 0.0041 波と同等である。このように、応力誘起複屈折を 1 つの [110] 光学要素に作用させると、[100] 立方晶系要素を追加したときと同様な補正が行われることが分かる。

20

【0242】

このように、応力誘起複屈折を、2 つの [110] 光学要素を含む例示的な光学要素の [110] 光学要素に作用させることは、例示的なことに過ぎない。他の例示的な実施形態では、応力誘起複屈折を他の [110] 光学要素 306 に作用させることができる。さらに、有利なことに、この技術は、互いに対して様々な角度にクローキングされた様々な数の要素を含む他の様々な光学系に適用することができる。応力誘起複屈折は、[100] や [111] 光学要素、または、たとえば乾燥溶融シリカのような非立方晶系光学要素に作用させることができる。例示的な一実施形態によれば、図 45 に示されている構成に第 3 の非複屈折要素を追加し (たとえば、図 6 に示されている構成)、それに、応力誘起複屈折を作用させることができる。

30

【0243】

光学系のリターダンスを測定するかまたはコンピュータモデリングを用いて光学系のリターダンスを求め、応力誘起複屈折を作用させる光学要素を識別し、次に、識別された光学系要素にフープ応力またはその他の応力としての圧縮応力または引張り応力をかける前述の方法を同様に用いて、上述のように応力誘起複屈折を生じさせ、残留リターダンスを軽減することができる。

40

【0244】

実施形態 6 に記載された原則は、前述の例示的なレンズシステムに適用することができる。特に、応力誘起複屈折は、例示の要素または例示の要素に追加された追加の要素に作用させることができる。

【0245】

前述の 6 つの例示的な実施形態は例示的なものであり、本発明を制限するものではない。さらに、1 つの例示的な実施形態に関連して説明した、リターダンス収差、平均屈折率の変化及びシステム透過率の変化によって生じる波面収差を含む、固有複屈折の影響を補償する様々な例示的な技術を他の例示的な実施形態に適用することができる。たとえば、

50

複数の [1 1 0] 光学要素を少なくとも1つの [1 0 0] 光学要素と一緒に選択すること、各要素の相対的なクロッキング、[1 1 1] 光学要素、容易に変化する応力による応力誘起複屈折要素、光軸に垂直な軸に沿って変化する応力による応力誘起複屈折要素、他の様々なレンズ配向の選択、レンズ要素厚さ、間隔、曲率半径及び非球面係数の最適化、ならびに他の例示的な技術及び要素を用いて、様々な例示的な光学系における固有複屈折を補正することができる。同様に、本発明の他の態様、すなわち、互いに直交する方向においてベース曲率半径が異なる少なくとも1つの光学要素を用いることによって立方晶系光学要素における平均屈折率の変化による残留非点収差を補償する方法は、前述の実施形態うちのどれでも用いることができる。

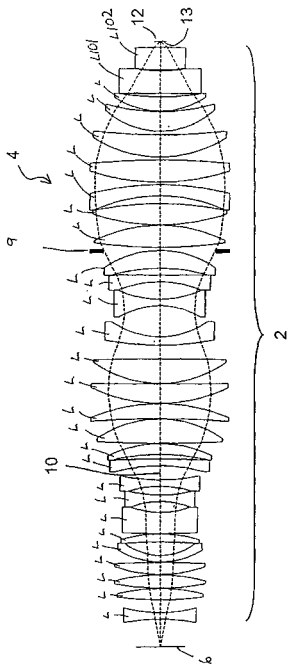
【 0 2 4 6 】

10

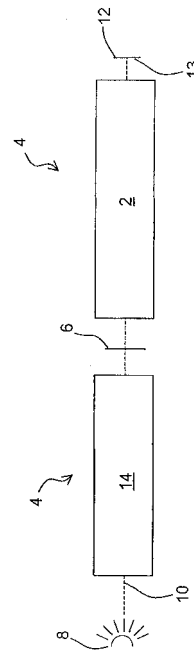
上記の説明は、本発明の原則を例示するものに過ぎない。したがって、当業者なら、本明細書には明示的に記載されておらずまたは図示されていないにもかかわらず、本発明の範囲及び趣旨内に含まれる様々な構成を考案できることが理解されよう。さらに、本明細書に示されたすべての実施例及び条件用語は主として、明示的に教示を目的としたものに過ぎず、本発明の原則、及び当技術分野を進展させるために発明者によって与えられる概念の理解を助けるものであり、制限なしにこのような具体的に示された実施例及び条件であると解釈されるものである。さらに、本発明の原則、態様、及び実施形態と、その特定の実施例を示した本明細書内のすべての記載は、その構造的均等物と機能的均等物の両方を含むものである。さらに、このような均等物は、現在公知の均等物と、将来開発される均等物、すなわち、構造とは無関係に同じ機能を実行する将来開発されるあらゆる要素との両方を含むものである。したがって、本発明の範囲は、本明細書で図示され記載された例示的な実施形態に限るものではない。むしろ、本発明の範囲及び趣旨は、添付の特許請求の範囲によって実現される。

20

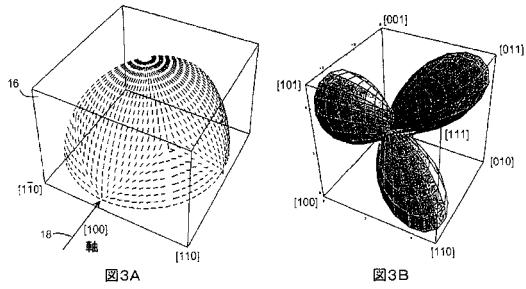
【 図 1 】



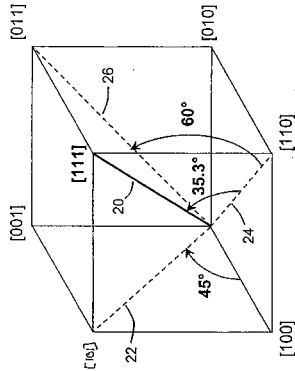
【 図 2 】



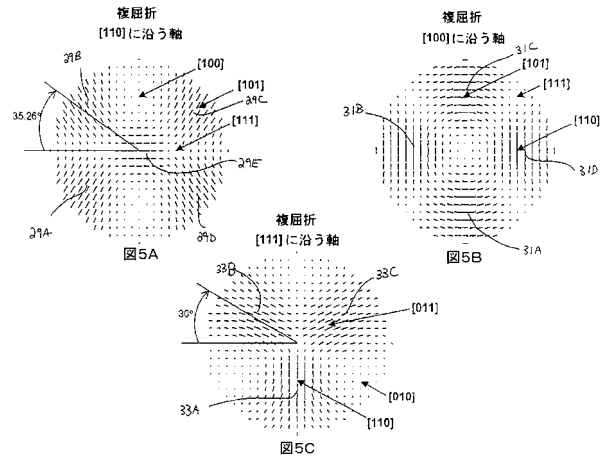
【 図 3 】



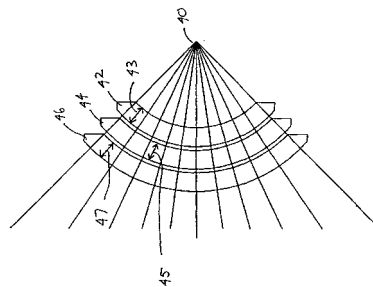
【 図 4 】



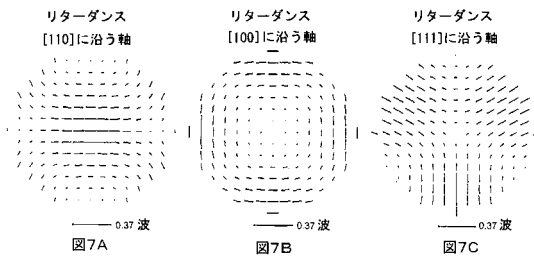
【 図 5 】



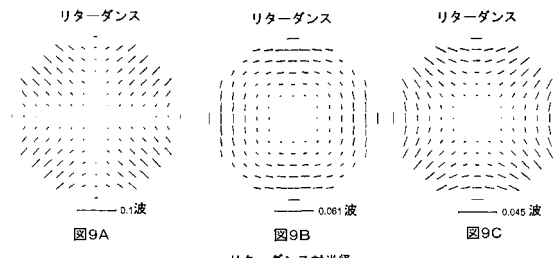
【 図 6 】



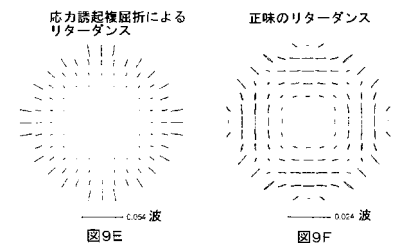
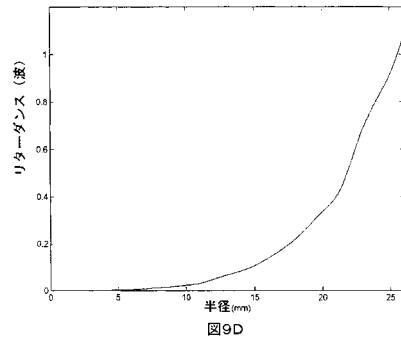
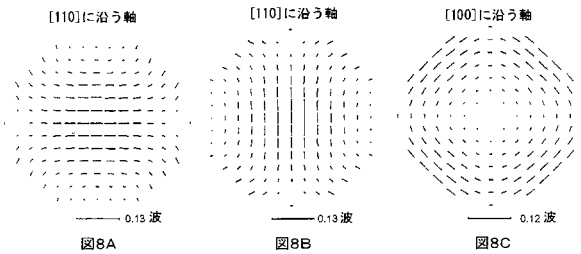
【 図 7 】



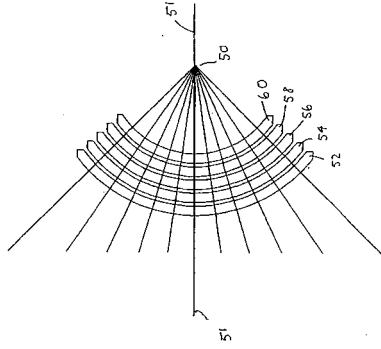
【 図 9 】



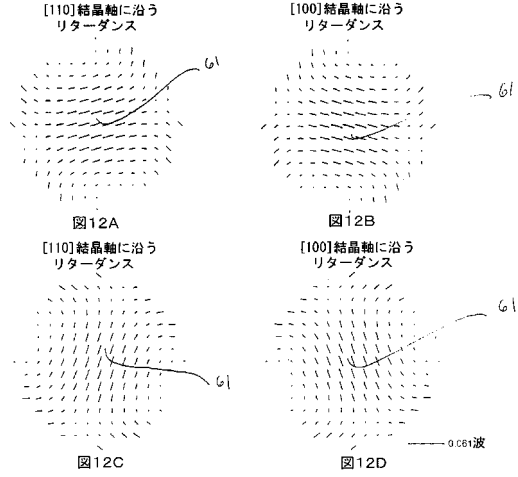
【 図 8 】



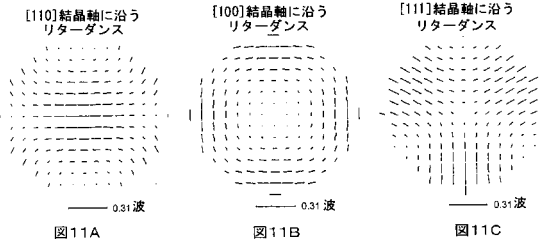
【図10】



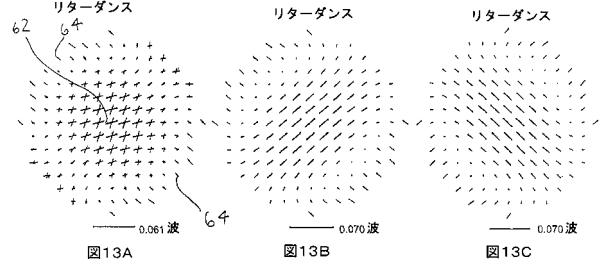
【図12】



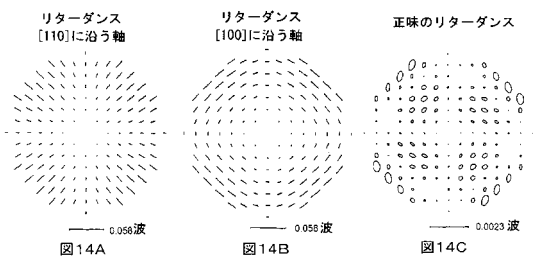
【図11】



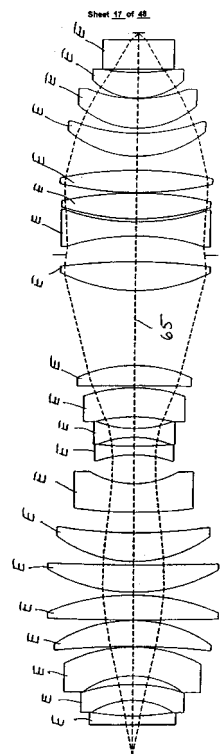
【図13】



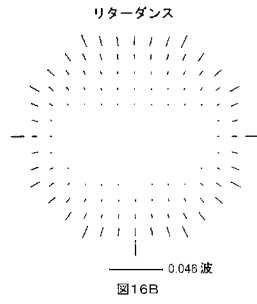
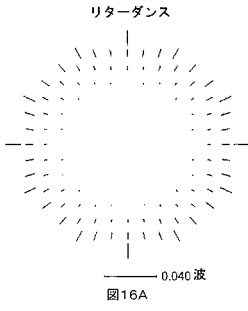
【図14】



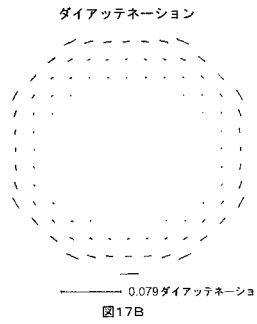
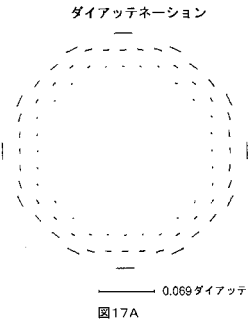
【図15】



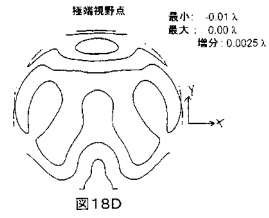
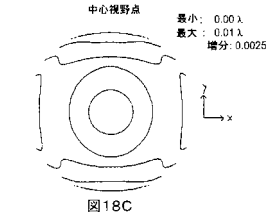
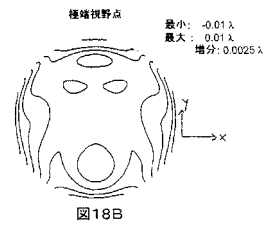
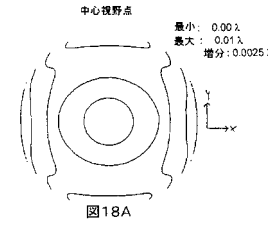
【図16】



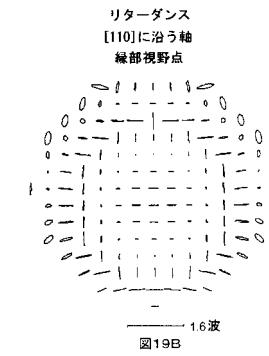
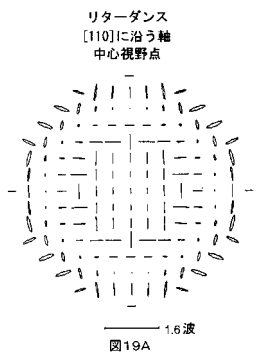
【図17】



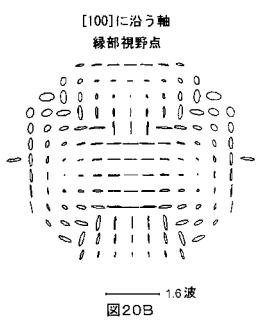
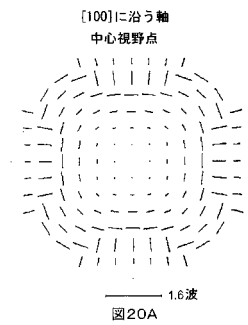
【図18】



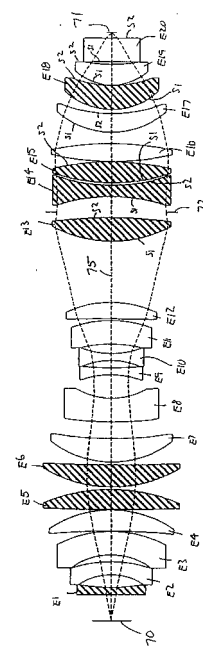
【図19】



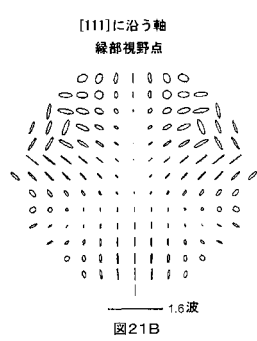
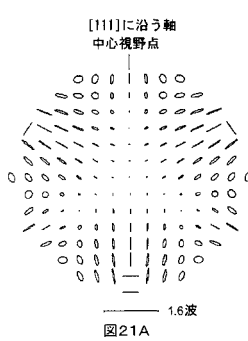
【図20】



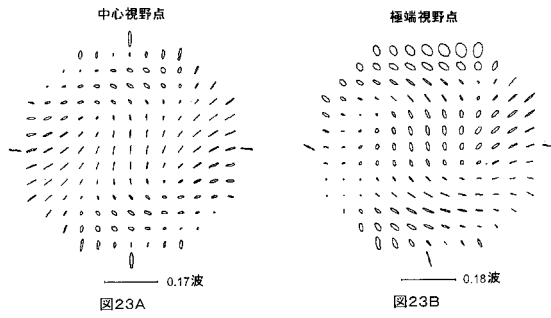
【図22】



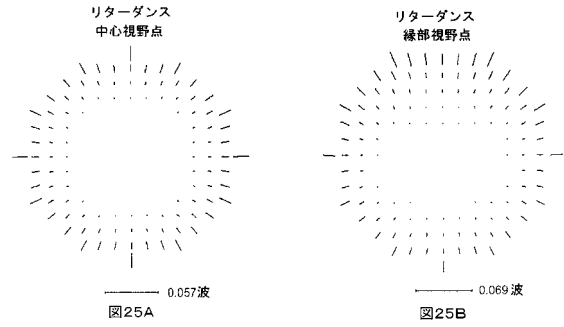
【図21】



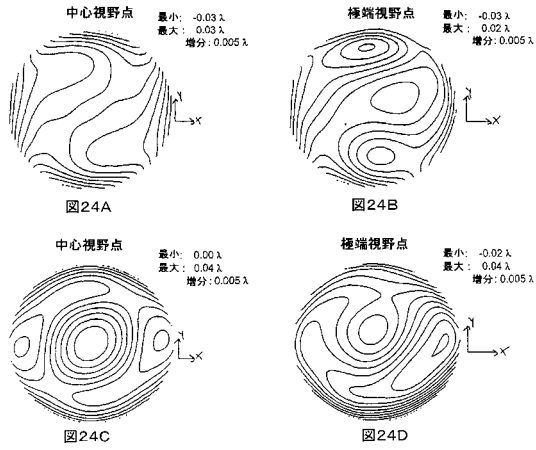
【図23】



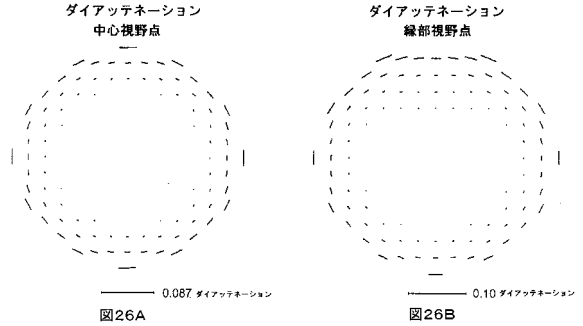
【図25】



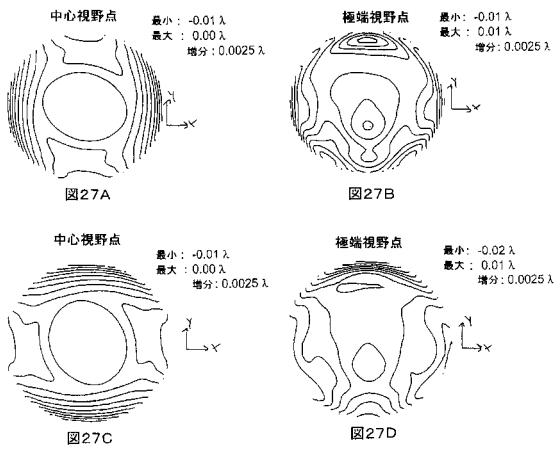
【図24】



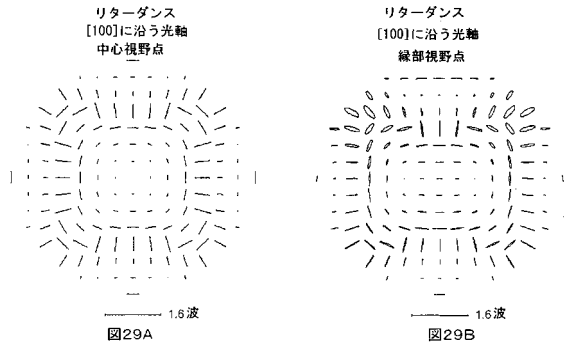
【図26】



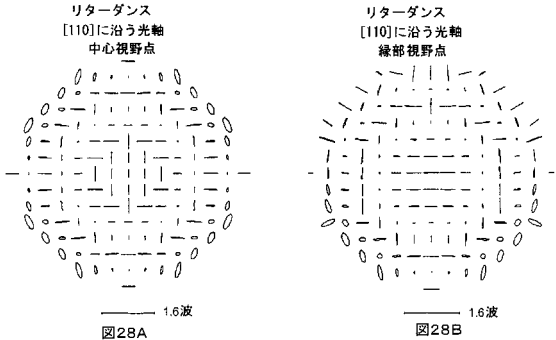
【図27】



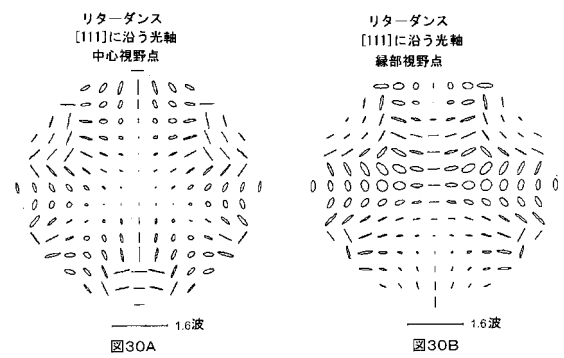
【図29】



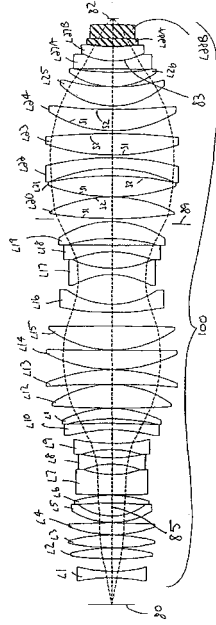
【図28】



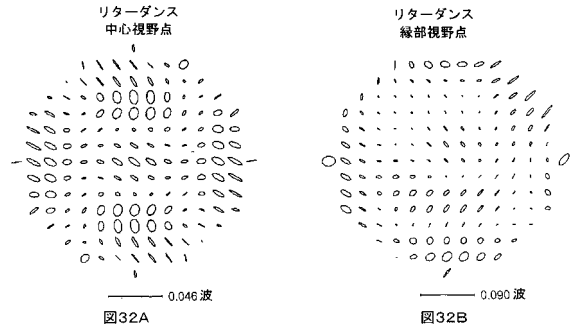
【図30】



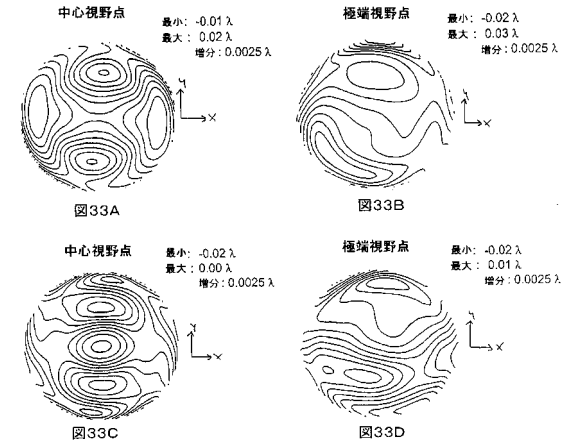
【図31】



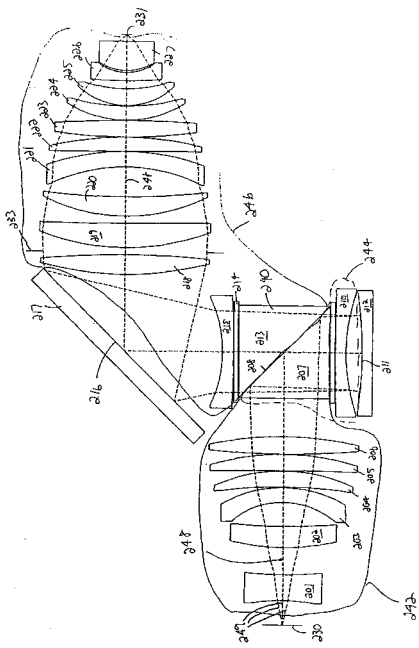
【図32】



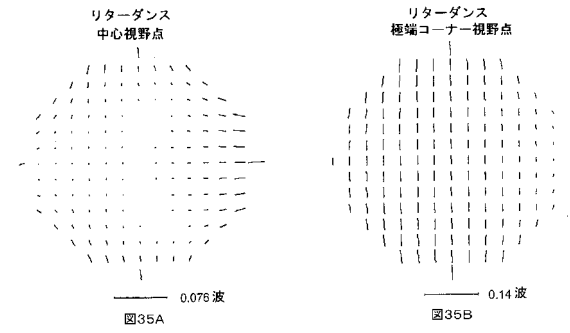
【図33】



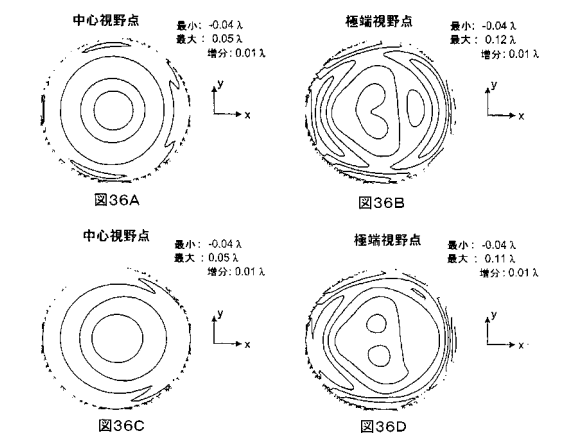
【図34】



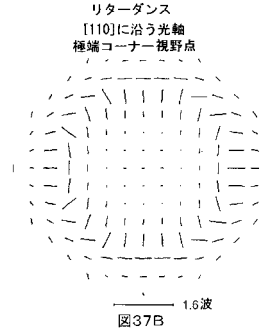
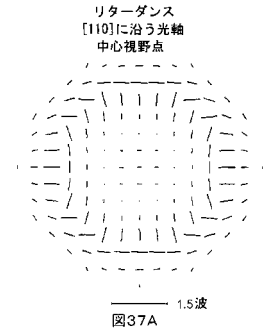
【図35】



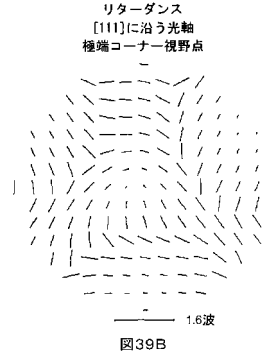
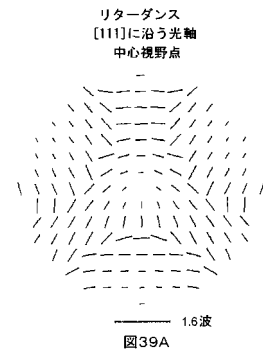
【図36】



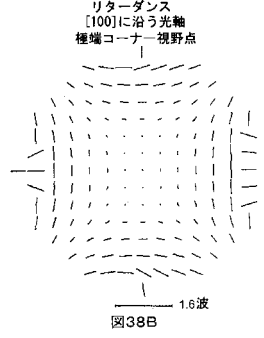
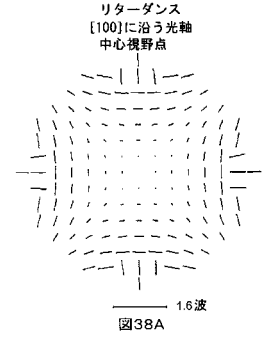
【図37】



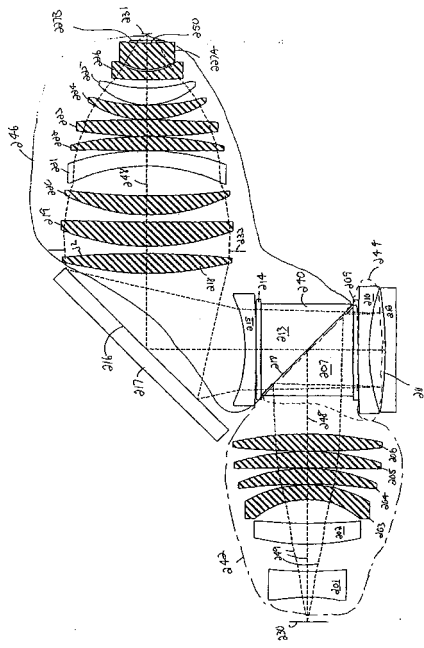
【図39】



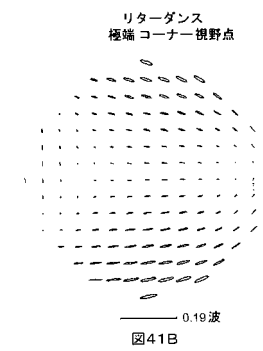
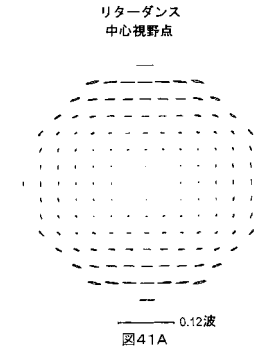
【図38】



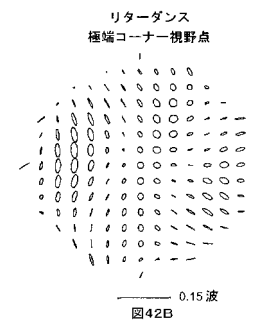
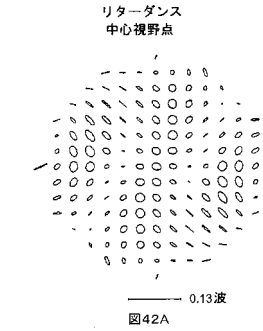
【図40】



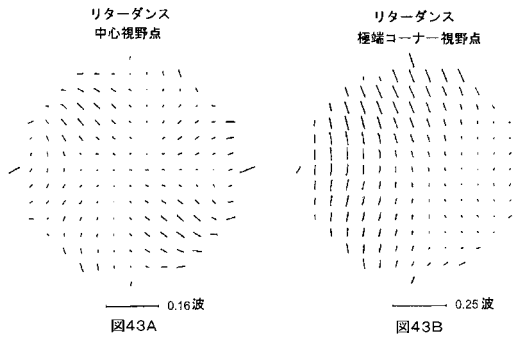
【図41】



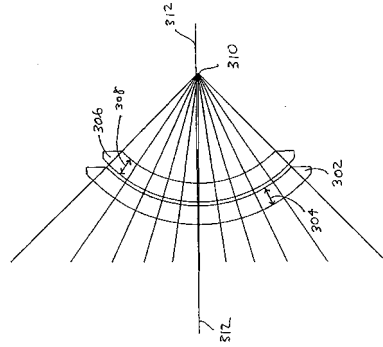
【図42】



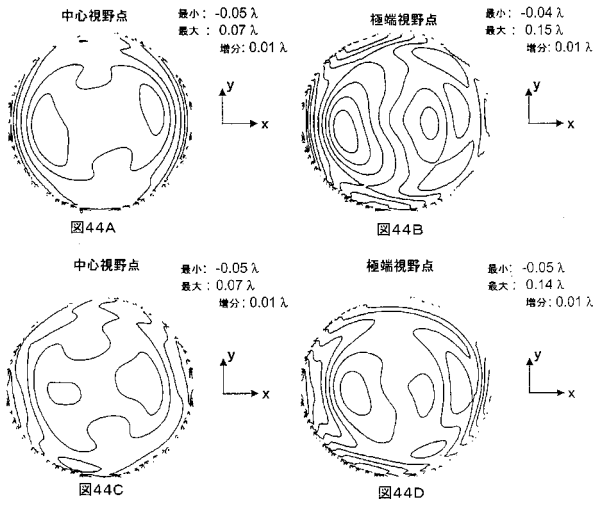
【図43】



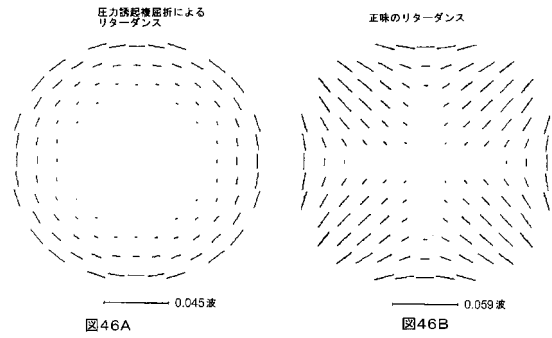
【図45】



【図44】



【図46】



フロントページの続き

- (31)優先権主張番号 60/299,497
(32)優先日 平成13年6月20日(2001.6.20)
(33)優先権主張国 米国(US)
(31)優先権主張番号 60/299,603
(32)優先日 平成13年6月20日(2001.6.20)
(33)優先権主張国 米国(US)
(31)優先権主張番号 60/335,093
(32)優先日 平成13年10月30日(2001.10.30)
(33)優先権主張国 米国(US)
(31)優先権主張番号 60/332,183
(32)優先日 平成13年11月21日(2001.11.21)
(33)優先権主張国 米国(US)
(31)優先権主張番号 10/071,375
(32)優先日 平成14年2月7日(2002.2.7)
(33)優先権主張国 米国(US)

- (72)発明者 マクガイア、 ジェイムズ ピー。
アメリカ合衆国 91105 カリフォルニア州 ペサディーナ カーウィー 1720

審査官 瀬川 勝久

- (56)参考文献 特開平11-054411(JP,A)
特開2000-331927(JP,A)
特開2003-050349(JP,A)
特表2004-526331(JP,A)
国際公開第2002/093209(WO,A1)
国際公開第2003/001271(WO,A1)
特許第4347686(JP,B2)

- (58)調査した分野(Int.Cl., DB名)
G02B 9/00 - 17/08