

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公表特許公報(A)

(11) 特許出願公表番号

特表2004-526331
(P2004-526331A)

(43) 公表日 平成16年8月26日(2004.8.26)

(51) Int. Cl. ⁷	F I	テーマコード (参考)
HO 1 L 21/027	HO 1 L 21/30 5 1 5 D	2 H O 8 7
GO 2 B 13/24	GO 2 B 13/24	5 F O 4 6
GO 2 B 17/08	GO 2 B 17/08 A	

審査請求 未請求 予備審査請求 有 (全 171 頁)

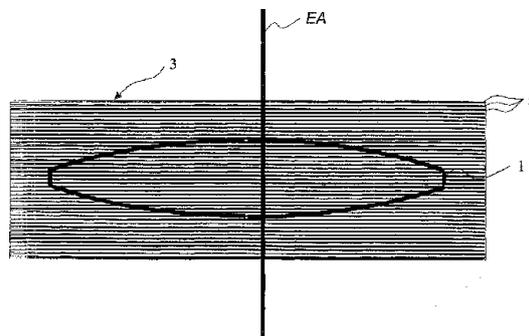
(21) 出願番号	特願2002-589833 (P2002-589833)	(71) 出願人	502057795 カール・ツァイス・エスエムテイ・アーゲー
(86) (22) 出願日	平成14年5月8日 (2002.5.8)		
(85) 翻訳文提出日	平成15年9月22日 (2003.9.22)		
(86) 国際出願番号	PCT/EP2002/005050		ドイツ連邦共和国・73447・オーベル コヒェン・カールツァイスシュトラ セ・22
(87) 国際公開番号	W02002/093209	(74) 代理人	100064621 弁理士 山川 政樹
(87) 国際公開日	平成14年11月21日 (2002.11.21)		
(31) 優先権主張番号	101 23 725.1	(72) 発明者	クレマー, ダニエル ドイツ連邦共和国・73431 アーレン ・ハイゲルシュトラセ・28
(32) 優先日	平成13年5月15日 (2001.5.15)		
(33) 優先権主張国	ドイツ (DE)	(72) 発明者	グルナー, トラルフ ドイツ連邦共和国・09122 ヒュムニ ッツ・ファレスカーマイニンク ーシュトラセ・128
(31) 優先権主張番号	101 23 727.8		
(32) 優先日	平成13年5月15日 (2001.5.15)		
(33) 優先権主張国	ドイツ (DE)		
(31) 優先権主張番号	101 25 487.3		
(32) 優先日	平成13年5月23日 (2001.5.23)		
(33) 優先権主張国	ドイツ (DE)		

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 フッ化物結晶レンズを含む対物レンズ

(57) 【要約】

少なくとも1つのフッ化物結晶レンズを持つ対物レンズ、それも特にマイクロリソグラフィ用投射照明装置向けの投射対物レンズ。複屈折の妨害的影響は、このレンズを、フッ化物結晶の{100}結晶平面またはこれと等価な結晶平面にほぼ垂直なレンズ軸を持つ(100)レンズとすることによって抑制される。少なくとも2つのフッ化物結晶レンズを持つ対物レンズの場合では、フッ化物結晶レンズを相互に捻れた状態で配置するのが好都合である。その場合フッ化物結晶レンズのレンズ軸は、(100)結晶方向のほか(111)または(110)結晶方向に向けることもできる。複屈折の妨害的影響は、相互に捻れ配置された(100)レンズのグループと相互に捻れ配置された(111)または(110)レンズのグループとを同時使用することによって一段と減少させることができる。複屈折の妨害的影響のさらなる減少は、光学素子の補償コーティングによって達成される。



【特許請求の範囲】

【請求項1】

多数のレンズ(L601~L630、L801~L817)、少なくとも1つのフッ化物結晶からのレンズ(1)を持つ対物レンズ(611、711)、特にマイクロリソグラフィ用投射照明装置(81)向けの投射対物レンズであって、少なくとも1つのレンズ(1)が、{100}結晶平面またはフッ化物結晶のそれと等価な結晶平面にほぼ垂直であるレンズ軸(EA)を持つ(100)レンズであることを特徴とする対物レンズ(611、711)。

【請求項2】

(100)レンズが対称軸を持つ回転対称なレンズであり、その対称軸が(100)レンズのレンズ軸(EA)と重なる請求項1に記載の対物レンズ(611、711)。 10

【請求項3】

(100)レンズのレンズ軸が対物レンズ(611、711)の光軸(OA)と重なる請求項1ないし2のいずれか一項に記載の光軸(OA)を持つ対物レンズ(611、711)。

【請求項4】

対物レンズ(611、711)内で光線が対象物平面(O)から像平面(O')に通っていて、(100)レンズ内で少なくとも1つの光線(609、713、715)がレンズ軸に対し25°を超える、とりわけ30°を超える光線角を形成している請求項1ないし3のいずれか一項に記載の対物レンズ(611、711)。 20

【請求項5】

対物レンズ(611、711)内で光線が対象物平面(O)から像平面(O')に通っていて、NAを像側開口数、 n_{FK} をフッ化物結晶の屈折率としたとき、(100)レンズ内ですべての光線がレンズ軸に対し最高45°、とりわけ最高 $\arcsin(NA/n_{FK})$ の光線角を形成している請求項1ないし4のいずれか一項に記載の対物レンズ(611、711)。

【請求項6】

絞り平面(APE)と(100)レンズがそれぞれある直径を有しており、レンズ直径が絞り直径の85%未満、とりわけ80%未満である請求項1ないし5のいずれか一項に記載の絞り平面(APE)を持つ対物レンズ(611、711)。 30

【請求項7】

(100)レンズ(L630、L817)が像平面(O')に最も近いレンズである請求項1ないし6のいずれか一項に記載の像平面(O')を持つ対物レンズ(611、711)。

【請求項8】

それぞれがほぼ主結晶方向に向いているレンズ軸を持つ、フッ化物結晶から成る少なくとも2つのレンズまたはレンズ部品を有していて、その際にそれぞれ方位角 θ_R 、開口角 θ_R および互いに直交する2つの直線偏光状態における光路差OPLを示す光線を含む光線束が像平面(O')の像点に入射する対物レンズ(611、711)、それも特にマイクロリソグラフィ用投射照明装置向けの投射対物レンズであって、レンズ軸が同一の主結晶方向に向いていて、レンズ軸の周りに相互に捻れた状態で配置されているのではないレンズまたはレンズ部品と比較して、方位角 θ_R および開口角 θ_R の関数としての光線束の光路差分布OPL(θ_R 、 θ_R)が大幅に低い値を示すように、レンズまたはレンズ部品がレンズ軸の周りに捻れた状態で配置されていることを特徴とする対物レンズ(611、711)。 40

【請求項9】

所定の開口角 θ_0 に対して方位角 θ_R の関数としての光路差OPLが30%未満、とりわけ20%未満の範囲を変動する請求項8に記載の対物レンズ(611、711)。

【請求項10】

レンズまたはレンズ部品それぞれが複屈折分布 $n(L, L)$ を示し、その場合その複 50

屈折値 n がレンズ軸に垂直な基準方向に対する方位角 θ_L およびレンズ軸に対する開口角 θ_R に依存している、

複屈折分布 $n(\theta_L, \theta_R)$ が k 方位対称を有している、

個々のレンズまたはレンズ部品の基準方向間で回転角 α が決められ、 n 個のレンズまたは n 個のレンズ部品のいくつかは 1 グループを形成し、それらのレンズ軸が同一の主結晶方向またはそれと等価な主結晶方向を向き、複屈折分布 $n(\theta_L, \theta_R)$ が基準方向に対し同一の方位経過を示しており、 m を整数としたとき、同グループのそれぞれ 2 つずつのレンズまたはレンズ部品間における回転角 β について

$\beta = 360^\circ / (k \cdot n) + m \cdot 360^\circ / k \pm 10^\circ$ が成り立つ請求項 8 または 9 のいずれか一項に記載の対物レンズ (611、711)。

10

【請求項 11】

レンズ内またはレンズ部品内にある光線束の最外開口光線 (609、713、715) がそれぞれ開口角 θ_L を取り、当該グループのレンズ内またはレンズ部品内における開口角 θ_L が最大 30%、とりわけ最大 20% 変動する請求項 10 に記載の対物レンズ。

【請求項 12】

レンズ内またはレンズ部品内にある光線束の最外開口光線 (609、713、715) がそれぞれ光路 R_{L_L} 分進行し、当該グループのレンズ内またはレンズ部品内における光路 R_{L_L} が最大 30%、とりわけ最大 20% 変動する請求項 10 または 11 のいずれか一項に記載の対物レンズ (611、711)。

【請求項 13】

同グループの個々のレンズまたはレンズ部品において回転角 $\alpha = 0^\circ$ で測定した、光線束の最外開口光線 (609、713、715) についての光路差 OPL が 30%、とりわけ 20% 変動する請求項 10 ないし 12 のいずれか一項に記載の対物レンズ (611、711)。

20

【請求項 14】

グループが 2 ~ 4 つのレンズまたはレンズ部品を有している請求項 10 ないし 13 のいずれか一項に記載の対物レンズ (611、711)。

【請求項 15】

同グループのレンズ (L629、L630) またはレンズ部品が隣接して配置されている、とりわけ相互に圧着されている請求項 14 に記載の対物レンズ (611、711)。

30

【請求項 16】

レンズまたはレンズ部品それぞれが複屈折分布 $n(\theta_L, \theta_R)$ を呈し、その場合その複屈折値 n がレンズ軸に垂直な基準方向に対する方位角 θ_L およびレンズ軸に対する開口角 θ_R に依存している、

複屈折分布 $n(\theta_L, \theta_R)$ が k 方位対称を有している、

個々のレンズまたはレンズ部品の基準方向間で回転角 α が決められ、 n 個の従グループが 1 グループを形成し、そのレンズまたはレンズ部品のレンズ軸が同一の主結晶方向またはそれと等価な主結晶方向を向いており、複屈折分布 $n(\theta_L, \theta_R)$ が基準方向に対し同一の方位経過を示しており、 n 個の従グループがそれぞれ少なくとも 1 つのレンズまたはレンズ部品を有しており、

40

l を整数としたとき、同従グループのレンズまたはレンズ部品間における回転角 β について $\beta = l \cdot 360^\circ / k \pm 10^\circ$ が成り立ち、

m を整数としたとき、異なった従グループからのそれぞれ 2 つのレンズまたはレンズ部品間における回転角 γ について

$$\gamma = 360^\circ / (k \cdot n) + m \cdot 360^\circ / k \pm 10^\circ$$

が成り立つ請求項 8 または 9 のいずれか一項に記載の対物レンズ (611、711)。

【請求項 17】

対物レンズ (611、711) が、それぞれ相互に捻れ配置されたレンズまたはレンズ部品を持つ、少なくとも 2 つのグループを有している請求項 10 ないし 16 のいずれか一項に記載の対物レンズ (611、711)。

50

【請求項 18】

レンズ軸が $\langle 111 \rangle$ 結晶方向またはそれと等価な主結晶方向に向いており、レンズまたはレンズ部品の複屈折分布 $n(\theta_L, \theta_L)$ が 3 方位対称を示している請求項 8 ないし 17 のいずれか一項に記載の対物レンズ (611、711)。

【請求項 19】

レンズ軸が $\langle 100 \rangle$ 結晶方向またはそれと等価な主結晶方向に向いており、レンズまたはレンズ部品の複屈折分布 $n(\theta_L, \theta_L)$ が 4 方位対称を示している請求項 8 ないし 17 のいずれか一項に記載の対物レンズ (611、711)。

【請求項 20】

レンズ軸が $\langle 110 \rangle$ 結晶方向またはそれと等価な主結晶方向に向いており、レンズまたはレンズ部品の複屈折分布 $n(\theta_L, \theta_L)$ が 2 方位対称を示している請求項 8 ないし 17 のいずれか一項に記載の対物レンズ (611、711)。 10

【請求項 21】

第 1 グループのレンズまたはレンズ部品のレンズ軸が $\langle 100 \rangle$ 結晶方向またはそれと等価な主結晶方向に向いており、第 2 グループのレンズまたはレンズ部品のレンズ軸が $\langle 111 \rangle$ 結晶方向またはそれと等価な主結晶方向に向いている請求項 8 ないし 20 のいずれか一項に記載の対物レンズ (611、711)。

【請求項 22】

第 1 グループのレンズまたはレンズ部品のレンズ軸が $\langle 100 \rangle$ 結晶方向またはそれと等価な主結晶方向に向いており、第 2 グループのレンズまたはレンズ部品のレンズ軸が $\langle 110 \rangle$ 結晶方向またはそれと等価な主結晶方向に向いている請求項 8 ないし 20 のいずれか一項に記載の対物レンズ (611、711)。 20

【請求項 23】

光路差分布 $OP L(\theta_R, \theta_R)$ が、第 1 グループ全体のレンズおよびレンズ部品に起因する第 1 光路差分布 $OP L_1(\theta_R, \theta_R)$ と第 2 グループ全体のレンズおよびレンズ部品に起因する第 2 光路差分布 $OP L_2(\theta_R, \theta_R)$ から合成されており、第 1 光路差分布 $OP L_1(\theta_R, \theta_R)$ の最大値が第 2 光路差分布 $OP L_2(\theta_R, \theta_R)$ の最大値と最大 30%、とりわけ最大 20% 異なっている請求項 21 または 22 のいずれか一項に記載の対物レンズ (611、711)。

【請求項 24】

レンズまたはレンズ部品が光学面を持つ多数の光学素子に属しており、その際に少なくとも 1 つの光学面が補償コーティング (613) でコートされており、その補償コーティング (613) が、方位角 θ_R と開口角 θ_R の関数としての光線束の光路差分布 $OP L(\theta_R, \theta_R)$ が補償コーティングなしの対物レンズに比較して大幅に低い値を示すように構成されている請求項 8 ないし 23 のいずれか一項に記載の対物レンズ (611)。 30

【請求項 25】

補償コーティング (613) を施された光学素子 (L630) が素子軸を有し、その補償コーティング (613) が実効複屈折分布を示している、ただし、その実効複屈折値が素子軸に垂直な基準方向に対する方位角 θ_F および素子軸に対する開口角 θ_F に依存している請求項 24 に記載の対物レンズ (611)。 40

【請求項 26】

開口角 $\theta_F = 0^\circ$ における補償コーティング (613) の実効複屈折分布がほぼ 0 である請求項 25 に記載の対物レンズ (611)。

【請求項 27】

実効複屈折分布が一次的には開口角 θ_F にのみ依存する請求項 25 および 26 のいずれか一項に記載の対物レンズ (611)。

【請求項 28】

補償コーティング (613) のなされた光学素子 (L630) がフッ化物結晶から成るレンズの 1 つであり、素子軸がフッ化物結晶からなるレンズのレンズ軸である請求項 24 ないし 27 のいずれか一項に記載の対物レンズ (611)。 50

【請求項 29】

複数の光学素子に補償コーティングが施されている請求項 24 ないし 28 のいずれか一項に記載の対物レンズ (611)。

【請求項 30】

すべての光学素子に補償コーティングが施されている請求項 24 ないし 29 のいずれか一項に記載の対物レンズ (611)。

【請求項 31】

フッ化物結晶がフッ化カルシウム結晶、フッ化ストロンチウム結晶またはフッ化バリウム結晶である請求項 1 ないし 30 のいずれか一項に記載の対物レンズ (611、711)。

【請求項 32】

互いに直交する 2 つの直線偏光状態においてそれぞれ光路差 $OP L$ が現われる光線を含む光線束が像面 (O') において像点に入射する場合での光学面を持つ複数の光学素子、なかでもフッ化物結晶からのレンズを擁する対物レンズ (611)、それも特にマイクロリソグラフィ用投射照明装置向けの投射対物レンズであって、少なくとも 1 つの光学面が補償コーティング (613) されており、その場合光線束の光路差 $OP L$ が、補償コーティングのなされていない対物レンズの場合に比較して大幅に低い値を示すように、補償コーティングが構成されていることを特徴とする対物レンズ (611)。

10

【請求項 33】

補償コーティング (613) のなされた光学素子 ($L630$) が素子軸を有し、その補償コーティング (613) が実効複屈折分布を示しており、その実効複屈折値が素子軸に垂直な基準方向に対する方位角 F および素子軸に対する開口角 F に依存している請求項 32 に記載の対物レンズ (611)。

20

【請求項 34】

開口角 $F = 0^\circ$ における補償コーティング (613) の実効複屈折分布がほぼ 0 である請求項 33 に記載の対物レンズ (611)。

【請求項 35】

補償コーティング (613) の実効複屈折分布が一次的には開口角 F に応じた請求項 33 および 34 のいずれか一項に記載の対物レンズ (611)。

【請求項 36】

補償コーティング (613) のなされた光学素子 ($L630$) が取り換え可能である請求項 33 ないし 37 のいずれか一項に記載の対物レンズ (611)。

30

【請求項 37】

少なくとも 2 つの光学素子がフッ化物結晶からなるレンズまたはレンズ部品であり、そのレンズまたはレンズ部品がレンズ軸を有していて、その際に、レンズ軸が同一の主結晶方向に向いた、レンズ軸の周りに相互に捻れ配置されていないレンズまたはレンズ部品に比較して、方位角 R および開口角 R の関数としての光路差分布 $OP L (R, R)$ が大幅に低い値を示すように、レンズまたはレンズ部品がレンズ軸の周りに相互に捻れた状態で配置されている請求項 32 ないし 36 のいずれか一項に記載の対物レンズ (611)。

40

【請求項 38】

所定の開口角 0 における方位角 R の関数としての光路差 $OP L$ が 30% 未満、特に 20% 未満の範囲で変動する請求項 37 に記載の対物レンズ (611)。

【請求項 39】

レンズまたはレンズ部品それぞれが複屈折分布 $n (L, L)$ を示し、その際に、その複屈折値 n がレンズ軸に垂直な基準方向に対する方位角 L およびレンズ軸に対する開口角 R に依存しており、

複屈折分布 $n (L, L)$ が k 方位対称を有しており、

個々のレンズまたはレンズ部品の基準方向間で回転角 θ が定義され、 n 個のレンズまたは n 個のレンズ部品のいくつかは 1 グループを形成し、それらのレンズ軸が同一の主結晶方

50

向またはそれと等価な主結晶方向を向いており、複屈折分布 $n(\theta_L, \phi_L)$ が基準方向に対し同一の方位経過を示しており、 m を整数としたとき、同グループのそれぞれ2つずつのレンズまたはレンズ部品間における回転角 θ について

$$\theta = 360^\circ / (k \cdot n) + m \cdot 360^\circ / k \pm 10^\circ$$

が成り立つ請求項37または38のいずれか一項に記載の対物レンズ(611)。

【請求項40】

レンズまたはレンズ部品それぞれが複屈折分布 $n(\theta_L, \phi_L)$ を示し、その場合その複屈折値 n がレンズ軸に垂直な基準方向に対する方位角 θ_L およびレンズ軸に対する開口角 ϕ_R に依存しており、

複屈折分布 $n(\theta_L, \phi_L)$ が k 方位対称を有しており、

10

個々のレンズまたはレンズ部品の基準方向間で回転角 θ が定義され、 n 個の従グループのいくつかは1グループを形成し、そのレンズまたはレンズ部品のレンズ軸が同一の主結晶方向またはそれと等価な主結晶方向を向いており、複屈折分布 $n(\theta_L, \phi_L)$ が基準方向に対し同一の方位経過を示しており、 n 個の従グループがそれぞれ少なくとも1つのレンズまたはレンズ部品を有しており、

l を整数としたとき、同従グループのレンズまたはレンズ部品間における回転角 θ について $\theta = l \cdot 360^\circ / k \pm 10^\circ$ が成り立ち、

m を整数としたとき、異なった従グループからのそれぞれ2つのレンズまたはレンズ部品間における回転角 θ について

$$\theta = 360^\circ / (k \cdot n) + m \cdot 360^\circ / k \pm 10^\circ$$

20

が成り立つ請求項37または38のいずれか一項に記載の対物レンズ(611)。

【請求項41】

補償コーティング(613)を施された光学素子(L630)がフッ化物結晶からなるレンズであり、素子軸がフッ化物結晶からなるレンズのレンズ軸である請求項37ないし40のいずれか一項に記載の対物レンズ(611)。

【請求項42】

複数の光学素子に補償コーティングが施されている請求項32ないし41のいずれか一項に記載の対物レンズ(611)。

【請求項43】

対物レンズ(611、711)が像側の開口数 NA を持ち、その像側開口数 NA が 0.7 より大きく、特に 0.8 より大きい請求項1ないし42のいずれか一項に記載の対物レンズ(611、711)。

30

【請求項44】

対物レンズ(611、711)が 200 nm 未満の波長向けに設計されている請求項1ないし43のいずれか一項に記載の対物レンズ(611、711)。

【請求項45】

対物レンズ(611、711)が 160 nm 未満の波長向けに設計されている請求項1ないし44のいずれか一項に記載の対物レンズ(611、711)。

【請求項46】

対物レンズ(611)が屈折性の対物レンズである請求項1ないし45のいずれか一項に記載の対物レンズ(611)。

40

【請求項47】

対物レンズ(711)がレンズおよび少なくとも1つのミラー(Sp2)を持つ反射屈折性の対物レンズ(711)である請求項1ないし45のいずれか一項に記載の対物レンズ(711)。

【請求項48】

すべてのレンズがフッ化カルシウム製である請求項1ないし47のいずれか一項に記載の対物レンズ(611、711)。

【請求項49】

照明システム(83)、

50

マスク(89)の持つ構造を感光性基板(815)に結像させる請求項1ないし48のいずれか一項に記載の対物レンズ(85)を有するマイクロリソグラフィ用投射照明装置(81)。

【請求項50】

請求項49に記載のマイクロリソグラフィ用投射照明装置(81)による半導体構成素子の製造方法。

【請求項51】

それぞれほぼ主結晶方向に向いたレンズ軸を持つ、フッ化物結晶から成る少なくとも2つのレンズまたはレンズ部品を有する対物レンズ(611、711)、特にマイクロリソグラフィ用投射照明装置向けの投射対物レンズの製造方法であって、

10

それぞれ方位角 θ_R 、開口角 ϕ_R および互いに直交する2つの直線偏光状態における像平面での光路差OPLを示す光線を含む光線束について、レンズまたはレンズ部品における光路差分布OPL(θ_R 、 ϕ_R)が測定されること、レンズ軸が同一の主結晶方向に向いていて、レンズ軸の周りに相互に捻れた状態で配置されているのではないレンズまたはレンズ部品に比較して、光線束の光路差分布OPL(θ_R 、 ϕ_R)が大幅に低い値を示すように、レンズまたはレンズ部品がレンズ軸の周りに捻れた状態で配置されていることを特徴とする方法。

【請求項52】

対物レンズ(611、711)がレンズまたはレンズ部品を含む第1グループおよびレンズまたはレンズ部品を含む第2グループを有しており、第1グループのレンズまたはレンズ部品のレンズ軸が $\langle 100 \rangle$ 結晶方向またはそれと等価な主結晶方向に向いており、第2グループのレンズまたはレンズ部品のレンズ軸が $\langle 111 \rangle$ 結晶方向またはそれと等価な主結晶方向に向いている請求項51に記載の方法。

20

【請求項53】

対物レンズ(611、711)がレンズまたはレンズ部品を含む第1グループおよびレンズまたはレンズ部品を含む第2グループを有しており、第1グループのレンズまたはレンズ部品のレンズ軸が $\langle 100 \rangle$ 結晶方向またはそれと等価な主結晶方向に向いており、第2グループのレンズまたはレンズ部品のレンズ軸が $\langle 110 \rangle$ 結晶方向またはそれと等価な主結晶方向に向いている請求項51に記載の方法。

【請求項54】

それぞれ方位角 θ_R 、開口角 ϕ_R および互いに直交する2つの直線偏光状態における像平面での光路差OPLを示す光線を含む光線束について、光路差分布OPL(θ_R 、 ϕ_R)が測定され、

30

その光路差分布OPL(θ_R 、 ϕ_R)から、光路差分布OPL(θ_R 、 ϕ_R)縮小のための補償コーティングの実効複屈折分布が測定され、

その補償コーティングの実効複屈折値が、光学素子の素子軸に垂直な基準方向を基準とした方位角 θ_F および素子軸を基準とした開口角 ϕ_F に依存しており、その複屈折分布から補償コーティング(613)の構成が決定され、

対物レンズ(611)の光学素子(L630)に補償コーティング(613)が施される請求項51ないし53のいずれか一項に記載の方法。

40

【請求項55】

対物レンズ(611)が光学面を持つ複数の光学素子、特にフッ化物結晶からなるレンズを有し、

少なくとも1つの光学素子(L630)が取り換え可能であり、

それぞれ方位角 θ_R 、開口角 ϕ_R および互いに直交する2つの直線偏光状態における像平面での光路差OPLを示す光線を含む光線束が像面(O')において像点に入射し、

光路差分布OPL(θ_R 、 ϕ_R)が測定され、

その光路差分布OPL(θ_R 、 ϕ_R)から、補償コーティング(613)の実効複屈折分布が測定され、その実効複屈折値が、光学素子の素子軸に垂直な基準方向を基準とした方位角 θ_F および素子軸を基準とした開口角 ϕ_F に依存しており、その実効複屈折分布から補

50

償コーティング(613)の構成が決定され、取り換え可能な光学素子(L630)が対物レンズから取り除かれ、

取り換え可能な光学素子(L630)に補償コーティング(613)が施され、補償コーティング(613)を施された取り換え可能な光学素子(L630)が再び対物レンズ(611)に組み込まれる、対物レンズ(611)における、特にマイクロリソグラフィ用投射照明装置向けの投射対物レンズにおける複屈折作用の補償のための方法。

【請求項56】

結晶方位が相互に捻れた位置関係の結晶素材、好ましくはフッ化物結晶、特にフッ化カルシウムから成る複数の平板が、光学的に継目なく接合され、それも特に圧着され、引き続き一様な未加工材として成形加工され、研磨されることを特徴とするレンズ製造方法。

10

【請求項57】

平板それぞれが複屈折分布 $n(\theta_L, \phi_L)$ を示し、その際に、その複屈折値 n が、レンズ軸に垂直な基準方向に対する方位角 θ_L およびレンズ軸に対する開口角 ϕ_R に依存して、しかも k 方位対称を持ち、

n 枚の平板の面法線が同一の主結晶方向またはそれと等価な主結晶方向を向いており、複屈折分布 $n(\theta_L, \phi_L)$ が基準方向に対し同一の方位経過を示し、

その場合個別平板の基準方向間で回転角 α が決められ、 m を整数としたとき、2枚の平板間の回転角 β について

$$\beta = 360^\circ / (k \cdot n) + m \cdot 360^\circ / k \pm 10^\circ$$

が成り立つ請求項56に記載のレンズ製造方法。

20

【請求項58】

2枚の平板が継目なく接合される請求項57に記載のレンズ製造方法。

【請求項59】

平板がほぼ同じ厚さになる請求項57および58のいずれか一項に記載のレンズ製造方法。

【請求項60】

第1平板の面法線が $\langle 111 \rangle$ 結晶方向またはそれと等価な主結晶方向に向いており、第2平板の面法線が $\langle 100 \rangle$ 結晶方向またはそれと等価な主結晶方向に向いている請求項56ないし59のいずれか一項に記載のレンズ製造方法。

【請求項61】

第1平板がそれぞれほぼ同じ第1の厚さを持ち、第2平板がそれぞれほぼ同じ第2の厚さを持ち、第2の厚さの総和に対する第1の厚さの総和の比が 1.5 ± 0.2 である請求項60に記載のレンズ製造方法。

30

【請求項62】

第1平板の面法線が $\langle 110 \rangle$ 結晶方向またはそれと等価な主結晶方向に向いており、第2平板の面法線が $\langle 100 \rangle$ 結晶方向またはそれと等価な主結晶方向に向いている請求項56ないし59のいずれか一項に記載のレンズ製造方法。

【請求項63】

第1平板がそれぞれほぼ同じ第1の厚さを持ち、第2平板がそれぞれほぼ同じ第2の厚さを持ち、第2の厚さの総和に対する第1の厚さの総和の比が 4.0 ± 0.4 である請求項62に記載のレンズ製造方法。

40

【請求項64】

2枚の第1平板が1枚の第2平板と光学的に継目なく接合される請求項62および63のいずれか一項に記載のレンズ製造方法。

【請求項65】

4枚の第1平板が2枚の第2平板と光学的に継目なく接合される請求項62および63のいずれか一項に記載のレンズ製造方法。

【請求項66】

請求項56ないし65のいずれか一項に記載の製造を特徴とするレンズ。

【請求項67】

50

請求項 6 6 に記載のレンズを含むことを特徴とする対物レンズ (6 1 1 、 7 1 1) 、特にマイクロリソグラフィ用投射照明装置 (8 1) 向けの投射対物レンズ。

【請求項 6 8】

請求項 6 6 に記載のレンズ (L 6 2 9 、 L 6 3 0) を含むことを特徴とする請求項 1 ないし 4 8 の少なくとも一項に記載のレンズ (6 1 1 、 7 1 1) 。

【請求項 6 9】

対物レンズ (6 1 1 、 7 1 1) 、特にマイクロリソグラフィ用投射照明装置向けの投射対物レンズに使用されるレンズまたはレンズ部品の製造における予備段階として、立方晶系構造を持つ結晶素材から光学未加工品を製造するための方法であって、下記の作業ステップ、すなわち

- a) 結晶構造内部で決められている配向した第 1 結晶方向の方位を決定すること、
- b) 第 1 結晶方向が光学未加工品の光学未加工面に対してほぼ垂直になるように光学未加工品を加工すること、
- c) 基準方向は第 1 結晶方向に垂直な位置にある平面への第 2 結晶方向の投射であり、第 1 結晶方向と第 2 結晶方向は 0° とは異なる角度をなすものとして第 1 結晶方向に垂直な基準方向を決定すること、
- d) 光学未加工品または光学未加工品の保持フレームに基準方向をマーキングすることを特徴とする方法。

【請求項 7 0】

第 1 結晶方向の位置が、この第 1 結晶方向に対応する第 1 結晶平面群のブラッグ反射の方向の測定によって決定される請求項 6 9 に記載の方法。

【請求項 7 1】

第 1 結晶軸の位置が、光学未加工品の入射面に垂直な軸を基準に相互に捻れた位置にある複数の測定位置において計測された、結晶平面群のブラッグ反射方向の比較により決定される請求項 7 0 に記載の方法。

【請求項 7 2】

第 1 結晶方向が、 $\langle 100 \rangle$ 結晶方向または $\langle 111 \rangle$ 結晶方向または $\langle 110 \rangle$ 結晶方向またはこれらの結晶方向と等価な結晶方向に向いている請求項 6 9 ないし 7 1 のいずれか一項に記載の方法。

【請求項 7 3】

結晶素材がフッ化カルシウム、フッ化ストロンチウムまたはフッ化バリウムである請求項 6 9 ないし 7 2 のいずれか一項に記載の方法。

【請求項 7 4】

基準方向の位置が、第 2 結晶軸に対応する結晶平面グループのブラッグ反射の方向測定によって決定される請求項 6 9 ないし 7 3 のいずれか一項に記載の方法。

【請求項 7 5】

基準方向の位置がラウエ法を利用して決定される請求項 6 9 ないし 7 3 のいずれか一項に記載の方法。

【請求項 7 6】

第 1 結晶方向に対して垂直な位置にある平面への投射が、基準方向に対して平行になる光線が、互いに直交する 2 つの直線偏光状態において最大または最小の光路差を示す請求項 6 9 ないし 7 5 のいずれか一項に記載の方法。

【請求項 7 7】

第 1 結晶軸が $\langle 100 \rangle$ 結晶方向または $\langle 111 \rangle$ 結晶方向またはそれと等価な結晶方向に向いており、第 1 結晶方向に垂直な位置にある平面への第 2 結晶方向の投射が、第 1 結晶方向に垂直な位置にある平面への $\langle 110 \rangle$ 結晶方向またはそれと等価な結晶方向の投射に平行になる請求項 6 9 ないし 7 6 のいずれか一項に記載の方法。

【請求項 7 8】

第 1 結晶軸が $\langle 111 \rangle$ 結晶方向またはそれと等価な結晶方向に向いており、第 2 結晶軸が $\langle 331 \rangle$ 結晶方向またはそれと等価な結晶方向に向いている請求項 7 2 ないし 7 7 の

10

20

30

40

50

いずれか一項に記載の方法。

【請求項 79】

ブラッグ測定光線の通過した光学未加工品の素材領域が平坦化される請求項 70 ないし 78 のいずれか一項に記載の方法。

【請求項 80】

対物レンズ(611、711)、特にマイクロリソグラフィ用投射照明装置向けの投射対物レンズに使用されるレンズまたはレンズ部品を製造するための原料製品としての立方晶系構造の結晶素材から成る光学未加工品であって、

その光学未加工品または光学未加工品の保持フレームには、第1結晶方向に垂直であり、第1結晶方向に垂直な位置にある平面への第2結晶方向の投射である基準方向を表示するマーキングが付けられており、その際に第1結晶方向と第2結晶方向が0°とは異なる角度を形成している光学未加工品。

10

【請求項 81】

請求項 69 ないし 79 のいずれか一項に記載の方法に従って製造された請求項 80 に記載の光学未加工品。

【請求項 82】

請求項 80 または 81 のいずれか一項に記載の光学未加工品からレンズまたはレンズ部品を製造する方法であって、下記の作業ステップ、すなわち

e) 第1結晶軸の方向がレンズ軸にほぼ平行になるようにレンズまたはレンズ部品を成形することを特徴とする方法。

20

【請求項 83】

立方晶系構造を持つ結晶素材からなる光学未加工品からレンズまたはレンズ部品を製造する方法であって、下記の作業ステップ、すなわち

a1) 結晶構造内部で決められている配向した第1結晶軸の方向がレンズ軸にほぼ平行になるようにレンズまたはレンズ部品を成形すること、

b1) 基準方向は第1結晶方向に垂直な位置にある平面への第2結晶方向の投射であり、第1結晶方向と第2結晶方向は0°とは異なる角度をなすものとして、第1結晶方向に垂直である基準方向を決定すること、

c1) レンズまたはレンズ部品、あるいはレンズまたはレンズ部品の保持フレームに基準方向をマーキングすること

30

を特徴とする方法。

【請求項 84】

第1結晶方向が、 $\langle 100 \rangle$ 結晶方向または $\langle 111 \rangle$ 結晶方向または $\langle 110 \rangle$ 結晶方向またはこれらの結晶方向と等価な結晶方向に向いている請求項 83 に記載の方法。

【請求項 85】

結晶素材がフッ化カルシウム、フッ化ストロンチウムまたはフッ化バリウムである請求項 83 または 84 のいずれか一項に記載の方法。

【請求項 86】

基準方向の位置が、第2結晶軸に対応する結晶平面グループのブラッグ反射の方向測定によって決定される請求項 83 ないし 85 のいずれか一項に記載の方法。

40

【請求項 87】

基準方向の位置がラウエ法を利用して決定される請求項 83 ないし 86 のいずれか一項に記載の方法。

【請求項 88】

第1結晶方向に対して垂直な位置にある平面への投射が基準方向に対して平行になる光線が、互いに直交する2つの直線偏光状態において最大または最小の光路差を示す請求項 83 ないし 87 のいずれか一項に記載の方法。

【請求項 89】

第1結晶軸が $\langle 100 \rangle$ 結晶方向または $\langle 111 \rangle$ 結晶方向またはそれと等価な結晶方向に向いており、第1結晶方向に垂直な位置にある平面への第2結晶方向の投射が、第1結

50

$\langle 010 \rangle$ 、 $\langle 011 \rangle$ 、 $\langle 01\bar{1} \rangle$ 、 $\langle 0110 \rangle$ 、 $\langle 01\bar{1}0 \rangle$ 、 $\langle 111 \rangle$ 、 $\langle 11\bar{1} \rangle$ 、 $\langle 1110 \rangle$ 、 $\langle 11\bar{1}0 \rangle$ 、 $\langle 1111 \rangle$ 、 $\langle 11\bar{1}1 \rangle$ 、 $\langle 11100 \rangle$ 、 $\langle 11\bar{1}00 \rangle$ 、 $\langle 100 \rangle$ 、 $\langle 010 \rangle$ 、 $\langle 001 \rangle$ 、 $\langle 100 \rangle$ 、 $\langle 010 \rangle$ 、 $\langle 001 \rangle$ および $\langle 001 \rangle$ を有している。主結晶方向 $\langle 100 \rangle$ 、 $\langle 010 \rangle$ 、 $\langle 001 \rangle$ 、 $\langle 100 \rangle$ 、 $\langle 010 \rangle$ および $\langle 001 \rangle$ は立方体結晶の対称特性を有している互いに等価なので、以下では、これらの主結晶方向の1つを指し示す結晶方向には接頭辞“(100)”を付ける。これら主結晶方向の1つに垂直な結晶平面には、それに対応して接頭辞“(100)”を付ける。主結晶方向 $\langle 110 \rangle$ 、 $\langle 1\bar{1}0 \rangle$ 、 $\langle 110 \rangle$ 、 $\langle 1\bar{1}0 \rangle$ 、 $\langle 101 \rangle$ 、 $\langle 10\bar{1} \rangle$ 、 $\langle 101 \rangle$ 、 $\langle 10\bar{1} \rangle$ 、 $\langle 011 \rangle$ 、 $\langle 01\bar{1} \rangle$ 、 $\langle 011 \rangle$ 、および $\langle 01\bar{1} \rangle$ も同様に互いに等価なので、以下では、これらの主結晶方向の1つを指し示す結晶方向に接頭辞“(110)”を付ける。これら主結晶方向の1つに垂直な結晶平面には、それに対応して接頭辞“(110)”を付ける。主結晶方向 $\langle 111 \rangle$ 、 $\langle 1\bar{1}1 \rangle$ 、 $\langle 11\bar{1} \rangle$ 、 $\langle 1\bar{1}\bar{1} \rangle$ 、 $\langle 111 \rangle$ 、 $\langle 1\bar{1}1 \rangle$ 、 $\langle 11\bar{1} \rangle$ 、 $\langle 1\bar{1}\bar{1} \rangle$ および $\langle 111 \rangle$ も同様に互いに等価なので、以下では、これらの主結晶方向の1つを指し示す結晶方向に接頭辞“(111)”を付ける。これら主結晶方向の1つに垂直な結晶平面には、それに対応して接頭辞“(111)”を付ける。以下において、上記の主結晶方向の1つについて明らかになった事柄は、等価な主結晶方向にも常に当てはまる。(訳注：本明細書中“()”は実際にはベクトル表示と同じようにその前の数字の上に付く。)

【0005】

投射対物レンズおよびマイクロソグラフィ用投射照明装置は、例えば本出願人の特許出願 PCT/EP00/13148 (WO 150171 A1) およびその中で引用された文献から公知である。同出願の実施形態に、操作波長 193 nm および 157 nm において開口数 0.8 および 0.9 の適切な純屈折性および反射屈折性の投射対物レンズが示されている。

【0006】

出願人整理番号 01055P、2001年5月15日提出の特許出願「マイクロソグラフィの投射照明装置、光学システムおよび製法」(DE 10123725.1)にも複屈折作用の補整のためのレンズ素子における回転のことが記述されている。当出願の内容は本出願の一部でもある。

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0007】

本発明の課題は、複屈折、それも特に固有複屈折の影響を根本的に抑制する、マイクロソグラフィ用投射照明装置向けの投射対物レンズを提供することである。

【0008】

この課題は、請求項 1、8、32、67、68 および 93 に基づく対物レンズ、請求項 49 に基づくマイクロソグラフィ用投射照明装置、請求項 50 に基づく半導体構成素子の製造法、請求項 51 に基づく対物レンズ製造法、請求項 55 に基づく複屈折作用の補整法、請求項 56、82 および 83 に基づくレンズ製造法、請求項 69 に基づく光学未加工品の製造法および当方法で製造された請求項 80 に基づく光学未加工品によって解決される。

【課題を解決するための手段】

【0009】

本発明の有利な実施態様は従属請求項の特徴から明らかである。

【0010】

請求項 1 では、固有複屈折の影響を最小限に抑えるために、フッ化物結晶からのレンズにおいて、レンズ軸を $\langle 100 \rangle$ - 結晶方向に重ねるように整列させることが提案されている。レンズ軸と主結晶方向間の最大偏差が 5° 未満であれば、レンズ軸は主結晶方向に重なる。その場合、必ずしも対物レンズの全フッ化物結晶レンズにおいて、このような結晶

平面の方向性が示される必要はない。レンズ軸が $\{100\}$ 結晶平面に垂直であるレンズは、以下では (100) レンズとも称する。 $\langle 100 \rangle$ 結晶方向におけるレンズ軸を整列させる場合、 $\langle 110 \rangle$ 結晶方向への光線伝播の際に生じる固有複屈折の妨害的影響が、 $\langle 111 \rangle$ 結晶方向にレンズ軸を整列させた場合より光線の開口角が大きくなって初めて表面化するという利点がある。この関係で開口角とは、レンズの外側では光線と光軸間の角度、レンズの内側では光線とレンズ軸間の角度を言う。開口角が $\langle 100 \rangle$ 結晶方向と $\langle 110 \rangle$ 結晶方向との間の角度範囲になって初めて、当該光線は複屈折の影響を感知する。その場合、 $\langle 110 \rangle$ 結晶方向と $\langle 100 \rangle$ 結晶方向の間の角度が 45° である。それに対し、レンズ軸が $\langle 111 \rangle$ 結晶方向に整列していれば、固有複屈折の妨害的影響はより小さな開口角から既に表面化する。それは、 $\langle 110 \rangle$ 結晶方向と $\langle 111 \rangle$ 結晶方向間の角度は 35° に過ぎないからである。

10

【0011】

例えば、フッ化物結晶の製造法やまたはレンズの機械的負荷に、特に応力性複屈折に起因して複屈折の角度依存性が惹起された場合にも、もちろん、開示された解決手段を複屈折の妨害的影響の抑制に同様に適用することができる。

【0012】

この場合レンズ軸は、例えば回転対称レンズの対称軸で表される。レンズに回転対称軸がない場合、レンズ軸は入射光線束の中心またはレンズ内部におけるすべての光線の放射角が最小である直線によって与えられる。レンズとしては、例えば屈折性または回折性のレンズおよび形態の自由補正面を持つ補正板が使用される。対物レンズの光路内に配置されている限り、平面平板もレンズと見なされる。その場合、平面平板のレンズ軸は平面レンズ表面に垂直である。

20

【0013】

しかしレンズとしては、回転対称レンズが好ましい。

【0014】

対物レンズは、対象物平面から像平面に延びる光軸を有している。好ましくも、 (100) レンズはこの光軸を中心に配置されているので、レンズ軸も光軸にまとめる。

【0015】

本発明は、マイクロソグラフィ用投射照明装置向けの投射対物レンズに有利に適用できる。この対物レンズには分解能に極めて高い要求が課せられるからである。大きな開口での波面測定により、例えば投射対物レンズ用のレンズをテストする試験用対物レンズについても複屈折の妨害的影響が現われる。

30

【0016】

特に 0.7 を超える大きな像側開口数を持つ対物レンズの場合、 (100) レンズ内で 25° を超える、特に 30° を超える開口角が現われる。この大きな開口角の場合でさえ、本発明はレンズ軸を $\langle 100 \rangle$ 結晶方向に向ける上で有効に利用できる。レンズ軸が $\langle 111 \rangle$ 結晶方向に向いていれば、後々取り上げる補正対策の1つが適用されていない場合では、 25° を上回る、特に 30° を上回る開口角を持つ光線はより明瞭に複屈折の妨害的影響を感知する。

【0017】

他方、固有複屈折の妨害的影響は開口角 45° で最大になり得るので、投射対物レンズは、光線の全開口角が 45° を下回るように、特に $\arcsin(NA/n_{FK})$ より小さく、または等しくなるように構成することが有利である。ただし、 NA は像側開口数、 n_{FK} はフッ化物結晶の屈折率である。ここで $\arcsin(NA/n_{FK})$ の値は、光線が平坦界面で屈折した場合におけるフッ化物結晶レンズ内の像側開口数に相当する開口角を表している。上記条件は、光線方向において拡散性レンズ面の後ろに収束性の強いレンズ面が配置されている場合に、像平面近くに配置されているレンズが収束性レンズ面、平坦レンズ面またはせいぜい軽度拡散性レンズ面を有していることによって達成される。

40

【0018】

大きな開口角は、主として視野平面近くの、特に像平面のレンズに現われる。それゆえ、

50

(100) レンズは、好ましくは、視野平面領域で使用すべきである。(100) レンズの使用対象領域は、レンズ直径と絞り直径の比から決定することができる。(100) レンズのレンズ直径は、好ましくは、絞り直径に対して最大85%、特に好ましくは、最大80%とする。

【0019】

投射対物レンズの場合、最大開口角は通例、像平面に最も近い位置にあるレンズに現われる。それゆえ、このレンズの場合レンズ軸は、好ましくは、 $\langle 100 \rangle$ 結晶方向に向けられる。

【0020】

その場合、フッ化物結晶レンズの固有複屈折は光線の開口角だけでなく、光線の方位角にも依存している。各フッ化物結晶レンズには、一方では開口角 θ_L の関数であり、他方では方位角 ϕ_L の関数である複屈折分布 $n(\theta_L, \phi_L)$ を割り当てることができる。この場合、複屈折 n の値は、開口角 θ_L および方位角 ϕ_L によって決められる光線方向について、互いに直交する2つの直線偏光状態における光路差と、フッ化物結晶内を進んだ物理的光路の比として単位 $[nm/cm]$ で表している。したがって、固有複屈折は光路およびレンズ形態に依存しない。光線の光路差は、それに相応して、進んだ光路に複屈折率を掛け合わせて求める。開口角 θ_L は光線方向とレンズ軸との間で、方位角 ϕ_L はレンズ軸に垂直な結晶平面への投射光線方向と、レンズに固定の基準方向との間で決められる。

【0021】

個別フッ化物結晶レンズの複屈折分布における角度依存性により、対物レンズの像平面において像点に当たる光線束の光線が、互いに直交する2つの直線偏光状態において角度に応じた光路差 $OPD(\theta_R, \phi_R)$ となる。この場合光路差 OPD は開口角 θ_R および方位角 ϕ_R の関数として表される。なお、光線の開口角 θ_R は像平面内の光線方向と光軸間で、方位角 ϕ_R は像平面に投射された光線方向と像平面内の固定基準方向間で決められる。対物レンズがフッ化物結晶からのレンズまたはレンズ部品を少なくとも2つ有している場合、これらのレンズまたはレンズ部品のレンズ軸が主結晶方向に向いていて、レンズまたはレンズ部品がレンズ軸の周りに相互に捻れた状態で配置されていれば、つまり、レンズ軸が同じ主結晶方向に向いていてレンズまたはレンズ部品が同方位に構成されている配置に比較して、光路差分布 $OPD(\theta_R, \phi_R)$ が大幅に低い値を示すように配慮されていれば有利である。実際レンズの複屈折分布は方位依存性を示すので、レンズの捻れ配置によって分布 $OPD(\theta_R, \phi_R)$ の最大値は同方位構造の場合と比較して20%ほど、特別な場合では25%ほど引き下げることができる。

【0022】

レンズ部品とは、例えば、圧着加工によって光学的に継目のない単一レンズに接合仕上げされる個別レンズのことである。ごく一般的には、レンズ部品は単一レンズの構成部材を指していて、レンズ部品のレンズ軸はそれぞれ単一レンズのレンズ軸方向に向いている。

【0023】

フッ化物結晶レンズの捻れた状態での組込により、特に分布 $OPD(\theta_R, \phi_R)$ の方位角 ϕ_R 依存性は明らかに小さくできるので、ほとんど回転対称な分布 $OPD(\theta_R, \phi_R)$ が得られる。方位角 ϕ_R 次第では光路差は、有利には、同開口角 θ_R の場合分布 $OPD(\theta_R, \phi_R)$ 最大値に対して最大30%、とりわけ最大20%変わるはずである。

【0024】

レンズ軸が主結晶方向を指せば、レンズの複屈折分布 $n(\theta_L, \phi_L)$ は k 方位対称を有している。例えば、レンズ軸が $\langle 100 \rangle$ 結晶方向に向いている(100) レンズの複屈折分布は4方位対称を、レンズ軸が $\langle 111 \rangle$ 結晶方向に向いている(111) レンズの複屈折分布は3方位対称を、レンズ軸が $\langle 110 \rangle$ 結晶方向に向いている(110) レンズの複屈折分布は2方位対称を有している。方位対称の個数に応じて、グループ内個々のレンズまたはレンズ部品は、レンズ軸の周りを予備設定回転角 θ だけ互いに捻れた位置に配置される。その場合、回転角 θ はそれぞれ2つのレンズまたはレンズ部品の基準方向間で決定または測定される。グループ内レンズについては、レンズ軸は同一の主結晶方向ま

たはそれと等価な主結晶方向を指している。グループ内レンズの基準方向は、予備設定開口角 θ_0 における複屈折分布 $n(\theta_L, \theta_0)$ が同一方位経過を示すように、レンズと関連づけられている。したがって、グループ内全レンズについて同一方位角で最大の複屈折を持つ方位領域が現われる。グループ内の n 個のレンズについて、それぞれ 2 つずつのレンズ間の回転角は次式によって与えられる：

$$= 360^\circ / (k \cdot n) + m \cdot 360^\circ / k \pm 10^\circ$$

ただし、 k は方位対称の個数、 n はグループ内レンズ数および m は任意整数である。 $\pm 10^\circ$ の許容誤差は、対物レンズの調整時に他の付随条件も配慮できるように、状況によっては回転角が理論的理想角から離反するという事実を考慮したものである。理想的回転角からの離反により、グループ内レンズの光路差に対する方位補整が最適化されなくなる。しかしこれは一定限度内では許容できる。

10

したがって (100) レンズの回転角については次の基本式が成り立つ：

$$= 90^\circ / n + m \cdot 90^\circ \pm 10^\circ$$

グループ内に 2 つの (100) レンズが含まれていれば、両レンズ間の回転角は、理想的には 45° 、 135° 、 225° ... となる。

同様に、(111) レンズの回転角については次の基本式が得られる：

$$= 120^\circ / n + m \cdot 120^\circ \pm 10^\circ$$

したがって (110) レンズの回転角については次の基本式が得られる：

$$= 180^\circ / n + m \cdot 180^\circ \pm 10^\circ$$

【0025】

また、光路差分布 $OPL_G(\theta_R, \theta_R)$ は、複屈折の評価では当該グループのレンズだけを観察し、他のレンズは非複屈折性を見なすことによって単一レンズグループによる影響という観点からも表示することができる。

20

【0026】

グループレンズは例えば、当該レンズ内の光線束のうち最外開口光線がそれぞれ類似開口角を有していることから決められる。開口角は当該グループレンズ内の最大開口角に対して最大 30%、とりわけ最大 20% 変動するのが有利である。その場合、当該レンズ内の最外開口光線の開口角は 15° 、特に 20° を超えれば有利である。最外開口光線と称せられるのは、その光線高が絞り平面内で絞りの半径に相当し、それにより像平面内では像側開口数に基づく角度を形成する、対象物点から発せられた光線である。それゆえ、最外開口光線はグループを決めるのに利用される。当光線は通例、レンズ内で最大開口角を示し、複屈折により最大の障害を受けるからである。このように、互いに直交する 2 つの直線偏光状態における最外開口光線に対する光路差の測定から、複屈折による波面の最大障害に関する情報が取得できる。

30

【0027】

さらに、これらのレンズにおける最外開口光線がそれぞれ同程度の光路長を経過していれば有利である。同グループのレンズ内での最大光路に対する光路変動は最大 30%、とりわけ最大 20% が有利である。この対策によって、同グループの個別レンズに起因する光路差の分布に対する方位成分について良好な補整が得られるので、その結果光路差の分布はほとんど回転対称になる。

40

【0028】

そのほか、レンズの方位が同じ場合、同グループの各レンズにおける最外開口光線が、互いに直交する 2 つの直線偏光状態において同程度の光路差を示せば有利である。同グループのレンズ内での最大光路差に対する光路差の変動は最大 30%、とりわけ最大 20% が有利である。この条件が満たされれば、当該レンズを捻り配置した場合に方位成分において最大の補整が達成される。

【0029】

同じ厚さを持ち隣接する平面平行の (100) または (111) レンズの場合、または同じ厚さを持ち隣接する平面平行の 4 つの (110) レンズの場合、上記公式に従ってレンズを回転させることによって回転対称な光路差 OPL 分布が得られる。湾曲表面を持つ

50

レンズの場合でも、グループ内のレンズを上手く選択することによって、またはレンズの厚さおよび半径を適切に選択することによって、2つのレンズを回転させるだけで既にほぼ回転対称な光路差分布が達成できる。(100)レンズまたは(111)レンズの場合では、1グループが2つのレンズを有していると有利である。(110)レンズの場合では、1グループ4レンズについてほぼ回転対称な光路差分布が得られる。

【0030】

レンズが隣接配置されている場合では、レンズの捻りが非常に効果的になる。レンズを2つの部分に分割して、双方を互いに捻り、例えば圧着加工によって光学的に継目なく接合させるのが特に有利である。

【0031】

レンズ軸が同じ主結晶方向または等価な主結晶方向に向いている単一レンズグループの場合、互いに直交する2つの直線偏光状態においてほぼ回転対称な光路差分布を達成するためには、グループをn個の従グループに細分するのが好都合である。その場合、従グループは少なくとも1つのレンズ、例えば1つ、2つまたは3つのレンズを有している。なお、従グループのレンズは方位対称ゆえのわずかな角度誤差分を除き互いに捻りなく配置されている。したがって、従グループレンズ間の回転角 θ については $\theta = 1 \cdot 360^\circ / k \pm 10^\circ$ が成立する。ここで1は整数、kはレンズの複屈折分布 $n(L_1, L_2)$ の方位対称数である。それに対し、2種従グループからの2つのレンズはそれぞれ、次式によって表される回転角を有している：

$$\theta = 360^\circ / (k \cdot n) + m \cdot 360^\circ / k \pm 10^\circ$$

ここでmは整数である。従グループがそれぞれ1つのレンズしか持たない場合は、1グループを形成するときのレンズ選択に関する既述の関係が成り立つ。例えば、2つのレンズの相互捻りが、所望のほぼ回転対称の光路差分布をもたらさなければ、別なレンズを従グループに割り当てることによって所望の分布が達成できる。これは、個別従グループによって惹起された光路差分布がほぼ類似の最大値および分布状態を示せば可能である。ある従グループのレンズを他の従グループのレンズに対して相互回転させることによって、最終的にはほぼ回転対称な光路差分布が得られる。しかし、このように従グループから形成されるグループは常に、相互回転角 θ について等式 $\theta = 360^\circ / (k \cdot n) + m \cdot 360^\circ / k \pm 10^\circ$ が成立するn個のレンズを有している。このn個のレンズについては、必ずしもほぼ回転対称な光路差分布にならなくてもよい。

【0032】

多数のレンズを持つ投射対物レンズの場合、複数のレンズグループを構成しているのが好都合である。その場合同グループのレンズは、生じる分布 $OPL(R_1, R_2)$ が方位角にほとんど依存しないように、レンズ軸の周りに捻れ状態に配置する。

【0033】

個別グループによって惹起された分布 $OPLG(R_1, R_2)$ は、グループレンズの相互捻りにより方位角にはほとんど依存しないが、他方対物レンズ全体の総分布 $OPL(R_1, R_2)$ の最大値は、投射対物レンズに少なくとも1つの(100)レンズグループだけでなく、少なくとも1つの(111)レンズグループを組み込むことによって明らかに低下させることができる。また、対物レンズ内に(100)レンズグループのほか(110)レンズグループを配置すれば、良好な補整が可能である。

【0034】

複屈折は絶対値だけでなく方向も示すので補償が可能である。複屈折の妨害的影響に対する補償は、(100)レンズを持つ全グループのレンズまたはレンズ部品によって惹起される光路差分布 $OPL_1(R_1, R_2)$ および(111)レンズまたは(110)レンズを持つ全グループのレンズまたはレンズ部品によって惹起される光路差分布 $OPL_2(R_1, R_2)$ が同程度の最大値を示したとき最適となる。

【0035】

複屈折の妨害的影響を緩和するもう1つの有利な可能性は、投射対物レンズの光学素子に補償コーティングを施すことにある。その場合、例えば反射防止コーティングまたは鏡面

10

20

30

40

50

コーティングなど各光学コーティングは独自の反射特性および透過特性のほかに、互いに直交する2つの直線偏光状態においては必ず光路差をもたらすという認識を基礎に置いている。これらの点はs偏光とp偏光とで異なっており、しかも層への光線入射角に依存している。したがって、複屈折は入射角依存性になる。その中央光線が補償コーティングに対して入射角 0° で入射する光線束に関しては、複屈折の値および方向は中央光線に対して回転対称である。その場合、入射角は光線と面の交点における光線と面法線との角度を表している。補償コーティングは、複屈折の大きさに関して、それが光線束の光線開口角の関数として所与の挙動を示すように構成されている。

【0036】

その場合まず、投射対物レンズの像平面における光線束について、互いに直交する2つの直線偏光状態における光路差分布 $OP L (\theta_R, \phi_R)$ を決定する。光線の開口角 θ_R は像平面における光線方向と光軸との間で、方位角 ϕ_R は像平面に投射された光線方向と像平面内の固定基準方向との間で決定される。互いに直交する2つの直線偏光状態における光路差分布 $OP L (\theta_R, \phi_R)$ は、フッ化物結晶レンズの固有複屈折、応力性複屈折、光学素子のレンズの部分反射防止コーティングまたは鏡面コーティングによる影響のすべてを表している。

【0037】

光路差分布 $OP L (\theta_R, \phi_R)$ から、軸を持つ光学素子へ塗布される補償コーティングの実効複屈折分布を決定する。光学素子としては、例えば屈折性または回折性のレンズ、平面平板あるいはミラーが使用される。光学素子の光学面は、光学利用領域、つまり通常では前面および背面である。素子軸は、例えば回転対称レンズの対称軸によって与えられる。レンズに対称軸がなければ、素子軸は入射光線束の中央またはレンズ内全光線の光線角が最小になる直線によって表すことができる。実効複屈折値は、素子軸に垂直な基準方向に対する方位角 θ_F および素子軸に対する開口角 ϕ_F に応ずる。

【0038】

光学素子における対値 (θ_F, ϕ_F) は、像平面における光線の対値 (θ_R, ϕ_R) に相当する。

【0039】

補償コーティングの実効複屈折分布は、補償コーティングを含むシステム全体について、互いに直交する2つの直線偏光状態における光路差分布が補償コーティングなしのときの分布に比べて大きく減少するように決定する。補償コーティングのなされた光学素子を持つ対物レンズでは、分布 $OP L (\theta_R, \phi_R)$ の最大値は補償コーティングなしの対物レンズに比べて20%ほども、特別な場合では25%ほども低下する。

【0040】

実効複屈折分布に対しては、素材選択、厚さ変動および補償コーティング個別各層の蒸着角度の如何により影響を与えることができる。その場合、層設計および工程パラメータは、実効複屈折分布、それに素材データと光学素子幾何学構造のインプットから個別層の厚さ変動および工程ファクタを決定する層設計コンピュータプログラムの適用によって求められる。

【0041】

なお、補償コーティングは複数の光学素子に行うこともできる。それにより、補償のほかに高いコーティング透過率も保証されねばならない場合には、補償コーティングの決定における選択自由度が高まることになる。

【0042】

互いに直交する2つの直線偏光状態における光路差分布 $OP L (\theta_R, \phi_R)$ の典型では、開口角 $\theta_R = 0^\circ$ のときに光路差が小さくなる。したがって、開口角 $\theta_F = 0^\circ$ において補償コーティングの複屈折作用がほとんど消えれば好都合である。これは、補償コーティングの製造において大きな蒸着角を適用しなければ達成される。それゆえ、補償コーティングがなされる光学素子の光学面はできる限り曲率の小さいほうが有利である。

【0043】

10

20

30

40

50

(100)または(111)方位のレンズを相互に捻り配置することにより、上述の通り、像平面において開口角 θ_R にのみ依存するほぼ回転対称な光路差分布 $OPL(\theta_R, \theta_R)$ が得られる。光路差は、その実効複屈折分布が一次的には開口角 θ_F にしか依存しない光学素子の補償コーティングによってさらに小さくすることができる。これは、補償コーティングの個別層の層厚を光学素子全体に亘って均等にして、厚さ変動のないようにすることによって達成される。

【0044】

補償コーティングのなされた光学素子を交換可能な素子とすることで、本発明を有利に適用することができる。

【0045】

その場合、像平面に最も近く配置された光学素子を利用するのが有利である。

【0046】

本方法は、第1ステップで像平面における光線束について、互いに直交する2つの直線偏光状態における光路差分布 $OPL(\theta_R, \theta_R)$ を決定するよう構成されている。その場合、コーティングを含めて対物レンズの全光学素子の影響が考慮される。続いてのステップで補償コーティングされる光学素子もその際同様に光線束の光路内に置かれている。

第2ステップでは、既述の方法により補償コーティングの実効複屈折分布、コーティングによって生じる個別層の厚さ変動および個別層製造のための工程パラメータが決定される。

第3ステップでは光学素子が光路から取り除かれ、補償コーティングがなされる。光学素子の光学面が既に被覆加工されている場合は、その層を新たな被覆加工の前に取り除く。第4ステップでは補償コーティングのなされた光学素子が対物レンズ内の元の位置に再設置される。

【0047】

投射対物レンズの場合レンズ素材としては好ましくはフッ化カルシウムが使用される。フッ化カルシウムは石英と併用すれば操作波長193nmで色補正に非常に適しており、あるいは操作波長157nmでは十分な透過性を提供するからである。しかし、フッ化ストロンチウムやフッ化バリウムなどのフッ化物結晶にも上記のことが当てはまる。これらも同じ立方晶系タイプの結晶だからである。

【0048】

固有複屈折の妨害的影響は、レンズ内の光線が大きな開口角を示したときに特に表面化する。これは、像側開口数が0.7を、とりわけ0.8を超える投射対物レンズの場合に当てはまることである。

【0049】

固有複屈折は操作波長が短くなると共に明白に増大する。操作波長193nmのときの固有複屈折は、波長248nmのときの2倍を超え、波長157nmのときでは5倍を超える。したがって、本発明は、なかでも光線の波長が200nm未満、それも特に160nm未満のときに有利に適用できる。

【0050】

対物レンズとしては、光軸の周りに回転対称に配置されている多数のレンズから成る完全屈折性投射対物レンズまたは反射屈折性対物レンズの投射対物レンズが対象になる。

【0051】

このような投射対物レンズは、光源から始まって照明システム、マスク位置決めシステム、構造化マスク、投射対物レンズ、対象物位置決めシステムおよび感光基板を含むマイクロリソグラフィ用投射照明装置向けとして有利に使用できる。

【0052】

このマイクロリソグラフィ用投射照明装置により微細構造の半導体構成素子を製作することができる。

【0053】

本発明は対物レンズ製造のための適切な方法も提供する。その方法に基づき、レンズ軸が

10

20

30

40

50

主結晶方向に向いた、フッ化物結晶から成るレンズまたはレンズ部品をレンズ軸の周りに捻れた状態で配置するが、その場合フッ化物結晶レンズのレンズ軸が同一の主結晶方向を指し、レンズが同じ方位に配置されている配列レンズに比較して分布 $OPL(R, R)$ がはるかに低い値を取るよう配置する。

【0054】

当方法ではさらに、(100)レンズのグループおよび(111)レンズまたは(110)レンズのグループを形成し、これらを同時平行的に使用することを想定している。この方法は、例えば、<100>方位に少なくとも2つのフッ化物結晶レンズを、<111>方位に少なくとも2つのレンズを擁す投射対物レンズに適用される。これらのレンズから、さらに基準方向の位置も分かる。この方法では、フッ化物結晶レンズを光軸の周りを回転させることにより光路差分布 $OPL(R, R)$ の最大値を大きく下げることができるという経験的知識が活用されている。その場合、適当なシミュレーション法により、対象物点から発せられた光線束を投射対物レンズによって伝播させ、フッ化物結晶レンズの周知の光学特性を基に像平面での分布 $OPL(R, R)$ を決定する。最適化ステップでは、複屈折が許容可能な値になるまでフッ化物結晶レンズ間で回転角を変更する。最適化ステップではさらに、例えば非回転対称のレンズ欠陥をレンズの回転によって行う補償など付随条件も考慮に入れることができる。この最適化ステップによって分布 $OPL(R, R)$ の最大値は、フッ化物結晶レンズが同一方位に配置されている投射対物レンズに比較して30%ほども、特別な場合では50%までも引き下げることができる。この最適化法では中間ステップを設けることができる。その中間ステップではフッ化物結晶レンズからレンズグループを形成する。その場合、同一方位に配置された最外開口光線用のグループレンズは、互いに直交する2つの直線偏光状態間で類似光路差を発生させる。続いての最適化ステップでは光路差を小さくするために、グループ内だけでレンズを回転させる。そのようにして、まず、(100)レンズによって惹起される光路差が小さくなるように、(100)レンズを回転させることができる。次に、(111)レンズによって惹起される光路差が小さくなるように、(111)レンズを回転させる。最適化におけるフッ化物結晶レンズの(100)方位レンズと(111)方位レンズへの配分は、その結果としての(100)側分布 $OPL_{100}(R, R)$ と(111)側分布 $OPL_{111}(R, R)$ が完全なまでに相殺されるように行わなければならない。(100)レンズと(110)レンズとの同時平行使用についても同様である。

【0055】

本発明は、第1ステップでフッ化物結晶から成る複数の平板を光学的に継目のない未加工材として接合し、第2ステップで公知の製造法によりその未加工材からレンズを作るというレンズの製造法にも関する。この場合平板は、上でレンズまたはレンズ部品について述べた通り、面法線の周りに互いに捻れ位置に配置される。

【0056】

その面法線が同一の主結晶方向またはそれと等価な主結晶方向に向いている平板は、それぞれ軸方向の厚さが同じであると有利である。

【0057】

(100)平板と(111)平板を光学的に継目なく接合する場合、(111)平板の厚さ総和と(100)平板の厚さ総和の比は 1.5 ± 0.2 とする。

【0058】

(100)平板と(110)平板を光学的に継目なく接合する場合、(110)平板の厚さ総和と(100)平板の厚さ総和の比は 4.0 ± 0.4 とする。

【0059】

本発明は、既述の対物レンズにおいて複屈折の妨害的影響を抑制する目的に有効に利用できる、立方晶系構造を持つ結晶素材からのレンズまたはレンズ部品の製造のための方法も提供する。

【0060】

複屈折の妨害的影響を抑制するための本発明に基づく対策は、同グループ内レンズの相互

10

20

30

40

50

捻り配置に基づいている。その場合レンズのレンズ軸は同一結晶方向、好ましくは同一の主結晶方向に向いているものとする。グループ内個別レンズ間の回転角を調整できるように、各レンズ毎に基準方向が分かっているなければならない。以下では、適切な基準方向を如何にして決めるか、レンズおよびレンズ部品にそれをどのようにマーキングする方法について説明する。

【0061】

レンズまたはレンズ部品が最終形態を取るまでには、形態加工および表面加工のための過程が多数必要である。レンズまたはレンズ部品は結晶素材から構成されるので、通例原料としては単結晶塊が用いられ、それが例えば鋸切断および研削を経てまず光学未加工品に仕上がられる。レンズまたはレンズ部品の先駆段階が光学未加工品と称せられる。光学未加工品から1つまたは複数のレンズまたはレンズ部品を作製することができる。1つの光学未加工品から複数のレンズまたはレンズ部品を作製する場合、光学未加工品を鋸切断によって複数の個別光学未加工品に分ける。なお、この個別光学未加工品はさらに別な加工作業過程で研削および/または研磨して、その予備加工面で光学測定が行えるようにする。このようにして準備した光学未加工品は、次に円筒形態の素材ディスクに加工される。

10

【0062】

この光学未加工品は、その面法線が結晶構造内で方位が決められた第1結晶方向に向いている光学未加工面を持つように加工されていれば有利である。その結晶方向が主結晶方向、例えば $\langle 100 \rangle$ 、 $\langle 111 \rangle$ 、または $\langle 110 \rangle$ 結晶方向であれば有利である。そのためには、まず第1に光学未加工品において第1結晶方向を決めることが必要である。この決定は、光学未加工品が個別光学未加工品に分割される前に光学未加工品において行うことができる。また、まず分割を行って、次に個別光学未加工品においてそれぞれ決定することも可能である。光学未加工品は鋸切断および研削により、第1結晶方向が光学未加工面にほぼ垂直になるように加工される。その場合 $\pm 5^\circ$ の偏差は許容できる。なお、光学未加工面は素材ディスクの前面または背面である。

20

【0063】

次のステップでは、第1結晶方向に垂直である基準方向が決定される。この場合基準方向は、その面法線が第1結晶方向に向いている平面への第2結晶方向の投射である。第1結晶方向と第2結晶方向との角度は 0° とは異なる値である。第2結晶方向は同様に主結晶方向でも、あるいは結晶構造内で方位が決められた結晶方向でもよく、例えば $\langle 331 \rangle$ 結晶方向とすることができる。

30

【0064】

基準方向が決まれば、それを光学未加工品に、例えば円筒外面に彫り込みを入れてマーキングする。また、光学未加工品を保持フレームに固定して、保持フレームにマーキングすることも可能である。

【0065】

第1結晶方向の決定においては、光学未加工品を決められた方向からの測定光線で照明することができる。測定光線は第1結晶方向に該当する結晶平面、例えば $\{111\}$ 結晶平面で反射し、対応のブラッグ(Bragg)反射を起こす。測定光線の入射角および光学未加工品の素材は分かっているので、ブラッグ反射の理論要求角もブラッグ反射法則の適用で求められる。光学未加工面の面法線が第1結晶方向と一致したときのみ、反射測定光線が所定の要求角のもとで検出される。光学未加工品は、光学未加工面の面法線が第1結晶方向と一致するように、必要に応じて、例えば研削により加工する。

40

【0066】

有利な実施態様では、光学未加工品は、光学未加工品の未加工面に垂直な軸の周りに回転可能な状態で設置される。ブラッグ反射は様々な回転角に対して測定されるが、最も簡単な例では 0° と 90° である。

【0067】

基準方向も同様にブラッグ反射の適用で決められる。その場合、測定光線は第2結晶方向に該当する結晶平面で反射する。

50

【0068】

基準方向の位置は、この方法に代わりラウエ法によっても決められる。

【0069】

基準方向は、レンズ内の光線を第1結晶方向に垂直な平面に対して行った投射が基準方向に平行になるのであれば、その光線が複屈折のために、例えば互いに直交する2つの直線偏光状態において最大光路差となるように選択するのが好都合である。前記の補償法、つまりレンズの相互捻り配置を適用すれば、当マーキング処方により所期の回転角へ容易に調整できる。第1結晶方向に垂直な平面への投射が基準方向に平行である場合、当該光線が最小光路差となる基準方向をマーキングすることも可能である。

【0070】

第1結晶方向が $\langle 100 \rangle$ 結晶方向または $\langle 111 \rangle$ 結晶方向またはこれらの結晶方向と等価な結晶方向に向いている場合、第1結晶方向に垂直な平面への第2結晶方向の投射が、 $\langle 110 \rangle$ 結晶方向またはそれと等価な結晶方向の同平面への投射に平行であれば好都合である。つまり、 $\langle 110 \rangle$ 結晶方向またはそれと等価な結晶方向に平行な光線は最大光路差となる。

【0071】

第1結晶軸が $\langle 111 \rangle$ 結晶方向またはそれと等価な結晶方向を指している場合、第2結晶方向が $\langle 331 \rangle$ 結晶方向またはそれと等価な結晶方向を指していると有利である。

【0072】

ブラッグ反射測定のための測定光線は光学未加工面の領域で素材を損傷することがあるので、測定光線の通過した光学未加工品の素材領域は研削または研磨によって仕上げるのが好都合である。

【0073】

この方法によって、対物レンズ用のレンズまたはレンズ部品の製作原料としての光学未加工品を有利に製造することができる。

【0074】

このようにして準備した光学未加工品からレンズまたはレンズ部品を製造すれば、レンズまたはレンズ部品の光学面の加工ではレンズ軸を第1結晶軸にほぼ平行に、あるいは光学未加工面の面法線に平行に合わせられる。偏差は $\pm 5^\circ$ 未満でなければならない。光学未加工品の未加工面を研削および研磨することによって湾曲レンズ面が生れる。それが回転対称面であればレンズ軸が対称軸になる。

【0075】

別法として、レンズまたはレンズ部品を対象に基準方向を決めてマーキングすることもできる。立方晶系構造を持つ結晶材より成る光学未加工品から、例えばレンズ面の研削および研磨によりレンズを作製する。その場合表面は、レンズ軸が好ましくは主結晶方向の第1結晶方向に平行になるように加工される。回転対称レンズ面を持つレンズの場合、レンズ軸が対称軸である。基準方向はレンズまたはレンズ部品を対象に決められる。その場合、基準方向は第1結晶方向に垂直で、第1結晶方向に垂直な平面への第2結晶方向の投射である。その場合第1、第2結晶方向は 0° とは異なる角度を形成している。基準方向はレンズまたはレンズ部品にマーキングする。レンズが保持フレームに固定されている場合は、そのフレームにマーキングすることもできる。

【0076】

基準方向の決定には、光学未加工品用として既に紹介した方法を適用することができる。ブラッグ反射の測定では、測定光線が湾曲レンズ表面の決められた箇所に入射するようにレンズの位置が調整できれば有利である。特に様々なレンズ回転位置で測定する場合は、測定光線がレンズの頂点領域に入射するのが好都合である。

【0077】

凹面レンズの場合自己陰影の影響を避けるには、入射測定光線、および第1結晶方向または基準方向の決定に利用される反射光線が、レンズの幾何学構造によって妨げられないように第2結晶方向を選択するのが得策である。

10

20

30

40

50

【0078】

レンズまたはレンズ部品を対物レンズに使用する場合、基準方向のマーキングがなされたレンズまたはレンズ部品を相互に捻れ配置して、複屈折の妨害的影響を抑制するのが有利である。各レンズの照準捻れ配置はマーキングによって大幅に簡易化される。

【発明を実施するための最良の形態】

【0079】

本発明を図面に基づきより詳しく説明する。

【0080】

図1はフッ化物結晶ブロック3の概略切断図である。切断面は、 $\{100\}$ 結晶平面5が個別単一ラインと見なせるように、したがって $\{100\}$ 結晶平面5が紙面に垂直になるように選択されている。フッ化物結晶ブロック3は (100) レンズ1用の未加工材または原料素材として用いられる。本例では (100) レンズ1は、同時にレンズの対称軸でもあるレンズ軸EAを持つ両凸レンズである。レンズ1は、フッ化物結晶ブロックの加工から、レンズ軸EAが $\{100\}$ 結晶平面に垂直になるように作製される。

10

【0081】

図2Aには、レンズ軸EAが $\langle 100 \rangle$ 結晶方向に向いている場合、固有複屈折と結晶方向とが如何に関係しているかが3次元図で示されている。図ではフッ化カルシウムから成る円形の平面平行平板201が描かれている。レンズ軸EAは $\langle 100 \rangle$ 結晶方向を指している。 $\langle 100 \rangle$ 結晶方向のほか $\langle 101 \rangle$ 、 $\langle 110 \rangle$ 、 $\langle 101 \rangle$ および $\langle 110 \rangle$ 結晶方向が矢印で描かれている。固有複屈折は図では4本の「棒」203で概略的に描かれていて、その表面は光線それぞれの放射方向についての固有複屈折の量を示している。最大固有複屈折は $\langle 101 \rangle$ 、 $\langle 110 \rangle$ 、 $\langle 101 \rangle$ および $\langle 110 \rangle$ 結晶方向において、つまり開口角 45° およびレンズ内方位角 0° 、 90° 、 180° および 270° の光線において現われる。方位角 45° 、 135° 、 225° および 315° の場合には固有複屈折の値は最小になる。開口角 0° では固有複屈折は消失する。

20

【0082】

図2Bには、レンズ軸EAが $\langle 111 \rangle$ 結晶方向に向いている場合、固有複屈折と結晶方向とが如何に関係しているかが3次元図で示されている。図ではフッ化カルシウムから成る円形の平面平行平板205が描かれている。レンズ軸EAは $\langle 111 \rangle$ 結晶方向を指している。 $\langle 111 \rangle$ 結晶方向のほか $\langle 011 \rangle$ 、 $\langle 101 \rangle$ および $\langle 110 \rangle$ 結晶方向が矢印で描かれている。固有複屈折は図では3本の「棒」207で概略的に描かれていて、その表面は光線それぞれの放射方向についての固有複屈折の量を示している。最大固有複屈折は $\langle 011 \rangle$ 、 $\langle 101 \rangle$ および $\langle 110 \rangle$ 結晶方向において、つまり開口角 35° およびレンズ内方位角 0° 、 120° および 240° の光線において現われる。方位角 60° 、 180° および 300° の場合には固有複屈折の値はそれぞれ最小になる。開口角 0° では固有複屈折は消失する。

30

【0083】

図2Cには、レンズ軸EAが $\langle 110 \rangle$ 結晶方向に向いている場合、固有複屈折と結晶方向とが如何に関係しているかが3次元図で示されている。図ではフッ化カルシウムから成る円形の平面平行平板209が描かれている。レンズ軸EAは $\langle 110 \rangle$ 結晶方向を指している。 $\langle 110 \rangle$ 結晶方向のほか $\langle 011 \rangle$ 、 $\langle 101 \rangle$ および $\langle 011 \rangle$ 結晶方向が矢印で描かれている。固有複屈折は図では5本の「棒」211で概略的に描かれていて、その表面は光線それぞれの放射方向についての固有複屈折の量を示している。最大固有複屈折は、1つにはレンズ軸EAの方向において、また1つにはそれぞれ $\langle 011 \rangle$ 、 $\langle 101 \rangle$ 、 $\langle 101 \rangle$ および $\langle 011 \rangle$ 結晶方向において、つまり開口角 0° または 60° で $\langle 011 \rangle$ 、 $\langle 101 \rangle$ 、 $\langle 101 \rangle$ および $\langle 011 \rangle$ 結晶方向からの $\{110\}$ 結晶平面への投射によって生じる4種方位角に相当する光線において現われる。しかし、結晶素材においてはそのような大きな開口角は現われない。それは、結晶の屈折率により最大開口角は 45° 未満に制限されるからである。

40

【0084】

50

開口角 および方位角 の定義が図3に描かれている。図2の(100)レンズの場合、z軸は<100>結晶方向を指し、x軸は<110>結晶方向からの{100}結晶平面への投射によって得られる方向を指している。その場合z軸はレンズ軸に等しく、x軸は基準方向に等しい。

【0085】

<110>結晶方向の光線伝播における測定で、フッ化カルシウムに対し波長 = 156.1 nmを適用した場合、複屈折値(6.5 ± 0.4) nm/cmが得られることは引用したインターネット文献から知られている。基準値としてのこの測定値を用いて、フッ化カルシウムレンズの複屈折分布 $n(\theta, \phi)$ を結晶方位の関数として理論的に導き出すことができる。それには、結晶光学から公知である、光線方向を関数とする屈折率楕円体の計算公式が利用される。その理論的原理は、例えば「光学事典」(スペクトル・アカデミー出版/ハイデルベルク、ベルリン、1999年刊)の見出し「結晶光学」の項に説明されている。

10

【0086】

出願人の新式測定によると、<110>結晶方向の光線伝播において、フッ化カルシウム結晶に対し波長 = 156.1 nmを適用した場合、固有複屈折値は11 nm/cmであった。基準値 $n_{max} = 6.5 \text{ nm/cm}$ についての下記説明より、基準値 $n_{max} = 11 \text{ nm/cm}$ への換算は難なく行える。

【0087】

図4Aには(100)レンズ、方位角 = 0°における固有複屈折の大きさが開口角 の関数として描かれている。開口角 = 45°における固有複屈折値6.5 nm/cmは測定値に一致している。曲線軌跡は結晶光学分野からの公知の公式に基づき求めた。

20

【0088】

図4Bには(100)レンズ、開口角 = 45°における固有複屈折の大きさが方位角の関数として描かれている。明らかに4方位対称が認められる。

【0089】

図4Cには(100)レンズ、(θ, φ)角空間における個別光線方向での複屈折分布 $n(\theta, \phi)$ が描かれている。各線は開口角 および方位角 によって定義付けされた光線の量および方向を表している。線の長さは複屈折量または切断楕円の主軸長偏差に比例するが、線の方向は切断楕円の長主軸方位を表している。切断楕円は、方向(θ, φ)の光線に対応する屈折率楕円体を、光線方向に垂直で屈折率楕円体の中心を通る平面で切断することによって得られる。線の方向も長さも分布の4方位性を示している。線の長さ、したがって複屈折は方位角0°、90°、180°および270°のときが最大である。

30

【0090】

図4Dは、隣接する同じ厚さの2つの平面平行(100)レンズを45°回転させて配置したときに生じる複屈折分布 $n(\theta, \phi)$ を示している。発生する複屈折分布 $n(\theta, \phi)$ は方位角 には依存しない。切断楕円の長主軸は接線方向に延びている。互いに直交する2つの偏光状態において生じる光路差は、複屈折値と平面平行(100)レンズ内の物理的光路とを掛け合わせることで得られる。回転対称の複屈折分布は、同じ厚さを持つn個の平面平行(100)レンズを次の条件で、つまりそれぞれ2つずつのレンズ間で回転角 について次式

40

$$= 90^\circ / n + m \cdot 90^\circ \pm 5^\circ$$

が成り立つように配置すれば得られる。ただし、nは平面平行(100)レンズの数、mは整数を表している。開口角 = 30°とすれば、同一方位に配置のレンズに比べて複屈折の最大値を30%低下させることができる。レンズ内光線束のすべての光線がそれぞれ類似角度を示し、レンズ内の光路長が類似の長さであれば、任意のレンズについても、互いに直交する2つの直線偏光状態においてほぼ回転対称な光路差分布が得られる。したがってレンズは、光線が上記の条件をできる限り満たすように、グループにまとめておかなければならない。

【0091】

50

図 4 E には、図 4 D と同じレンズ、すなわち隣接する同じ厚さの 2 つの平面平行 (100) レンズで方位角 $\theta = 0^\circ$ のときの開口角 α に応じた固有複屈折の大きさが描かれている。開口角 $\alpha = 41^\circ$ における固有複屈折の最大値は 4.2 nm/cm であり、したがって図 4 A での最大値 6.5 nm/cm より 35% 低下する。

【0092】

図 4 F には、図 4 D と同じレンズ、すなわち隣接する同じ厚さの 2 つの平面平行 (100) レンズで開口角 $\alpha = 41^\circ$ のときの方位角 θ 別固有複屈折の大きさが描かれている。固有複屈折は方位角 θ に依存しない。

【0093】

図 5 A には、(111) レンズ、方位角 $\theta = 0^\circ$ における固有複屈折の大きさが開口角 α の関数として描かれている。開口角 $\alpha = 35^\circ$ における固有複屈折値 6.5 nm/cm は測定値に一致している。曲線軌跡は結晶光学分野からの公知の公式に基づき求めた。

【0094】

図 5 B には (111) レンズ、開口角 $\alpha = 35^\circ$ における固有複屈折の大きさが方位角 θ の関数として描かれている。明らかに 3 方位対称が認められる。

【0095】

図 5 C は、既に図 4 C で紹介した描法による (111) レンズの (θ , α) 角空間における個別光線方向についての複屈折分布 $n(\theta, \alpha)$ を示している。線の方法も長さも分布の 3 方位性を示している。線の長さ、したがって複屈折は方位角 0° 、 120° および 240° のときが最大である。(100) レンズの場合とは異なり、方位角 0° の光線に代わり方位角 180° の光線がレンズを通過すると、複屈折の方位が 90° 回転する。したがって、例えば同方位の 2 つの (111) レンズを用いて、その両レンズ間で光線束の光線角符号を入れ替えれば、複屈折を相殺することができる。これは特に、対象物点から光軸を伝って進む光線束直径の最大または最小が、これら同方位の両 (111) レンズ間にある場合には必ず当てはまる。屈折性投射対物レンズは正および負の屈折力を持つ複数のレンズグループを有している。特に正の屈折力を持つレンズグループにはしばしば光線束直径の最大が現われ、負の屈折力を持つレンズグループには光線束直径の最小が現われる。典型的なマイクロリソグラフィ用投射対物レンズは、例えば正屈折第 1 レンズグループ、負屈折第 2 レンズグループ、正屈折第 3 レンズグループ、負屈折第 4 レンズグループおよび正屈折第 5 レンズグループを擁している。第 1 レンズグループ内には光線束直径の最大が、第 2 レンズグループ内には光線束直径の最小が、第 3 レンズグループ内には光線束直径の最大が、第 4 レンズグループ内には光線束直径の最小が、および第 5 レンズグループ内には光線束直径の最大が現われる。したがって、光線方向に沿って、極値の光線束直径を持つ位置の前後に同方位の (111) レンズ、又は相互回転角 $\theta = 1 \cdot 120^\circ \pm 10^\circ$ の (111) レンズを配置するのが有利である。ただし、式中 l は整数である。(111) レンズの複屈折分布は 3 方位対称なので、 $\theta = 1 \cdot 120^\circ$ の回転は (111) レンズの複屈折作用に影響を与えない。同方位の (111) レンズ間で開口角 α がほぼ等しく、他方、方位角 θ が 180° 変化した光線の場合、互いに直交する 2 つの直線偏光状態における光路差は少なくとも部分的には相殺される。

【0096】

図 5 D は、隣接する同じ厚さの 2 つの平面平行 (111) レンズを 60° 回転させて配置した場合に現われる複屈折分布 $n(\theta, \alpha)$ を示している。その結果得られる複屈折分布 $n(\theta, \alpha)$ は方位角 θ に依存しない。しかし図 4 C とは違って、切断楕円の長主軸は放射状である。互いに直交する 2 つの偏光状態において現われる光路差は、複屈折値に (111) レンズ内での光線の物理的経路を掛け合わせることによって得られる。同様に回転対称の複屈折分布は、同じ厚さを持つ n 個の平面平行 (111) レンズを次の条件で、つまりそれぞれ 2 つずつのレンズ間で回転角 θ について次式

$$\theta = 120^\circ / k + 1 \cdot 120^\circ \pm 5^\circ$$

が成り立つように配置すれば得られる。ただし、 k は平面平行 (111) レンズの数、 l は整数を表している。開口角 $\alpha = 30^\circ$ とすれば、同一方位に配置のレンズに比べて複屈

折の値を68%低下させることができる。レンズ内光線束のすべての光線がそれぞれ類似角度を示し、レンズ内の光路長が類似の長さであれば、任意のレンズについても、互いに直交する2つの直線偏光状態においてほぼ回転対称な光路差分布が得られる。したがってレンズは、光線が上記の条件をできる限り満たすように、グループにまとめておかねばならない。

【0097】

図5Eには、図5Dと同じレンズ、すなわち隣接する同じ厚さの2つの平面平行(111)レンズで方位角 $\theta = 0^\circ$ のときの開口角 α に応じた固有複屈折の大きさが描かれている。開口角 $\alpha = 41^\circ$ における固有複屈折の最大値は 2.8 nm/cm であり、したがって図5Aでの最大値 6.5 nm/cm より57%低下している。

10

【0098】

図5Fには、図5Dと同じレンズ、すなわち隣接する同じ厚さの2つの平面平行(111)レンズで開口角 $\alpha = 41^\circ$ のときの方位角 θ 別固有複屈折の大きさが描かれている。固有複屈折は方位角 θ に依存しない。

【0099】

投射対物レンズ内で(100)レンズのグループと(111)レンズのグループを組み合わせれば、これらのレンズに起因する、互いに直交する2つの直線偏光状態における光路差を大きく相殺することができる。そのためには、まずそれぞれのグループ内でレンズの回転によりほぼ回転対称な光路差分布を達成し、次にグループ(100)のレンズとグループ(111)のレンズを組み合わせることによって双方の光路差分布を相殺する必要がある。それには、図4Dおよび5Dに見られるとおり、回転(100)レンズグループの複屈折分布における切断楕円の長主軸の方位が、回転(111)レンズグループの複屈折分布における切断楕円の長主軸の方位に垂直であるということを利用する。その場合、1つには個々のグループによってほぼ回転対称な光路差分布が形成されること、また1つにはその総量が(100)レンズグループと(111)レンズグループとでほぼ等しいことが決定的な要因になる。

20

【0100】

図6Aには、(110)レンズ、方位角 $\theta = 0^\circ$ における固有複屈折の大きさが開口角 α の関数として描かれている。開口角 $\alpha = 0^\circ$ における固有複屈折値 6.5 nm/cm は測定値に一致している。曲線軌跡は結晶光学分野からの公知の公式に基づき求めた。

30

【0101】

図6Bには(110)レンズ、開口角 $\alpha = 35^\circ$ における固有複屈折の大きさが方位角 θ の関数として描かれている。明らかに2方位対称が認められる。

【0102】

図6Cは、既に図4Cで紹介した描法による(110)レンズの()角空間における個別光線方向についての複屈折分布 $n(\theta, \alpha)$ を示している。線の方向も長さも分布の2方位性を示している。線の長さ、したがって複屈折は開口角 $\alpha = 0^\circ$ のときが最大である。

【0103】

図6Dは、隣接する同じ厚さの2つの平面平行(110)レンズを 90° 回転させて配置した場合に現われる複屈折分布 $n(\theta, \alpha)$ を示している。複屈折分布 $n(\theta, \alpha)$ の結果は4方位対称を示している。複屈折の最大値は方位角 $\theta = 45^\circ$ 、 135° 、 225° および 315° で現われる。その場合の複屈折値は開口角 $\alpha = 40^\circ$ で 2.6 nm/cm である。

40

【0104】

図6Eは、図6Cと同じレンズ、すなわち同じ厚さの2つの平面平行(110)レンズを同じ厚さの別な2つの平面平行(110)レンズと組み合わせたときに生じる複屈折分布 $n(\theta, \alpha)$ を示している。それぞれ両(110)レンズ間の回転角は 45° である。発生する複屈折分布 $n(\theta, \alpha)$ は方位角 θ には依存しない。しかし図4Cとは違って、切断楕円の長主軸は放射状であり、したがって図5Cの分布に類似する。互いに直交す

50

る2つの偏光状態において現われる光路差は、複屈折値に(110)レンズ内での光線の物理的経路を掛け合わせることによって得られる。同様に回転対称の複屈折分布は、同じ厚さを持つ $4 \cdot n$ 個の平面平行(110)レンズを次の条件で、つまりそれぞれ2つずつのレンズ間で回転角 θ について次式

$$\theta = 45^\circ / n + m \cdot 90^\circ \pm 5^\circ$$

が成り立つように配置すれば得られる。ただし、 $4 \cdot n$ は平面平行(100)レンズの数、 m は整数を表している。レンズ内光線束のすべての光線がそれぞれ類似角度を示し、レンズ内の光路長が類似の長さであれば、任意のレンズについても、互いに直交する2つの直線偏光状態においてほぼ回転対称な光路差分布が得られる。したがってレンズは、光線が上記の条件をできる限り満たすように、グループにまとめておかねばならない。

10

【0105】

図6Fには、図6Eと同じレンズ、すなわち隣接する同じ厚さの4つの平面平行(110)レンズで方位角 $\theta = 0^\circ$ のときの開口角 α に応じた固有複屈折の大きさが描かれている。開口角 $\alpha = 41^\circ$ における固有複屈折の値は 1.0 nm/cm であり、したがって図5Aでの最大値 6.5 nm/cm より84%低下している。

【0106】

図6Gには、図6Eと同じレンズ、すなわち隣接する同じ厚さの4つの平面平行(110)レンズで開口角 $\alpha = 41^\circ$ のときの方位角 θ 別固有複屈折の大きさが描かれている。固有複屈折は方位角 θ に依存しない。

【0107】

投射対物レンズ内で(110)レンズのグループと(100)レンズのグループを組み合わせれば、これらのレンズに起因する、互いに直交する2つの直線偏光状態における光路差を大きく相殺することができる。そのためには、まずそれぞれのグループ内でレンズの回転によりほぼ回転対称な光路差分布を達成し、次にグループ(110)のレンズとグループ(100)のレンズを組み合わせることによって双方の光路差分布を相殺する必要がある。それには、図4Dおよび6Eに見られるとおり、回転(110)レンズグループの複屈折分布における切断楕円の長主軸の方位が、回転(100)レンズグループの複屈折分布における切断楕円の長主軸の方位に垂直であるということを利用する。その場合、1つには個々のグループによってほぼ回転対称な光路差分布が形成されること、また1つにはその総量が(110)レンズグループと(100)レンズグループとでほぼ等しいこと

20

30

【0108】

図7には、波長 157 nm 用の屈折性投射対物レンズ611が描かれている。この対物レンズの光学データは表1にまとめてある。その実施形態は本出願人の特許出願PCT/E P 00/13148 (WO 150171 A1)に記載されており、その図7または表6に相当する。対物レンズの機能性に関するより詳しい説明については特許出願PCT/E P 00/13148 (WO 150171 A1)を参照のこと。この対物レンズはいずれのレンズもフッ化カルシウム結晶でできている。対物レンズの像側開口数は0.9である。本対物レンズの結像性能は、波長 157 nm における理想球面波の波面からの偏差が 1.8 m 未満になるように補正されている。この高性能対物レンズの場合こそ、固有

40

【0109】

図6の実施形態では、個別レンズL601~L630について最外開口光線609の開口角 α および光路長 R_L を算出した。その場合、最外開口光線609は座標 $x = 0 \text{ mm}$ 、 $y = 0 \text{ mm}$ の対象物点から出発し、像面では光軸に対し、像側開口数に相当する角度を形成する。最外開口光線609は、レンズ内でほぼ最大の開口角を惹起するので観察対象に利用される。

【0110】

【表1】

表2

レンズ	開口角 θ [°]	光路長 $R L_L$	光路差 (111)レンズ $\alpha_L = 0^\circ$ [mm]	光路差 (111)レンズ $\alpha_L = 60^\circ$ [mm]	光路差 (100)レンズ $\alpha_L = 0^\circ$ [mm]	光路差 (100)レンズ $\alpha_L = 45^\circ$ [mm]	光路差 (110)レンズ $\alpha_L = 0^\circ$ [mm]	光路差 (110)レンズ $\alpha_L = 45^\circ$ [mm]	光路差 (110)レンズ $\alpha_L = 90^\circ$ [mm]	光路差 (110)レンズ $\alpha_L = 135^\circ$ [mm]
L601	8.1	15.1	2.9	-2.2	-0.8	-0.4	-9.0	-9.0	-9.1	-9.0
L602	8.7	8.2	1.7	-1.2	-0.5	-0.2	-4.9	-4.8	-4.9	-4.8
L603	7.8	9.5	1.7	-1.3	-0.4	-0.2	-5.7	-5.7	-5.7	-5.7
L604	10.7	7.2	1.9	-1.3	-0.6	-0.3	-4.1	-4.1	-4.1	-4.1
L605	9.4	6.5	1.5	-1.0	-0.4	-0.2	-3.8	-3.8	-3.8	-3.8
L606	10.3	8.5	2.1	-1.4	-0.7	-0.3	-4.8	-4.8	-4.8	-4.8
L607	21.8	12.7	6.6	-2.7	-3.9	-1.8	-4.2	-4.2	-4.3	-4.2
L608	25.4	22.2	12.8	-4.4	-8.7	-3.9	-5.3	-5.7	-5.8	-5.7
L609	16.3	36.1	14.3	-7.6	-6.8	-3.3	-16.5	-16.5	-16.7	-16.5
L610	12.2	15.2	4.5	-2.9	-1.7	-0.8	-8.2	-8.2	-8.2	-8.2
L611	2.3	26.6	1.4	-1.3	-0.1	-0.1	-17.2	-17.2	-17.2	-17.2
L612	2.3	32.2	1.6	-1.5	-0.1	-0.1	-20.8	-20.8	-20.8	-20.8
L613	-18.3	30.4	-6.6	13.5	-7.0	-3.3	-12.5	-12.6	-12.7	-12.6
L614	-18.7	22.0	-4.8	10.0	-5.3	-2.5	-8.9	-8.9	-9.0	-8.9
L615	-14.0	10.2	-2.0	3.5	-1.5	-0.7	-5.1	-5.1	-5.2	-5.1
L616	-1.3	29.8	-0.8	0.9	0.0	0.0	-19.3	-19.3	-19.3	-19.3
L617	26.4	31.6	18.6	-6.1	-13.0	-5.7	-6.7	-7.6	-7.5	-7.6
L618	33.5	14.3	9.3	-2.0	-7.9	-3.1	-0.6	3.2	-1.4	3.2
L619	26.5	7.5	4.4	-1.4	-3.1	-1.4	-1.6	-1.8	-1.8	-1.8
L620	19.3	6.4	3.0	-1.4	-1.6	-0.8	-2.5	-2.5	-2.5	-2.5
L621	6.7	8.0	1.3	-1.0	-0.3	-0.1	-4.9	-4.9	-4.9	-4.9
L622	-10.3	7.7	-1.3	1.9	-0.6	-0.3	-4.4	-4.4	-4.4	-4.4
L623	-11.9	9.6	-1.8	2.8	-1.0	-0.5	-5.2	-5.2	-5.2	-5.2
L624	0.3	17.8	0.1	-0.1	0.0	0.0	-11.6	-11.6	-11.6	-11.6
L625	6.0	16.3	2.3	-1.8	-0.5	-0.2	-9.9	-9.9	-10.0	-9.9
L626	-24.0	9.0	-1.9	5.0	-3.2	-1.5	-2.5	-2.6	-2.6	-2.6
L627	-35.6	8.0	-0.9	5.2	-4.7	-1.7	0.1	2.1	-0.5	2.1
L628	-39.4	12.0	-1.0	7.6	-7.5	-2.5	1.0	4.0	-0.3	4.0
L629	-35.3	27.3	-3.3	17.7	-15.7	-5.9	0.5	6.9	-1.9	6.9
L630	-35.3	26.0	-3.1	16.9	-15.0	-5.6	0.4	6.5	-1.9	6.5
総計			64.5	42.3	112.9	47.4	-198.2	-178.7	-208.0	-178.8

10

20

30

40

50

【0111】

表2には、最外開口光線の開口角 および光路長 $R L_L$ のほかに、互いに直交する2つの直線偏光状態におけるレンズ方位別の光路差がまとめてある。(111)レンズ、(100)レンズおよび(110)レンズの別に光路差が列挙されている。その場合、レンズ内での最外辺縁光線の方位角 α_L は(111)レンズで 0° と 60° 、(100)レンズで 0° と 45° および(110)レンズで 0° 、 45° 、 90° および 135° である。

【0112】

表2から明らかのように、レンズL608、L617、L618、L619、L627、L628、L629およびL630の開口角は 25° を超え、さらにレンズL618、L627、L628、L629およびL630については 30° も超えている。特に開口角が大きいのは、像平面に最も近いところにあるレンズL627～L630である。

【0113】

投射対物レンズの設計面での工夫により、全光線の最大開口角を 45° 未満にすることが

できた。最外開口光線の最大開口角は、レンズL628における 39.4° である。分厚い2つの平面レンズL629およびL630を像平面の直前に設置したのが非常に有効であった。

【0114】

レンズL621とL622との間にある絞りの直径は270mmである。レンズL618の直径は207mmおよびレンズL627～L630の直径はいずれも190mm未満である。したがって、大きな開口角を示すこれらのレンズの直径は絞り直径の80%未満である。

【0115】

表2から見て取れるように、大きな開口角を持つ個別レンズは(100)方向に向けるのが好都合である。そうすれば全体として複屈折値が低くなる。それは、(100)レンズの場合では(111)レンズの場合より大きな角度にならなると $\langle 110 \rangle$ 結晶方向の影響が感知できないことによる。例えば、レンズL608、L609およびL617の場合光路差は30%超小さくなる。

【0116】

両平面平行レンズL629およびL630を手掛かりに、レンズの相互回転によって複屈折が明らかに抑制できることがはっきりと証明できる。両レンズは最外開口光線に対して同じ開口角 35.3° および類似の光路長27.3mm、あるいは26.0mmを有している。両レンズを(100)レンズとして同方位に組み込めば、光路差は30.7nmとなる。しかし、両(100)レンズを相互に 45° 捻れば、光路差は20.9nmに、すなわち32%減少する。両レンズを(111)レンズとして同方位に組み込めば、光路差は34.6nmとなる。しかし、両(111)レンズを相互に 60° 捻れば、光路差は13.6nmに、すなわち61%減少する。

【0117】

レンズL629およびL630に起因する固有複屈折により生じる、互いに直交する2つの直線偏光状態における光路差に対しては、レンズL629をレンズL6291とL6292に、レンズL630をレンズL6301とL6302に分割することによりほぼ完全な補償を達成することができる。ただし、レンズL6291は厚さ9.15mmの(100)レンズ、レンズL6292は厚さ13.11mmの(111)レンズ、レンズL6301は厚さ8.33mmの(100)レンズ、レンズL6302は厚さ12.9mmの(111)レンズである。レンズL6291とレンズL6301は互いに 45° 、レンズL6292とレンズL6302は互いに 60° 捻れて配置されている。この場合に生じる最大光路差は0.2nmである。レンズL6291とレンズL6292も、レンズL6301とレンズL6302も、例えば圧着加工により光学的に継目なく接合できる。

【0118】

上記の原理は、投射対物レンズに1つの結晶レンズしか含まれていない場合でも適用できる。その場合では結晶レンズを少なくとも2つのレンズに分割し、互いに捻れた状態に配置する。接合は圧着加工で行うことができる。別な可能性として、まず所望の結晶方位を持つ個別平板を光学的に継目なく結合させ、さらに続いての作業過程でその相互接合平板からレンズを作製するという方法もある。

【0119】

レンズL629とL630による固有複屈折の妨害的影響を抑制するまた別な可能性として、レンズL629をレンズL6293とレンズL6294に、レンズL630をレンズL6303とレンズL6304に分割することもできる。ただし、レンズL6293は厚さ11.13mmの(110)レンズ、レンズL6294は厚さ11.13mmの(110)レンズ、レンズL6303は厚さ10.62mmの(110)レンズ、レンズL6304は厚さ10.62mmの(110)レンズである。レンズL6293とレンズL6294およびレンズL6303とレンズL6304はそれぞれ互いに 90° 捻れた位置にあり、レンズL6293とレンズL6303間の回転角は 45° である。この場合に生じる最大光路差は4.2nmである。レンズL6293とレンズL6294も、レンズL6303とレンズL6304も、

03とレンズL6304も、レンズ部品として、例えば圧着加工により光学的に継目なく接合できる。

【0120】

高い負荷のかかったレンズL629およびL630によってもたらされる、互いに直交する2つの直線偏光状態における光路差に対しては、レンズL629を3つのレンズ部品L6295、L6296およびL6297に、およびレンズL630をレンズ部品L6305、L6306およびL6307に分割することによりほぼ完全に補償が達成される。ただし、レンズL6295は厚さ4.45mmの(100)レンズ、レンズL6296およびL6297は厚さ8.90mmの(110)レンズ、レンズL6305は厚さ4.25mmの(100)レンズ、レンズL6306およびL6307は厚さ8.49mmの(110)レンズである。レンズL6294とレンズL6304は互いに45°回転して、レンズL6295、L6297、L6306およびL6307はそれぞれ2つずつが互いに45°回転して配置されている。この組合せの結果、最大光路差は0.1nm未満に減少する。レンズL6295～レンズL6297も、レンズL6305～レンズL6307もレンズ部品として、例えば圧着加工により光学的に継目なく接合できる。

10

【0121】

レンズL629とL630による固有複屈折の妨害的影響を抑制する他の可能性として、2つの(110)レンズと1つの(100)レンズを組み合わせる方法がある。その場合、両(110)レンズは互いに90°捻れた状態で組み込むが、(100)レンズと(110)レンズ間の回転角は45°+m・90°とする。なお、mは整数である。上記目的には、レンズL629をレンズL6298とL6299に、レンズL630をレンズL6308とL6309に分割する。ただし、レンズL6298は厚さ17.40mmの(110)レンズ、レンズL6299は厚さ4.87mmの(110)レンズ、レンズL6308は厚さ12.53mmの(110)レンズで、レンズL6309は厚さ8.70mmの(100)レンズである。この場合に生じる最大光路差は3.1nmである。レンズL6298とレンズL6299も、レンズL6308とレンズL6309もレンズ部品として、例えば圧着加工により光学的に継目なく接合できる。

20

【0122】

図8には波長157nm用の反射屈折性投射対物レンズ711のレンズ切断面が描かれている。この対物レンズの光学データは表3にまとめてある。その実施形態は本出願人の特許出願PCT/EP00/13148(WO 150171 A1)に記載されており、その図9または表8に相当する。対物レンズの機能性に関するより詳しい説明については特許出願PCT/EP00/13148(WO 150171 A1)を参照のこと。この対物レンズはいずれのレンズもフッ化カルシウム結晶でできている。対物レンズの像側開口数は0.8である。

30

【0123】

図8の実施形態では、個別レンズL801～L817について上側の最外開口光線713および下側の最外開口光線715の開口角および光路長 RL_L を算出した。その場合、最外開口光線713および715は座標 $x = 0$ mm、 $y = -82.15$ mmの対象物点から出発し、像面では光軸に対し、像側開口数に相当する角度を形成する。上側および下側の最外開口光線は、軸から離れた対象物フィールドにあって、図7の実施形態における最外開口光線の場合とは異なり光軸に対し対称な方向に進まないで算出した。

40

【0124】

表4には上側の最外開口光線に関するデータが、表5には下側の最外開口光線に関するデータがまとめてある。表4および表5には最外開口光線の開口角および光路長 RL_L のほかに、互いに直交する2つの直線偏光状態における光路差がレンズ方位の別に、つまり(111)レンズ、(100)レンズおよび(110)レンズに分けて列挙されている。なお、レンズ内最外辺縁光線の方位角 θ_L は、(111)レンズが0°と60°、(100)レンズが0°と45°および(110)レンズが0°、45°、90°と135°である。

50

【 0 1 2 5 】

【 表 2 】

表 4

レンズ	開口角 θ [°]	光路長 R_L	光路差 (111)レンズ $\alpha_L = 0^\circ$ [mm]	光路差 (111)レンズ $\alpha_L = 60^\circ$ [mm]	光路差 (100)レンズ $\alpha_L = 0^\circ$ [mm]	光路差 (100)レンズ $\alpha_L = 45^\circ$ [mm]	光路差 (110)レンズ $\alpha_L = 0^\circ$ [mm]	光路差 (110)レンズ $\alpha_L = 45^\circ$ [mm]	光路差 (110)レンズ $\alpha_L = 90^\circ$ [mm]	光路差 (110)レンズ $\alpha_L = 135^\circ$ [mm]
801	1.4	28.1	0.8	-0.8	0.0	0.0	-18.2	-18.2	-18.2	-18.2
802	-10.8	30.7	-5.3	8.0	-2.7	-1.3	-17.2	-17.2	-17.3	-17.2
803	-15.6	32.4	-6.8	12.4	-5.7	-2.7	-15.3	-15.3	-15.4	-15.3
803	-24.4	31.8	-6.5	17.8	-11.7	-5.2	-8.4	-8.8	-9.0	-8.8
802	-19.5	26.6	-5.8	12.4	-6.8	-3.2	-10.2	-10.3	-10.4	-10.3
804	6.4	20.1	3.0	-2.4	-0.6	-0.3	-12.4	-12.4	-12.4	-12.4
805	10.8	34.4	9.0	-6.0	-3.0	-1.5	-19.3	-19.3	-19.3	-19.3
806	0.2	10.0	0.1	-0.1	0.0	0.0	-6.5	-6.5	-6.5	-6.5
807	-11.1	22.0	-3.9	5.9	-2.1	-1.0	-12.2	-12.2	-12.3	-12.2
808	0.1	18.5	0.0	0.0	0.0	0.0	-12.0	-12.0	-12.0	-12.0
809	-0.8	9.0	-0.1	0.2	0.0	0.0	-5.8	-5.8	-5.8	-5.8
810	1.1	12.4	0.3	-0.3	0.0	0.0	-8.0	-8.0	-8.0	-8.0
811	-16.8	9.4	-2.0	3.8	-1.9	-0.9	-4.2	-4.2	-4.2	-4.2
812	-10.4	29.8	-5.0	7.5	-2.4	-1.2	-16.9	-16.9	-16.9	-16.9
813	-8.8	34.7	-5.2	7.3	-2.1	-1.0	-20.5	-20.5	-20.5	-20.5
814	-9.4	17.5	-2.8	4.0	-1.2	-0.6	-10.2	-10.2	-10.2	-10.2
815	-27.4	28.1	-5.3	16.9	-12.2	-5.3	-5.2	-6.4	-6.1	-6.4
816	-28.7	40.2	-7.1	24.8	-18.6	-7.9	-6.2	-8.5	-7.6	-8.5
817	-30.8	39.0	-6.3	24.7	-19.6	-8.1	-3.9	-8.0	-5.7	-8.0
総計			-48.9	136.1	-90.9	-40.3	-212.9	-220.9	-218.0	-220.9

10

20

30

【 0 1 2 6 】

【 表 3 】

表5

レンズ	開口角 θ [°]	光路長 R_L	光路差 (111)レンズ $\alpha_L = 0^\circ$ [nm]	光路差 (111)レンズ $\alpha_L = 60^\circ$ [nm]	光路差 (100)レンズ $\alpha_L = 0^\circ$ [nm]	光路差 (100)レンズ $\alpha_L = 45^\circ$ [nm]	光路差 (110)レンズ $\alpha_L = 0^\circ$ [nm]	光路差 (110)レンズ $\alpha_L = 45^\circ$ [nm]	光路差 (110)レンズ $\alpha_L = 90^\circ$ [nm]	光路差 (110)レンズ $\alpha_L = 135^\circ$ [nm]
801	-11.6	32.1	-5.8	9.0	-3.2	-1.6	-17.6	-17.6	-17.6	-17.6
802	19.5	28.3	13.3	-6.1	-7.3	-3.4	-10.9	-10.9	-11.1	-10.9
803	24.7	33.8	19.1	-6.9	-12.7	-5.7	-8.6	-9.2	-9.3	-9.2
803	17.7	34.3	14.7	-7.4	-7.5	-3.6	-14.6	-14.6	-14.8	-14.6
802	12.7	31.6	9.7	-6.0	-3.8	-1.8	-16.7	-16.7	-16.8	-16.7
804	-5.2	27.7	-2.7	3.3	-0.6	-0.3	-17.4	-17.4	-17.4	-17.4
805	-4.5	34.6	-3.0	3.5	-0.5	-0.3	-21.9	-21.9	-21.9	-21.9
806	-8.6	19.5	-2.9	4.0	-1.1	-0.6	-11.6	-11.6	-11.6	-11.6
807	-0.5	16.5	-0.2	0.2	0.0	0.0	-10.7	-10.7	-10.7	-10.7
808	-8.2	25.6	-3.7	5.0	-1.3	-0.7	-15.3	-15.3	-15.3	-15.3
809	-7.5	10.1	-1.3	1.8	-0.4	-0.2	-6.1	-6.1	-6.1	-6.1
810	-9.1	13.1	-2.0	2.9	-0.8	-0.4	-7.7	-7.7	-7.7	-7.7
811	9.0	9.9	2.1	-1.5	-0.6	-0.3	-5.8	-5.8	-5.8	-5.8
812	2.6	30.7	1.8	-1.6	-0.2	-0.1	-19.8	-19.8	-19.8	-19.8
813	0.9	34.0	0.6	-0.6	0.0	0.0	-22.1	-22.1	-22.1	-22.1
814	1.3	10.4	0.3	-0.3	0.0	0.0	-6.7	-6.7	-6.7	-6.7
815	23.5	16.3	8.9	-3.4	-5.7	-2.6	-4.7	-4.8	-4.9	-4.8
816	24.6	37.2	21.0	-7.6	-13.9	-6.2	-9.6	-10.2	-10.3	-10.2
817	29.4	29.6	18.5	-5.1	-14.1	-5.9	-4.0	-6.2	-5.2	-6.2
総計			88.3	-16.8	-73.7	-33.5	-231.9	-235.4	-235.2	-235.4

10

20

30

40

50

【0127】

表4および表5から分かるように、レンズL815~L817における開口角は25°を超えている。この実施形態でも像平面に最も近いレンズL815~L817が大きな開口角を有している。レンズL815~L817の設計面での工夫により、最大開口角を $\arcsin(NA/n_{FK}) = \arcsin(0.8/1.5597) = 30.9^\circ$ より小さいか等しくすることができた。レンズL817における最外開口光線の最大開口角は30.8°である。

【0128】

レンズL811とL812との間に存在する絞りの直径は193mmである。レンズL815~L817の直径はいずれも162mm未満である。したがって、大きな開口角を示すこれらのレンズの直径は絞り直径の85%未満である。

【0129】

表4および表5より明らかなように、大きな開口角を持つレンズは(100)方向に向けるのが好都合である。そうすれば複屈折値が全体として(111)レンズの場合より低くなるからである。例えばレンズL815~L817の場合、光路差は(111)レンズより20%超小さい。

【0130】

以下では図8の実施形態に基づき、相互に捻れ配置された(100)レンズを持つグループと相互に捻れ配置された(111)レンズを持つグループとの同時平行使用により固有複屈折が如何に大きく補償されるかを見ていく。

【0131】

まず最初は、フッ化カルシウムレンズをすべて(111)レンズの相互捻れなしに(11

1) 方位に組み込む。この場合、互いに直交する2つの直線偏光状態においては最高光路差が136nmである。(111)レンズの回転により最高光路差を約38nmに下げることができる。そのためには、レンズL801とL804を1つのグループに、レンズL802とL803をまた別な1つのグループにまとめる。その場合のレンズ間の回転角はそれぞれ60°とする。レンズL808、L809、L810を、およびレンズL815、L816、L817をそれぞれ第3グループとしてまとめる。その場合の2レンズ間の回転角はそれぞれ40°である。レンズL811、L812、L813およびL814を相互回転角30°に設定して第4グループにまとめる。

【0132】

フッ化カルシウムレンズをすべて(100)レンズの相互捻れなしに(100)方位に組み込めば、互いに直交する2つの直線偏光状態においては最高光路差が90.6nmになる。(100)レンズの回転により最高光路差を約40nmに下げることができる。そのためには、レンズL801とL804を1つのグループに、レンズL802とL803をまた別な1つのグループにまとめる。その場合のレンズ間の回転角はそれぞれ45°とする。レンズL808、L809、L810を、およびレンズL815、L816、L817をそれぞれ第3グループとしてまとめる。その場合の2レンズ間の回転角はそれぞれ30°である。レンズL811、L812、L813およびL814を相互回転角22.5°に設定して第4グループにまとめる。

【0133】

互いに直交する2つの直線偏光状態における最大光路差は、(100)レンズグループと(111)レンズグループとを組み合わせることによって、わずか7nmにすることができる。そのためには、レンズL801とL804を1つの(111)レンズグループにまとめる。その場合のレンズ間の回転角は60°とする。レンズL802とL803も1つの(100)レンズグループにまとめる。その場合のレンズ間の回転角は45°とする。レンズL808、L809およびL810を第3(100)レンズグループとしてまとめる。その場合の2レンズ間の回転角はそれぞれ30°とする。レンズL815、L816およびL817も第3(111)レンズグループとして1つにまとめる。その場合の2レンズ間の回転角はそれぞれ40°とする。レンズL811、L812、L813およびL814を相互回転角22.5°に設定して第4(100)レンズグループにまとめる。1つのグループにまとめられないレンズL805およびL807のレンズ軸は<111>結晶方向に向いているが、一方レンズL806のレンズ軸は<100>結晶方向に向いている。グループ間では光軸の周りに任意に相互捻れ配置することができる。この回転自由度は、例えばレンズフレームによって発生する非回転対称な収差の補償に利用することができる。

【0134】

以下では、(100)、(111)または(110)レンズグループが如何にして決定されるかについて、また別な方法を説明する。この場合、既知の光学デザインを持つ対物レンズを前提とする。この対物レンズは複数レンズが複屈折性のフッ化物結晶から成っている。それらレンズの複屈折特性は既知である。例えば固有複屈折の影響は、光線の開口角および方位角に応じて理論的に予知することができる。しかし、複屈折特性はレンズでの測定によっても知ることができる。レンズの複屈折特性は既知なので、対物レンズ内の光線が呈する、互いに直交する2つの直線偏光状態における光路差が判明する。この光路差は、以下では、その絶対値の最小化が重要な最適化指数として利用する。同様の方法で、個別光線の光線束全体に対しても最適化を行うことができる。この最適化に対して与えられる可能な自由度とは、個別レンズ相互間の回転角および主結晶方向に対するレンズ軸の方位である。上記の原則に基づけば、1つにはレンズ軸が主結晶方向に向いているのが、また1つにはレンズの相互回転角がそれぞれのレンズ軸の方向に依存した離散値しかとらないのが好都合である。

【0135】

レンズ軸の方位に関しては3つの自由度が提供されている。つまり、レンズ軸は(100)

)、(111)および(110)結晶方向に向けることができる。

【0136】

レンズ軸が同一の、またはそれと等価な主結晶方向に向いているレンズは単一グループに統合される。ただし、各グループは少なくとも2つのレンズを擁するものとする。

【0137】

グループ内レンズの離散回転角はレンズ軸の方位に応ずる。

n個の(100)レンズを擁するグループの回転角については次式が成り立つ：

$$= 90^\circ / n + m \cdot 90^\circ \pm 10^\circ$$

ただし、mは任意の整数である。

グループが2つの(100)レンズを擁する場合、これら両レンズ間の回転角は、理想的には45°、135°、225°...である。 10

n個の(111)レンズを含むグループの回転角については次式が成り立つ：

$$= 120^\circ / n + m \cdot 120^\circ \pm 10^\circ$$

ただし、mは任意の整数である。

n個の(110)レンズを含むグループの回転角については次式が成り立つ：

$$= 180^\circ / n + m \cdot 180^\circ \pm 10^\circ$$

ただし、mは任意の整数である。

【0138】

このように、自由度としてレンズ相互間の離散回転角および離散結晶方位が提供される。このパラメータ空間の中で、個別レンズ毎に、最適化指数が最小値を取るまたは閾値を下回る場合の回転角および結晶方位の組合せを見出すことができる。 20

各対物レンズを対象として、互いに直交する2つの直線偏光状態における光路差が光線束全体を通して最小値となるような最適解決策は存在する。

しかしこの最適解決策を求めるには、特に、図7または図8の対物レンズのように対物レンズに多数のレンズが含まれている場合では極端に手間がかかる。

【0139】

必ずしも最適な解決策でなくても、対物レンズの実用に十分である解決策を見い出すための最適化法が現在公知になっている。文献から知られる極めて類似した数学的課題は「操作側の問題」であり、そこでは与えられた地図で所定の都市を通る最短ルートを見出すことが重要である。 30

最適化には、文献から下記名称で知られる次の方法が使用できる：

1. モンテカルロ探索法
2. シミュレーション・クーリング (“ Simulated Annealing ”)
3. 閾値採用 (“ Threshold accepting ”)
4. 中間加熱を伴うシミュレーション・クーリング
5. 遺伝学アルゴリズム

【0140】

固有複屈折における妨害的影響の補償には、最初の実施形態では各レンズに4つの自由度(FGH)が提供されている：

F G H 1 : 回転角0°の(111)レンズ

F G H 2 : 回転角60°の(111)レンズ

F G H 3 : 回転角0°の(100)レンズ

F G H 4 : 回転角45°の(100)レンズ

回転角はそれぞれ対象物平面の固定基準方向を基準とした値である。 40

【0141】

図8の投射対物レンズ711について、モンテカルロ探索法の利用および4つの自由度F G H 1 ~ F G H 4の予備設定により、レンズ軸の最適結晶方位および対象物平面の固定基準方向に対するレンズの回転角 θ_L を決定した。表6はレンズL801~L817についてレンズ軸の結晶方向および回転角 θ_L を示している。さらに、各レンズ毎に、互いに直交する2つの直線偏光状態における光路差が、最外開口光線の最上部および最下部の別に 50

記載されている。それより得られた最大光路差の結果は 5 nm である。

【 0 1 4 2 】

【 表 4 】

表 6

レンズ	レンズ軸の方位	角度 β_L [°]	最外開口光線最上部の光路差 [nm]	最外開口光線最下部の光路差 [nm]
L801	<100>	45	0.0	-3.1
L802	<111>	60	-13.0	29.7
L803	<100>	0	-15.1	-27.6
L803	<100>	0	-26.0	-19.2
L802	<111>	60	28.3	-14.2
L804	<111>	0	-7.6	9.8
L805	<100>	45	-3.1	-1.0
L806	<100>	0	0.0	-2.1
L807	<111>	60	-7.8	1.0
L808	<100>	45	0.0	-1.1
L809	<100>	0	0.0	-0.7
L810	<100>	0	-0.1	-1.5
L811	<100>	0	-3.9	-1.7
L812	<111>	0	15.4	-5.0
L813	<100>	0	-3.7	-0.2
L814	<100>	0	-2.1	-0.1
L815	<100>	45	-11.4	-6.6
L816	<111>	60	-16.8	49.6
L817	<111>	0	55.7	-12.2
総計			-5.0	-2.7

10

20

30

40

【 0 1 4 3 】

レンズを個別グループに割り当てる場合には、最適化に関し別な自由度が生じる。その場合、同グループ内のレンズのレンズ軸は同一の主結晶方向に向いている。同グループ内のレンズは、グループに起因する、互いに直交する 2 つの直線偏光状態における光路差分布がほぼ回転対称になるように互いに捻れた状態で配置される。個別グループ間の回転角は任意に調整可能で、この補足的自由度によって例えば製作過程に起因する追加収差の補正をする。

【 0 1 4 4 】

表 6 の実施形態ではレンズ L 8 0 1 と L 8 1 4 が (1 0 0) レンズの第 1 グループを形成

50

している。なお、両レンズは回転角 45° 分相互に捻れた位置に配置されている。
 レンズ L 8 0 2、L 8 0 4、L 8 0 7 および L 8 1 2 は (1 1 1) レンズの第 2 グループを形成している。その場合、レンズ L 8 0 2 と L 8 0 7、レンズ L 8 0 4 と L 8 1 2 がそれぞれ従グループを形成し、それら従グループ内ではレンズは相互には捻り配置されていないか、またはせいぜい $= 1 \cdot 120^\circ \pm 10^\circ$ の回転角を呈している。ただし、1 は整数である。両従グループは相互に 60° 捻れて配置されているので、異なった従グループからの 2 つのレンズ間の回転角は $= 60^\circ + m \cdot 120^\circ \pm 10^\circ$ である。式中 m は整数である。

レンズ L 8 0 3、L 8 0 5 および L 8 1 5 は (1 0 0) レンズの第 3 グループを形成している。その場合、レンズ L 8 0 3 およびレンズ L 8 0 5 と L 8 1 5 がそれぞれ従グループを形成し、それら従グループ内ではレンズは相互には捻り配置されていないか、またはせいぜい $= 1 \cdot 90^\circ \pm 10^\circ$ の回転角を呈している。ただし、1 は整数である。両従グループは相互に 45° 捻れて配置されているので、異なった従グループからの 2 つのレンズ間の回転角は $= 45^\circ + m \cdot 90^\circ \pm 10^\circ$ である。式中 m は整数である。

レンズ L 8 0 8、L 8 0 9 および L 8 1 1 は (1 0 0) レンズの第 4 グループを形成している。その場合、レンズ L 8 0 8 およびレンズ L 8 0 8 と L 8 0 9 がそれぞれ従グループを形成し、それら従グループ内ではレンズは相互には捻り配置されていないか、またはせいぜい $= 1 \cdot 90^\circ \pm 10^\circ$ の回転角を呈している。ただし、1 は整数である。両従グループは相互に 45° 捻れて配置されているので、異なった従グループからの 2 つのレンズ間の回転角は $= 45^\circ + m \cdot 90^\circ \pm 10^\circ$ である。式中 m は整数である。

レンズ L 8 1 6 および L 8 1 7 は第 5 の (1 1 1) レンズグループであり、両レンズは回転角 60° 分捻れて配置されている。

【 0 1 4 5 】

第 2 の実施形態では各レンズに 8 つの自由度が提供されている：

F G H 1 : 回転角 0° の (1 1 1) レンズ

F G H 2 : 回転角 60° の (1 1 1) レンズ

F G H 3 : 回転角 0° の (1 0 0) レンズ

F G H 4 : 回転角 45° の (1 0 0) レンズ

F G H 5 : 回転角 0° の (1 1 0) レンズ

F G H 6 : 回転角 90° の (1 1 0) レンズ

F G H 7 : 回転角 45° の (1 1 0) レンズ

F G H 8 : 回転角 135° の (1 1 0) レンズ

【 0 1 4 6 】

自由度の数が増えると共に最適化の結果が良好になるが、最適化コストは指数関数的に上昇する。回転角をより細かく等級付けすることによって自由度はさらに増える。

【 0 1 4 7 】

最適化では応力性複屈折に関する測定データ、レンズまたはミラーの表面データおよび/またはレンズの素材不均質性を考慮に入れることもできる。このようにして、発生する障害要因がすべて掌握されると共に、自由度の利用により、全体として良好な結像品質を提供する対物レンズの状態が求められる。

【 0 1 4 8 】

以下では最適化法を個別ステップ毎に説明する：

第 1 ステップでは、レンズの複屈折特性が既知である対物レンズについて目的関数を立てる。目的関数とは複屈折における妨害的影響の尺度を表すものである。目的関数として、例えば、最外開口光線の互いに直交する 2 つの直線偏光状態における光路差を用いることができる。また、光線束光路差分布の最大値または中間値を目的関数として定義付けすることもできる。レンズの回転角、結晶方位および当該状態についての対物レンズの目的関数を記憶させる。

目的関数には、設定レベルに達しなければ複屈折の妨害的影響の許容できる閾値が存在する。

10

20

30

40

50

第2ステップでは、目的関数が閾値を下回っているかどうかを試験される。閾値を下回っていれば、作業を打ち止める。閾値を下回っていなければ、第3ステップに入る。

第3ステップでは、所定の自由度に基づきレンズ相互間の回転角および対物レンズ内の結晶方位を変更する。その場合、前記方法の1つ、例えばモンテカルロ法を使用する。

第3ステップの後には作業は第1ステップに立ち戻る。その場合、研削実施回数を測定する。研削実施回数が極大値を超えた場合も作業を打ち止めにする。

【0149】

このように、定められた閾値を下回った場合、または所定の研削回数を上回った場合には作業を打ち止める。研削極大値を超えた場合には、例えばその結果として、当該目的関数と共に対物レンズ個別状態の表示されたランクリストが作成されるようにすることができる。

10

【0150】

以下では屈折性対物レンズ611の例を基に、光学素子に補償コーティング613を施すことによって複屈折作用の妨害的影響が如何に明白に軽減できるかを示すことにする。それには、フッ化カルシウムから構成されているために固有複屈折を呈する両レンズL629およびL630の複屈折成分だけを観察する必要がある。この実施形態では両レンズは(111)方位を示し、相互に60°捻れて配置されている。それにより、ほぼ回転対称な光路差OPL分布が達成される。最外開口光線の最大光路差OPLは、方位角 θ の如何に応じて13.6nm~14.6nmである。像平面O'のほうに向いたレンズL630の光学面上には、表7に記載された補償コーティング613が施される。補償コーティング613は、フッ化マグネシウム(MgF₂)およびフッ化ランタン(LaF₃)を素材とする15の個別層から成っている。表7のnおよびkは屈折率の実部と虚部を表している。層厚は均等であり、側部に厚さブレはない。コーティング過程での蒸着角度はレンズL630の光学面に垂直である。補償コーティングの結果、両レンズL629、L630間の光路差は1.1nmとなって、補償コーティングなしの対物レンズに比較して明らかに小さくなっている。

20

【0151】

【表5】

表 7

層	厚さ [nm]	素材
	基板	CaF ₂
1	103.54	MgF ₂
2	41.54	LaF ₃
3	33.35	MgF ₂
4	30.8	LaF ₃
5	39.53	MgF ₂
6	35.34	LaF ₃
7	32.05	MgF ₂
8	27.25	LaF ₃
9	28.57	MgF ₂
10	26.48	LaF ₃
11	27.64	MgF ₂
12	26.17	LaF ₃
13	27.36	MgF ₂
14	26.11	LaF ₃
15	8.66	MgF ₂

10

20

光学定数	n	k
LaF ₃	1.760026	0.00118471
MgF ₂	1.506675	0.00305275

30

40

50

【0152】

最終両レンズの代わりに、対物レンズ全体を観察する類似の作業法も可能である。複屈折を1光学素子にだけの補償コーティングにより補償する代わりに、複数の光学素子に対して補償コーティングを行うこともできる。

【0153】

この方法は、システム全体における複屈折を補償するためにも適用することができる。その場合、複屈折の原因としては応力性複屈折、固有複屈折および他層による複屈折が考えられる。

【0154】

システムの最終調整後、像平面の1つまたは複数の光線束について光路差 OPL の分布を測定する。次に、層最適化プログラムを利用して必要な補償層を算出して、これを例えば像平面に最も近いシステム平面に塗布する。像平面に最も近い光学素子を取り換え可能であれば好都合である。そのようにして、対物レンズの作動で初めて発生する複屈折作用の補正も可能である。

【0155】

UV内での結晶の複屈折を補償するためには、上述の通り、結晶軸方位の異なる結晶素子

を相前後して配置することができる。光学システム内に結晶方向の異なるレンズを相前後して配置した場合、光線のレンズ透過角度がまちまちになることが多くて、補償可能性がごく限られるかもしれないという問題がある。結晶レンズしか含まない光学系の場合、この種の補償は全く不可能である。

解決策の1つは、レンズの構造を2分割して、相互に捻れた状態で圧着する方法である。実際にはこの方法には、通過部を変形させる応力がかかるほか、両分割半片の側面がマイクロメータの精度で位置設定されねばならないという難点がある。

結晶軸方位を基準に相互に捻れた状態で圧着した個別平板から未加工材を製作し、それを切削および研磨してレンズに加工することが提案される。方位設定に関しては上記のことがここでもすべて当てはまる。光学系の製造における旧来の圧着（圧搾）加工のほかに、緊密な接触が得られて応力障害ができるだけ少なければ、他の接合技術もすべて可能であり、本発明の範囲に含まれる。圧着加工は、特に、例えば石英ガラスなどの層により補助することができる。重要なのは、接合箇所障害となるような屈折または反射が起きないことである。

【0156】

方位の選択は上記の法則に従って行う。

【0157】

実施形態としては、例えば図8の投射対物レンズに用いるレンズL816の製作材料である未加工材が挙げられる。レンズL816は、天頂半径342.13mmの凸非球面の前面および天頂半径449.26mmの凹球面の背面を有している。軸方向の厚さは37.3mmである。レンズの素材はフッ化カルシウムである。レンズの直径は141mmである。レンズが切り出される未加工材は、少なくとも全体の厚さが45mm、直径が150mmなければならない。この場合、未加工材は相互に45°回転した厚さ9.0mmの2枚の(100)平板と相互に60°回転した厚さ13.5mmの2枚の(111)平板から成っていて、双方が光学的に継目なく接合されている。この(100)平板と(111)平板はそれぞれ隣接配置されていなければならない。

【0158】

他の実施形態では、それぞれ45°ずつ回転した厚さ3.0mmの6枚の(100)平板とそれぞれ60°ずつ回転した厚さ4.5mmの6枚の(111)平板が光学的に継目なく接合されている。ただし、常に2枚の(100)平板の後には2枚の(111)平板がくるように配置されている。

【0159】

別な実施形態では、相互に45°回転した厚さ9.0mmの4枚の(110)平板と相互に45°回転した厚さ4.5mmの2枚の(100)平板が光学的に継目なく接合されている。ただし、2枚の(100)平板は4枚の(110)平板の後に配置されている。

【0160】

また別な実施形態では、相互に45°回転した厚さ4.5mmの8枚の(110)平板と相互に45°回転した厚さ2.25mmの4枚の(100)平板が光学的に継目なく接合されている。ただし、4枚の(110)平板はそれぞれ2枚の(100)平板の後に配置されている。

【0161】

以下では、レンズまたはレンズ部品間の回転角を照準調整するための方法について説明する。それによれば、レンズまたはレンズ部品に、あるいはその保持フレームに然るべきマーキングを行うことができる。実施形態として、そのレンズ軸が<111>結晶方向に向いているフッ化カルシウムレンズの製造について説明する。当製法は、フッ化バリウムまたはフッ化ストロンチウムなど立方晶系構造の他の結晶素材から成るレンズの製造にも転用できる。また、レンズ軸が<100>または<110>結晶方向であっても可能である。当方法は、平面平行構造のものだけでなく湾曲構造のレンズまたはレンズ部品の製造にも適している。

【0162】

10

20

30

40

50

第1ステップでは、光学未加工品、本例ではフッ化カルシウム円板の $\langle 111 \rangle$ 結晶方向の方位を決定する。これは、例えば劈開面の探知またはエッチピットの生成など結晶学的方法により高精度で行うことができる。この方向測定はレントゲン回折法により改良できる。それに適した機器は単色レントゲン線使用のゴニオメータである。文献から知られている一覧表を基に $\{111\}$ 結晶平面でのブラッグ反射の発現を測定する。なお、表の値は反射指数に応じた所要入射角を示している。測定では、フッ化カルシウムの円板をそれに垂直な軸の周りを回転させる。それにより、様々な回転角について、フッ化カルシウム円板の面法線からの $\langle 111 \rangle$ 結晶方向の偏差が求められる。偏差の測定は、少なくとも2つの回転位置で行うのが好都合である。本実施形態では 0° と 90° で測定が行われる。測定精度を高めるために、これに加えて 180° と 270° でも測定することができる。

10

【0163】

第2ステップではフッ化カルシウム円板は、その面法線が $\langle 111 \rangle$ 結晶方向に平行になるように加工される。その際の測定偏差は、照準補正、すなわちフッ化カルシウム円板の鋸切断または研削による指定どおりの加工における基礎データとして用いられる。この加工ステップ後には、フッ化カルシウム円板の面法線は 5° 未満の偏差で $\langle 111 \rangle$ 結晶方向に向いている。

【0164】

第3ステップでは、フッ化カルシウム円板において基準方向が決められる。フッ化カルシウム円板の面法線が $\langle 111 \rangle$ 結晶方向に向いていれば、 $\langle 111 \rangle$ 結晶方向の周りに3軸対称でグループ化されている3結晶方向 $\langle 110 \rangle$ 、 $\langle 011 \rangle$ および $\langle 101 \rangle$ 、あるいは $\langle 100 \rangle$ 、 $\langle 010 \rangle$ および $\langle 001 \rangle$ の1つを知っておくのが好都合である。このことは、光線がフッ化カルシウムレンズ内で $\langle 110 \rangle$ 結晶方向またはそれと等価な結晶方向を進む場合、互いに直交する2つの直線偏光状態では固有複屈折により最大光路差となることから注目される。光線が $\langle 100 \rangle$ 結晶方向またはそれと等価な結晶方向を進む場合、光路差は現われない。その場合では、3結晶方向 $\langle 110 \rangle$ 、 $\langle 011 \rangle$ および $\langle 101 \rangle$ はそれぞれ 35° の角度を形成し、3結晶方向 $\langle 100 \rangle$ 、 $\langle 010 \rangle$ および $\langle 001 \rangle$ は $\langle 111 \rangle$ 結晶方向と 55° の角度を形成する。 (110) または (100) 結晶平面のレントゲン反射は物理的理由から測定不可能である。したがって、 (100) または (110) 結晶平面に対して決められた関係にある他の結晶平面のブラッグ反射を利用しなければならない。例えば (331) ブラッグ反射が利用できる。その場合、3結晶方向 $\langle 331 \rangle$ 、 $\langle 133 \rangle$ および $\langle 313 \rangle$ はそれぞれ $\langle 111 \rangle$ 結晶方向と 22° の角度を形成する。 (331) ブラッグ反射は、フッ化カルシウムの場合単色銅K光線(8048 eV)では 38° 未満で現われる。それより、フッ化カルシウム円板の表面によって決められる参照平面に対し、入射角 16° および検出角 60° が得られる。円板が面法線の周りを 360° 回転すれば、3つの回転角でブラッグ反射が測定できる。これは、3つの関連 (331) 結晶平面の方向ベクトルの1つがブラッグ測定の入射平面にあることを指し示している。これら3つの (331) 結晶方向の円板表面への投射は、3結晶方向 $\langle 110 \rangle$ 、 $\langle 011 \rangle$ および $\langle 101 \rangle$ の投射に平行である。したがって、結晶方向 $\langle 331 \rangle$ 、 $\langle 133 \rangle$ および $\langle 313 \rangle$ の投射方向を決めれば、同時に結晶方向 $\langle 110 \rangle$ 、 $\langle 011 \rangle$ および $\langle 101 \rangle$ の投射方向も決まる。表面法線と $\langle 111 \rangle$ 結晶方向との間で偏差がある場合には、光源および検出器を然るべき位置に誘導し直さねばならない。

20

30

40

【0165】

代替法として、結晶方位はラウエ像によっても決定することができる。ラウエ法では、単色レントゲン線による上記のブラッグ反射測定とは違って、「白色」、すなわち広帯幅レントゲン光を使って作業する。白色レントゲン光では様々な結晶平面グループのブラッグ反射が得られるので、素材の特徴が出たラウエ像が生成される。 $\langle 111 \rangle$ 結晶方向が入射方向に平行であれば、3方位対称のラウエ像が生成される。 $\langle 111 \rangle$ 結晶方向が円板法線から数度離反していれば、その結果としてやや歪んだ像になる。例えば適当なソフト

50

ウェアを使ってのラウエ像の精確な分析は、 $\langle 111 \rangle$ 結晶方向の円板法線からの偏差を測定するのに利用できる。さらに、像の評価から、3方の結晶方向 $\langle 110 \rangle$ 、 $\langle 011 \rangle$ および $\langle 101 \rangle$ または $\langle 100 \rangle$ 、 $\langle 010 \rangle$ および $\langle 001 \rangle$ の決定が、したがって円板の方位設定が可能になる。

【0166】

第4ステップではフッ化カルシウム円板に対して、投射結晶方向 $\langle 110 \rangle$ 、 $\langle 011 \rangle$ および $\langle 101 \rangle$ または $\langle 100 \rangle$ 、 $\langle 010 \rangle$ および $\langle 001 \rangle$ の1つの方向を示すマーキングを少なくとも1つ付ける。マーキングは、例えば彫り込み、腐食または文字の書き込みによって行うことができる。マーキングにはフッ化カルシウム円板の円筒縁が利用される。これに代わり、フッ化カルシウム円板が固定されているフレームにマーキングすることもできる。

10

【0167】

第5ステップでは、レンズ軸が $\langle 111 \rangle$ 結晶方向に平行になるように、フッ化カルシウム円板からレンズを作製する。前もって付けたマーキングがフッ化カルシウム円板の加工時に破壊されることはない。それが実現可能なのは、研削や研磨など多くの加工過程がレンズの上面および下面にだけ関係し、円筒縁には関係ないからである。しかし、フッ化カルシウム円板の縁も、例えば回転作業などによる加工を行う場合、マーキングをフッ化カルシウム円板のフレームに十分な精度で転写し、加工終了後には再び円筒縁にマーキングを付けることが必要である。

【0168】

別な実施形態では、レンズ軸が既に $\langle 111 \rangle$ 結晶方向に向いているレンズがフッ化カルシウム円板から製造される。この場合、マーキングはレンズ製造後に付けられる。

20

【0169】

第1ステップでは、フッ化カルシウム円板からレンズを、レンズ軸が $\langle 111 \rangle$ 結晶方向に向くように製造される。

【0170】

第2ステップでは基準方向が決定される。この場合、フッ化カルシウム円板について既述したのと同じ方法が適用される。ただし、レントゲン線のレンズ表面への衝突点は、その高さにより精確に調整するように注意しなければならない。つまり、レンズの接触面はその高さで調整可能である。このように、湾曲レンズ表面の様々な点を測定すれば、レンズの湾曲側面を辿ることができる。そのほか、湾曲によって入射光線と出射光線の陰影が生じる場合のあることにも注意しなければならない。陰影は、適切なブラッグ反射およびそれより生ずる測定幾何学構造の選択により避けることができる。

30

【0171】

平面平行な平板の場合、ゴニオメータ構造をベースとした記述の方法は表面のどの点にも適用できる。

【0172】

光学未加工品およびレンズの加工では、フッ化カルシウムのレントゲン線による照射で場合によっては着色中心が生成されることに注意しなければならない。フッ化カルシウムの場合、Cu-K 照射の浸透深度は約30 μm である。着色中心の存在を回避するためには、レントゲン分析は後に然るべき素材のレベリングを行うフッ化カルシウム未加工品またはレンズに対してだけ行うのが有利である。Cu-K 照射の場合レベリングは約30 μm である。

40

【0173】

図9に基づいてマイクロリソグラフィ用投射照明装置の原理構造を説明する。投射照明装置81は照明装置83と投射対物レンズ85を有している。投射対物レンズ85は開口絞りAPを持つ配列レンズ819を擁している。その場合光軸87は配列レンズ819によって決められる。配列レンズ819の実施形態は図7と図8に示されている。照明装置83と投射対物レンズ85との間には、マスクホルダ811によって光路内に保持されているマスク89が配置されている。マイクロリソグラフィに使用されるそのようなマスク8

50

9は、投射対物レンズ85により例えば1/4または1/5に縮小されて像平面813に結像するマイクロメータ～ナノメータ構造を有している。像平面813には基板ホルダ817によって位置設定されている感光性基板815あるいはウェハが保持されている。

【0174】

極小構造の分解可能性は、照明に使用される光の波長 および投射対物レンズ85の像側開口数に依る。その場合、投射照明装置81の達成可能な最大分解能は、照明装置83の波長 の短縮および投射対物レンズ85の像側開口数の増加と共に上昇する。図7および図8に示された実施形態によって150nmより小さい範囲での分解が実現できる。それゆえ、固有複屈折のような作用も極小化されるはずである。本発明により、まさに投射対物レンズにおける固有複屈折の妨害的影響を大きな像側開口数により大幅に低下させることに成功した。

10

【0175】

【表6】

表 1

レンズ	半径	厚さ	ガラス	157.629nmにお ける屈折率	1 / 2 自由直径
0	0.000000000	27.171475840	N2	1.00031429	46.200
	0.000000000	0.602670797	N2	1.00031429	52.673
L601	900.198243311AS	15.151284556	CaF2	1.55929035	53.454
	-235.121108435	9.531971079	N2	1.00031429	54.049
L602	-167.185917779	8.294716452	CaF2	1.55929035	54.178
	-132.673519510	14.020355779	N2	1.00031429	54.901
L603	-333.194588652	9.893809820	CaF2	1.55929035	53.988
	-155.450516203	15.930502944	N2	1.00031429	54.132
L604	-73.572316296	7.641977580	CaF2	1.55929035	53.748
	-68.248613899AS	2.881720302	N2	1.00031429	55.167
L605	-86.993585564AS	5.094651720	CaF2	1.55929035	52.580
	-238.150965327	5.379130780	N2	1.00031429	53.729
L606	-165.613920870	5.094651720	CaF2	1.55929035	53.730
	153.6217884485	34.150169591	N2	1.00031429	56.762
L607	-92.061009990	5.094651720	CaF2	1.55929035	58.081
	8491.086261873AS	19.673523795	N2	1.00031429	74.689
L608	-407.131300451	30.380807138	CaF2	1.55929035	87.291
	-140.620317156	0.761662684	N2	1.00031429	91.858
L609	-4831.804853654AS	50.269660218	CaF2	1.55929035	117.436
	-192.197373609	1.688916911	N2	1.00031429	121.408
L610	-367.718684892	21.227715500	CaF2	1.55929035	127.704
	-233.628547894	2.224071019	N2	1.00031429	129.305
L611	709.585855080	28.736922725	CaF2	1.55929035	137.016
	1238.859445357	9.120684720	N2	1.00031429	137.428
L612	1205.457051945	49.281218258	CaF2	1.55929035	138.288
	-285.321880705	1.625271224	N2	1.00031429	138.379
L613	137.549591710	56.718543740	CaF2	1.55929035	108.652
	-4380.301012978AS	0.623523902	N2	1.00031429	106.138
L614	2663.880214408	6.792868960	CaF2	1.55929035	103.602
	149.184979730	15.779049257	N2	1.00031429	84.589
L615	281.093108064	6.792868960	CaF2	1.55929035	83.373
	184.030288413	32.341552355	N2	1.00031429	77.968
L616	-222.157416308	5.094651720	CaF2	1.55929035	77.463
	101.254238115AS	56.792834221	N2	1.00031429	71.826
L617	-106.980638018	5.094651720	CaF2	1.55929035	72.237
	1612.305471130	20.581065398	N2	1.00031429	89.760
L618	-415.596135628	26.398111993	CaF2	1.55929035	96.803
	-204.680044631	0.713343960	N2	1.00031429	103.409
L619	-646.696622394	25.867340760	CaF2	1.55929035	116.636
	-231.917626896	0.766268682	N2	1.00031429	118.569
L620	-790.657607677	23.400482872	CaF2	1.55929035	128.806
	-294.872053725	0.721402031	N2	1.00031429	130.074
L621	786.625567756	40.932308205	CaF2	1.55929035	141.705
	-431.247283013	12.736629300	N2	1.00031429	142.089
	0.000000000	-8.491086200	N2	1.00031429	134.586
L622	295.022653593AS	20.185109438	CaF2	1.55929035	139.341
	449.912291916	0.619840486	N2	1.00031429	137.916
L623	358.934076212	48.662890509	CaF2	1.55929035	136.936
	-622.662988878	30.955714157	N2	1.00031429	135.288
L624	-224.404889753	12.736629300	CaF2	1.55929035	134.760
	-251.154571510AS	16.079850229	N2	1.00031429	134.853
L625	-193.582989843AS	16.510083506	CaF2	1.55929035	134.101
	-198.077570749	0.880353872	N2	1.00031429	136.109
L626	206.241795157	19.927993542	CaF2	1.55929035	101.240
	338.140581666	0.925956949	N2	1.00031429	97.594
L627	111.017549581	24.580089962	CaF2	1.55929035	85.023
	169.576109839	0.777849447	N2	1.00031429	81.164
L628	117.982165264	31.161065630	CaF2	1.55929035	75.464
	921.219058213AS	6.934980174	N2	1.00031429	69.501
L629	0.000000000	22.260797322	CaF2	1.55929035	63.637
	0.000000000	4.245543100	N2	1.00031429	48.606
L630	0.000000000	21.227715500	CaF2	1.55929035	41.032
	0.000000000	8.491086200	N2	1.00031429	26.698
	0.000000000	0.000000000		1.000000000	11.550

波長および屈折率は真空時との比較で表示されている。

非球面定数

レンズL601の非球面率

K	0.0000
C1	1.28594437e-007
C2	8.50731836e-013
C3	1.16375620e-016
C4	2.28674275e-019
C5	-1.23202729e-022
C6	3.32056239e-026
C7	-4.28323389e-030
C8	0.00000000e+000
C9	0.00000000e+000

レンズL604の非球面率

K	-1.3312
C1	-4.03355456e-007
C2	2.25776586e-011
C3	-2.19259878e-014
C4	4.32573397e-018
C5	-7.92477159e-022
C6	7.57618874e-026
C7	-7.14962797e-030
C8	0.00000000e+000
C9	0.00000000e+000

レンズL605の非球面率

K	-1.1417
C1	1.33637337e-007
C2	1.56787758e-011
C3	-1.64362484e-014
C4	3.59793786e-018
C5	-5.11312568e-022
C6	1.70636633e-026
C7	1.82384731e-030
C8	0.00000000e+000
C9	0.00000000e+000

10

レンズL607の非球面率

K	0.0000
C1	1.34745120e-007
C2	-2.19807543e-011
C3	1.20275881e-015
C4	4.39597377e-020
C5	-2.37132819e-023
C6	2.87510939e-027
C7	-1.42065162e-031
C8	0.00000000e+000
C9	0.00000000e+000

レンズL609の非球面率

K	0.0000
C1	6.85760526e-009
C2	-4.84524868e-013
C3	-6.28751350e-018
C4	-3.72607209e-022
C5	3.25276841e-026
C6	-4.05509974e-033
C7	-3.98843079e-035
C8	0.00000000e+000
C9	0.00000000e+000

レンズL613の非球面率

K	0.0000
C1	2.24737416e-008
C2	-4.45043770e-013
C3	-4.10272049e-017
C4	4.31632628e-021
C5	-3.27538237e-025
C6	1.44053025e-029
C7	-2.76858490e-034
C8	0.00000000e+000
C9	0.00000000e+000

20

レンズL616の非球面率

K	0.0000
C1	-2.83553693e-008
C2	-1.12122261e-011
C3	-2.05192812e-016
C4	-1.55525080e-020
C5	-4.77093112e-024
C6	8.39331135e-028
C7	-8.97313681e-032
C8	0.00000000e+000
C9	0.00000000e+000

レンズL622の非球面率

K	0.0421
C1	7.07310826e-010
C2	-2.00157185e-014
C3	-9.33825109e-020
C4	1.27125854e-024
C5	1.94008709e-027
C6	-6.11989858e-032
C7	2.92367322e-036
C8	0.00000000e+000
C9	0.00000000e+000

レンズL624の非球面率

K	0.0000
C1	3.02835805e-010
C2	-2.40484062e-014
C3	-3.22339189e-019
C4	1.64516979e-022
C5	-8.51268614e-027
C6	2.09276792e-031
C7	-4.74605669e-036
C8	0.00000000e+000
C9	0.00000000e+000

30

レンズL625の非球面率

K	0.0000
C1	-3.99248993e-010
C2	5.79276562e-014
C3	3.53241478e-018
C4	-4.57872308e-023
C5	-6.29695208e-027
C6	1.57844931e-031
C7	-2.19266130e-036
C8	0.00000000e+000
C9	0.00000000e+000

レンズL628の非球面率

K	0.0000
C1	4.40737732e-008
C2	1.52385268e-012
C3	-5.44510329e-016
C4	6.32549789e-020
C5	-4.58358203e-024
C6	1.92230388e-028
C7	-3.11311258e-033
C8	0.00000000e+000
C9	0.00000000e+000

40

【 0 1 7 6 】

【 表 7 】

表3

レンズ	半径	厚さ	ガラス	157.629nmにおける屈折率	1/2自由直径
0	0.000000000	34.000000000		1.00000000	82.150
	0.000000000	0.100000000		1.00000000	87.654
L801	276.724757380	40.000000000	CaF2	1.55970990	90.112
	1413.944109416AS	95.000000000		1.00000000	89.442
SP1	0.000000000	11.000000000		1.00000000	90.034
	0.000000000	433.237005445		1.00000000	90.104
L802	-195.924336384	17.295305525	CaF2	1.55970990	92.746
	-467.658808527	40.841112468		1.00000000	98.732
L803	-241.385736441	15.977235467	CaF2	1.55970990	105.512
	-857.211727400AS	21.649331094		1.00000000	118.786
SP2	0.000000000	0.000010000		1.00000000	139.325
	253.074839896	21.649331094		1.00000000	119.350
L803'	857.211727400AS	15.977235467	CaF2	1.55970990	118.986
	241.385736441	40.841112468		1.00000000	108.546
L802'	467.658808527	17.295305525	CaF2	1.55970990	102.615
	195.924336384	419.981357165		1.00000000	95.689
SP3	0.000000000	6.255658280		1.00000000	76.370
	0.000000000	42.609155219		1.00000000	76.064
Z1	0.000000000	67.449547115		1.00000000	73.981
L804	432.544479547	37.784311058	CaF2	1.55970990	90.274
	-522.188532471	113.756133662		1.00000000	92.507
L805	-263.167605725	33.768525968	CaF2	1.55970990	100.053
	-291.940616829AS	14.536591424		1.00000000	106.516
L806	589.642961222AS	20.449887046	CaF2	1.55970990	110.482
	-5539.698828792	443.944079795		1.00000000	110.523
L807	221.780582003	9.000000000	CaF2	1.55970990	108.311
	153.071443064	22.790060084		1.00000000	104.062
L808	309.446967518	38.542735318	CaF2	1.55970990	104.062
	-2660.227900099	0.100022286		1.00000000	104.098
L809	23655.354584194	12.899131182	CaF2	1.55970990	104.054
	-1473.189213176	9.318886362		1.00000000	103.931
L810	-652.136459374	16.359499814	CaF2	1.55970990	103.644
	-446.489459129	0.100000000		1.00000000	103.877
L811	174.593507050	25.900313780	CaF2	1.55970990	99.267
	392.239615259AS	14.064505431		1.00000000	96.610
	0.000000000	2.045119392		1.00000000	96.552
L812	7497.306838492	16.759051656	CaF2	1.55970990	96.383
	318.210831711	8.891640764		1.00000000	94.998
L813	428.724465129	41.295806263	CaF2	1.55970990	95.548
	3290.097860119AS	7.377912006		1.00000000	95.040
L814	721.012739719	33.927118706	CaF2	1.55970990	95.443
	-272.650872353	6.871397517		1.00000000	95.207
L815	131.257556743	38.826450065	CaF2	1.55970990	81.345
	632.112566477AS	4.409527396		1.00000000	74.847
L816	342.127616157AS	37.346293509	CaF2	1.55970990	70.394
	449.261078744	4.859754445		1.00000000	54.895
L817	144.034814702	34.792179308	CaF2	1.55970990	48.040
	-751.263321098AS	11.999872684		1.00000000	33.475
0'	0.000000000	0.000127776		1.00000000	16.430

10

20

30

非球面定数

レンズL801の非球面率

K	0.0000
C1	4.90231706e-009
C2	3.08634889e-014
C3	-9.53005325e-019
C4	-6.06316417e-024
C5	6.11462814e-028
C6	-8.64346302e-032
C7	0.00000000e+000
C8	0.00000000e+000
C9	0.00000000e+000

レンズL803の非球面率

K	0.0000
C1	-5.33460884e-009
C2	9.73867225e-014
C3	-3.28422058e-018
C4	1.50550421e-022
C5	0.00000000e+000
C6	0.00000000e+000
C7	0.00000000e+000
C8	0.00000000e+000
C9	0.00000000e+000

レンズL803の非球面率

K	0.0000
C1	5.33460884e-009
C2	-9.73867225e-014
C3	3.28422058e-018
C4	-1.50550421e-022
C5	0.00000000e+000
C6	0.00000000e+000
C7	0.00000000e+000
C8	0.00000000e+000
C9	0.00000000e+000

10

レンズL805の非球面率

K	0.0000
C1	2.42569449e-009
C2	3.96137865e-014
C3	-2.47855149e-018
C4	7.95092779e-023
C5	0.00000000e+000
C6	0.00000000e+000
C7	0.00000000e+000
C8	0.00000000e+000
C9	0.00000000e+000

レンズL806の非球面率

K	0.0000
C1	-6.74111232e-009
C2	-2.57289693e-014
C3	-2.81309020e-018
C4	6.70057831e-023
C5	5.06272344e-028
C6	-4.81282974e-032
C7	0.00000000e+000
C8	0.00000000e+000
C9	0.00000000e+000

レンズL811の非球面率

K	0.0000
C1	2.28889624e-008
C2	-1.88390559e-014
C3	2.86010656e-017
C4	-3.18575336e-021
C5	1.45886017e-025
C6	-1.08492931e-029
C7	0.00000000e+000
C8	0.00000000e+000
C9	0.00000000e+000

20

レンズL813の非球面率

K	0.0000
C1	3.40212872e-008
C2	-1.08008877e-012
C3	4.33814531e-017
C4	-7.40125614e-021
C5	5.66856812e-025
C6	0.00000000e+000
C7	0.00000000e+000
C8	0.00000000e+000
C9	0.00000000e+000

レンズL815の非球面率

K	0.0000
C1	-3.15395039e-008
C2	4.30010133e-012
C3	3.11663337e-016
C4	-3.64089769e-020
C5	1.06073268e-024
C6	0.00000000e+000
C7	0.00000000e+000
C8	0.00000000e+000
C9	0.00000000e+000

レンズL816の非球面率

K	0.0000
C1	-2.16574623e-008
C2	-6.67182801e-013
C3	4.46519932e-016
C4	-3.71571535e-020
C5	0.00000000e+000
C6	0.00000000e+000
C7	0.00000000e+000
C8	0.00000000e+000
C9	0.00000000e+000

30

レンズL817の非球面率

K	0.0000
C1	2.15121397e-008
C2	-1.65301726e-011
C3	-5.03883747e-015
C4	1.03441815e-017
C5	-6.29122773e-021
C6	1.44097714e-024
C7	0.00000000e+000
C8	0.00000000e+000
C9	0.00000000e+000

40

【図面の簡単な説明】

【0177】

【図1】 投射対物レンズのレンズと共に概略図示された、{100}結晶平面に垂直なフ 50

ッ化物結晶ブロックの切断図である。

【図 2 A - 2 C】それぞれ平面平行な (100) 、 (111) および (110) レンズの 3 次元概略図である。

【図 3】開口角および方位角の定義付けのための座標系を表した図である。

【図 4 A - 4 F】様々な表現における (100) レンズの複屈折分布図および相互に 45° 捻れて配置された 2 つの (100) レンズの複屈折分布図である。

【図 5 A - 5 F】様々な表現における (111) レンズの複屈折分布図および相互に 60° 捻れて配置された 2 つの (111) レンズの複屈折分布図である。

【図 6 A - 6 F】様々な表現における (110) レンズの複屈折分布図および相互に 90° 捻れて配置された 2 つの (110) レンズ、または相互に 45° 捻れて配置された 4 つの (110) レンズの複屈折分布図である。

【図 7】屈折性投射対物レンズのレンズ切断面である。

【図 8】反射屈折性投射対物レンズのレンズ切断面である。

【図 9】マイクロリソグラフィ用投射照明装置の概略図である。

【国際公開パンフレット】

(12) NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES PATENTWESENS (PCT) VERÖFFENTLICHTE INTERNATIONALE ANMELDUNG

(19) Weltorganisation für geistiges Eigentum
Internationales Büro



(43) Internationales Veröffentlichungsdatum
21. November 2002 (21.11.2002)

PCT

(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 02/093209 A2

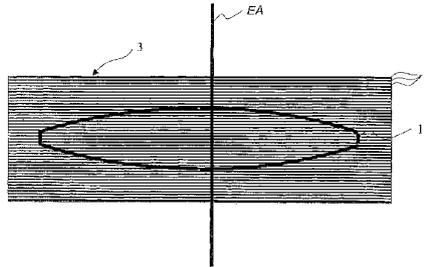
- (51) Internationale Patentklassifikation: **G02B 3/00**
- (21) Internationales Aktenzeichen: PCT/JP02/05050
- (22) Internationales Anmeldedatum: 8. Mai 2002 (08.05.2002)
- (25) Einreichungssprache: Deutsch
- (26) Veröffentlichungssprache: Deutsch
- (30) Angaben zur Priorität:

101 23 725.1	15. Mai 2001 (15.05.2001)	DE
101 23 727.8	15. Mai 2001 (15.05.2001)	DE
101 25 487.3	23. Mai 2001 (23.05.2001)	DE
101 27 320.7	6. Juni 2001 (06.06.2001)	DE
102 10 782.3	12. März 2002 (12.03.2002)	DE
- (71) Anmelder (nur für AT, BE, CH, CY, DE, DK, ES, FI, FR, GR, IE, IT, LU, MC, NL, PT, SE, TR): **CARL ZEISS** [DE/DE]; 89518 Heidenheim (Brenz) (DE).
- (71) Anmelder (für alle Bestimmungsstaaten mit Ausnahme von US): **CARL ZEISS SEMICONDUCTOR MANUFACTURING TECHNOLOGIES AG** [DE/DE]; Carl Zeiss-Strasse 22, 73447 Oberkochen (DE).
- (72) Erfinder; und
- (75) Erfinder/Anmelder (nur für US): **KRÄHMER, Daniel** [DE/DE]; Hegelsbrasse 28, 73431 Aalen (DE); **GRUNER, Toralf** [DE/DE]; Faleska-Meinig-Strasse 128, 09122 Chemnitz (DE); **ULRICH, Wilhelm** [DE/DE]; Lederackerring 44, 73434 Aalen (DE); **ENKISCH, Birgit** [DE/DE]; Aalener Strasse 2a, 73447 Oberkochen (DE); **GERHARD, Michael** [DE/DE]; Bühlstrasse 4, 73432 Aalen (DE); **BRUNOTTE, Martin** [DE/DE]; Hegelstrasse

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

(54) Title: LENS SYSTEM CONSISTING OF FLUORIDE CRYSTAL LENSES

(54) Bezeichnung: OBJEKTIV MIT FLUORID-KRISTALL-LINSEN



(57) Abstract: A lens system, especially a projection lens system for a microlithographic projection illumination system, comprising at least one fluoride crystal lens. The disruptive influence of birefringence is reduced by using a lens which is a lens (100) with a lens axis which is approximately perpendicular in relation to the crystal planes {100} or the equivalent crystal planes of the fluoride crystal. In lens systems consisting of at least two fluoride crystal lenses, it is useful to arrange the fluoride crystal lenses in such a way that they are twisted in relation to each other. The lens axes of the fluoride crystal lenses can thus point in crystal direction (111) or (110), in addition to direction (100). It is also possible to reduce the disruptive influence of birefringence by using groups with twisted (100) lenses and groups with other twisted lenses (111) or other twisted (110) lenses. The disruptive influence of birefringence can be reduced further by providing the optical element with a compensating coating.

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]



WO 02/093209 A2

WO 02/093209 A2



47, 73431 Aalen (DE). **WAGNER, Christian** [DE/NL];
Steenstraat 131, NL-5521 KS Eersel (NL). **KAISER,**
Winfried [DE/DE]; Fahrbachstrasse 150, 73431 Aalen
(DE). **MAUL, Manfred** [DE/DE]; Elchweg 29, 73434
Aalen (DE). **ZACZEK, Christoph** [DE/DE]; Lanterner
Strasse 37, 73540 Heubach (DE).

Erklärung gemäß Regel 4.17:

— *Erfindererklärung (Regel 4.17 Ziffer iv) nur für US*

Veröffentlicht:

*ohne internationalen Recherchenbericht und erneut zu
veröffentlichen nach Erhalt des Berichts*

(81) Bestimmungsstaaten (national): CN, DE, JP, KR, US.

(84) Bestimmungsstaaten (regional): europäisches Patent (AT,
BE, CH, CY, DE, DK, ES, FI, FR, GB, GR, IE, IT, LU, MC,
NL, PT, SE, TR).

*Zur Erklärung der Zweibuchstaben-Codes und der anderen
Abkürzungen wird auf die Erklärungen ("Guidance Notes on
Codes and Abbreviations") am Anfang jeder regulären Ausgabe
der PCT-Gazette verwiesen.*

(57) Zusammenfassung: Objektiv, insbesondere Projektionsobjektiv für eine Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage mit mindestens einer Fluorid-Kristall-Linse. Eine Reduzierung des störenden Einflusses der Doppelbrechung erzielt man, wenn diese Linse eine (100)-Linse mit einer Linsenachse ist, welche annähernd senkrecht auf den [100] Kristallebenen oder auf den dazu äquivalenten Kristallebenen des Fluorid-Kristalls steht. Bei Objektiven mit mindestens zwei Fluorid-Kristall-Linsen ist es günstig, wenn die Fluorid-Kristall-Linsen gegeneinander verdreht angeordnet sind. Die Linsenachsen der Fluorid-Kristall-Linsen können dabei neben der (100)-Kristallrichtung auch in die (111)-oder in die (110)-Kristallrichtung weisen. Eine weitere Reduzierung des störenden Einflusses der Doppelbrechung erzielt man durch den gleichzeitigen Einsatz von Gruppen mit gegeneinander verdrehten (100)-Linsen und Gruppen mit gegeneinander verdrehten (111)-Linsen oder (110)-Linsen. Eine weitere Reduzierung des störenden Einflusses der Doppelbrechung erzielt man durch die Belagung eines optischen Elements mit einer Kompensations-Beschichtung.

WO 02/093209

PCT/EP02/05050

Beschreibung:

Objektiv mit Fluorid-Kristall-Linsen

5 Die Erfindung betrifft ein Objektiv nach dem Oberbegriff des Anspruchs 1.

Derartige Projektionsobjektive sind aus der US 6,201,634 bekannt. Dort ist offenbart, daß bei der Herstellung von Fluorid-Kristall-Linsen idealerweise die Linsenachsen senkrecht zu den {111}-Kristallebenen der Fluorid-Kristalle ausgerichtet werden, um die

10 Spannungsdoppelbrechung zu minimieren. Die US 6,201,634 geht dabei davon aus, daß Fluorid-Kristalle keine intrinsische Doppelbrechung aufweisen.

Aus der Internet-Publikation „Preliminary Determination of an Intrinsic Birefringence in CaF₂“ von John H. Burnett, Eric L. Shirley, and Zachary H. Levine, NIST Gaithersburg

15 MD 20899 USA (verbreitet am 07.05.01) ist jedoch bekannt, daß Kalzium-Fluorid-Einkristalle auch nicht spannungsinduzierte, also intrinsische Doppelbrechung aufweisen. Die dort präsentierten Messungen zeigen, daß bei Strahlausbreitung in der <110>-Kristallrichtung eine Doppelbrechung von (6.5 ± 0.4) nm/cm bei einer Wellenlänge von $\lambda = 156.1$ nm, von (3.6 ± 0.2) nm/cm bei einer Wellenlänge von $\lambda = 193.09$ nm und von $(1.2$
 20 $\pm 0.1)$ nm/cm bei einer Wellenlänge von $\lambda = 253.65$ nm für Kalzium-Fluorid auftritt. Bei einer Strahlausbreitung in der <100>-Kristallrichtung und in der <111>-Kristallrichtung weist Kalzium-Fluorid dagegen keine intrinsische Doppelbrechung auf, wie dies auch von der Theorie vorhergesagt wird. Die intrinsische Doppelbrechung ist somit stark richtungsabhängig und nimmt mit kleiner werdender Wellenlänge deutlich zu.

25 Die Indizierung der Kristallrichtungen wird im folgenden zwischen den Zeichen „<“ und „>“ angegeben, die Indizierung der Kristallebenen zwischen den Zeichen „{“ und „}“ . Die Kristallrichtung gibt dabei immer die Richtung der Flächennormalen der entsprechenden Kristallebene an. So zeigt die Kristallrichtung <100> in Richtung der Flächennormalen der

30 Kristallebene {100}. Die kubischen Kristalle, zu denen die hier betrachteten Fluorid-

WO 02/093209

PCT/EP02/05050

- Kristalle gehören, weisen die Hauptkristallrichtungen $\langle 110 \rangle$, $\langle \bar{1}10 \rangle$, $\langle \bar{1}10 \rangle$, $\langle \bar{1}\bar{1}0 \rangle$, $\langle 101 \rangle$, $\langle 10\bar{1} \rangle$, $\langle \bar{1}01 \rangle$, $\langle \bar{1}0\bar{1} \rangle$, $\langle 011 \rangle$, $\langle 0\bar{1}1 \rangle$, $\langle 01\bar{1} \rangle$, $\langle 0\bar{1}\bar{1} \rangle$, $\langle 111 \rangle$, $\langle \bar{1}\bar{1}\bar{1} \rangle$, $\langle \bar{1}\bar{1}1 \rangle$, $\langle \bar{1}1\bar{1} \rangle$, $\langle 1\bar{1}\bar{1} \rangle$, $\langle \bar{1}11 \rangle$, $\langle 1\bar{1}1 \rangle$, $\langle 11\bar{1} \rangle$, $\langle 100 \rangle$, $\langle 010 \rangle$, $\langle 001 \rangle$, $\langle \bar{1}00 \rangle$, $\langle 0\bar{1}0 \rangle$ und $\langle 00\bar{1} \rangle$ auf. Die Hauptkristallrichtungen $\langle 100 \rangle$, $\langle 010 \rangle$, $\langle 001 \rangle$, $\langle \bar{1}00 \rangle$, $\langle 0\bar{1}0 \rangle$ und $\langle 00\bar{1} \rangle$ sind auf Grund der Symmetrieeigenschaften der kubischen Kristalle äquivalent zueinander, so daß im folgenden Kristallrichtungen, die in eine dieser Hauptkristallrichtungen weisen, das Präfix „(100)-“ erhalten. Kristallebenen, die senkrecht zu einer dieser Hauptkristallrichtungen stehen, erhalten entsprechend das Präfix „(100)-“.
- Die Hauptkristallrichtungen $\langle 110 \rangle$, $\langle \bar{1}10 \rangle$, $\langle \bar{1}10 \rangle$, $\langle \bar{1}\bar{1}0 \rangle$, $\langle 101 \rangle$, $\langle 10\bar{1} \rangle$, $\langle \bar{1}01 \rangle$, $\langle \bar{1}0\bar{1} \rangle$, $\langle 011 \rangle$, $\langle 0\bar{1}1 \rangle$, $\langle 01\bar{1} \rangle$ und $\langle 0\bar{1}\bar{1} \rangle$ sind ebenso äquivalent zueinander, so daß im folgenden Kristallrichtungen, die in eine dieser Hauptkristallrichtungen weisen, das Präfix „(110)-“ erhalten. Kristallebenen, die senkrecht zu einer dieser Hauptkristallrichtungen stehen, erhalten entsprechend das Präfix „(110)-“. Die Hauptkristallrichtungen $\langle 111 \rangle$, $\langle \bar{1}\bar{1}\bar{1} \rangle$, $\langle \bar{1}\bar{1}1 \rangle$, $\langle \bar{1}1\bar{1} \rangle$, $\langle 1\bar{1}\bar{1} \rangle$, $\langle \bar{1}11 \rangle$, $\langle 1\bar{1}1 \rangle$ und $\langle 11\bar{1} \rangle$ sind ebenso äquivalent zueinander, so daß im folgenden Kristallrichtungen, die in eine dieser Hauptkristallrichtungen weisen, das Präfix „(111)-“ erhalten. Kristallebenen, die senkrecht zu einer dieser Hauptkristallrichtungen stehen, erhalten entsprechend das Präfix „(111)-“. Aussagen, die im folgenden zu einer der zuvor genannten Hauptkristallrichtungen getroffen werden, gelten immer auch für die äquivalenten Hauptkristallrichtungen.

- Projektionsobjektive und Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlagen sind beispielsweise aus der Patentanmeldung PCT/EP00/13148 (WO 150171 A1) der Anmelderin und den darin zitierten Schriften bekannt. Die Ausführungsbeispiele dieser Anmeldung zeigen geeignete rein refraktive und katadioptrische Projektionsobjektive mit numerischen Aperturen von 0.8 und 0.9, bei einer Betriebswellenlänge von 193nm sowie 157 nm.

WO 02/093209

PCT/EP02/05050

Die Drehung von Linsenelementen zur Kompensation von Doppelbrechungseffekten ist auch in der Patentanmeldung „Projektionsbelichtungsanlage der Mikrolithographie, Optisches System und Herstellverfahren“ (DE 10123725.1) mit dem Aktenzeichen des Anmelders 01055P und dem Einreichungstag 15.05.2001 beschrieben. Der Inhalt dieser

5 Anmeldung soll auch Teil der vorliegenden Anmeldung sein.

Aufgabe der Erfindung ist es, Projektionsobjektive für eine Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage anzugeben, bei denen der Einfluß der Doppelbrechung, insbesondere der intrinsischen Doppelbrechung wesentlich reduziert ist.

10 Gelöst wird diese Aufgabe mit einem Objektiv gemäß Anspruch 1, 8, 32, 67, 68 und 93, einer Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage gemäß Anspruch 49, einem Verfahren zur Herstellung von Halbleiterbauelementen gemäß Anspruch 50, einem Verfahren zur Herstellung von Objektiven gemäß Anspruch 51, einem Verfahren zur

15 Kompensation von Doppelbrechungseffekten gemäß Anspruch 55, einem Linsenherstellverfahren gemäß Anspruch 56, 82 und 83, einem Verfahren zur Herstellung eines optischen Rohlings gemäß Anspruch 69 und einem mit diesem Verfahren hergestellten optischen Rohling nach Anspruch 80.

20 Vorteilhafte Ausgestaltungen der Erfindung ergeben sich aus den Merkmalen der abhängigen Ansprüche.

Um den Einfluss der intrinsischen Doppelbrechung zu minimieren, schlägt Anspruch 1 vor, bei Linsen aus Fluorid-Kristall die Linsenachsen so auszurichten, daß sie mit der <100>-

25 Kristallrichtung zusammenfallen. Die Linsenachsen fallen dann mit einer Hauptkristallrichtung zusammen, wenn die maximale Abweichung zwischen Linsenachse und Hauptkristallrichtung kleiner 5° ist. Dabei müssen nicht alle Fluorid-Kristall-Linsen des Objektives eine derartige Ausrichtung der Kristallebenen aufweisen. Diejenigen Linsen, bei denen die Linsenachsen senkrecht auf den {100}-Kristallebenen stehen, werden im

30 Folgenden auch als (100)-Linsen bezeichnet. Die Ausrichtung der Linsenachse in <100>-

WO 02/093209

PCT/EP02/05050

- Kristallrichtung hat den Vorteil, daß sich der störende Einfluss der intrinsischen Doppelbrechung, der sich bei Lichtausbreitung in $\langle 110 \rangle$ -Kristallrichtung ergibt, erst bei höheren Öffnungswinkeln der Lichtstrahlen bemerkbar macht als für eine Ausrichtung der Linsenachse in $\langle 111 \rangle$ -Kristallrichtung. Unter Öffnungswinkel versteht man in diesem
- 5 Zusammenhang den Winkel zwischen einem Lichtstrahl und der optischen Achse außerhalb einer Linse und zwischen dem Lichtstrahl und der Linsenachse innerhalb einer Linse. Erst wenn die Öffnungswinkel in den Bereich des Winkels zwischen der $\langle 100 \rangle$ -Kristallrichtung und der $\langle 110 \rangle$ -Kristallrichtung kommen, spüren die entsprechenden Lichtstrahlen den Einfluss der Doppelbrechung. Der Winkel zwischen der $\langle 110 \rangle$ -
- 10 Kristallrichtung und der $\langle 100 \rangle$ -Kristallrichtung beträgt dabei 45° . Wäre die Linsenachse dagegen in $\langle 111 \rangle$ -Kristallrichtung ausgerichtet, so würde sich der störende Einfluss der intrinsischen Doppelbrechung schon bei kleineren Öffnungswinkeln bemerkbar machen, da der Winkel zwischen der $\langle 110 \rangle$ -Kristallrichtung und der $\langle 111 \rangle$ -Kristallrichtung nur 35° beträgt.
- 15 Wird die Winkelabhängigkeit der Doppelbrechung beispielsweise durch das Herstellverfahren des Fluorid-Kristalls oder die mechanische Beanspruchung der Linse, insbesondere Spannungsdoppelbrechung, hervorgerufen, so können die offenbarten Lösungsansätze selbstverständlich ebenfalls zur Reduzierung des störenden Einflusses der
- 20 Doppelbrechung angewendet werden.

- Die Linsenachse ist dabei beispielsweise durch eine Symmetrieachse einer rotationssymmetrischen Linse gegeben. Weist die Linse keine Symmetrieachse auf, so kann die Linsenachse durch die Mitte eines einfallenden Strahlbündels oder durch eine Gerade
- 25 gegeben sein, bezüglich der die Strahlwinkel aller Lichtstrahlen innerhalb der Linse minimal sind. Als Linsen kommen beispielsweise refraktive oder diffraktive Linsen sowie Korrekturplatten mit Freiformkorrekturflächen in Frage. Auch Planplatten werden als Linsen angesehen, sofern sie im Strahlengang des Objektivs angeordnet sind. Die Linsenachse einer Planplatte steht dabei senkrecht auf den planen Linsenoberflächen.
- 30

WO 02/093209

PCT/EP02/05050

Vorzugsweise handelt es sich jedoch bei den Linsen um rotationssymmetrische Linsen.

Objektive weisen eine optische Achse auf, welche von der Objektebene zur Bildebene verläuft. Vorzugsweise sind die (100)-Linsen zentriert um diese optische Achse aufgebaut, so daß auch die Linsenachsen mit der optischen Achse zusammenfallen.

Vorteilhaft läßt sich die Erfindung bei Projektionsobjektiven für eine Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage einsetzen, da für diese Objektive extrem hohe Anforderungen an das Auflösungsvermögen gestellt werden. Aber auch bei Prüfobjektiven, mit denen beispielsweise Linsen für Projektionsobjektive durch Vermessung von Wellenfronten mit großer Öffnung getestet werden, wirkt sich der Einfluß der Doppelbrechung störend aus.

Bei Objektiven mit großen bildseitigen numerischen Aperturen, insbesondere größer 0.7, treten innerhalb der (100)-Linsen Öffnungswinkel auf, die größer als 25°, insbesondere größer als 30° sind. Gerade bei diesen großen Öffnungswinkeln kommt die Erfindung zum Tragen, die Linsenachsen in <100>-Kristallrichtung zu orientieren. Wären die Linsenachsen in <111>-Kristallrichtung orientiert, so würden die Lichtstrahlen mit Öffnungswinkeln größer als 25°, insbesondere größer als 30° deutlicher den störenden Einfluß der Doppelbrechung spüren, wenn nicht eine der weiter unten beschriebenen Korrekturmaßnahmen angewandt wird.

Da andererseits der störende Einfluß der intrinsischen Doppelbrechung bei einem Öffnungswinkel von 45° maximal werden kann, ist es vorteilhaft, das Projektionsobjektiv so auszulegen, daß alle Öffnungswinkel der Lichtstrahlen kleiner 45° sind, insbesondere kleiner gleich $\arcsin\left(\frac{NA}{n_{FK}}\right)$ sind, wobei NA die bildseitige numerische Apertur bezeichnet und n_{FK} die Brechzahl des Fluorid-Kristalls. Der Ausdruck $\arcsin\left(\frac{NA}{n_{FK}}\right)$ gibt dabei den Öffnungswinkel an, welcher der bildseitigen numerischen Apertur innerhalb einer Fluorid-Kristall-Linse entspricht, wenn der Lichtstrahl an einer planen Grenzfläche gebrochen

WO 02/093209

PCT/EP02/05050

wird. Dies wird erreicht, indem die Linsen, die nahe an der Bildebene angeordnet sind, sammelnde Linsenflächen, plane Linsenflächen oder höchstens leicht zerstreuliche Linsenflächen aufweisen, wenn in Lichtrichtung nach der zerstreulichen Linsenfläche eine stärker sammelnde Linsenfläche folgt.

5

Große Öffnungswinkel treten hauptsächlich bei Linsen in der Nähe von Feldebene, insbesondere der Bildebene auf. Die (100)-Linsen sollten deshalb vorzugsweise im Bereich der Feldebene eingesetzt werden. Der Bereich, in dem die (100)-Linsen eingesetzt werden sollten, lässt sich über das Verhältnis der Linsendurchmessers zum Durchmesser der Blende bestimmen. So beträgt der Linsendurchmesser der (100)-Linsen vorzugsweise maximal 85%, insbesondere maximal 80% des Blendendurchmessers.

10

Bei Projektionsobjektiven treten die größten Öffnungswinkel in der Regel in dem der Bildebene am nächsten gelegenen Linse auf. Deshalb wird vorzugsweise bei dieser Linse die Linsenachse in Richtung der $\langle 100 \rangle$ -Kristallrichtung ausgerichtet.

15

Die intrinsische Doppelbrechung einer Fluorid-Kristall-Linse ist dabei nicht nur vom Öffnungswinkel eines Lichtstrahls, sondern auch vom Azimutwinkel des Lichtstrahls abhängig. So kann jeder Fluorid-Kristall-Linse eine Doppelbrechungsverteilung $\Delta n(\alpha_L, \theta_L)$ zugeordnet werden, die einerseits eine Funktion des Öffnungswinkels θ_L und andererseits eine Funktion des Azimutwinkels α_L ist. Der Wert der Doppelbrechung Δn gibt dabei für eine durch den Öffnungswinkel θ_L und den Azimutwinkel α_L bestimmte Strahlrichtung das Verhältnis des optischen Wegunterschied für zwei zueinander orthogonale lineare Polarisationszustände zum im Fluorid-Kristall zurückgelegten physikalischen Strahlweg in der Einheit [nm/cm] an. Die intrinsische Doppelbrechung ist somit von den Strahlwegen und der Linsenform unabhängig. Den optischen Wegunterschied für einen Strahl erhält man entsprechend durch Multiplikation der Doppelbrechung mit dem zurückgelegten Strahlweg. Der Öffnungswinkel θ_L wird zwischen der Strahlrichtung und der Linsenachse bestimmt, der Azimutwinkel α_L zwischen der in die zur Linsenachse senkrecht stehenden

20

25

WO 02/093209

PCT/EP02/05050

Kristallebene projizierten Strahlrichtung und einer mit der Linse fest verknüpfen Bezugsrichtung.

- Die Winkelabhängigkeit der Doppelbrechungsverteilungen der einzelnen Fluorid-Kristall-
- 5 Linsen führt dazu, daß die Strahlen eines Strahlbüschels, das in der Bildebene des Objektivs auf einen Bildpunkt trifft, winkelabhängige optische Wegunterschiede $\Delta OPL(\alpha_R, \theta_R)$ für zwei zueinander orthogonale lineare Polarisationszustände erfahren. Die optischen Wegunterschiede ΔOPL werden dabei in Abhängigkeit des Öffnungswinkels θ_R und des Azimutwinkel α_R angegeben. Der Öffnungswinkel θ_R eines Strahls wird dabei
- 10 zwischen der Strahlrichtung und der optischen Achse in der Bildebene, der Azimutwinkel α_R zwischen der in die Bildebene projizierten Strahlrichtung und einer festen Bezugsrichtung innerhalb der Bildebene bestimmt. Weist nun das Objektiv mindestens zwei Linsen oder Linsenteile aus Fluorid-Kristall auf, so ist es vorteilhaft, wenn die Linsenachsen dieser Linsen oder Linsenteile in eine Hauptkristallrichtung weisen und die
- 15 Linsen oder Linsenteile derart gegeneinander um die Linsenachsen verdreht angeordnet sind, daß die Verteilung $\Delta OPL(\alpha_R, \theta_R)$ der optischen Wegunterschiede wesentlich reduzierte Werte im Vergleich zu einer Anordnung aufweist, bei der die Linsenachsen in die gleiche Hauptkristallrichtung weisen und die Linsen oder Linsenteile gleich orientiert eingebaut sind. Da die Doppelbrechungsverteilungen der Linsen jedoch eine azimutale
- 20 Abhängigkeit aufweisen, kann durch die verdrehte Anordnung der Linsen der Maximalwert der Verteilung $\Delta OPL(\alpha_R, \theta_R)$ um bis zu 20%, insbesondere um bis zu 25% im Vergleich zu einem gleich orientierten Einbau reduziert werden.

- Unter Linsenteilen sind beispielsweise einzelne Linsen zu verstehen, die durch Ansprengen
- 25 optisch nahtlos zu einer einzelnen Linse gefügt werden. Ganz allgemein bezeichnen Linsenteile die Bausteine einer einzelnen Linse, wobei die Linsenachsen der Linsenteile jeweils in Richtung der Linsenachse der einzelnen Linse weisen.

WO 02/093209

PCT/EP02/05050

- Durch den verdrehten Einbau der Fluorid-Kristall-Linsen kann insbesondere die Abhängigkeit der Verteilung $\Delta OPL(\alpha_R, \theta_R)$ vom Azimutwinkel α_R deutlich reduziert werden, so daß sich eine nahezu rotationssymmetrische Verteilung $\Delta OPL(\alpha_R, \theta_R)$ ergibt. Je nach Azimutwinkel α_R sollen die optischen Wegdifferenzen vorteilhafterweise für den gleichen Öffnungswinkel θ_R um maximal 30%, insbesondere um maximal 20% bezogen auf den Maximalwert der Verteilung $\Delta OPL(\alpha_R, \theta_R)$ variieren.

- Zeigt die Linsenachse in eine Hauptkristallrichtung, so weist die Doppelbrechungsverteilung $\Delta n(\alpha_L, \theta_L)$ der Linse eine k-zählige Azimutalsymmetrie auf.
- 10 Beispielsweise zeigt die Doppelbrechungsverteilung einer (100)-Linse, bei der die Linsenachse in <100>-Kristallrichtung weist, eine 4-zählige Azimutalsymmetrie, die Doppelbrechungsverteilung einer (111)-Linse, bei der die Linsenachse in <111>-Kristallrichtung weist, eine 3-zählige Azimutalsymmetrie, und die Doppelbrechungsverteilung einer (110)-Linse, bei der die Linsenachse in <110>-
- 15 Kristallrichtung weist, eine 2-zählige Azimutalsymmetrie. Je nach der Zähligkeit der Azimutalsymmetrie werden nun die einzelnen Linsen oder Linsenteile einer Gruppe um vorgegebene Drehwinkel γ gegeneinander um die Linsenachsen verdreht angeordnet. Die Drehwinkel γ werden dabei zwischen den Bezugsrichtungen von je zwei Linsen oder Linsenteilen bestimmt oder gemessen. Für die Linsen einer Gruppe weisen die
- 20 Linsenachsen in die gleiche Hauptkristallrichtung oder eine dazu äquivalente Hauptkristallrichtung. Die Bezugsrichtungen der Linsen einer Gruppe sind so mit den Linsen verknüpft, daß die Doppelbrechungsverteilungen $\Delta n(\alpha_L, \theta_L)$ für einen vorgegebenen Öffnungswinkel θ_0 den gleichen azimutalen Verlauf aufweisen. Somit treten für alle Linsen einer Gruppe die azimutalen Bereiche mit maximaler Doppelbrechung bei den gleichen
- 25 Azimutwinkeln auf. Für n Linsen einer Gruppe sind die Drehwinkel zwischen je zwei Linsen folgendermaßen gegeben:

$$\gamma = \frac{360^\circ}{k \cdot n} + m \cdot \frac{360^\circ}{k} \pm 10^\circ$$

WO 02/093209

PCT/EP02/05050

k gibt dabei die Zähligkeit der Azimutalsymmetrie, n die Zahl der Linsen einer Gruppe und m eine beliebige ganze Zahl an. Die Toleranz von $\pm 10^\circ$ berücksichtigt die Tatsache, daß unter Umständen die Drehwinkel von den theoretisch idealen Winkeln abweichen, um andere Randbedingungen bei der Objektivjustage berücksichtigen zu können. Eine

- 5 Abweichung vom idealen Drehwinkel führt zu einem nicht optimalen azimutalen Ausgleich der optischen Wegunterscheide der Linsen einer Gruppe. Dies kann jedoch in gewissen Grenzen toleriert werden.

Für (100)-Linsen ergibt sich somit folgende Vorgabe für die Drehwinkel:

$$\gamma = \frac{90^\circ}{n} + m \cdot 90^\circ \pm 10^\circ.$$

- 10 Umfasst die Gruppe zwei (100)-Linsen, so beträgt der Drehwinkel zwischen diesen beiden Linsen idealerweise 45° , beziehungsweise 135° , 225° ...

Für (111)-Linsen ergibt sich somit folgende Vorgabe für die Drehwinkel:

$$\gamma = \frac{120^\circ}{n} + m \cdot 120^\circ \pm 10^\circ.$$

Für (110)-Linsen ergibt sich somit folgende Vorgabe für die Drehwinkel:

- 15 $\gamma = \frac{180^\circ}{n} + m \cdot 180^\circ \pm 10^\circ.$

Die Verteilung der optischen Wegunterschiede $\Delta OPL_G(\alpha_R, \theta_R)$ kann dabei aber auch für den Einfluß einer einzelnen Gruppe von Linsen angegeben werden, indem nur diese Linsen bei der Doppelbrechungsauswertung betrachtet werden und die anderen Linsen als nicht

- 20 doppelbrechend angenommen werden.

Die Linsen einer Gruppe werden beispielsweise dadurch bestimmt, daß ein äußerster Aperturstrahl eines Strahlenbüschels innerhalb dieser Linsen jeweils ähnliche Öffnungswinkel aufweist. Vorteilhafterweise variieren die Öffnungswinkel um maximal

- 25 30%, insbesondere um maximal 20% bezogen auf den maximalen Öffnungswinkel innerhalb der Linsen dieser Gruppe. Dabei sind die Öffnungswinkel des äußersten Aperturstrahls innerhalb dieser Linsen vorteilhafterweise größer 15° , insbesondere größer 20° . Als äußerster Aperturstrahl wird ein Strahl bezeichnet, der von einem Objektpunkt

WO 02/093209

PCT/EP02/05050

ausgeht, dessen Strahlhöhe in der Blendenebene dem Radius der Blende entspricht und der somit in der Bildebene einen Winkel gemäß der bildseitigen numerischen Apertur aufweist. Die äußersten Aperturstrahlen werden deshalb zur Definition der Gruppen herangezogen, weil sie üblicherweise innerhalb der Linsen die größten Öffnungswinkel aufweisen und

5 damit die größte Störung durch die Doppelbrechung erfahren. Die Bestimmung der optischen Wegdifferenz für zwei zueinander orthogonale lineare Polarisationszustände für die äußersten Aperturstrahlen ermöglicht somit Aussagen über die maximale Störung einer Wellenfront durch die Doppelbrechung.

- 10 Weiterhin ist es vorteilhaft, wenn der äußerste Aperturstrahl in diesen Linsen jeweils einen ähnlich großen Strahlweg zurückgelegt. Vorteilhafterweise variieren die Strahlwege maximal um 30%, insbesondere maximal um 20% bezogen auf den maximalen Strahlweg innerhalb der Linsen dieser Gruppe. Durch diese Maßnahmen ergibt sich ein guter Ausgleich der azimutalen Beiträge zur Verteilung der optischen Wegdifferenzen, die von
- 15 den einzelnen Linsen einer Gruppe hervorgerufen werden, so daß die resultierende Verteilung der optischen Wegdifferenzen nahezu rotationssymmetrisch ist.

- Weiterhin ist es vorteilhaft, wenn der äußerste Aperturstrahl in jeder Linse einer Gruppe bei gleicher Orientierung der Linsen ähnlich große optische Wegunterschiede für zwei
- 20 zueinander orthogonale lineare Polarisationszustände erfährt. Vorteilhafterweise variieren die optischen Wegunterschiede maximal um 30%, insbesondere maximal um 20% bezogen auf den maximalen optischen Wegunterschied innerhalb der Linsen dieser Gruppe. Ist diese Bedingung erfüllt, tritt bei verdrehter Anordnung dieser Linsen ein optimaler Ausgleich der azimutalen Beiträge auf.

- 25 Im Fall von planparallelen benachbarten (100)- oder (111)-Linsen gleicher Dicke oder von vier planparallelen benachbarten (110)-Linsen gleicher Dicke erhält man eine rotationssymmetrische Verteilung der optischen Wegunterschiede ΔOPL durch Drehung der Linsen gemäß obigen Formeln. Auch bei Linsen mit gekrümmten Oberflächen läßt sich
- 30 durch geschickte Auswahl der Linsen einer Gruppe oder durch eine entsprechende Wahl

WO 02/093209

PCT/EP02/05050

- der Dicken und der Radien der Linsen bereits durch Drehen von zwei Linsen eine näherungsweise rotationssymmetrische Verteilung der optischen Wegunterschiede erzielen. Bei (100)-Linsen oder (111)-Linsen ist es vorteilhaft, wenn eine Gruppe zwei Linsen aufweist. Bei (110)-Linsen stellt sich eine näherungsweise rotationssymmetrische
- 5 Verteilung der optischen Wegdifferenzen für vier Linsen in einer Gruppe ein.

- Besonders effektiv wird die Verdrehung der Linsen dann, wenn die Linsen benachbart angeordnet sind. Besonders vorteilhaft ist es, eine Linse in zwei Teile aufzuteilen und die Linsenteile gegeneinander verdreht optisch nahtlos zu fügen, beispielsweise durch
- 10 Ansprennen.

- Um für eine einzelne Gruppe von Linsen, deren Linsenachsen in die gleiche Hauptkristallrichtung oder eine dazu äquivalente Hauptkristallrichtung weisen, eine nahezu rotationssymmetrische Verteilung der optischen Wegunterschiede für zwei zueinander
- 15 orthogonale lineare Polarisationszustände zu erzielen, ist es günstig, wenn die Gruppe in eine Anzahl von n Untergruppen unterteilt wird. Eine Untergruppe weist dabei mindestens eine Linse auf, beispielsweise ein, zwei oder drei Linsen. Die Linsen einer Untergruppe sind dabei bis auf einen wegen der Azimutalsymmetrie unerheblichen Winkel-Offset nicht gegeneinander verdreht angeordnet. Für die Drehwinkel γ zwischen den Linsen einer

- 20 Untergruppe gilt somit $\gamma = 1 \cdot \frac{360^\circ}{k} \pm 10^\circ$, wobei l eine ganze Zahl ist und k die Zähligkeit der Azimutalsymmetrie der Doppelbrechungsverteilung $\Delta n(\alpha_L, \theta_L)$ einer Linse angibt. Zwei Linsen aus zwei verschiedenen Untergruppen dagegen weisen jeweils einen Drehwinkel auf, der durch folgende Gleichung gegeben ist:

$$\gamma = \frac{360^\circ}{k \cdot n} + m \cdot \frac{360^\circ}{k} \pm 10^\circ, \text{ wobei } m \text{ eine ganze Zahl ist. Weisen die Untergruppen jeweils}$$

- 25 nur eine Linse auf, so ergeben sich die zuvor bereits beschriebenen Zusammenhänge für die Auswahl der Linsen, die eine Gruppe bilden. Führt beispielsweise das gegenseitige Verdrehen von zwei Linsen nicht zu der gewünschten Erzeugung einer nahezu rotationssymmetrischen Verteilung der optischen Wegunterschiede, so läßt sich durch die

WO 02/093209

PCT/EP02/05050

Zuweisung von einer weiteren Linse zu einer Untergruppe die gewünschte Verteilung erzielen. Dies ist dann möglich, wenn die von den einzelnen Untergruppen hervorgerufenen Verteilungen der optischen Wegunterschiede nahezu ähnliche Maximalwerte und Verteilungen aufweisen. Durch gegenseitiges Drehen der Linsen einer Untergruppe zu den Linsen einer anderen Untergruppe ergibt sich letztendlich die nahezu rotationsymmetrischen Verteilung der optischen Wegunterschiede. Eine derart aus Untergruppen gebildete Gruppe weist jedoch immer n Linsen auf, für deren gegenseitige Drehwinkel γ gilt: $\gamma = \frac{360^\circ}{k \cdot n} + m \cdot \frac{360^\circ}{k} \pm 10^\circ$. Diese n Linsen müssen dann nicht unbedingt zu einer nahezu rotationsymmetrischen Verteilung der optischen Wegunterschiede führen.

10

Bei einem Projektionsobjektiv mit einer Vielzahl von Linsen ist es günstig, mehrere Gruppen von Linsen zu bilden. Dabei sind die Linsen einer Gruppe derart um die Linsenachsen verdreht angeordnet, daß die resultierende Verteilung $\Delta OPL(\alpha_R, \theta_R)$ vom Azimutwinkel nahezu unabhängig ist.

15

Während nun die von den einzelnen Gruppen hervorgerufenen Verteilungen $\Delta OPL_G(\alpha_R, \theta_R)$ durch das gegenseitige Verdrehen der Linsen einer Gruppe nahezu unabhängig vom Azimutwinkel sind, kann der Maximalwert der Gesamtverteilung $\Delta OPL(\alpha_R, \theta_R)$ des gesamten Objektivs dadurch deutlich reduziert werden, daß das Projektionsobjektiv sowohl mindestens eine Gruppe mit (100)-Linsen als auch mindestens eine Gruppe mit (111)-Linsen aufweist. Eine gute Kompensation ist auch möglich, wenn innerhalb des Objektivs neben einer Gruppe mit (100)-Linsen eine Gruppe mit (110)-Linsen angeordnet ist.

20

Die Kompensation ist möglich, weil die Doppelbrechung nicht nur einen absoluten Wert, sondern auch eine Richtung aufweist. Die Kompensation des störenden Einflusses der Doppelbrechung ist dann optimal, wenn die Verteilung der optischen Wegunterschiede $\Delta OPL_1(\alpha_R, \theta_R)$, welche durch die Linsen oder Linsenteile von allen Gruppen mit (100)-Linsen hervorgerufen wird, und die Verteilung der optischen Wegunterschiede

25

WO 02/093209

PCT/EP02/05050

$\Delta OPL(\alpha_R, \theta_R)$, welche durch die Linsen oder Linsenteile von allen Gruppen mit (111)-Linsen oder (110)-Linsen hervorgerufen wird, ähnlich hohe Maximalwerte aufweist.

- Eine weitere vorteilhafte Möglichkeit, den störenden Einfluß der Doppelbrechung zu reduzieren, besteht darin, ein optisches Element des Projektionsobjektivs mit einer Kompensations-Beschichtung zu belegen. Dabei geht man von der Erkenntnis aus, dass jede optische Beschichtung, beispielsweise Antireflex- oder Spiegelbeschichtungen, neben ihren Eigenschaften bezüglich Reflexion und Transmission auch immer optische Wegunterschiede für zwei zueinander orthogonale lineare Polarisationszustände mit sich bringen. Diese sind für s- und p-polarisiertes Licht unterschiedlich und hängen zudem vom Einfallswinkel des Strahls auf die Schicht ab. Man hat also eine einfallswinkelabhängige Doppelbrechung. Für ein Strahlbüschel, dessen Mittenstrahl mit Inzidenzwinkel 0° auf die Kompensations-Beschichtung trifft, sind die Doppelbrechungs-Werte und -Richtungen rotationssymmetrisch bezüglich des Mittenstrahls. Der Inzidenzwinkel gibt dabei den Winkel zwischen dem Lichtstrahl und der Flächennormalen am Schnittpunkt des Lichtstrahles mit der Fläche an. Die Kompensations-Beschichtung ist nun so aufgebaut, daß sie bezüglich des Betrags der Doppelbrechung ein vorgegebenes Verhalten als Funktion des Öffnungswinkels der Strahlen eines Strahlbüschels zeigt.
- Dabei bestimmt man zunächst die Verteilung der optischen Wegunterschiede $\Delta OPL(\alpha_R, \theta_R)$ für zwei zueinander orthogonale lineare Polarisationszustände für ein Strahlbüschel in der Bildebene des Projektionsobjektivs. Der Öffnungswinkel θ_R eines Strahls wird dabei zwischen der Strahlrichtung und der optischen Achse in der Bildebene, der Azimutwinkel α_R zwischen der in die Bildebene projizierten Strahlrichtung und einer festen Bezugsrichtung innerhalb der Bildebene bestimmt. Die Verteilung der optischen Wegunterschiede $\Delta OPL(\alpha_R, \theta_R)$ für zwei zueinander orthogonale lineare Polarisationszustände beschreibt dabei alle Einflüsse durch intrinsische Doppelbrechung von Fluorid-Kristall-Linsen, Spannungsdoppelbrechung, Belegung der optischen Elemente mit Antireflex-Schichten von Linsen oder Spiegelschichten.

30

WO 02/093209

PCT/EP02/05050

Aus der Verteilung der optischen Wegunterschiede $\Delta OPL(\alpha_R, \theta_R)$ wird die effektive Doppelbrechungsverteilung der Kompensations-Beschichtung bestimmt, welche auf ein optisches Element mit einer Elementachse aufgebracht wird. Als optische Elemente werden beispielsweise refraktive oder diffraktive Linsen, Planplatten oder Spiegel eingesetzt. Die optischen Flächen des optischen Elements sind durch die optisch genutzten Bereiche, also in der Regel Vorder- und Rückfläche gegeben. Die Elementachse ist beispielsweise durch eine Symmetrieachse einer rotationssymmetrischen Linse gegeben. Weist die Linse keine Symmetrieachse auf, so kann die Elementachse durch die Mitte eines einfallenden Strahlbündels oder durch eine Gerade gegeben sein, bezüglich der die Strahlwinkel aller Lichtstrahlen innerhalb der Linse minimal sind. Die effektiven Doppelbrechungswerte hängen von Azimutwinkeln α_F , welche auf eine zur Elementachse senkrecht stehende Bezugsrichtung bezogen sind, und von Öffnungswinkeln θ_F , welche auch die Elementachse bezogen sind, ab.

15 Einem Wertepaar (α_R, θ_R) eines Strahls in der Bildebene entspricht dabei ein Wertepaar (α_F, θ_F) am optischen Element.

Die effektive Doppelbrechungsverteilung der Kompensations-Beschichtung wird nun so bestimmt, dass die Verteilung der optischen Wegunterschiede für zwei zueinander orthogonale lineare Polarisationszustände für das gesamte System inklusive Kompensations-Beschichtung wesentlich reduziert sind gegenüber der Verteilung ohne die Kompensations-Beschichtung. In einem Objektiv mit einem optischen Element mit einer Kompensations-Beschichtung ist der Maximalwert der Verteilung $\Delta OPL(\alpha_R, \theta_R)$ um bis zu 20%, insbesondere um bis zu 25% reduziert im Vergleich zu einem Objektiv ohne eine Kompensations-Beschichtung.

Die effektive Doppelbrechungsverteilung lässt sich durch die Materialwahl, die Dickenverläufe und die Aufdampfwinkel für die einzelnen Schichten der Kompensations-Beschichtung beeinflussen. Das Schichtdesign und die Prozessparameter ergeben sich dabei durch Anwendung von Schichtdesign-Computer-Programmen, welche aus der

WO 02/093209

PCT/EP02/05050

effektiven Doppelbrechungsverteilung, der Vorgabe der Materialien und der Geometrie des optischen Elements die Dickenverläufe der einzelnen Schichten und die Prozessgrößen bestimmt.

- 5 Die Kompensations-Beschichtung kann dabei auch auf mehreren optischen Elementen angebracht werden. Dies erhöht die Freiheitsgrade bei der Bestimmung der Kompensations-Schichten, die neben der Kompensation auch eine hohe Transmission der Beschichtung gewährleisten sollen.
- 10 Typische Verteilungen der optischen Wegunterschiede $\Delta OPL(\alpha_R, \theta_R)$ für zwei zueinander orthogonale lineare Polarisationszustände weisen für den Öffnungswinkel $\theta_R=0^\circ$ geringe Wegunterschiede auf. Deshalb ist es günstig, wenn die doppelbrechende Wirkung der Kompensations-Beschichtung für den Öffnungswinkel $\theta_T=0^\circ$ nahezu verschwindet. Dies erreicht man, wenn bei der Herstellung der Kompensations-Beschichtung keine hohen
- 15 Aufdampfwinkel zum Einsatz kommen. Vorteilhaft weist deshalb die optische Fläche des optischen Elements, auf das die Kompensations-Beschichtung aufgebracht wird, eine möglichst geringe Krümmung auf.

- Durch das gegeneinander Verdrehen von Linsen mit (100)- oder (111)-Orientierung erhält man wie oben beschrieben näherungsweise eine rotationssymmetrische Verteilung der optischen Wegunterschiede $\Delta OPL(\alpha_R, \theta_R)$ in der Bildebene, welche nur vom Öffnungswinkel θ_R abhängt. Die optischen Wegunterschiede können mit der Kompensations-Beschichtung eines optischen Elements noch weiter reduziert werden, deren effektive Doppelbrechungsverteilung primär nur vom Öffnungswinkel θ_T abhängt.
- 20 Dies wird erreicht, indem die Schichtdicken der einzelnen Schichten der Kompensations-Beschichtung über das optische Element homogen sind und keine Dickenverläufe aufweisen.

- Vorteilhaft lässt sich die Erfindung einsetzen, indem das optische Element mit der
- 30 Kompensationsbeschichtung ein austauschbares Element ist.

WO 02/093209

PCT/EP02/05050

Vorteilhaft wird dabei das der Bildebene am nächsten gelegene optische Element verwendet.

- 5 Das Verfahren sieht dabei vor, dass in einem ersten Schritt die Verteilung der optischen Wegunterschiede $\Delta OPL(\alpha_R, \theta_R)$ für zwei zueinander orthogonale lineare Polarisationszustände für ein Strahlbüschel in der Bildebene bestimmt wird. Dabei wird der Einfluß von allen optischen Elementen des Objektivs inklusive Beschichtungen berücksichtigt. Das optische Element, das in einem nachfolgenden Schritt mit der
- 10 Kompensationsbeschichtung belegt wird, ist dabei ebenfalls im Strahlengang des Strahlbüschels.
- In einem zweiten Schritt wird mit dem bereits beschriebenen Verfahren die effektive Doppelbrechungsverteilung einer Kompensations-Beschichtung und die daraus resultierenden Dickenverläufe der einzelnen Schichten und die Prozessparameter zur
- 15 Herstellung der einzelnen Schichten bestimmt.
- In einem dritten Schritt wird das optische Element aus dem Strahlengang entfernt und mit der Kompensations-Beschichtung belegt. Falls die optische Fläche des optischen Elements bereits belegt war, wird diese Schicht vor der erneuten Belegung entfernt.
- In einem vierten Schritt wird das optische Element mit der Kompensations-Beschichtung
- 20 wieder an dem ursprünglichen Ort innerhalb des Objektivs angebracht.
- Als Material für die Linsen wird in Projektionsobjektiven vorzugsweise Kalzium-Fluorid eingesetzt, da Kalzium-Fluorid bei gemeinsamem Einsatz mit Quarz bei einer Arbeitswellenlängen von 193nm sich zur Farbkorrektur besonders eignet, beziehungsweise
- 25 bei einer Arbeitswellenlänge von 157nm eine ausreichende Transmission bereitstellt. Aber auch für die Fluorid-Kristalle Strontium-Fluorid oder Barium-Fluorid gelten die hier getroffenen Aussagen, da es sich um Kristalle vom gleichen kubischen Kristall-Typ handelt.

WO 02/093209

PCT/EP02/05050

Der störende Einfluss der intrinsische Doppelbrechung macht sich besonders dann bemerkbar, wenn die Lichtstrahlen innerhalb der Linsen große Öffnungswinkel aufweisen. Dies ist für Projektionsobjektive der Fall, die eine bildseitige numerische Apertur aufweisen, die größer als 0.7, insbesondere größer 0.8 ist.

5

Die intrinsische Doppelbrechung nimmt mit abnehmender Arbeitswellenlänge deutlich zu. So ist die intrinsische Doppelbrechung bei einer Wellenlänge von 193nm mehr als doppelt so groß, bei einer Wellenlänge von 157nm mehr als fünfmal so groß wie bei einer Wellenlänge von 248nm. Die Erfindung lässt sich deshalb besonders dann vorteilhaft einsetzen, wenn die Lichtstrahlen Wellenlängen kleiner 200nm, insbesondere kleiner 160nm aufweisen.

10

Bei dem Objektiv kann es sich dabei um ein rein refraktives Projektionsobjektiv handeln, das aus einer Vielzahl von rotationssymmetrisch um die optische Achse angeordneten Linsen besteht, oder um ein Projektionsobjektiv vom katadioptrischen Objektivtyp.

15

Derartige Projektionsobjektive lassen sich vorteilhaft in Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlagen einsetzen, die ausgehend von der Lichtquelle ein Beleuchtungssystem, ein Masken-Positioniersystem, eine Struktur tragende Maske, ein Projektionsobjektiv, ein Objekt-Positionierungssystem und ein Licht empfindliches Substrat umfassen.

20

Mit dieser Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage lassen sich mikrostrukturierte Halbleiter-Bauelemente herstellen.

25

Die Erfindung stellt auch ein geeignetes Verfahren zur Herstellung von Objektiven bereit. Gemäß dem Verfahren werden Linsen oder Linsenteile aus Fluorid-Kristall, deren Linsenachsen in eine Hauptkristallrichtung weisen, derart um die Linsenachsen verdreht angeordnet, daß die Verteilung $\Delta OPL(\alpha_R, \theta_R)$ wesentlich reduzierte Werte aufweist im

30

Vergleich zu einer Linsenanordnung, bei der die Linsenachsen der Fluorid-Kristall-Linsen

WO 02/093209

PCT/EP02/05050

in die gleiche Hauptkristallrichtung weisen und bei der die Linsen gleich orientiert angeordnet sind.

- Das Verfahren sieht weiterhin vor, Gruppen mit (100)-Linsen und Gruppen mit (111)-Linsen oder (110)-Linsen zu bilden und diese parallel einzusetzen. Das Verfahren wird dabei beispielsweise bei einem Projektionsobjektiv angewandt, das mindestens zwei Fluorid-Kristall-Linsen in $\langle 100 \rangle$ -Orientierung und mindestens zwei Linsen in $\langle 111 \rangle$ -Orientierung umfasst. Von diesen Linsen ist dabei weiterhin die Lage der Bezugsrichtungen bekannt. Das Verfahren nutzt dabei die erfinderische Erkenntnis aus, daß sich durch Drehen der Fluorid-Kristall-Linsen um die optische Achse die Maximalwerte der Verteilung $\Delta OPL(\alpha_R, \theta_R)$ der optischen Wegunterschiede wesentlich reduzieren lassen. Durch geeignete Simulationsmethoden wird dabei ein von einem Objektpunkt ausgehendes Strahlenbüschel durch ein Projektionsobjektiv propagiert und auf Grund der bekannten optischen Eigenschaften der Fluorid-Kristall-Linsen die Verteilung $\Delta OPL(\alpha_R, \theta_R)$ in der Bildebene bestimmt. In einem Optimierungsschritt werden nun die Drehwinkel zwischen den Fluorid-Kristall-Linsen so lange geändert, bis die Doppelbrechung tolerierbare Werte aufweist. Der Optimierungsschritt kann dabei auch weitere Randbedingungen wie beispielsweise die Kompensation von nicht rotations-symmetrischen Linsenfehlern durch Linsendrehen berücksichtigen. Durch diesen Optimierungsschritt kann der Maximalwert der Verteilung $\Delta OPL(\alpha_R, \theta_R)$ um bis zu 30%, insbesondere bis zu 50% reduziert werden im Vergleich zu einem Projektionsobjektiv, bei dem die Fluorid-Kristall-Linsen gleich orientiert angeordnet sind. Das Optimierungsverfahren kann auch einen Zwischenschritt aufweisen. In diesem Zwischenschritt werden aus den Fluorid-Kristall-Linsen Gruppen mit Linsen gebildet, wobei die Linsen einer Gruppe für einen äußersten Aperturstrahl bei gleich orientierter Anordnung der Linsen einen ähnlichen optischen Wegunterschied zwischen zwei zueinander orthogonalen linearen Polarisationszuständen erzeugen. In dem nachfolgenden Optimierungsschritt werden dann die Linsen nur innerhalb der Gruppen gedreht, um die optischen Wegunterschiede zu reduzieren. So lassen sich zunächst die (100)-Linsen derart drehen, daß die durch die (100)-Linsen hervorgerufenen optischen Wegunterschiede

WO 02/093209

PCT/EP02/05050

- reduziert werden. Dann werden die (111)-Linsen derart gedreht, daß die durch die (111)-Linsen hervorgerufenen optischen Wegunterschiede reduziert werden. Die Verteilung der Fluorid-Kristall-Linsen auf Linsen mit (100)-Orientierung und (111)-Orientierung muß bei der Optimierung so erfolgen, daß sich die resultierende (100)-Verteilung $\Delta OPL_{100}(\alpha_R, \theta_R)$ und die resultierende (111)-Verteilung $\Delta OPL_{111}(\alpha_R, \theta_R)$ weitgehend kompensieren.
- 5 Entsprechendes gilt auch für den parallelen Einsatz von (100)-Linsen und (110)-Linsen.

- Die Erfindung betrifft auch ein Herstellverfahren für eine Linse, bei dem in einem ersten Schritt mehrere Platten aus Fluorid-Kristall optisch nahtlos zu einem Blank gefügt werden, und in einem zweiten Schritt die Linse aus dem Blank durch bekannte Herstellmethoden herausgearbeitet wird. Die Platten werden dabei wie zuvor für Linsen oder Linsenteile beschrieben, zueinander um die Flächennormalen verdreht angeordnet.
- 10

- Platten, deren Flächennormalen in die gleiche Hauptkristallrichtung oder in eine dazu äquivalente Hauptkristallrichtung weisen, haben vorteilhafterweise die gleiche axiale Dicke.
- 15

- Werden (100)-Platten mit (111)-Platten optisch nahtlos gefügt, so sollte das Verhältnis der Summe der Dicken der (111)-Platten zu der Summe der Dicken der (100)-Platten = 1.5 ± 0.2 betragen.
- 20

- Werden (100)-Platten mit (110)-Platten optisch nahtlos gefügt, so sollte das Verhältnis der Summe der Dicken der (110)-Platten zu der Summe der Dicken der (100)-Platten = 4.0 ± 0.4 betragen.
- 25

- Die Erfindung stellt auch ein Verfahren zur Herstellung von Linsen oder Linsenteilen aus Kristall-Material mit kubischer Kristallstruktur zur Verfügung, welche vorteilhaft in den zuvor beschriebenen Objektiven zur Reduzierung des störenden Einflusses der Doppelbrechung eingesetzt werden können.
- 30

WO 02/093209

PCT/EP02/05050

Die erfindungsgemäße Reduzierung des störenden Einflusses der Doppelbrechung basiert auf dem gegenseitigen Verdrehen von Linsen innerhalb einer Gruppe, wobei die Linsenachsen der Linsen in die gleiche Kristallrichtung, bevorzugt in die gleiche Hauptkristallrichtung weisen. Um den Drehwinkel zwischen den einzelnen Linsen einer Gruppe einstellen zu können, sollte von jeder Linse eine Bezugsrichtung bekannt sein. Im folgenden werden Verfahren beschrieben, wie eine geeignete Bezugsrichtung bestimmt und auf der Linse oder dem Linsenteil markiert wird.

Bis eine Linse oder ein Linsenteil seine Endform aufweist, sind eine Vielzahl von form- und oberflächenbearbeitenden Prozessschritten erforderlich. Da die Linsen oder Linsenteile aus Kristallmaterial bestehen, dient in der Regel als Ausgangsmaterial ein Einkristall-Block, aus dem beispielsweise durch Sägen und Schleifen zunächst ein optischer Rohling gefertigt wird. Als optischer Rohling wird die Vorstufe einer Linse oder eines Linsenteils bezeichnet. Aus dem optischen Rohling können eine oder mehrere Linsen oder Linsenteile gefertigt werden. Werden aus einem optischen Rohling mehrere Linsen oder Linsenteile gefertigt, so wird der optische Rohling durch Sägen in einzelne optische Rohlinge zerlegt, wobei die einzelnen optischen Rohlinge in einem weiteren Bearbeitungsschritt geschliffen und/oder poliert werden, um an den so vorbereiteten Flächen optische Messungen durchführen zu können. Die derart vorbereiteten optischen Rohlinge bilden dann einzelne Materialscheiben in Form von Zylindern.

Es ist nun vorteilhaft, wenn der optische Rohling derart bearbeitet wird, dass er eine optische Rohfläche aufweist, deren Flächennormale in Richtung einer definiert innerhalb der Kristallstruktur orientierten ersten Kristallrichtung weist. Vorteilhaft ist dies eine Hauptkristallrichtung, beispielsweise die $\langle 100 \rangle$ -, $\langle 111 \rangle$ - oder $\langle 110 \rangle$ -Kristallrichtung. Dazu ist es zunächst erforderlich, an dem optischen Rohling die Richtung der ersten Kristallrichtung zu bestimmen. Diese Bestimmung kann dabei an dem optischen Rohling vorgenommen werden, bevor der optische Rohling in einzelne optische Rohlinge zerteilt wird. Es ist auch möglich, zuerst die Teilung vorzunehmen und dann an den einzelnen optischen Rohlingen jeweils die Bestimmung vorzunehmen. Der optische Rohling wird

WO 02/093209

PCT/EP02/05050

nun durch Sägen und Schleifen derart bearbeitet, dass die erste Kristallrichtung nahezu senkrecht auf der optischen Roh-Fläche steht. Eine Abweichung von $\pm 5^\circ$ ist dabei tolerierbar. Die optische Roh-Fläche stellt dabei die Vorder- oder Rückseite der Materialscheibe dar.

5

In einem nächsten Schritt wird eine Bezugsrichtung bestimmt, welche senkrecht auf der ersten Kristallrichtung steht. Die Bezugsrichtung stellt dabei eine Projektion einer zweiten Kristallrichtung in eine Ebene dar, deren Flächennormalen in Richtung der ersten Kristallrichtung weist. Der Winkel zwischen der ersten Kristallrichtung und der zweiten

10 Kristallrichtung weist dabei einen von 0° verschiedenen Wert auf. Die zweite Kristallrichtung kann dabei ebenfalls eine Hauptkristallrichtung oder eine definiert innerhalb der Kristallstruktur orientierte Kristallrichtung, beispielsweise die $\langle 311 \rangle$ -Kristallrichtung sein.

15 Ist die Bezugsrichtung bestimmt, so wird diese am optischen Rohling, beispielsweise am Außenzylinder durch eine Gravur markiert. Möglich ist auch, dass der optische Rohling fest mit einer Haltefassung verbunden ist und die Markierung an der Haltefassung angebracht wird.

20 Bei der Bestimmung der ersten Kristallrichtung kann der optische Rohling mit einer Messstrahlung aus einer definierten Richtung beleuchtet werden. Die Messstrahlung wird an den der ersten Kristallrichtung zugeordneten Kristallebenen, beispielsweise die $\{111\}$ -Kristallebenen reflektiert und erzeugt einen entsprechenden Bragg-Reflex. Da der Inzidenzwinkel der Messstrahlung und das Material des optischen Rohlings bekannt sind,

25 ist auch der theoretische Soll-Winkel des Bragg-Reflexes durch Anwendung des Bragg-Reflexions-Gesetzes bekannt. Nur wenn die Flächennormale der optischen Roh-Flächen mit der ersten Kristallrichtung übereinstimmt, wird die reflektierte Messstrahlung unter dem vorgegebenen Soll-Winkel detektiert. Gegebenenfalls wird der optische Rohling beispielsweise durch Schleifen derart bearbeitet, dass die Flächennormale der optischen

30 Roh-Fläche mit der ersten Kristallrichtung übereinstimmt.

WO 02/093209

PCT/EP02/05050

In einer vorteilhaften Ausführungsform ist der optische Rohling um eine Achse drehbar gelagert, welche senkrecht auf der optischen Roh-Fläche des optischen Rohlings steht. Die Bragg-Reflexe werden nun für verschiedene Drehwinkel bestimmt, im einfachsten Fall bei
5 0° und bei 90°.

Die Bezugsrichtung kann ebenfalls durch Auswertung eines Bragg-Reflexes bestimmt werden. Dabei wird die Messstrahlung an den der zweiten Kristallrichtung zugeordneten Kristallebenen reflektiert.

10

Alternativ kann die Lage der Bezugsrichtung mit Hilfe des Laue-Verfahrens bestimmt werden.

Es ist günstig, die Bezugsrichtung derart zu wählen, dass ein Lichtstrahl in der Linse auf Grund der Doppelbrechung beispielsweise einen maximalen optischen Wegunterschied für zwei zueinander orthogonale lineare Polarisationszustände erfährt, wenn die Projektion dieses Lichtstrahls in eine Ebene, welche senkrecht auf der ersten Kristallrichtung steht, parallel zur Bezugsrichtung verläuft. Wendet man die zuvor beschriebenen Kompensationsmethoden, also das gegenseitige Verdrehen von Linsen an, so ist es auf
15 Grund dieser Markierungsvorschrift einfach, die vorgeschriebenen Drehwinkel einzustellen. Es ist auch möglich, die Bezugsrichtung zu markieren, für die ein Lichtstrahl einen minimalen optischen Wegunterschied erfährt, wenn dessen Projektion in eine Ebene, welche senkrecht auf der ersten Kristallrichtung steht, parallel zur Bezugsrichtung verläuft.

20 Weist die erste Kristallrichtung in die $\langle 100 \rangle$ - Kristallrichtung oder in die $\langle 111 \rangle$ - Kristallrichtung oder in eine zu diesen Kristallrichtungen äquivalente Kristallrichtung, so ist es günstig, wenn die Projektion der zweiten Kristallrichtung in eine Ebene, welche senkrecht auf der ersten Kristallrichtung steht, parallel zur Projektion der $\langle 110 \rangle$ - Kristallrichtung oder einer dazu äquivalenten Kristallrichtung in die gleiche Ebene ist.

WO 02/093209

PCT/EP02/05050

Lichtstrahlen, die parallel zur $\langle 110 \rangle$ -Kristallrichtung oder einer dazu äquivalenten Kristallrichtung verlaufen, erfahren nämlich einen maximalen optischen Wegunterschied.

- Weist die erste Kristallachse in die $\langle 111 \rangle$ - Kristallrichtung oder eine dazu äquivalente
- 5 Kristallrichtung, so ist es vorteilhaft, wenn die zweite Kristallrichtung in die $\langle 331 \rangle$ - Kristallrichtung oder eine dazu äquivalente Kristallrichtung weist.

- Da die Messstrahlung zur Bestimmung der Bragg-Reflexe zu Materialschäden im Bereich der optischen Roh-Flächen führen kann, ist es günstig, diejenigen Materialbereiche des
- 10 optischen Rohlings durch Schleifen oder Polieren abzutragen, die von der Messstrahlung durchtreten wurden.

Mit diesem Verfahren lässt sich vorteilhaft ein optischer Rohling als Ausgangsprodukt zur Herstellung einer Linse oder eines Linsenteils für ein Objektiv herstellen.

- 15 Wird nun aus dem derart vorbereiteten optischen Rohling eine Linse oder ein Linsenteil hergestellt, so wird bei der Bearbeitung der optischen Flächen der Linse oder des Linsenteils die Linsenachse nahezu parallel zur Richtung der ersten Kristallachse ausgerichtet, beziehungsweise parallel zur Flächennormalen der optischen Roh-Fläche. Die
- 20 Abweichung sollte weniger als $\pm 5^\circ$ betragen. Durch Schleifen und Polieren der optischen Roh-Flächen des optischen Rohling entstehen die gekrümmten Linsenflächen der Linse. Handelt es sich um rotationssymmetrische Flächen, so ist die Linsenachse die Symmetrieachse.
- 25 Alternativ kann die Bezugsrichtung auch an der Linse oder dem Linsenteil bestimmt und markiert werden. Aus einem optischen Rohling aus Kristallmaterial mit kubischer Kristallstruktur wird die Linse beispielsweise durch Schleifen und Polieren der Linsenflächen hergestellt. Dabei werden die Oberflächen derart bearbeitet, dass die Linsenachse parallel zu einer ersten Kristallrichtung, vorzugsweise einer
- 30 Hauptkristallrichtung ist. Bei Linsen mit rotationssymmetrischen Linsenflächen bildet die

WO 02/093209

PCT/EP02/05050

Symmetrieachse die Linsenachse. An der Linse oder dem Linsenteil wird nun eine Bezugsrichtung bestimmt. Die Bezugsrichtung steht dabei senkrecht auf der ersten Kristallrichtung und ist eine Projektion einer zweiten Kristallrichtung in eine zur ersten Kristallrichtung senkrecht liegenden Ebene. Die erste und die zweite Kristallrichtung schließen dabei einen von 0° verschiedenen Winkel ein. Die Bezugsrichtung wird nun an der Linse oder dem Linsenteil markiert. Ist die Linse mit einer Haltefassung fest verbunden, so kann die Markierung auch an dieser Fassung angebracht werden.

Zur Bestimmung der Bezugsrichtung können die bereits für den optischen Rohling vorgestellten Verfahren angewendet werden. Bei der Messung des Bragg-Reflexes ist es vorteilhaft, wenn die Position der Linse einstellbar ist, damit die Messstrahlung an der gekrümmten Linsenoberfläche an einem definierten Ort auftrifft. Insbesondere, wenn Messungen bei verschiedenen Drehstellungen der Linse vorgenommen werden, ist es günstig, wenn die Messstrahlung im Bereich des Linsenscheitels auftrifft.

Um bei konkaven Linsenflächen nicht durch Selbstabschattung behindert zu werden, ist es vorteilhaft, die zweite Kristallrichtung so auszuwählen, dass die einfallende Messstrahlung und die reflektierte Strahlung, welche zur Bestimmung der ersten Kristallrichtung, beziehungsweise der Bezugsrichtung herangezogen wird, nicht durch die Linsengeometrie gestört werden.

Vorteilhaft werden Linsen oder Linsenteile, welche eine Markierung einer Bezugsrichtung aufweisen, in Objektiven eingesetzt, bei denen durch gegeneinander Verdrehen der Linsen oder Linsenteile der störende Einfluß der Doppelbrechung reduziert wird. Mit der Markierung wird das gezielte Verdrehen der einzelnen Linsen wesentlich vereinfacht.

WO 02/093209

PCT/EP02/05050

Näher erläutert wird die Erfindung anhand der Zeichnungen.

- Figur 1 zeigt einen Schnitt durch einen Fluorid-Kristall-Block senkrecht zu den {100}-
Kristallebenen zusammen mit einer Linse eines Projektionsobjektives in
5 schematischer Darstellung;
- Figur 2A-C zeigen je eine planparallele (100)-, (111)- und (110)-Linse in einer
schematischen dreidimensionalen Darstellung;
- Figur 3 zeigt ein Koordinatensystem zur Definition des Öffnungswinkels und des
Azimutwinkels;
- 10 Figur 4A-F zeigen die Doppelbrechungsverteilung für (100)-Linsen in verschiedenen
Darstellungen, sowie die Doppelbrechungsverteilung für zwei gegeneinander um
45° verdrehte (100)-Linsen;
- Figur 5A-F zeigen die Doppelbrechungsverteilung für (111)-Linsen in verschiedenen
Darstellungen, sowie die Doppelbrechungsverteilung für zwei gegeneinander um
15 60° verdrehte (111)-Linsen;
- Figur 6A-G zeigen die Doppelbrechungsverteilung für (110)-Linsen in verschiedenen
Darstellungen, sowie die Doppelbrechungsverteilung für zwei gegeneinander um
90° verdrehte (110)-Linsen, beziehungsweise für vier gegeneinander um 45°
verdrehte (110)-Linsen;
- 20 Figur 7 zeigt den Linsenschnitt eines refraktiven Projektionsobjektives;
Figur 8 zeigt den Linsenschnitt eines katadioptrischen Projektionsobjektives; und
Figur 9 zeigt eine Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage in schematischer
Darstellung.
- 25 Figur 1 zeigt schematisch einen Schnitt durch einen Fluorid-Kristall-Block 3. Der Schnitt
ist so gewählt, daß die {100}-Kristallebenen 5 als einzelne Linien zu sehen sind, so daß die
{100}-Kristallebenen 5 sich senkrecht zur Papierebene befinden. Der Fluorid-Kristall-
Block 3 dient als Blank oder Ausgangsmaterial für die (100)-Linse 1. In diesem Beispiel ist
die (100)-Linse 1 eine Bikonvex-Linse mit der Linsenachse EA, die zugleich

WO 02/093209

PCT/EP02/05050

Symmetrieachse der Linse ist. Die Linse 1 wird nun so aus dem Fluorid-Kristall-Block herausgearbeitet, daß die Linsenachse EA senkrecht auf den {100}-Kristallebenen steht.

- In Figur 2A wird mit einer dreidimensionalen Darstellung veranschaulicht, wie die
- 5 intrinsische Doppelbrechung mit den Kristallrichtungen zusammenhängt, wenn die Linsenachse EA in $\langle 100 \rangle$ -Kristallrichtung weist. Dargestellt ist eine kreisrunde planparallele Platte 201 aus Kalzium-Fluorid. Die Linsenachse EA zeigt dabei in $\langle 100 \rangle$ -Kristallrichtung. Neben der $\langle 100 \rangle$ -Kristallrichtung sind auch die $\langle 101 \rangle$ -, $\langle 1\bar{1}0 \rangle$ -, $\langle 10\bar{1} \rangle$ - und $\langle 110 \rangle$ -Kristallrichtungen als Pfeile dargestellt. Die intrinsische
- 10 Doppelbrechung ist schematisch durch vier "Keulen" 203 dargestellt, deren Oberflächen den Betrag der intrinsischen Doppelbrechung für die jeweilige Strahlrichtung eines Lichtstrahls angeben. Die maximale intrinsische Doppelbrechung ergibt sich in den $\langle 101 \rangle$ -, $\langle 1\bar{1}0 \rangle$ -, $\langle 10\bar{1} \rangle$ - und $\langle 110 \rangle$ - Kristallrichtungen, also für Lichtstrahlen mit einem Öffnungswinkel von 45° und einem Azimutwinkel von 0° , 90° , 180° und 270° innerhalb
- 15 der Linse. Für Azimutwinkel von 45° , 135° , 225° und 315° ergeben sich minimale Werte der intrinsischen Doppelbrechung. Für einen Öffnungswinkel von 0° verschwindet die intrinsische Doppelbrechung.

- In Figur 2B wird mit einer dreidimensionalen Darstellung veranschaulicht, wie die
- 20 intrinsische Doppelbrechung mit den Kristallrichtungen zusammenhängt, wenn die Linsenachse EA in $\langle 111 \rangle$ -Kristallrichtung weist. Dargestellt ist eine kreisrunde planparallele Platte 205 aus Kalzium-Fluorid. Die Linsenachse EA zeigt dabei in $\langle 111 \rangle$ -Kristallrichtung. Neben der $\langle 111 \rangle$ -Kristallrichtung sind auch die $\langle 011 \rangle$ -, $\langle 101 \rangle$ - und $\langle 110 \rangle$ -Kristallrichtungen als Pfeile dargestellt. Die intrinsische Doppelbrechung ist
- 25 schematisch durch drei "Keulen" 207 dargestellt, deren Oberflächen den Betrag der intrinsischen Doppelbrechung für die jeweilige Strahlrichtung eines Lichtstrahls angeben. Die maximale intrinsische Doppelbrechung ergibt sich jeweils in den $\langle 011 \rangle$ -, $\langle 101 \rangle$ - und $\langle 110 \rangle$ - Kristallrichtungen, also für Lichtstrahlen mit einem Öffnungswinkel von 35° und einem Azimutwinkel von 0° , 120° und 240° innerhalb der Linse. Für Azimutwinkel von

WO 02/093209

PCT/EP02/05050

60°, 180° und 300° ergeben sich jeweils minimale Werte der intrinsischen Doppelbrechung. Für einen Öffnungswinkel von 0° verschwindet die intrinsische Doppelbrechung.

In Figur 2C wird mit einer dreidimensionalen Darstellung veranschaulicht, wie die intrinsische Doppelbrechung mit den Kristallrichtungen zusammenhängt, wenn die Linsenachse EA in $\langle 110 \rangle$ -Kristallrichtung weist. Dargestellt ist eine kreisrunde planparallele Platte 209 aus Kalzium-Fluorid. Die Linsenachse EA zeigt dabei in $\langle 110 \rangle$ -Kristallrichtung. Neben der $\langle 110 \rangle$ -Kristallrichtung sind auch die $\langle 01 \bar{1} \rangle$ -, die $\langle 10 \bar{1} \rangle$ -, die $\langle 101 \rangle$ - und die $\langle 011 \rangle$ -Kristallrichtungen als Pfeile dargestellt. Die intrinsische Doppelbrechung ist schematisch durch fünf "Keulen" 211 dargestellt, deren Oberflächen den Betrag der intrinsischen Doppelbrechung für die jeweilige Strahlrichtung eines Lichtstrahls angeben. Die maximale intrinsische Doppelbrechung ergibt sich zum einen in Richtung der Linsenachse EA, und zum anderen jeweils in der $\langle 01 \bar{1} \rangle$ -, $\langle 10 \bar{1} \rangle$ -, $\langle 101 \rangle$ - und $\langle 011 \rangle$ -Kristallrichtung, also für Lichtstrahlen mit einem Öffnungswinkel von 0°, beziehungsweise mit einem Öffnungswinkel von 60° und den vier Azimutwinkeln, die sich durch Projektion der $\langle 01 \bar{1} \rangle$ -, $\langle 10 \bar{1} \rangle$ -, $\langle 101 \rangle$ - und $\langle 011 \rangle$ -Kristallrichtungen in die $\{110\}$ -Kristallebene ergeben. Derartig hohe Öffnungswinkel treten in Kristallmaterial jedoch nicht auf, da die maximalen Öffnungswinkel durch die Brechzahl des Kristalls auf kleiner 45° beschränkt sind.

Die Definition von Öffnungswinkel θ und Azimutwinkel α ist in Figur 3 dargestellt. Für die (100)-Linse von Figur 2 zeigt die z-Achse in $\langle 100 \rangle$ -Kristallrichtung, die x-Achse in die Richtung, die sich durch Projektion der $\langle 110 \rangle$ -Kristallrichtung in die $\{100\}$ -Kristallebene ergibt. Die z-Achse ist dabei gleich der Linsenachse und die x-Achse gleich der Bezugsrichtung.

Aus der zitierten Internetpublikation ist bekannt, daß Messungen bei Strahlausbreitung in der $\langle 110 \rangle$ -Kristallrichtung einen Doppelbrechungswert von (6.5 ± 0.4) nm/cm bei einer Wellenlänge von $\lambda = 156.1$ nm für Kalzium-Fluorid ergeben haben. Mit diesem Messwert

WO 02/093209

PCT/EP02/05050

- als Normierungsgröße kann die Doppelbrechungsverteilung $\Delta n(\theta, \alpha)$ einer Kalzium-Fluorid-Linse in Abhängigkeit der Kristallorientierung theoretisch abgeleitet werden. Dazu werden die aus der Kristalloptik bekannten Formalismen zur Berechnung der Indexellipsoide in Abhängigkeit der Strahlrichtung herangezogen. Die theoretischen Grundlagen sind beispielsweise im „Lexikon der Optik“, Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg Berlin, 1999 unter dem Stichwort „Kristalloptik“ zu finden.

- Neuere Messungen der Anmelderin haben ergeben, daß bei Strahlausbreitung in der $\langle 110 \rangle$ -Kristallrichtung die intrinsische Doppelbrechung 11 nm/cm in Kalzium-Fluorid-Kristall bei einer Wellenlänge von $\lambda = 156.1$ nm beträgt. Die im folgenden für die Normierungsgröße $\Delta n_{\max} = 6,5$ nm/cm getroffenen Aussagen können ohne Schwierigkeiten auf die Normierungsgröße $\Delta n_{\max} = 11$ nm/cm umgerechnet werden.

- In Figur 4A ist der Betrag der intrinsischen Doppelbrechung in Abhängigkeit des Öffnungswinkels θ für den Azimutwinkel $\alpha = 0^\circ$ für eine (100)-Linse dargestellt. Der Wert für die intrinsische Doppelbrechung von 6.5 nm/cm bei dem Öffnungswinkels $\theta = 45^\circ$ entspricht dem Messwert. Der Kurvenverlauf wurde gemäß den aus der Kristalloptik bekannten Formeln bestimmt.

- In Figur 4B ist der Betrag der intrinsischen Doppelbrechung in Abhängigkeit des Azimutwinkels α für den Öffnungswinkels $\theta = 45^\circ$ für eine (100)-Linse dargestellt. Die vierzählige Azimutalsymmetrie ist offensichtlich.

- In Figur 4C ist die Doppelbrechungsverteilung $\Delta n(\theta, \alpha)$ für einzelne Strahlrichtungen im (θ, α) -Winkelraum für eine (100)-Linse dargestellt. Jede Linie repräsentiert Betrag und Richtung für eine durch den Öffnungswinkel θ und den Azimutwinkel α definierte Strahlrichtung. Die Länge der Linien ist proportional zum Betrag der Doppelbrechung, beziehungsweise der Differenz der Hauptachsenlängen der Schnittellipse, während die Richtung der Linien die Orientierung der längeren Hauptachse der Schnittellipse angibt.

WO 02/093209

PCT/EP02/05050

Die Schnittellipse erhält man, indem man das Indexellipsoid für den Strahl der Richtung (θ, α) mit einer Ebene schneidet, die senkrecht auf der Strahlrichtung steht und durch die Mitte des Indexellipsoids geht. Sowohl die Richtungen als auch die Längen der Linien zeigen die Vierzähligkeit der Verteilung. Die Länge der Linien und damit die

- 5 Doppelbrechung ist bei den Azimutwinkeln 0° , 90° , 180° und 270° maximal.

Figur 4D zeigt nun die Doppelbrechungsverteilung $\Delta n(\theta, \alpha)$, die sich ergibt, wenn zwei benachbarte planparallele (100)-Linsen gleicher Dicke um 45° gedreht angeordnet werden. Die resultierende Doppelbrechungsverteilung $\Delta n(\theta, \alpha)$ ist unabhängig vom Azimutwinkel

- 10 α . Die längeren Hauptachsen der Schnittellipsen verlaufen tangential. Die resultierenden optischen Wegunterschiede zweier zueinander orthogonaler Polarisationszustände erhält man, indem man die Doppelbrechungswerte mit den physikalischen Weglängen der Strahlen innerhalb der planparallelen (100)-Linsen multipliziert. Rotationssymmetrische Doppelbrechungsverteilungen erhält man, wenn man n planparallele (100)-Linsen gleicher
- 15 Dicke derart anordnet, daß für die Drehwinkel β zwischen je zwei Linsen gilt:

$$\beta = \frac{90^\circ}{n} + m \cdot 90^\circ \pm 5^\circ,$$

wobei n die Anzahl der planparallelen (100)-Linsen angibt und m eine ganze Zahl ist. Im Vergleich zu einer gleichorientierten Anordnung der Linsen kann der maximale Wert der Doppelbrechung für den Öffnungswinkel $\theta = 30^\circ$ um 30% reduziert werden. Eine nahezu

- 20 rotationssymmetrische Verteilung der optischen Wegunterschiede für zwei zueinander orthogonale lineare Polarisationszustände ergibt sich auch für beliebige Linsen, wenn alle Strahlen eines Strahlbüschels in den Linsen jeweils ähnlich große Winkel aufweisen und ähnlich große Weglängen innerhalb der Linsen zurücklegen. Die Linsen sollten deshalb so zu Gruppen zusammengefaßt werden, daß die Strahlen die zuvor angegebene Bedingung so
- 25 gut wie möglich erfüllen.

In Figur 4E ist der Betrag der intrinsischen Doppelbrechung in Abhängigkeit des Öffnungswinkels θ für den Azimutwinkel $\alpha = 0^\circ$ für die zwei benachbarten planparallelen (100)-Linsen gleicher Dicke der Figur 4D dargestellt. Der maximale Wert für die

WO 02/093209

PCT/EP02/05050

intrinsische Doppelbrechung bei dem Öffnungswinkels $\theta = 41^\circ$ beträgt 4.2nm/cm und ist somit um 35% zu dem Maximalwert von 6.5nm/cm in Figur 4A reduziert.

- 5 In Figur 4F ist der Betrag der intrinsischen Doppelbrechung in Abhängigkeit des Azimutwinkels α für den Öffnungswinkels $\theta = 41^\circ$ für die zwei benachbarten planparallelen (100)-Linsen gleicher Dicke der Figur 4D dargestellt. Die intrinsische Doppelbrechung ist unabhängig vom Azimutwinkel α .

- 10 In Figur 5A ist der Betrag der intrinsischen Doppelbrechung in Abhängigkeit des Öffnungswinkels θ für den Azimutwinkel $\alpha = 0^\circ$ für eine (111)-Linse dargestellt. Der Wert für die intrinsische Doppelbrechung von 6.5nm/cm bei dem Öffnungswinkels $\theta = 35^\circ$ entspricht dem Messwert. Der Kurvenverlauf wurde gemäß den aus der Kristalloptik bekannten Formeln bestimmt.

- 15 In Figur 5B ist der Betrag der intrinsischen Doppelbrechung in Abhängigkeit des Azimutwinkels α für den Öffnungswinkels $\theta = 35^\circ$ für eine (111)-Linse dargestellt. Die dreizählige Azimutalsymmetrie ist offensichtlich.

- 20 Figur 5C zeigt die Doppelbrechungsverteilung $\Delta n(\theta, \alpha)$ für einzelne Strahlrichtungen im (θ, α) -Winkelraum für eine (111)-Linse in der bereits mit Fig. 4C eingeführten Darstellung. Sowohl die Richtungen als auch die Längen der Linien zeigen die Dreizähligkeit der Verteilung. Die Länge der Linien und damit die Doppelbrechung ist bei den Azimutwinkeln 0° , 120° und 240° maximal. Im Gegensatz zu einer (100)-Linse dreht sich die Orientierung der Doppelbrechung um 90° , wenn ein Strahl anstatt mit einem Azimutwinkel von 0° mit einem Azimutwinkel von 180° durch eine Linse läuft. Somit kann beispielsweise durch zwei gleich orientierte (111)-Linsen die Doppelbrechung kompensiert werden, wenn die Strahlwinkel eines Strahlbüschels zwischen den beiden Linsen ihr Vorzeichen tauschen. Dies ist insbesondere immer dann der Fall, wenn sich zwischen diesen beiden gleich orientierten (111)-Linsen ein Maximum oder ein Minimum

WO 02/093209

PCT/EP02/05050

- für den Durchmessers eines Strahlbüschels befindet, welches von einem Objektpunkt auf der optischen Achse losläuft. Refraktive Projektionsobjektive weisen mehrere Linsengruppen mit positiver und negativer Brechkraft auf. Insbesondere in Linsengruppen mit positiver Brechkraft befindet sich oftmals ein Maximum des Büscheldurchmessers, in
- 5 Linsengruppen mit negativer Brechkraft ein Minimum des Büscheldurchmessers. Ein typisches Mikrolithographie-Projektionsobjektiv weist beispielsweise eine erste Linsengruppe mit positiver Brechkraft, eine zweite Linsengruppe mit negativer Brechkraft, eine dritte Linsengruppe mit positiver Brechkraft, eine vierte Linsengruppe mit negativer Brechkraft und eine fünfte Linsengruppe mit positiver Brechkraft auf. Innerhalb der ersten
- 10 Linsengruppe befindet sich ein Maximum des Büscheldurchmessers, innerhalb der zweiten Linsengruppe ein Minimum des Büscheldurchmessers, innerhalb der dritten Linsengruppe ein Maximum des Büscheldurchmessers, innerhalb der vierten Linsengruppe ein Minimum des Büscheldurchmessers und innerhalb der fünften Linsengruppe ein Maximum des Büscheldurchmessers. Es ist deshalb vorteilhaft, in Lichtrichtung vor und nach einer
- 15 Position mit extremalem Büscheldurchmesser gleich orientierte (111)-Linsen anzuordnen, beziehungsweise (111)-Linsen, die einen gegenseitigen Drehwinkel von $\gamma = 1 \cdot 120^\circ \pm 10^\circ$ aufweisen, wobei 1 eine ganze Zahl ist. Auf Grund der dreizähligen Symmetrie der Doppelbrechungsverteilung von (111)-Linsen hat eine Drehung um $\gamma = 1 \cdot 120^\circ$ ohne Einfluß auf die doppelbrechende Wirkung einer (111)-Linse. Ein Strahl mit nahezu
- 20 gleichem Öffnungswinkel, dessen Azimutwinkel sich jedoch zwischen den gleich orientierten (111)-Linsen um 180° geändert hat, erfährt eine zumindest teilweise Kompensation des optischen Wegunterschieds für zwei zueinander orthogonale lineare Polarisationszustände.
- 25 Figur 5D zeigt nun die Doppelbrechungsverteilung $\Delta n(\theta, \alpha)$, die sich ergibt, wenn zwei benachbarte planparallele (111)-Linsen gleicher Dicke um 60° gedreht angeordnet werden. Die resultierende Doppelbrechungsverteilung $\Delta n(\theta, \alpha)$ ist unabhängig vom Azimutwinkel α . Die längeren Hauptachsen der Schnittellipsen verlaufen jedoch im Gegensatz zu Figur 4C radial. Die resultierenden optischen Wegunterschiede zweier zueinander orthogonaler
- 30 Polarisationszustände erhält man, indem man die Doppelbrechungswerte mit den

WO 02/093209

PCT/EP02/05050

physikalischen Weglängen der Strahlen innerhalb der (111)-Linsen multipliziert. Ebenfalls rotationssymmetrische Doppelbrechungsverteilungen erhält man, wenn man n planparallele (111)-Linsen gleicher Dicke derart anordnet, daß für die Drehwinkel zwischen je zwei

Linsen gilt: $\gamma = \frac{120^\circ}{k} + 1 \cdot 120^\circ \pm 5^\circ$

- 5 wobei k die Anzahl der planparallelen (111)-Linsen angibt und l eine ganze Zahl ist. Im Vergleich zu einer gleichorientierten Anordnung der Linsen kann der Wert der Doppelbrechung für den Öffnungswinkel $\theta = 30^\circ$ um 68% reduziert werden. Eine nahezu rotationssymmetrische Verteilung der optischen Wegunterschiede für zwei zueinander orthogonale lineare Polarisationszustände ergibt sich auch für beliebige Linsen, wenn alle
- 10 Strahlen eines Strahlbüschels in den Linsen jeweils ähnlich große Winkel aufweisen und ähnlich große Weglängen innerhalb der Linsen zurücklegen. Die Linsen sollten deshalb so zu Gruppen zusammengefaßt werden, daß die Strahlen die zuvor angegebene Bedingung so gut wie möglich erfüllen.
- 15 In Figur 5E ist der Betrag der intrinsischen Doppelbrechung in Abhängigkeit des Öffnungswinkels θ für den Azimutwinkel $\alpha = 0^\circ$ für die zwei benachbarten planparallelen (111)-Linsen gleicher Dicke der Figur 5D dargestellt. Der maximale Wert für die intrinsische Doppelbrechung bei dem Öffnungswinkels $\theta = 41^\circ$ beträgt 2.8nm/cm und ist somit um 57% zu dem Maximalwert von 6.5nm/cm in Figur 5A reduziert.
- 20 In Figur 5F ist der Betrag der intrinsischen Doppelbrechung in Abhängigkeit des Azimutwinkels α für den Öffnungswinkels $\theta = 41^\circ$ für die zwei benachbarten planparallelen (111)-Linsen gleicher Dicke der Figur 5D dargestellt. Die intrinsische Doppelbrechung ist unabhängig vom Azimutwinkel α .
- 25 Kombiniert man nun innerhalb eines Projektionsobjektives Gruppen mit (100)-Linsen und Gruppen mit (111)-Linsen, so kann die von diesen Linsen eingebrachten optischen Wegunterschiede für zwei zueinander orthogonale lineare Polarisationszustände weitgehend kompensiert werden. Dazu ist es erforderlich, daß zunächst innerhalb dieser

WO 02/093209

PCT/EP02/05050

- Gruppen durch Drehung der Linsen eine nahezu rotationssymmetrische Verteilung der optischen Wegunterschiede erzielt wird und sich dann durch Kombination einer Gruppe mit (100)-Linsen und einer Gruppe mit (111)-Linsen die beiden Verteilungen der optischen Wegunterschiede kompensieren. Dazu nutzt man aus, daß die Orientierungen der längeren Hauptachsen der Schnittellipsen für die Doppelbrechungsverteilung einer Gruppe mit gedrehten (100)-Linsen senkrecht auf den Orientierungen der längeren Hauptachsen der Schnittellipsen für die Doppelbrechungsverteilung einer Gruppe mit gedrehten (111)-Linsen steht, wie dies den Figuren 4D und 5D zu entnehmen ist. Entscheidend ist dabei, daß zum einen von den einzelnen Gruppen eine nahezu rotationssymmetrische Verteilung der optischen Wegunterschiede erzeugt wird und zum anderen die Summe der Beiträge der Gruppen mit (100)-Linsen dem Betrage nach nahezu gleich groß ist zur Summe der Beiträge der Gruppen mit (111)-Linsen.

- In Figur 6A ist der Betrag der intrinsischen Doppelbrechung in Abhängigkeit des Öffnungswinkels θ für den Azimutwinkel $\alpha = 0^\circ$ für eine (110)-Linse dargestellt. Der Wert für die intrinsische Doppelbrechung von 6.5nm/cm bei dem Öffnungswinkel $\theta = 0^\circ$ entspricht dem Messwert. Der Kurvenverlauf wurde gemäß den aus der Kristalloptik bekannten Formeln bestimmt.

- In Figur 6B ist der Betrag der intrinsischen Doppelbrechung in Abhängigkeit des Azimutwinkels α für den Öffnungswinkel $\theta = 35^\circ$ für eine (110)-Linse dargestellt. Die zweizählige Azimutalsymmetrie ist offensichtlich.

- Figur 6C zeigt die Doppelbrechungsverteilung $\Delta n(\theta, \alpha)$ für einzelne Strahlrichtungen im (θ, α) -Winkelraum für eine (110)-Linse in der bereits mit Fig. 4C eingeführten Darstellung. Sowohl die Richtungen als auch die Längen der Linien zeigen die Zweizähligkeit der Verteilung. Die Linie mit maximaler Länge und damit die maximale Doppelbrechung ergibt sich für den Öffnungswinkel $\theta = 0^\circ$.

WO 02/093209

PCT/EP02/05050

Figur 6D zeigt nun die Doppelbrechungsverteilung $\Delta n(\theta, \alpha)$, die sich ergibt, wenn zwei benachbarte planparallele (110)-Linsen gleicher Dicke um 90° gedreht angeordnet werden. Die resultierende Doppelbrechungsverteilung $\Delta n(\theta, \alpha)$ weist nun eine vierzählige Azimutalsymmetrie auf. Maximale Doppelbrechungswerte treten bei den Azimutwinkeln $\alpha = 45^\circ, 135^\circ, 225^\circ$ und 315° auf, wobei der Wert der Doppelbrechung für den Öffnungswinkel $\theta = 40^\circ$ 2.6 nm/cm beträgt.

Figur 6E zeigt nun die Doppelbrechungsverteilung $\Delta n(\theta, \alpha)$, die sich ergibt, wenn die zwei planparallelen (110)-Linsen gleicher Dicke der Figur 6C mit zwei weiteren planparallelen (110)-Linsen gleicher Dicke kombiniert werden. Der Drehwinkel zwischen je zwei der (110)-Linsen beträgt 45° . Die resultierende Doppelbrechungsverteilung $\Delta n(\theta, \alpha)$ ist unabhängig vom Azimutwinkel α . Die längeren Hauptachsen der Schnittellipsen verlaufen jedoch im Gegensatz zu Figur 4C radial, also ähnlich der Verteilung von Figur 5C. Die resultierenden optischen Wegunterschiede zweier zueinander orthogonaler Polarisationszustände erhält man, indem man die Doppelbrechungswerte mit den physikalischen Weglängen der Strahlen innerhalb der (110)-Linsen multipliziert. Ebenfalls rotationssymmetrische Doppelbrechungsverteilungen erhält man, wenn man $4 \cdot n$ planparallele (110)-Linsen gleicher Dicke derart anordnet, daß für die Drehwinkel β zwischen je zwei Linsen gilt: $\beta = \frac{45^\circ}{n} + m \cdot 90^\circ \pm 5^\circ$,

wobei $4 \cdot n$ die Anzahl der planparallelen (100)-Linsen angibt und m eine ganze Zahl ist. Eine nahezu rotationssymmetrische Verteilung der optischen Wegunterschiede für zwei zueinander orthogonale lineare Polarisationszustände ergibt sich auch für beliebige Linsen, wenn alle Strahlen eines Strahlbüschels in den Linsen jeweils ähnlich große Winkel aufweisen und ähnlich große Weglängen innerhalb der Linsen zurücklegen. Die Linsen sollten deshalb so zu Gruppen zusammengefaßt werden, daß die Strahlen die zuvor angegebene Bedingung so gut wie möglich erfüllen.

WO 02/093209

PCT/EP02/05050

In Figur 6F ist der Betrag der intrinsischen Doppelbrechung in Abhängigkeit des Öffnungswinkels θ für den Azimutwinkel $\alpha = 0^\circ$ für die vier benachbarten planparallelen (110)-Linsen gleicher Dicke der Figur 6E dargestellt. Der Wert für die intrinsische Doppelbrechung bei dem Öffnungswinkels $\theta = 41^\circ$ beträgt 1.0nm/cm und ist somit um

5 84% zu dem Maximalwert von 6.5nm/cm in Figur 5A reduziert.

In Figur 6G ist der Betrag der intrinsischen Doppelbrechung in Abhängigkeit des Azimutwinkels α für den Öffnungswinkels $\theta = 41^\circ$ für die vier benachbarten planparallelen (110)-Linsen gleicher Dicke der Figur 6E dargestellt. Die intrinsische Doppelbrechung ist

10 unabhängig vom Azimutwinkel α .

Kombiniert man nun innerhalb eines Projektionsobjektives Gruppen mit (110)-Linsen und Gruppen mit (100)-Linsen, so kann die von diesen Linsen eingebrachten optischen Wegunterschiede für zwei zueinander orthogonale lineare Polarisationszustände

15 weitgehend kompensiert werden. Dazu ist es erforderlich, daß zunächst innerhalb dieser Gruppen durch Drehung der Linsen eine nahezu rotationssymmetrische Verteilung der optischen Wegunterschiede erzielt wird und sich dann durch Kombination einer Gruppe mit (110)-Linsen und einer Gruppe mit (100)-Linsen die beiden Verteilungen der optischen Wegunterschiede kompensieren. Dazu nutzt man aus, daß die Orientierungen der längeren

20 Hauptachsen der Schnittellipsen für die Doppelbrechungsverteilung einer Gruppe mit gedrehten (110)-Linsen senkrecht auf den Orientierungen der längeren Hauptachsen der Schnittellipsen für die Doppelbrechungsverteilung einer Gruppe mit gedrehten (100)-Linsen steht, wie dies den Figuren 4D und 6E zu entnehmen ist. Entscheidend ist dabei, daß zum einen von den einzelnen Gruppen eine nahezu rotationssymmetrische Verteilung

25 der optischen Wegunterschiede erzeugt wird und zum anderen die Summe der Beiträge der Gruppen mit (110)-Linsen dem Betrage nach nahezu gleich groß ist zur Summe der Beiträge der Gruppen mit (100)-Linsen.

In Figur 7 ist der Linsenschnitt eines refraktiven Projektionsobjektivs 611 für die

30 Wellenlänge 157nm dargestellt. Die optischen Daten für dieses Objektiv sind in Tabelle 1

WO 02/093209

PCT/EP02/05050

zusammengestellt. Das Ausführungsbeispiel ist der Patentanmeldung PCT/EP00/13148 (WO 150171 A1) der Anmelderin entnommen und entspricht dort Figur 7 beziehungsweise Tabelle 6. Zur näheren Beschreibung der Funktionsweise des Objektivs wird auf die Patentanmeldung PCT/EP00/13148 (WO 150171 A1) verwiesen. Alle Linsen dieses

5 Objektivs bestehen aus Kalzium-Fluorid-Kristall. Die bildseitige numerische Apertur des Objektivs beträgt 0.9. Die Abbildungsleistung dieses Objektivs ist so gut korrigiert, daß die Abweichung von der Wellenfront einer idealen Kugelwelle kleiner $1.8m\lambda$ bezogen auf die Wellenlänge von 157nm ist. Gerade bei diesen Hochleistungsobjektiven ist es erforderlich, daß störende Einflüsse wie die der intrinsischen Doppelbrechung so weit wie möglich

10 reduziert werden.

Für das Ausführungsbeispiel der Figur 6 wurden die Öffnungswinkel θ und Strahlwege RL_L des äußersten Aperturstrahls 609 für die einzelnen Linsen L601 bis L630 berechnet. Der äußerste Aperturstrahl 609 geht dabei von dem Objektpunkt mit den Koordinaten $x =$

15 0mm und $y = 0\text{mm}$ aus und weist in der Bildebene einen Winkel bezüglich der optischen Achse auf, welcher der bildseitigen numerischen Apertur entspricht. Der äußerste Aperturstrahl 609 wird deshalb herangezogen, da sich für ihn nahezu die maximalen Öffnungswinkel innerhalb der Linsen ergeben.

WO 02/093209

PCT/EP02/05050

Linse	Öffnungswinkel θ [°]	Strahlweg RL_L [mm]	Optischer Wegunterschied (111)-Linse $\alpha_L = 0^\circ$ [nm]	Optischer Wegunterschied (111)-Linse $\alpha_L = 60^\circ$ [nm]	Optischer Wegunterschied (100)-Linse $\alpha_L = 0^\circ$ [nm]	Optischer Wegunterschied (100)-Linse $\alpha_L = 65^\circ$ [nm]	Optischer Wegunterschied (110)-Linse $\alpha_L = 0^\circ$ [nm]	Optischer Wegunterschied (110)-Linse $\alpha_L = 65^\circ$ [nm]	Optischer Wegunterschied (110)-Linse $\alpha_L = 90^\circ$ [nm]	Optischer Wegunterschied (110)-Linse $\alpha_L = 135^\circ$ [nm]
L601	8.1	15.1	2.9	-2.2	-0.8	-0.4	-9.0	-9.0	-9.1	-9.0
L602	8.7	8.2	1.7	-1.2	-0.5	-0.2	-4.9	-4.8	-4.9	-4.8
L603	7.8	9.5	1.7	-1.3	-0.4	-0.2	-5.7	-5.7	-5.7	-5.7
L604	10.7	7.2	1.9	-1.3	-0.6	-0.3	-4.1	-4.1	-4.1	-4.1
L605	9.4	6.5	1.5	-1.0	-0.4	-0.2	-3.8	-3.8	-3.8	-3.8
L606	10.3	8.5	2.1	-1.4	-0.7	-0.3	-4.8	-4.8	-4.8	-4.8
L607	21.8	12.7	6.6	-2.7	-3.9	-1.8	-4.2	-4.2	-4.3	-4.2
L608	23.4	22.2	12.8	-4.4	-8.7	-3.9	-5.3	-5.7	-5.8	-5.7
L609	16.3	36.1	14.3	-7.6	-6.8	-3.3	-16.5	-16.5	-16.7	-16.5
L610	12.2	15.2	4.5	-2.9	-1.7	-0.8	-8.2	-8.2	-8.2	-8.2
L611	2.3	26.6	1.4	-1.3	-0.1	-0.1	-17.2	-17.2	-17.2	-17.2
L612	2.3	32.2	1.6	-1.5	-0.1	-0.1	-20.8	-20.8	-20.8	-20.8
L613	-18.3	30.4	-6.6	13.5	-7.0	-3.3	-12.5	-12.6	-12.7	-12.6
L614	-18.7	22.0	-4.8	10.0	-5.3	-2.5	-8.9	-8.9	-9.0	-8.9
L615	-14.0	10.2	-2.0	3.5	-1.5	-0.7	-5.1	-5.1	-5.2	-5.1
L616	-1.3	29.8	-0.8	0.9	0.0	0.0	-19.3	-19.3	-19.3	-19.3
L617	26.4	31.6	18.6	-6.1	-13.0	-5.7	-6.7	-7.6	-7.5	-7.6
L618	33.5	14.3	9.3	-2.0	-7.9	-3.1	-0.6	3.2	-1.4	3.2
L619	26.5	7.5	4.4	-1.4	-3.1	-1.4	-1.6	-1.8	-1.8	-1.8
L620	19.3	6.4	3.0	-1.4	-1.6	-0.8	-2.5	-2.5	-2.5	-2.5
L621	6.7	8.0	1.3	-1.0	-0.3	-0.1	-4.9	-4.9	-4.9	-4.9
L622	-10.3	7.7	-1.3	1.9	-0.6	-0.3	-4.4	-4.4	-4.4	-4.4
L623	-11.9	9.6	-1.8	2.8	-1.0	-0.5	-5.2	-5.2	-5.2	-5.2
L624	0.3	17.8	0.1	-0.1	0.0	0.0	-11.6	-11.6	-11.6	-11.6
L625	6.0	16.3	2.3	-1.8	-0.5	-0.2	-9.9	-9.9	-10.0	-9.9
L626	-24.0	9.0	-1.9	5.0	-3.2	-1.5	-2.5	-2.6	-2.6	-2.6
L627	-35.6	8.0	-0.9	5.2	-4.7	-1.7	0.1	2.1	-0.5	2.1
L628	-39.4	12.0	-1.0	7.6	-7.5	-2.5	1.0	4.0	-0.3	4.0
L629	-35.3	27.3	-3.3	17.7	-15.7	-5.9	0.5	6.9	-1.9	6.9
L630	-35.3	26.0	-3.1	16.9	-15.0	-5.6	0.4	6.5	-1.9	6.5
Summe			64.5	42.3	112.9	47.4	-198.2	-178.7	-208.0	-178.8

Tabelle 2

5 Neben den Öffnungswinkeln θ und den Weglängen RL_L für den äußersten Aperturstrahl sind in Tabelle 2 die optischen Wegunterschiede für zwei zueinander orthogonale lineare Polarisationszustände für verschiedene Linsenorientierungen zusammengestellt. Die

WO 02/093209

PCT/EP02/05050

optischen Wegunterschiede sind für (111)-Linsen, (100)-Linsen und (110)-Linsen zusammengestellt, wobei der Azimutwinkel α_t des äußersten Randstrahls innerhalb der Linsen für eine (111)-Linse 0° und 60° , für eine (100)-Linse 0° und 45° und für eine (110)-Linse 0° , 45° , 90° und 135° beträgt.

5

Tabelle 2 ist zu entnehmen, daß die Öffnungswinkel θ für die Linsen L608, L617, L618, L619, L627, L628, L629 und L630 größer als 25° , für die Linsen L618, L627, L628, L629 und L630 sogar größer als 30° sind. Besonders betroffen von hohen Öffnungswinkeln sind die der Bildebene am nächsten gelegenen Linsen L627 bis L630.

10

Durch das Design des Projektionsobjektives wurde erreicht, daß der maximale Öffnungswinkel aller Lichtstrahlen kleiner 45° ist. Der maximale Öffnungswinkel für den äußersten Aperturstrahl beträgt 39.4° bei der Linse L628. Hilfreich war der Einsatz von zwei dicken Planlinsen L629 und L630 unmittelbar vor der Bildebene.

15

Der Durchmesser der Blende, welche sich zwischen den Linsen L621 und L622 befindet, beträgt 270mm. Der Durchmesser der Linse L618 beträgt 207mm und die Durchmesser der Linsen L627 bis L630 sind alle kleiner 190mm. Somit sind die Durchmesser dieser Linsen, welche hohe Öffnungswinkel aufweisen, kleiner als 80% des Blendendurchmessers.

20

Tabelle 2 ist zu entnehmen, daß es für einzelne Linsen mit großen Öffnungswinkeln günstig ist, diese in (100)-Richtung zu orientieren, da die Doppelbrechungswerte insgesamt niedriger sind. Dies liegt daran, daß bei (100)-Linsen der Einfluß der <110>-Kristallrichtungen erst bei größeren Winkeln zu spüren ist wie bei (111)-Linsen.

25

Beispielsweise bei den Linsen L608, L609 und L617 sind die optischen Wegunterschiede um mehr als 30% niedriger.

Anhand der beiden planparallelen Linsen L629 und L630 läßt sich gut zeigen, wie durch gegenseitige Drehung der Linsen die Doppelbrechung deutlich reduziert werden kann.

30

Beide Linsen weisen gleiche Öffnungswinkel für den äußersten Aperturstrahl von 35.3°

WO 02/093209

PCT/EP02/05050

und ähnliche Strahlwege von 27.3mm, beziehungsweise 26.0mm auf. Würden beide Linsen als (100)-Linsen gleich orientiert eingebaut werden, so würde sich ein optischer Wegunterschied von 30.7nm ergeben. Verdreht man die beiden (100)-Linsen jedoch gegenseitig um 45°, so reduziert sich der optische Wegunterschied auf 20.9nm, also um 32%. Würden beide Linsen als (111)-Linsen gleich orientiert eingebaut werden, so würde sich ein optischer Wegunterschied von 34.6nm ergeben. Verdreht man die beiden (111)-Linsen jedoch gegenseitig um 60°, so reduziert sich der optische Wegunterschied auf 13.6nm, also um 61%.

- 10 Eine nahezu vollständige Kompensation der optischen Wegdifferenzen für zwei aufeinander orthogonale lineare Polarisationszustände auf Grund der intrinsischen Doppelbrechung, die durch die Linsen L629 und L630 hervorgerufen wird, kann erreicht werden, wenn die Linse L629 in die Linsen L6291 und L6292 und die Linse L630 in die Linsen L6301 und L6302 aufgespalten werden, wobei die Linse L6291 eine (100)-Linse der Dicke 9.15mm, die Linse L6292 eine (111)-Linse der Dicke 13.11mm, die Linse L6301 eine (100)-Linse der Dicke 8.33mm und die Linse L6302 eine (111)-Linse der Dicke 12.9mm ist. Die Linse L6291 und L6301 werden gegeneinander um 45°, die Linsen L6292 und L6302 um 60° gedreht. Der resultierende maximale optische Wegunterschied beträgt in diesem Fall dann 0.2nm. Die Linsen L6291 und L6292, ebenso wie die Linsen L6301 und L6302 können optisch nahtlos, beispielsweise durch Ansprengen, gefügt werden.

Dieses Prinzip ist auch anwendbar, wenn das Projektionsobjektiv nur eine Kristall-Linse enthält. Diese wird dann mindestens in zwei Linsen zerlegt, die zueinander gedreht angeordnet werden. Das Zusammenfügen ist durch Ansprengen möglich. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, zunächst einzelne Platten der gewünschten Kristallorientierung optisch nahtlos zu verbinden und in einem weiteren Verfahrensschritt die Linse aus den aneinandergefügten Platten zu fertigen.

Eine weitere Möglichkeit, den störenden Einfluß der intrinsischen Doppelbrechung durch die Linsen L629 und L630 zu reduzieren, besteht darin, die Linse L629 in die Linsen

WO 02/093209

PCT/EP02/05050

L6293 und L6294 sowie die Linse L630 in die Linsen L6303 und L6304 aufgespalten werden, wobei die Linse L6293 dann eine (110)-Linse der Dicke 11.13mm, die Linse L6294 eine (110)-Linse der Dicke 11.13mm, die Linse L6303 eine (110)-Linse der Dicke 10.62mm und die Linse L6304 eine (110)-Linse der Dicke 10.62mm ist. Die Linsen L6293
5 und L6294, sowie die Linsen L6303 und L6304 werden jeweils gegeneinander um 90° gedreht, wobei der Drehwinkel zwischen der Linse L6293 und L6303 45° beträgt. Der resultierende maximale optische Wegunterschied beträgt in diesem Fall 4.2nm. Die Linsen L6293 und L6294, ebenso wie die Linsen L6303 und L6304 können als Linsenteile optisch nahtlos, beispielsweise durch Ansprenge-
10

Nahezu vollständig gelingt eine Kompensation der optischen Wegdifferenzen für zwei zueinander orthogonale lineare Polarisationszustände, welche durch die hoch belasteten Linsen L629 und L630 hervorgerufen wird, wenn die Linse L629 in die drei Linsenteile L6295, L6296 und L6297 und die Linse L630 in die Linsenteile L6305, L6306 und L6307
15 aufgespalten werden, wobei die Linse L6295 dann eine (100)-Linse der Dicke 4.45mm, die Linsen L6296 und L6297 (110)-Linsen der Dicke 8.90mm, die Linse L6305 eine (100)-Linse der Dicke 4.25mm und die Linsen L6306 und L6307 (110)-Linsen der Dicke 8.49mm sind. Die Linsen L6294 und L6304 werden gegeneinander um 45° , je zwei der Linsen L6295, L6297, L6306 und L6307 um 45° gedreht. In dieser Kombination verringert
20 sich der resultierende maximale optische Wegunterschied auf unter 0,1 nm. Die Linsen L6295 bis L6297, ebenso wie die Linsen L6305 bis L6307 können als Linsenteile optisch nahtlos, beispielsweise durch Ansprenge-
25

Eine weitere Möglichkeit, den störenden Einfluß der intrinsischen Doppelbrechung durch die Linsen L629 und L630 zu reduzieren, besteht darin, zwei (110)-Linsen mit einer (100)-Linse zu kombinieren. Die beiden (110)-Linsen sind dabei um 90° gegeneinander verdreht einzubauen, während der Drehwinkel zwischen der (100)-Linse und den (110)-Linsen
30 $45^\circ + m \cdot 90^\circ$ beträgt, wobei m eine ganze Zahl ist. Dazu werden die Linse L629 in die Linsen L6298 und L6299 sowie die Linse L630 in die Linsen L6308 und L6309 aufgespalten, wobei die Linse L6298 dann eine (110)-Linse der Dicke 17.40mm, die Linse

WO 02/093209

PCT/EP02/05050

L6299 eine (110)-Linse der Dicke 4.87mm, die Linse L6308 eine (110)-Linse der Dicke 12.53mm und die Linse L6309 eine (100)-Linse der Dicke 8.70mm ist. Der resultierende maximale optische Wegunterschied liegt bei 3,1 nm. Die Linsen L6298 und L6299, ebenso wie die Linsen L6308 und L6309 können als Linsenteile optisch nahtlos, beispielsweise durch Ansprennen, gefügt werden.

In Figur 8 ist der Linsenschnitt eines katadioptrischen Projektionsobjektivs 711 für die Wellenlänge 157nm dargestellt. Die optischen Daten für dieses Objektiv sind in Tabelle 3 zusammengestellt. Das Ausführungsbeispiel ist der Patentanmeldung PCT/EP00/13148 (WO 150171 A1) der Anmelderin entnommen und entspricht dort Figur 9 beziehungsweise Tabelle 8. Zur näheren Beschreibung der Funktionsweise des Objektivs wird auf die Patentanmeldung PCT/EP00/13148 (WO 150171 A1) verwiesen. Alle Linsen dieses Objektivs bestehen aus Kalzium-Fluorid-Kristall. Die bildseitige numerische Apertur des Objektivs beträgt 0.8.

Für das Ausführungsbeispiel der Figur 8 wurden die Öffnungswinkel θ und Strahlwege RL_L des oberen äußersten Aperturstrahls 713 und des unteren äußersten Aperturstrahls 715 für die einzelnen Linsen L801 bis L817 berechnet. Die äußersten Aperturstrahlen 713 und 715 gehen dabei von dem Objektpunkt mit den Koordinaten $x = 0\text{mm}$ und $y = -82.15\text{mm}$ aus und weisen in der Bildebene Winkel bezüglich der optischen Achse auf, welche der bildseitigen numerischen Apertur entsprechen. Der obere und der untere äußerste Aperturstrahl wurden berechnet, da es sich um ein achsfernes Objektfeld handelt und somit die Aperturstrahlen nicht symmetrisch zur optischen Achse verlaufen, wie dies für den äußersten Aperturstrahl des Ausführungsbeispiels der Figur 7 der Fall war.

In Tabelle 4 sind die Daten für den oberen äußersten Aperturstrahl und in Tabelle 5 für den unteren äußersten Aperturstrahl zusammengestellt. Neben den Öffnungswinkeln θ und den Weglängen RL_L für den äußersten Aperturstrahl sind in Tabelle 4 und Tabelle 5 die optischen Wegunterschiede für zwei zueinander orthogonale lineare Polarisationszustände für verschiedene Linsenorientierungen zusammengestellt; und zwar für (111)-Linsen,

WO 02/093209

PCT/EP02/05050

(100)-Linsen und (110)-Linsen, wobei der Azimutwinkel α_1 des äußersten Randstrahl innerhalb der Linsen für eine (111)-Linse 0° und 60° , für eine (100)-Linse 0° und 45° und für eine (110)-Linse 0° , 45° , 90° und 135° beträgt.

Linse	Öffnungswinkel θ [°]	Strahlweg RL_{α_1} [nm]	Optischer Wegunterschied (111)-Linse $\alpha_1 = 0^\circ$ [nm]	Optischer Wegunterschied (111)-Linse $\alpha_1 = 60^\circ$ [nm]	Optischer Wegunterschied (100)-Linse $\alpha_1 = 0^\circ$ [nm]	Optischer Wegunterschied (100)-Linse $\alpha_1 = 45^\circ$ [nm]	Optischer Wegunterschied (110)-Linse $\alpha_1 = 0^\circ$ [nm]	Optischer Wegunterschied (110)-Linse $\alpha_1 = 45^\circ$ [nm]	Optischer Wegunterschied (110)-Linse $\alpha_1 = 90^\circ$ [nm]	Optischer Wegunterschied (110)-Linse $\alpha_1 = 135^\circ$ [nm]
801	1.4	28.1	0.8	-0.8	0.0	0.0	-18.2	-18.2	-18.2	-18.2
802	-10.8	30.7	-5.3	8.0	-2.7	-1.3	-17.2	-17.2	-17.3	-17.2
803	-15.6	32.4	-6.8	12.4	-5.7	-2.7	-15.3	-15.3	-15.4	-15.3
803	-24.4	31.8	-6.5	17.8	-11.7	-5.2	-8.4	-8.8	-9.0	-8.8
802	-19.5	26.6	-5.8	12.4	-6.8	-3.2	-10.2	-10.3	-10.4	-10.3
804	6.4	20.1	3.0	-2.4	-0.6	-0.3	-12.4	-12.4	-12.4	-12.4
805	10.8	34.4	9.0	-6.0	-3.0	-1.5	-19.3	-19.3	-19.3	-19.3
806	0.2	10.0	0.1	-0.1	0.0	0.0	-6.5	-6.5	-6.5	-6.5
807	-11.1	22.0	-3.9	5.9	-2.1	-1.0	-12.2	-12.2	-12.3	-12.2
808	0.1	18.5	0.0	0.0	0.0	0.0	-12.0	-12.0	-12.0	-12.0
809	-0.8	9.0	-0.1	0.2	0.0	0.0	-5.8	-5.8	-5.8	-5.8
810	1.1	12.4	0.3	-0.3	0.0	0.0	-8.0	-8.0	-8.0	-8.0
811	-16.8	9.4	-2.0	3.8	-1.9	-0.9	-4.2	-4.2	-4.2	-4.2
812	-10.4	29.8	-5.0	7.5	-2.4	-1.2	-16.9	-16.9	-16.9	-16.9
813	-8.8	34.7	-5.2	7.3	-2.1	-1.0	-20.5	-20.5	-20.5	-20.5
814	-9.4	17.5	-2.8	4.0	-1.2	-0.6	-10.2	-10.2	-10.2	-10.2
815	-27.4	28.1	-5.3	16.9	-12.2	-5.3	-5.2	-6.4	-6.1	-6.4
816	-28.7	40.2	-7.1	24.8	-18.6	-7.9	-6.2	-8.5	-7.6	-8.5
817	-30.8	39.0	-6.3	24.7	-19.6	-8.1	-3.9	-8.0	-5.7	-8.0
Summe			-48.9	136.1	-90.9	-40.3	-212.9	-220.9	-218.0	-220.9

5

Tabelle 4

WO 02/093209

PCT/EP02/05050

Linse	Öffnungswinkel θ [°]	Strahlweg RL [mm]	Optischer Wegunterschied (111)-Linse $\alpha_i = 0^\circ$ [mm]	Optischer Wegunterschied (110)-Linse $\alpha_i = 60^\circ$ [mm]	Optischer Wegunterschied (100)-Linse $\alpha_i = 0^\circ$ [mm]	Optischer Wegunterschied (100)-Linse $\alpha_i = 45^\circ$ [mm]	Optischer Wegunterschied (110)-Linse $\alpha_i = 0^\circ$ [mm]	Optischer Wegunterschied (110)-Linse $\alpha_i = 45^\circ$ [mm]	Optischer Wegunterschied (110)-Linse $\alpha_i = 90^\circ$ [mm]	Optischer Wegunterschied (110)-Linse $\alpha_i = 135^\circ$ [mm]
801	-11.6	32.1	-5.8	9.0	-3.2	-1.6	-17.6	-17.6	-17.6	-17.6
802	19.5	28.3	13.3	-6.1	-7.3	-3.4	-10.9	-10.9	-11.1	-10.9
803	24.7	33.8	19.1	-6.9	-12.7	-5.7	-8.6	-9.2	-9.3	-9.2
803	17.7	34.3	14.7	-7.4	-7.5	-3.6	-14.6	-14.6	-14.8	-14.6
802	12.7	31.6	9.7	-6.0	-3.8	-1.8	-16.7	-16.7	-16.8	-16.7
804	-5.2	27.7	-2.7	3.3	-0.6	-0.3	-17.4	-17.4	-17.4	-17.4
805	-4.5	34.6	-3.0	3.5	-0.5	-0.3	-21.9	-21.9	-21.9	-21.9
806	-8.6	19.5	-2.9	4.0	-1.1	-0.6	-11.6	-11.6	-11.6	-11.6
807	-0.5	16.5	-0.2	0.2	0.0	0.0	-10.7	-10.7	-10.7	-10.7
808	-8.2	25.6	-3.7	5.0	-1.3	-0.7	-15.3	-15.3	-15.3	-15.3
809	-7.5	10.1	-1.3	1.8	-0.4	-0.2	-6.1	-6.1	-6.1	-6.1
810	-9.1	13.1	-2.0	2.9	-0.8	-0.4	-7.7	-7.7	-7.7	-7.7
811	9.0	9.9	2.1	-1.5	-0.6	-0.3	-5.8	-5.8	-5.8	-5.8
812	2.6	30.7	1.8	-1.6	-0.2	-0.1	-19.8	-19.8	-19.8	-19.8
813	0.9	34.0	0.6	-0.6	0.0	0.0	-22.1	-22.1	-22.1	-22.1
814	1.3	10.4	0.3	-0.3	0.0	0.0	-6.7	-6.7	-6.7	-6.7
815	23.5	16.3	8.9	-3.4	-5.7	-2.6	-4.7	-4.8	-4.9	-4.8
816	24.6	37.2	21.0	-7.6	-13.9	-6.2	-9.6	-10.2	-10.3	-10.2
817	29.4	29.6	18.5	-5.1	-14.1	-5.9	-4.0	-6.2	-5.2	-6.2
Summe			88.3	-16.8	-73.7	-33.5	-231.9	-235.4	-235.2	-235.4

Tabelle 5

- 5 Tabelle 4 und Tabelle 5 ist zu entnehmen, daß die Öffnungswinkel θ für die Linsen L815 bis L817 größer als 25° sind. Auch in diesem Ausführungsbeispiel weisen die der Bildebene am nächsten gelegenen Linsen L815 bis L817 große Öffnungswinkel auf. Durch das Design der Linsen L815 bis L817 wurde erreicht, daß der maximale

Öffnungswinkel kleiner gleich $\arcsin\left(\frac{NA}{n_{FK}}\right) = \arcsin\left(\frac{0.8}{1.5597}\right) = 30.9^\circ$ ist. Der maximale

- 10 Öffnungswinkel für den äußersten Aperturstrahl beträgt 30.8° für die Linse L817.

WO 02/093209

PCT/EP02/05050

Der Durchmesser der Blende, welche sich zwischen den Linsen L811 und L812 befindet, beträgt 193mm. Die Durchmesser der Linsen L815 bis L817 sind alle kleiner als 162mm. Somit sind die Durchmesser dieser Linsen, welche hohe Öffnungswinkel aufweisen, kleiner als 85% des Blendendurchmessers.

5

Tabelle 4 und Tabelle 5 ist zu entnehmen, daß es für Linsen mit großen Öffnungswinkeln günstig ist, diese in (100)-Richtung zu orientieren, da die Doppelbrechungswerte insgesamt niedriger sind als bei (111)-Linsen. Beispielsweise bei den Linsen L815 bis L817 sind die optischen Wegunterschiede um mehr als 20% niedriger als bei (111)-Linsen.

10

Anhand des Ausführungsbeispiels der Figur 8 soll im folgenden gezeigt werden, wie durch den parallelen Einsatz von Gruppen mit gegeneinander verdrehten (100)-Linsen und Gruppen mit gegeneinander verdrehten (111)-Linsen die intrinsische Doppelbrechung weitgehend kompensiert werden kann.

15

Zunächst werden alle Kalzium-Fluorid in (111)-Orientierung ohne gegenseitiges Verdrehen der (111)-Linsen eingebaut. In diesem Fall ergibt sich ein maximaler optischer Wegunterschied für zwei zueinander orthogonale lineare Polarisationszustände von 136nm. Durch Drehen der (111)-Linsen kann der maximale optische Wegunterschied auf ca. 38nm reduziert werden. Dazu werden die Linsen L801 und L804 zu einer Gruppe und die Linsen L802 und L803 zu einer weiteren Gruppe zusammengefaßt, wobei der Drehwinkel zwischen den Linsen jeweils 60° beträgt. Zu je einer Dreier-Gruppe werden die Linsen L808, L809 und L810, sowie die Linsen L815, L816 und L817 zusammengefaßt, wobei der Drehwinkel zwischen je zwei dieser Linsen 40° beträgt. Die Linsen L811, L812, L813 und L814 werden zu einer Vierer-Gruppe zusammengefaßt mit einem gegenseitigen Drehwinkel von 30°.

20

25

30

Werden alle Kalzium-Fluorid-Linsen in (100)-Orientierung ohne gegenseitiges Verdrehen der (100)-Linsen eingebaut, so ergibt sich ein maximaler optischer Wegunterschied für zwei zueinander orthogonale lineare Polarisationszustände von 90,6nm. Durch Drehen der

WO 02/093209

PCT/EP02/05050

(100)-Linsen kann der maximale optische Wegunterschied auf ca. 40nm reduziert werden. Dazu werden die Linsen L801 und L804 zu einer Gruppe und die Linsen L802 und L803 zu einer weiteren Gruppe zusammengefaßt, wobei der Drehwinkel zwischen den Linsen jeweils 45° beträgt. Zu je einer Dreier-Gruppe werden die Linsen L808, L809 und L810, sowie die Linsen L815, L816 und L817 zusammengefaßt, wobei der Drehwinkel zwischen je zwei dieser Linsen 30° beträgt. Die Linsen L811, L812, L813 und L814 werden zu einer Vierer-Gruppe zusammengefaßt mit einem gegenseitigen Drehwinkel von 22.5°.

Einen maximalen optischen Wegunterschied für zwei zueinander orthogonale lineare Polarisationszustände von nur 7nm erhält man, wenn man nun Gruppen mit (100)-Linsen mit Gruppen mit (111)-Linsen kombiniert. Dazu werden die Linsen L801 und L804 zu einer Gruppe von (111)-Linsen zusammengefaßt, wobei der Drehwinkel zwischen den Linsen 60° beträgt. Die Linsen L802 und L803 werden zu einer Gruppe von (100)-Linsen zusammengefaßt, wobei der Drehwinkel zwischen den Linsen 45° beträgt. Zu einer Dreier-Gruppe von (100)-Linsen werden die Linsen L808, L809 und L810 zusammengefaßt, wobei der Drehwinkel zwischen je zwei dieser Linsen 30° beträgt. Zu einer Dreier-Gruppe von (111)-Linsen werden die Linsen L815, L816 und L817 zusammengefaßt, wobei der Drehwinkel zwischen je zwei dieser Linsen 40° beträgt. Die Linsen L811, L812, L813 und L814 werden zu einer Vierer-Gruppe von (100)-Linsen zusammengefaßt mit einem Drehwinkel von 22.5°. Die Linsenachsen der nicht zu einer Gruppe zusammengefaßten Linsen L805 und L807 sind in <111>-Kristallrichtung orientiert, während die Linsenachse der Linse L806 in <100>-Kristallrichtung orientiert ist. Die Gruppen können gegenseitig beliebig um die optische Achse verdreht angeordnet sein. Diese Drehfreiheitsgrade lassen sich zur Kompensation nicht rotationssymmetrischer Aberrationen ausnützen, die beispielsweise durch die Fassung der Linsen erzeugt werden.

Im folgenden wird ein weiteres Verfahren beschrieben, wie die Gruppen mit (100)-, (111)- oder (110)-Linsen bestimmt werden können. Dabei geht man von einem Objektiv mit bekanntem optischen Design aus. Mehrere Linsen dieses Objektivs sind aus doppelbrechendem Fluorid-Kristall, wobei die doppelbrechenden Eigenschaften der Linsen

WO 02/093209

PCT/EP02/05050

- bekannt sind. Beispielsweise lässt sich der Einfluß der intrinsischen Doppelbrechung in Abhängigkeit des Öffnungswinkels und Azimutwinkels eines Strahls theoretisch vorhersagen. Die doppelbrechenden Eigenschaften können aber auch durch Messungen an den Linsen bekannt sein. Da die doppelbrechenden Eigenschaften der Linsen bekannt sind,
- 5 ist der optische Wegunterschied für zwei zueinander orthogonale lineare Polarisationszustände bekannt, den ein Strahl innerhalb des Objektivs erfährt. Dieser optische Wegunterschied dient im folgenden als Optimiergröße, deren absoluten Wert es zu minimieren gilt. Auf ähnliche Weise kann die Optimierung auch für ein ganzes Strahlbüschel von einzelnen Strahlen durchgeführt werden. Mögliche Freiheitsgrade für
- 10 diese Optimierung sind die Drehwinkel der einzelnen Linsen zueinander und die Orientierung der Linsenachsen in Bezug auf die Hauptkristallrichtungen. Gemäß der zuvor beschriebenen Grundsätze ist es günstig, wenn zum einen die Linsenachsen in die Hauptkristallrichtungen weisen und zum anderen die Drehwinkel der Linsen zueinander in Abhängigkeit der Richtung der jeweiligen Linsenachse nur diskrete Werte annehmen.
- 15 Für die Orientierung der Linsenachse stehen drei Freiheitsgrade zur Verfügung. So können die Linsenachsen in (100)-, (111)- oder (110)-Kristallrichtung weisen.

- Linsen, deren Linsenachsen in die gleiche oder eine dazu äquivalente Hauptkristallrichtung
- 20 weisen, werden in einzelne Gruppen zusammengeschlossen, wobei jede Gruppe mindestens zwei Linsen aufweist.

Die diskreten Drehwinkel der Linsen einer Gruppe hängen von der Orientierung der Linsenachsen ab.

- 25 Für eine Gruppe mit n (100)-Linsen ergibt sich folgende Vorgabe für die Drehwinkel:

$$\gamma = \frac{90^\circ}{n} + m \cdot 90^\circ \pm 10^\circ, \text{ wobei } m \text{ eine beliebige ganze Zahl ist.}$$

Umfasst die Gruppe zwei (100)-Linsen, so beträgt der Drehwinkel zwischen diesen beiden Linsen idealerweise 45° , beziehungsweise 135° , 225° ...

Für eine Gruppe mit n (111)-Linsen ergibt sich folgende Vorgabe für die Drehwinkel:

WO 02/093209

PCT/EP02/05050

$$\gamma = \frac{120^\circ}{n} + m \cdot 120^\circ \pm 10^\circ, \text{ wobei } m \text{ eine beliebige ganze Zahl ist.}$$

Für eine Gruppe mit n (110)-Linsen ergibt sich folgende Vorgabe für die Drehwinkel:

$$\gamma = \frac{180^\circ}{n} + m \cdot 180^\circ \pm 10^\circ, \text{ wobei } m \text{ eine beliebige ganze Zahl ist.}$$

- 5 Es stehen somit als Freiheitsgrade diskrete Drehwinkel der Linsen untereinander und diskrete Kristallorientierungen zur Verfügung.
Innerhalb dieses Parameterraums ist nun diejenige Kombination der Drehwinkel und Kristallorientierungen für die einzelnen Linsen zu finden, für welche die Optimierunggröße einen minimalen Wert annimmt, beziehungsweise einen Schwellwert unterschreitet.
- 10 Es gibt für jedes Objektiv eine optimale Lösung, für welche die optischen Wegunterschiede für zwei zueinander orthogonale lineare Polarisationszustände für ein ganzes Strahlbüschel minimale Werte annehmen.
Es ist jedoch äußerst aufwendig, diese optimale Lösung zu bestimmen, insbesondere, wenn das Objektiv eine große Anzahl von Linsen aufweist, wie dies bei dem Objektiv der Figur 7 oder dem Objektiv der Figur 8 der Fall ist.
- 15 Es sind nun Optimierverfahren bekannt, um zwar nicht unbedingt die optimale Lösung, aber doch eine für die praktische Verwendung des Objektivs hinreichend gute Lösung zu finden. Eine in der Literatur bekannte sehr ähnliche mathematische Aufgabenstellung stellt das „Problem des Handlungsreisenden dar“, in dem es gilt, für eine gegebene Landkarte eine möglichst kurze Route durch vorgegebene Städte zu finden.
Bei der Optimierung können folgende Verfahren zum Einsatz kommen, welche unter diesen Bezeichnungen aus der Literatur bekannt sind:
- 25
1. Monte-Carlo-Suche
 2. Simulierte Abkühlung („Simulated Annealing“)
 3. Schwellakzeptanz („Threshold accepting“)
 4. Simulierte Abkühlung mit zwischenzeitlichem Aufheizen
 5. Genetischer Algorithmus

WO 02/093209

PCT/EP02/05050

Zur Kompensation des störenden Einflusses der intrinsischen Doppelbrechung stehen in einem ersten Ausführungsbeispiel vier Freiheitsgrade (FGH) für jede Linse zur Verfügung:

FGH 1: (111)-Linse mit Drehwinkel 0°

5 FGH 2: (111)-Linse mit Drehwinkel 60°

FGH 3: (100)-Linse mit Drehwinkel 0°

FGH 4: (100)-Linse mit Drehwinkel 45°

Die Drehwinkel beziehen sich dabei jeweils auf eine feste Bezugsrichtung in der Objektebene.

10

Für das Projektionsobjektiv 711 der Figur 8 wurden mit Hilfe der Monte-Carlo-Suche und der Vorgabe der vier Freiheitsgrade FGH1 bis FGH4 die optimalen Kristallorientierungen der Linsenachsen und die Drehwinkel β_L der Linsen bezüglich einer festen Bezugsrichtung in der Objektebene bestimmt. Tabelle 6 gibt für die Linsen L801 bis L817 die

15

Kristallrichtungen der Linsenachsen und die Drehwinkel β_L an. Für jede Linse ist auch der optische Wegunterschied für zwei zueinander orthogonale lineare Polarisationszustände für den obersten und untersten äußersten Aperturstrahl angegeben. Der maximale resultierende optische Wegunterschied beträgt 5nm.

WO 02/093209

PCT/EP02/05050

Linse	Orientierung der Linsenachse	Winkel β_L [°]	Optischer Wegunterschied für den obersten äußersten Aperturstrahl [nm]	Optischer Wegunterschied für den untersten äußersten Aperturstrahl [nm]
L801	<100>	45	0.0	-3.1
L802	<111>	60	-13.0	29.7
L803	<100>	0	-15.1	-27.6
L803	<100>	0	-26.0	-19.2
L802	<111>	60	28.3	-14.2
L804	<111>	0	-7.6	9.8
L805	<100>	45	-3.1	-1.0
L806	<100>	0	0.0	-2.1
L807	<111>	60	-7.8	1.0
L808	<100>	45	0.0	-1.1
L809	<100>	0	0.0	-0.7
L810	<100>	0	-0.1	-1.5
L811	<100>	0	-3.9	-1.7
L812	<111>	0	15.4	-5.0
L813	<100>	0	-3.7	-0.2
L814	<100>	0	-2.1	-0.1
L815	<100>	45	-11.4	-6.6
L816	<111>	60	-16.8	49.6
L817	<111>	0	55.7	-12.2
Summe			-5.0	-2.7

Tabelle 6

WO 02/093209

PCT/EP02/05050

- Weitere Freiheitsgrade für die Optimierung erhält man, wenn man die Linsen einzelnen Gruppen zuweist. Dabei weisen die Linsenachsen der Linsen einer Gruppe in die gleiche Hauptkristallrichtung. Innerhalb einer Gruppe sind die Linsen nun derart gegeneinander verdreht angeordnet, dass die Verteilung der optischen Wegunterschiede für zwei
- 5 zueinander orthogonale lineare Polarisationszustände, welche durch eine Gruppe hervorgerufen wird, nahezu rotationssymmetrisch ist. Die Drehwinkel zwischen den einzelnen Gruppen können nun beliebig eingestellt werden, um mit diesen zusätzlichen Freiheitsgraden beispielsweise fertigungsbedingte Zusatzaberrationen zu korrigieren.
- 10 Im Ausführungsbeispiel der Tabelle 6 bilden die Linsen L801 und L814 eine erste Gruppe mit (100)-Linsen, wobei die beiden Linsen gegeneinander um den Drehwinkel 45° verdreht angeordnet sind.
- Die Linsen L802, L804, L807 und L812 bilden eine zweite Gruppe mit (111)-Linsen. Die Linsen L802 und L807 und die Linsen L804 und L812 bilden dabei jeweils eine
- 15 Untergruppe, innerhalb derer die Linsen nicht gegeneinander verdreht angeordnet sind oder höchstens einen Drehwinkel von $\gamma = l \cdot 120^\circ \pm 10^\circ$ aufweisen, wobei l eine ganze Zahl ist. Die beiden Untergruppen sind gegeneinander um den Winkel 60° verdreht angeordnet, so dass der Drehwinkel zwischen zwei Linsen aus verschiedenen Untergruppen $\gamma = 60^\circ + m \cdot 120^\circ \pm 10^\circ$ beträgt, wobei m eine ganze Zahl ist.
- 20 Die Linsen L803, L805 und L815 bilden eine dritte Gruppe mit (100)-Linsen. Die Linse L803 und die Linsen L805 und L815 bilden dabei jeweils eine Untergruppe, innerhalb derer die Linsen nicht gegeneinander verdreht angeordnet sind oder höchstens einen Drehwinkel von $\gamma = l \cdot 90^\circ \pm 10^\circ$ aufweisen, wobei l eine ganze Zahl ist. Die beiden Untergruppen sind gegeneinander um den Winkel 45° verdreht angeordnet, so dass der
- 25 Drehwinkel zwischen zwei Linsen aus verschiedenen Untergruppen $\gamma = 45^\circ + m \cdot 90^\circ \pm 10^\circ$ beträgt, wobei m eine ganze Zahl ist.
- Die Linsen L808, L809 und L811 bilden eine vierte Gruppe mit (100)-Linsen. Die Linse L808 und die Linsen L808 und L809 bilden dabei jeweils eine Untergruppe, innerhalb derer die Linsen nicht gegeneinander verdreht angeordnet sind oder höchstens einen
- 30 Drehwinkel von $\gamma = l \cdot 90^\circ \pm 10^\circ$ aufweisen, wobei l eine ganze Zahl ist. Die beiden

WO 02/093209

PCT/EP02/05050

Untergruppen sind gegeneinander um den Winkel 45° verdreht angeordnet, so dass der Drehwinkel zwischen zwei Linsen aus verschiedenen Untergruppen $\gamma = 45^\circ + m \cdot 90^\circ \pm 10^\circ$ beträgt, wobei m eine ganze Zahl ist.

- Die Linsen L816 und L817 eine fünfte Gruppe mit (111)-Linsen, wobei die beiden Linsen
 5 gegeneinander um den Drehwinkel 60° verdreht angeordnet sind.

In einem zweiten Ausführungsbeispiel stehen acht Freiheitsgrade für jede Linse zur Verfügung:

- FGH 1: (111)-Linse mit Drehwinkel 0°
 10 FGH 2: (111)-Linse mit Drehwinkel 60°
 FGH 3: (100)-Linse mit Drehwinkel 0°
 FGH 4: (100)-Linse mit Drehwinkel 45°
 FGH 5: (110)-Linse mit Drehwinkel 0°
 FGH 6: (110)-Linse mit Drehwinkel 90°
 15 FGH 7: (110)-Linse mit Drehwinkel 45°
 FGH 8: (110)-Linse mit Drehwinkel 135°

- Mit der Zahl der Freiheitsgrade wird das Optimierungsergebnis besser, jedoch steigt auch der Optimier-Aufwand exponentiell an. Weitere Freiheitsgrade ergeben sich durch eine
 20 feinere Abstufung der Drehwinkel.

- Bei der Optimierung können auch Meßdaten zur Spannungsdoppelbrechung, die Oberflächendaten der Linsen oder Spiegel und/oder Materialinhomogenitäten der Linsen berücksichtigt werden. Auf diese Weise werden alle auftretenden Störgrößen erfaßt und es
 25 wird mit Hilfe der Freiheitsgrade derjenige Objektivzustand ermittelt, welcher insgesamt eine gute Abbildungsqualität liefert.

Im folgenden wird das Optimierverfahren in einzelnen Schritten erläutert:

- In einem ersten Schritt wird für ein Objektiv, bei dem die doppelbrechenden Eigenschaften
 30 der Linsen bekannt sind, die Zielfunktion berechnet. Die Zielfunktion gibt ein Maß für den

WO 02/093209

PCT/EP02/05050

- störenden Einfluß der Doppelbrechung an. Als Zielfunktion kann beispielsweise der optische Wegunterschied für zwei zueinander orthogonale lineare Polarisationszustände eines äußersten Aperturstrahls dienen. Möglich ist auch, als Zielfunktion den Maximalwert oder den Mittelwert einer Verteilung von optischen Wegunterschieden eines Strahlbüschels zu definieren. Die Drehwinkel der Linsen, die Kristallorientierungen und die Zielfunktion für diesen Objektivzustand werden abgespeichert.
- 5 Für die Zielfunktion existiert eine Schwelle, bei deren Unterschreitung der störende Einflusses der Doppelbrechung tolerierbar ist.
- In einem zweiten Schritt wird geprüft, ob die Zielfunktion die Schwelle unterschreitet.
- 10 Wird die Schwelle unterschritten, bricht das Verfahren ab. Wird die Schwelle nicht unterschritten folgt der dritte Schritt.
- Im dritten Schritt werden nun gemäß den vorgegebenen Freiheitsgraden die Drehwinkel der Linsen untereinander und die Kristallorientierungen innerhalb des Objektivs verändert, wobei eines der zuvor beschriebenen Verfahren, beispielsweise das Monte-Carlo-
- 15 Verfahren zum Einsatz kommt.
- Nach dem dritten Schritt beginnt das Verfahren wieder beim ersten Schritt, wobei die Anzahl der durchlaufenen Schleifen bestimmt wird. Überschreitet die Anzahl der durchlaufenen Schleifen eine maximale Anzahl, so bricht das Verfahren ebenfalls ab.
- 20 Das Verfahren bricht also ab, wenn eine bestimmte Schwelle unterschritten wird, oder eine vorgegebene Schleifenzahl überschritten wird. Wird die maximale Schleifenzahl überschritten, so kann beispielsweise als Resultat eine Rangliste entstehen, in der die einzelnen Objektivzustände mit der zugehörigen Zielfunktion angegeben werden.
- 25 Anhand des refraktiven Objektivs 611 soll im folgenden gezeigt werden, wie durch Belegung eines optischen Elements mit einer Kompensations-Beschichtung 613 der störende Einfluß von Doppelbrechungseffekten deutlich reduziert werden kann. Es sollen hierzu nur die Doppelbrechungs-Beiträge der beiden Linsen L629 und L630 betrachtet werden, die aus Kalzium-Fluorid bestehen und damit intrinsische Doppelbrechung zeigen.
- 30 Die beiden Linsen haben in diesem Ausführungsbeispiel eine (111)-Orientierung und sind

WO 02/093209

PCT/EP02/05050

um 60° gegeneinander verdreht. Damit erreicht man eine nahezu rotationssymmetrische Verteilung der optischen Wegunterschiede ΔOPL . Für einen äußersten Aperturstrahl beträgt der maximale optische Wegunterschied ΔOPL zwischen 13.6nm und 14.6 nm, je nach Azimutwinkel α_R . Nun wird auf der der Bildebene O' zugewandten optischen Fläche der Linse L630 die in Tabelle 7 beschriebene Kompensations-Beschichtung 613
5 aufgebracht. Die Kompensations-Beschichtung 613 besteht aus 15 einzelnen Schichten aus den Materialien Magnesium-Fluorid (MgF_2) und Lanthan-Fluorid (LaF_3). n und k in Tabelle 7 geben Real- und Imaginärteil des Brechungsindex an. Die Schichtdicken sind homogen und weisen keinen lateralen Dickenverlauf auf. Die Aufdampfwinkel während
10 der Beschichtung stehen senkrecht zur optischen Fläche der Linse L630. Mit der Kompensations-Beschichtung beträgt der resultierende optische Wegunterschied 1.1 nm für die beiden Linsen L629 und L630 und ist somit deutlich reduziert im Vergleich zu einem Objektiv ohne Kompensations-Beschichtung.

WO 02/093209

PCT/EP02/05050

Schicht	Dicke [nm]	Material
	Substrat	CaF2
1	103.54	MgF2
2	41.54	LaF3
3	33.35	MgF2
4	30.8	LaF3
5	39.53	MgF2
6	35.34	LaF3
7	32.05	MgF2
8	27.25	LaF3
9	28.57	MgF2
10	26.48	LaF3
11	27.64	MgF2
12	26.17	LaF3
13	27.36	MgF2
14	26.11	LaF3
15	8.66	MgF2

Optische Konstanten	n	k
LaF3	1.760026	0.00118471
MgF2	1.506675	0.00305275

Tabelle 7

5

Eine analoge Vorgehensweise ist auch möglich, wenn statt der beiden letzten Linsen das gesamte Objektiv betrachtet wird. Anstatt die Doppelbrechung mit nur einem optischen Element mit einer Kompensations-Beschichtung zu kompensieren kann man auch mehrere optische Elemente mit Kompensations-Beschichtungen belegen.

WO 02/093209

PCT/EP02/05050

Das Verfahren kann auch angewendet werden, um Doppelbrechung in einem Gesamtsystem zu kompensieren, wobei die Ursachen dieser Doppelbrechung Spannungsdoppelbrechung, intrinsische Doppelbrechung und Doppelbrechung durch die übrigen Schichten sein können.

- 5
- Nach der Endjustage eines Systems wird die Verteilung der optischen Wegunterschiede AOPL für ein oder mehrere Strahlenbündel in der Bildebene bestimmt. Mittels eines Programms zur Optimierung von Schichten wird dann die notwendige
- 10 Kompensationsschicht berechnet und zum Beispiel auf der der Bildebene am nächsten gelegenen Systemfläche aufgebracht. Es ist günstig, wenn das der Bildebene am nächsten gelegene optische Element austauschbar ist. So lassen sich auch Doppelbrechungs-Effekte, die erst mit dem Betrieb des Objektivs entstehen, korrigieren.
- 15 Um Doppelbrechung von Kristallen im UV zu kompensieren, kann man, wie oben beschrieben, Kristall-Elemente mit verschiedenen Orientierungen der Kristallachsen hintereinander anordnen. Wenn man in einem optischen System Linsen mit verschiedenen Kristallrichtungen hintereinander anordnet, hat man das Problem, daß vielfach Linsen mit verschiedenen Winkeln durchstrahlt werden, die Kompensation dann möglicherweise nur
- 20 eingeschränkt möglich ist. Bei Optiken, die nur eine Kristalllinse enthalten, ist diese Art der Kompensation überhaupt nicht möglich.
- Ein Lösungsmöglichkeit ist es, eine Linse konstruktiv in zwei aufzuspalten, die verdreht gegeneinander anzusprengen sind. Praktisch leidet dieses Verfahren an Spannungen, die die Linse verformen und daran, daß die beiden Hälften lateral mit einer Genauigkeit von
- 25 Mikrometern positioniert werden müssen.
- Vorgeschlagen wird, Blanks aus aneinander angesprengten, hinsichtlich der Orientierung der Kristallachsen gegeneinander verdrehten Einzelplatten herzustellen, die dann zu einer Linse gefräst und poliert werden. Alles obengesagte über die Orientierung gilt auch hierfür. Außer dem klassischen Ansprengen (wringing) der Optik-Fertigung sind auch alle anderen
- 30 Füge-Techniken mit innigem Kontakt und geringstmöglichem Spannungseintrag möglich

WO 02/093209

PCT/EP02/05050

und von der Erfindung umfaßt. Das Ansprengen kann insbesondere durch Schichten, z. B. aus Quarzglas, unterstützt werden. Wichtig ist, daß an der Fügestelle keine Brechung oder Reflexion auftritt, die störend wäre.

- 5 Die Auswahl der Orientierungen erfolgt nach den oben beschriebenen Regeln.

Als Ausführungsbeispiele werden Blanks angegeben, aus denen sich beispielsweise die Linse L816 für das Projektionsobjektiv der Figur 8 fertigen läßt. Die Linse L816 weist eine konvexe asphärische Vorderfläche mit dem Scheitelradius 342.13mm und eine konkave sphärische Rückfläche mit dem Scheitelradius 449.26mm auf. Die axiale Dicke beträgt 37.3mm. Das Linsenmaterial ist Kalzium-Fluorid. Der Linsendurchmesser beträgt 141mm. Das Blank, aus dem die Linse herausgearbeitet werden soll, benötigt mindestens eine Gesamtdicke von 45mm und einen Durchmesser von 150mm. Das Blank kann dabei aus zwei gegeneinander um 45° gedrehten (100)-Platten der Dicke 9.0mm und zwei gegeneinander um 60° gedrehten (111)-Platten der Dicke 13.5mm bestehen, die optisch nahtlos gefügt sind. Die (100)-Platten und die (111)-Platten sollten dabei jeweils benachbart angeordnet sein.

20 In einer weiteren Ausführungsform werden sechs jeweils gegeneinander um 45° gedrehte (100)-Platten der Dicke 3.0mm und sechs jeweils gegeneinander um 60° gedrehte (111)-Platten der Dicke 4.5 optisch nahtlos gefügt, wobei jeweils nach zwei (100)-Platten zwei (111)-Platten folgen.

25 In einer weiteren Ausführungsform werden vier jeweils gegeneinander um 45° gedrehte (110)-Platten der Dicke 9.0mm und zwei gegeneinander um 45° gedrehte (100)-Platten der Dicke 4.5 optisch nahtlos gefügt, wobei die zwei (100)-Platten auf die vier (110)-Platten folgen.

30 In einer weiteren Ausführungsform werden acht jeweils gegeneinander um 45° gedrehte (110)-Platten der Dicke 4.5mm und vier gegeneinander um 45° gedrehte (100)-Platten der

WO 02/093209

PCT/EP02/05050

Dicke 2.25 optisch nahtlos gefügt, wobei nach vier (110)-Platten jeweils zwei (100)-Platten folgen.

- Um die Drehwinkel zwischen den Linsen oder den Linsenteile gezielt einstellen zu können, werden im folgenden Verfahren beschrieben, mit denen an den Linsen oder Linsenteilen oder deren Haltefassungen entsprechende Markierungen angebracht werden können. Als Ausführungsbeispiel wird die Herstellung von Kalzium-Fluorid-Linsen beschrieben, deren Linsenachsen in $\langle 111 \rangle$ -Kristallrichtung weisen. Die Herstellverfahren lassen sich aber auch auf die Herstellung von Linsen aus anderen Kristallmaterialien mit kubischer Kristallstruktur wie Barium-Fluorid oder Strontium-Fluorid übertragen. Des weiteren können die Linsenachsen auch in die $\langle 100 \rangle$ - oder die $\langle 110 \rangle$ -Kristallrichtung weisen. Das Verfahren ist zur Herstellung sowohl von planparallelen als auch von gekrümmten Linsen oder Linsenteilen geeignet.
- 15 In einem ersten Schritt wird die Orientierung der $\langle 111 \rangle$ -Kristallrichtung eines optischen Rohlings, in diesem Fall einer Kalzium-Fluorid-Scheibe bestimmt. Dies kann beispielsweise mit hoher Genauigkeit durch kristallographische Methoden, wie beispielsweise durch Ermittlung von Spaltflächen oder Erzeugung von Ätzgrübchen geschehen. Eine Verbesserung dieser Richtungsbestimmung erreicht man mit
- 20 röntgendiffraktometrischen Methoden. Ein dafür geeignetes Gerät ist eine Goniometeranordnung unter Einsatz von monochromatischer Röntgenstrahlung. Mit Hilfe aus der Literatur bekannter Tabellenwerte wird das Auftreten eines Bragg-Reflexes für die $\{111\}$ -Kristallebenen bestimmt. Die Tabellenwerte geben dabei in Abhängigkeit der Reflex-Indizierung die erforderlichen Inzidenzwinkel an. Bei der Messung dreht man die
- 25 Kalzium-Fluorid-Scheibe um eine Achse, welche senkrecht auf der Kalzium-Fluorid-Scheibe steht. Damit erhält man für verschiedene Drehwinkel die Abweichung der $\langle 111 \rangle$ -Kristallrichtung von der Flächennormalen der Kalzium-Fluorid-Scheibe. Es ist günstig, bei mindestens zwei Drehstellungen die Abweichung zu bestimmen. In diesem Ausführungsbeispiel werden die Messungen bei 0° und 90° durchgeführt. Um die

WO 02/093209

PCT/EP02/05050

Messgenauigkeit zu erhöhen können die Messungen zusätzlich noch bei 180° und 270° durchgeführt werden.

- In einem zweiten Schritt wird die Kalzium-Fluorid-Scheibe derart bearbeitet, dass die
- 5 Flächennormale der Kalzium-Fluorid-Scheibe parallel zur Richtung der $\langle 111 \rangle$ -Kristallrichtung ist. Die gemessene Abweichung dient dabei als Grundlage für eine gezielte Korrektur, d.h. ein definiertes Bearbeiten der Kalzium-Fluorid-Scheibe durch Sägen oder Schleifen. Nach diesem Bearbeitungsschritt weist die Flächennormalen der Kalzium-Fluorid-Scheibe in die $\langle 111 \rangle$ -Kristallrichtung mit einer Abweichung kleiner 5°.
- 10
- In einem dritten Schritt wird an der Kalzium-Fluorid-Scheibe eine Bezugsrichtung bestimmt. Weist die Flächennormale der Kalzium-Fluorid-Scheibe in die $\langle 111 \rangle$ -Kristallrichtung, ist es günstig, eine der drei Kristallrichtungen $\langle 110 \rangle$, $\langle 011 \rangle$ und $\langle 101 \rangle$, beziehungsweise $\langle 100 \rangle$, $\langle 010 \rangle$ und $\langle 001 \rangle$ zu kennen, die in dreiwelliger Symmetrie um
- 15 die $\langle 111 \rangle$ -Kristallrichtung gruppiert sind. Dies ist deshalb interessant, da ein Lichtstrahl einen maximalen optischen Wegunterschied für zwei zueinander orthogonale lineare Polarisationszustände auf Grund intrinsischer Doppelbrechung erfährt, wenn er in einer Kalzium-Fluorid-Linse in $\langle 110 \rangle$ -Kristallrichtung oder einer dazu äquivalenten Kristallrichtung verläuft. Verläuft der Lichtstrahl in $\langle 100 \rangle$ -Kristallrichtung oder einer dazu
- 20 äquivalenten Kristallrichtung, erfährt er keinen optischen Wegunterschied. Die drei Kristallrichtungen $\langle 110 \rangle$, $\langle 011 \rangle$ und $\langle 101 \rangle$ schließen dabei jeweils einen Winkel von 35°, die drei Kristallrichtungen $\langle 100 \rangle$, $\langle 010 \rangle$ und $\langle 001 \rangle$ einen Winkel von 55° mit der $\langle 111 \rangle$ -Kristallrichtung ein. Aus physikalischen Gründen sind Röntgenreflexe von (110)- oder (100)-Kristallebenen nicht meßbar. Daher muß man Bragg-Reflexe von anderen
- 25 Kristallebenen zu Hilfe nehmen, die in definierter Beziehung zu den (100)- beziehungsweise (110)-Kristallebenen stehen. Beispielsweise kann ein (331)-Bragg-Reflex verwendet werden. Die drei Kristallrichtungen $\langle 331 \rangle$, $\langle 133 \rangle$ und $\langle 313 \rangle$ schließen dabei jeweils einen Winkel von 22° mit der $\langle 111 \rangle$ -Kristallrichtung ein. Der (331)-Bragg-Reflex erscheint für monochromatische Kupfer $K\alpha$ -Strahlung (8048 eV) bei Kalzium-Fluorid
- 30 unter 38°. Damit ergibt sich ein Einfallswinkel von 16° und ein Detektorwinkel von 60°

WO 02/093209

PCT/EP02/05050

- relativ zur Bezugsebene, die durch die Oberfläche der Kalzium-Fluorid-Scheibe definiert ist. Wenn die Scheibe um 360° um die Flächennormale gedreht wird, sind bei drei Drehwinkeln Bragg-Reflexe messbar. Diese zeigen an, daß einer der Richtungsvektoren der drei relevanten (331)-Kristallebenen in der Einfallsebene der Bragg-Messung liegt. Die
- 5 Projektionen dieser drei (331)-Kristallrichtungen auf die Scheibenoberfläche sind parallel zu den Projektionen der drei Kristallrichtungen $\langle 110 \rangle$, $\langle 011 \rangle$ und $\langle 101 \rangle$. Wenn man die Richtungen der Projektionen der Kristallrichtungen $\langle 331 \rangle$, $\langle 133 \rangle$ und $\langle 313 \rangle$ bestimmt, bestimmt man also gleichzeitig auch die Richtungen der Projektionen der Kristallrichtungen $\langle 110 \rangle$, $\langle 011 \rangle$ und $\langle 101 \rangle$. Bei einer möglichen Abweichung der
- 10 Oberflächennormalen von der $\langle 111 \rangle$ -Kristallrichtung müssen Quelle und Detektor entsprechend nachgeführt werden.

- Alternativ können die Kristallorientierungen auch durch ein Laue-Bild bestimmt werden. Im Gegensatz zu den zuvor beschriebenen Messungen der Bragg-Reflexe mit
- 15 monochromatischer Röntgenstrahlung, wird beim Laue-Verfahren mit „weißem“, also breitbandigem Röntgenlicht gearbeitet. Für weißes Röntgenlicht erhält man Bragg-Reflexe von verschiedenen Kristallebenenscharen, so daß ein für das Material charakteristisches Laue-Bild entsteht. Wenn die $\langle 111 \rangle$ -Kristallrichtung parallel zur Einstrahlrichtung ist, wird ein Laue-Bild mit dreizähliger Symmetrie erzeugt. Wenn die $\langle 111 \rangle$ -Kristallrichtung
- 20 um einige Grad von der Scheibennormalen abweicht, ist das Resultat ein leicht verzerrtes Bild. Die exakte Analyse des Laue-Bildes, beispielsweise mit einer geeigneten Software, kann dann dazu dienen, die Abweichung der $\langle 111 \rangle$ -Kristallrichtung von der Scheibennormalen zu bestimmen. Die Auswertung des Bildes erlaubt ferner die Bestimmung der dreizähligen Kristallrichtungen $\langle 110 \rangle$, $\langle 011 \rangle$ und $\langle 101 \rangle$,
- 25 beziehungsweise $\langle 100 \rangle$, $\langle 010 \rangle$ und $\langle 001 \rangle$ und damit die Orientierung der Scheibe.

- In einem vierten Schritt wird an der Kalzium-Fluorid-Scheibe mindestens eine Markierung angebracht, welche die Richtung einer der projizierten Kristallrichtungen $\langle 110 \rangle$, $\langle 011 \rangle$ und $\langle 101 \rangle$, beziehungsweise $\langle 100 \rangle$, $\langle 010 \rangle$ und $\langle 001 \rangle$ angibt. Die Markierung kann
- 30 beispielsweise mittels Gravur, Ätzung oder Beschriftung erfolgen. Zur Markierung bietet

WO 02/093209

PCT/EP02/05050

sich der Zylinderrand der Kalzium-Fluorid-Scheibe an. Alternativ kann die Markierung auch an einer Fassung angebracht sein, mit der die Kalzium-Fluorid-Scheibe fest verbunden ist.

- 5 In einem fünften Schritt wird eine Linse aus der Kalzium-Fluorid-Scheibe so gefertigt, daß die Linsenachse parallel zur $\langle 111 \rangle$ -Kristallrichtung ist. Dabei wird die zuvor angebrachte Markierung bei der Bearbeitung der Kalzium-Fluorid-Scheibe nicht zerstört. Das ist möglich, da viele Bearbeitungsschritte wie Schleifen oder Polieren nur die Ober- und Unterseite der Linse betreffen, jedoch nicht den Zylinderrand. Wenn aber auch der Rand
- 10 der Kalzium-Fluorid-Scheibe bearbeitet, beispielsweise gedreht wird, ist es notwendig, mit hinreichender Genauigkeit die Markierung auf die Halterung der Kalzium-Fluorid-Scheibe zu übertragen und die Markierung nach erfolgter Bearbeitung wieder auf dem Zylinderrand anzubringen.
- 15 In einem weiteren Ausführungsbeispiel wird eine Linse aus einer Kalzium-Fluorid-Scheibe hergestellt, deren Linsenachse bereits in $\langle 111 \rangle$ -Kristallrichtung weist. Die Markierung wird dabei nach der Herstellung der Linse aufgebracht.

In einem ersten Schritt wird die Linse aus der Kalzium-Fluorid-Scheibe derart gefertigt,

20 dass die Linsenachse in $\langle 111 \rangle$ -Kristallrichtung weist.

In einem zweiten Schritt wird die Bezugsrichtung bestimmt. Dabei werden die gleichen Verfahren angewandt, wie dies zuvor für die Kalzium-Fluorid-Scheibe beschrieben wurde. Dabei muß jedoch beachtet werden, daß der Auftreffpunkt des Röntgenstrahls auf die

25 Linsenoberfläche in der Höhe exakt eingestellt wird. Die Auflagefläche der Linse ist deshalb in der Höhe justierbar. Damit läßt sich das gekrümmte Profil der Linse abfahren, wenn man verschiedene Punkte auf der gekrümmten Linsenoberfläche vermisst. Außerdem ist zu beachten, daß durch die Krümmung eine Abschattung von einfallendem oder ausgehenden Strahl stattfinden kann. Durch Auswahl eines geeigneten Bragg-Reflexes und

30 einer daraus folgenden Meß-Geometrie können Abschattungen vermieden werden.

WO 02/093209

PCT/EP02/05050

Bei planparallelen Platten kann das beschriebene Verfahren auf Basis eines Goniometeraufbaus an jedem Punkt der Oberfläche angewandt werden.

- 5 Bei der Bearbeitung der optischen Rohlinge und der Linsen ist zu beachten, daß die Bestrahlung von Kalzium-Fluorid mit Röntgenstrahlung Farbzentren erzeugen kann. Die Eindringtiefe von Cu-K α -Strahlung liegt bei Kalzium-Fluorid bei ca. 30 μm . Um die Existenz von Farbzentren zu vermeiden, ist es vorteilhaft, die Röntgenanalyse nur an Kalzium-Fluorid-Rohlingen oder Linsen durchzuführen, bei denen später ein
- 10 entsprechender Materialabtrag erfolgt. Bei der Bestrahlung mit Cu-K α -Strahlung bedeutet das ein Abtrag von ca. 30 μm .

- Anhand von Figur 9 wird der prinzipielle Aufbau einer Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage beschrieben. Die Projektionsbelichtungsanlage 81 weist eine
- 15 Beleuchtungseinrichtung 83 und Projektionsobjektiv 85 auf. Das Projektionsobjektiv 85 umfaßt eine Linsenanordnung 819 mit einer Aperturblende AP, wobei durch die Linsenanordnung 89 eine optische Achse 87 definiert wird. Ausführungsbeispiele für die Linsenanordnung 89 sind in Figur 7 und Figur 8 gegeben. Zwischen der
- 20 Beleuchtungseinrichtung 83 und dem Projektionsobjektiv 85 ist eine Maske 89 angeordnet, die mittels eines Maskenhalters 811 im Strahlengang gehalten wird. Solche in der Mikrolithographie verwendeten Masken 89 weisen eine Mikrometer-Nanometer Struktur auf, die mittels des Projektionsobjektives 85 beispielsweise um den Faktor 4 oder 5
- 25 verkleinert auf eine Bildebene 813 abgebildet wird. In der Bildebene 813 wird ein durch einen Substrathalter 817 positioniertes lichtempfindliches Substrat 815, beziehungsweise ein Wafer, gehalten.

- Die noch auflösbaren minimalen Strukturen hängen von der Wellenlänge λ des für die Beleuchtung verwendeten Lichtes sowie von der bildseitigen numerischen Apertur des Projektionsobjektives 85 ab, wobei die maximal erreichbare Auflösung der
- 30 Projektionsbelichtungsanlage 81 mit abnehmender Wellenlänge λ der

WO 02/093209

PCT/EP02/05050

Beleuchtungseinrichtung 83 und mit zunehmender bildseitiger numerischer Apertur des Projektionsobjektives 85 steigt. Mit den in Figur 7 und Figur 8 gezeigten Ausführungsbeispielen lassen sich Auflösungen kleiner 150nm realisieren. Deshalb müssen auch Effekte wie die intrinsische Doppelbrechung minimiert werden. Durch die

5 Erfindung ist es gelungen, den störenden Einfluß der intrinsischen Doppelbrechung gerade bei Projektionsobjektiven mit großen bildseitigen numerischen Aperturen stark zu reduzieren.

WO 02/093209

PCT/EP02/05050

M1587a

TABELLE 1

LINSEN	RADIEN	DICKEN	GLÄSER	BRECHZAHL BEI 157,629nm	1/2 FREIER DURCHMESSER	
5	0	0.000000000	27.171475840	N2	1.00031429	46.200
		0.000000000	0.602670797	N2	1.00031429	52.673
L601	900.198243311AS	15.151284556	CaF2	1.55929035	1.55929035	53.454
	-235.121108435	9.531971079	N2	1.00031429	1.00031429	54.049
10	L602	-167.185917779	8.294716452	CaF2	1.55929035	54.178
	-132.673519510	14.020355779	N2	1.00031429	1.00031429	54.901
L603	-333.194588652	9.893809820	CaF2	1.55929035	1.55929035	53.988
	-155.450515203	15.930502944	N2	1.00031429	1.00031429	54.132
L604	-73.572316296	7.641977580	CaF2	1.55929035	1.55929035	53.748
	-68.248613899AS	2.881720302	N2	1.00031429	1.00031429	55.167
15	L605	-86.99358564AS	5.094651720	CaF2	1.55929035	52.580
	-238.150965327	5.379130760	N2	1.00031429	1.00031429	53.729
L606	-165.613920870	5.094651720	CaF2	1.55929035	1.55929035	53.730
	153.417884485	34.150169591	N2	1.00031429	1.00031429	56.762
L607	-92.061009990	5.094651720	CaF2	1.55929035	1.55929035	54.061
20	L608	8491.086261873AS	19.673523795	N2	1.00031429	78.689
	-407.131300451	30.380807138	CaF2	1.55929035	1.55929035	87.291
L609	-140.620317156	0.761662684	N2	1.00031429	1.00031429	91.858
	-651.804853654AS	50.269660218	CaF2	1.55929035	1.55929035	117.436
25	L610	-192.137373609	1.689166211	N2	1.00031429	121.408
	-367.718684892	21.227715500	CaF2	1.55929035	1.55929035	127.704
L611	-233.628547894	2.224071019	N2	1.00031429	1.00031429	129.305
	709.585855080	28.736922725	CaF2	1.55929035	1.55929035	137.016
30	L612	1238.859445357	9.120684720	N2	1.00031429	137.428
	1205.457053945	49.281218258	CaF2	1.55929035	1.55929035	138.288
L613	-285.321880705	1.625271224	N2	1.00031429	1.00031429	138.379
	137.549591710	56.718543740	CaF2	1.55929035	1.55929035	139.652
L614	-4380.301012978AS	0.623523902	N2	1.00031429	1.00031429	106.138
	2663.880214408	6.792868960	CaF2	1.55929035	1.55929035	103.602
35	L615	149.184979730	15.779049257	N2	1.00031429	84.589
	281.093180864	6.792868960	CaF2	1.55929035	1.55929035	83.373
L616	184.030288413	32.341552355	N2	1.00031429	1.00031429	77.968
	-222.157418308	5.094651720	CaF2	1.55929035	1.55929035	77.463
40	L617	101.254238115AS	56.792834221	N2	1.00031429	71.826
	-106.980638018	5.094651720	CaF2	1.55929035	1.55929035	72.237
L618	1612.305471130	20.581065398	N2	1.00031429	1.00031429	89.760
	-415.596135628	26.398111993	CaF2	1.55929035	1.55929035	96.803
L619	-204.680044631	0.713343960	N2	1.00031429	1.00031429	103.409
	-646.696622394	25.867340760	CaF2	1.55929035	1.55929035	116.636
45	L620	-231.917625896	0.766268682	N2	1.00031429	118.569
	-790.657807677	23.400482872	CaF2	1.55929035	1.55929035	128.806
L621	-294.872053725	0.721402031	N2	1.00031429	1.00031429	130.074
	786.628567756	40.932308205	CaF2	1.55929035	1.55929035	141.705
50	L622	-431.247283013	12.736629300	N2	1.00031429	142.089
	0.000000000	-8.491086200	N2	1.00031429	1.00031429	134.586
L623	295.022653593AS	20.185109438	CaF2	1.55929035	1.55929035	139.341
	449.912291916	0.619840485	N2	1.00031429	1.00031429	137.916
L624	358.934076212	48.562890509	CaF2	1.55929035	1.55929035	136.936
	-622.862988878	30.955714157	N2	1.00031429	1.00031429	135.288
55	L625	-224.404897553	12.736629300	CaF2	1.55929035	134.760
	-251.154571510AS	16.079850229	N2	1.00031429	1.00031429	134.853
L626	-193.582989843AS	16.510083506	CaF2	1.55929035	1.55929035	134.101
	-198.077570749	0.880353872	N2	1.00031429	1.00031429	136.109
L627	206.241795157	19.927993542	CaF2	1.55929035	1.55929035	101.240
	338.140581566	0.925956949	N2	1.00031429	1.00031429	97.594
60	L628	111.017549581	24.580089962	CaF2	1.55929035	85.023
	169.576109939	0.777849447	N2	1.00031429	1.00031429	81.164
L629	137.982165264	31.161065630	CaF2	1.55929035	1.55929035	75.464
	921.218058213AS	6.934980174	N2	1.00031429	1.00031429	69.501
65	L630	0.000000000	22.260797322	CaF2	1.55929035	63.637
	0.000000000	4.248543100	N2	1.00031429	1.00031429	48.606
L630	0.000000000	21.227715500	CaF2	1.55929035	1.55929035	41.032

WO 02/093209

PCT/EP02/05050

0.000000000 8.491085200 NZ 1.00031429 26.698
 0.000000000 0.000000000 1.00000000 11.550
 Wellenlänge und Brechzahl sind gegenüber Vakuum angegeben.

5
 ASPHAERISCHE KONSTANTEN

10
 Asphäre der Linse L601

15
 K 0.0000
 C1 1.28594437e-007
 C2 8.50731836e-013
 C3 1.16375620e-016
 C4 2.28674275e-019
 C5 -1.23202729e-022
 C6 3.32056239e-026
 C7 -4.28323389e-030
 C8 0.00000000e+000
 C9 0.00000000e+000

20
 Asphäre der Linse L604

25
 K -1.3312
 C1 -4.03355456e-007
 C2 2.25776586e-011
 C3 -2.19259878e-014
 C4 4.32573397e-018
 C5 -7.92477159e-022
 C6 7.57618874e-026
 C7 -7.14982797e-030
 C8 0.00000000e+000
 C9 0.00000000e+000

35
 Asphäre der Linse L605

40
 K -1.1417
 C1 1.33637337e-007
 C2 1.56787758e-011
 C3 -1.64362484e-014
 C4 3.89793786e-018
 C5 -5.11312568e-022
 C6 1.70636633e-026
 C7 1.82384731e-030
 C8 0.00000000e+000
 C9 0.00000000e+000

50

WO 02/093209

PCT/EP02/05050

Asphäre der Linse L607

	K	0.0000
5	C1	1.34745120e-007
	C2	-2.19807543e-011
	C3	1.20275881e-015
	C4	4.39597377e-020
	C5	-2.37132819e-023
	C6	2.87510933e-027
10	C7	-1.42065102e-031
	C8	0.00000000e+000
	C9	0.00000000e+000

Asphäre der Linse L609

15	K	0.0000
	C1	6.85760526e-009
	C2	-4.84524868e-013
	C3	-6.28751350e-018
	C4	-3.72607209e-022
20	C5	3.25276841e-026
	C6	-4.0550974e-033
	C7	-3.98843079e-035
	C8	0.00000000e+000
25	C9	0.00000000e+000

Asphäre der Linse L613

30	K	0.0000
	C1	2.24737416e-008
	C2	-4.45043770e-013
	C3	-4.10272049e-017
	C4	4.31632628e-021
35	C5	-3.27538237e-025
	C6	1.44053025e-029
	C7	-2.76858490e-034
	C8	0.00000000e+000
	C9	0.00000000e+000

Asphäre der Linse L616

40	K	0.0000
	C1	-2.83553693e-008
45	C2	-1.12122261e-011
	C3	-2.05192812e-016
	C4	-1.55525080e-020
	C5	-4.77093112e-024
	C6	8.39331135e-028
50	C7	-8.97313681e-032
	C8	0.00000000e+000
	C9	0.00000000e+000

55

WO 02/093209

PCT/EP02/05050

Asphäre der Linse L622

	K	0.0421
	C1	7.07310826e-010
5	C2	-2.00157185e-014
	C3	-9.33825109e-020
	C4	1.27125854e-024
	C5	1.94008709e-027
10	C6	-6.11988858e-032
	C7	2.92367322e-036
	C8	0.0000000e+000
	C9	0.0000000e+000

15 Asphäre der Linse L624

	K	0.0000
	C1	3.02835805e-010
	C2	-2.40484062e-014
20	C3	-3.22339189e-019
	C4	1.64516979e-022
	C5	-8.51268614e-027
	C6	2.09276792e-031
	C7	-4.74605669e-036
25	C8	0.0000000e+000
	C9	0.0000000e+000

Asphäre der Linse L625

	K	0.0000
	C1	-3.99248993e-010
	C2	5.79276552e-014
	C3	3.53341478e-018
35	C4	-4.57872308e-023
	C5	-6.29695208e-027
	C6	1.57844931e-031
	C7	-2.19266130e-036
	C8	0.0000000e+000
40	C9	0.0000000e+000

Asphäre der Linse L628

	K	0.0000
	C1	4.40737732e-008
	C2	1.52385268e-012
	C3	-5.44510329e-016
	C4	6.32549789e-020
50	C5	-4.58358203e-024
	C6	1.92230388e-028
	C7	-3.11311258e-033
	C8	0.0000000e+000
55	C9	0.0000000e+000

WO 02/093209

PCT/EP02/05050

TABELLE 3

L61							
5	LINSEN	RADIIEN	DICKEN	GLÄSER	BRECHZAHL BEI 157.13 nm	1/2 FREYER DURCHMESSER	
	0	0.000000000	34.000000000		1.000000000		82.150
	L801	0.000000000	0.100000000		1.000000000		87.654
		276.724757380	40.000000000	CaF2	1.559709990		90.112
10		1413.944109416AS	95.000000000		1.000000000		89.442
	SE1	0.000000000	11.000000000		1.000000000		90.034
		0.000000000	433.227005445		1.000000000		90.104
	L802	-195.924336384	17.295305525	CaF2	1.559709990		92.746
		-467.658808527	40.841112468		1.000000000		98.732
15	L803	-241.385736441	15.977235467	CaF2	1.559709990		105.512
		-857.211727400AS	21.649331094		1.000000000		118.786
	SP2	0.000000000	0.000010000		1.000000000		139.325
		253.074839896	21.649331094		1.000000000		119.350
20	L802'	857.211727400AS	15.977235467	CaF2	1.559709990		118.986
		241.385736441	40.841112468		1.000000000		108.546
	L802'	467.658808527	17.295305525	CaF2	1.559709990		102.615
		195.924336384	419.981357165		1.000000000		95.689
	SP3	0.000000000	6.255658280		1.000000000		76.370
		0.000000000	42.609135219		1.000000000		76.064
25	Z1	0.000000000	67.449547115		1.000000000		73.981
	L804	432.544479547	37.784311058	CaF2	1.559709990		90.274
		-522.188532471	113.756133662		1.000000000		92.507
	L805	-263.167605725	33.768525968	CaF2	1.559709990		100.053
		-291.940616829AS	14.336591424		1.000000000		106.516
30	L806	589.642961222AS	20.449887046	CaF2	1.559709990		110.482
		-5539.698828792	443.944079795		1.000000000		110.523
	L807	221.780582003	9.000000000	CaF2	1.559709990		108.311
		153.071443064	22.790060084		1.000000000		104.062
	L808	309.446967518	38.542735318	CaF2	1.559709990		104.062
		-2660.227000099	0.100022285		1.000000000		104.098
35	L809	23655.354584194	12.899131182	CaF2	1.559709990		104.054
		-1473.189213176	9.318886362		1.000000000		103.931
	L810	-652.136459374	16.359499814	CaF2	1.559709990		103.644
		-446.489459129	0.100000000		1.000000000		103.877
40	L811	174.593507050	25.900313780	CaF2	1.559709990		99.267
		392.239515259AS	14.064505431		1.000000000		96.610
		0.000000000	2.045119392		1.000000000		96.552
	L812	7497.306838482	16.759051656	CaF2	1.559709990		96.383
		318.210831711	8.891640764		1.000000000		94.998
45	L813	428.724465129	41.295806263	CaF2	1.559709990		95.548
		3290.097601139AS	7.377912006		1.000000000		95.040
	L814	721.012739719	33.921118706	CaF2	1.559709990		95.443
		-272.650872353	6.871397517		1.000000000		95.207
50	L815	131.257556743	38.826450065	CaF2	1.559709990		81.345
		632.112566477AS	4.409527396		1.000000000		74.847
	L816	342.127618157AS	37.346293509	CaF2	1.559709990		70.394
		449.261078744	4.859754445		1.000000000		54.895
	L817	144.034814702	34.792179308	CaF2	1.559709990		48.040
		-751.263321098AS	11.999872684		1.000000000		33.475
55	0'	0.000000000	0.000127776		1.000000000		16.430

WO 02/093209

PCT/EP02/05050

ASPHAERISCHE KONSTANTEN

5 Asphäre der Linse L801
 K 0.0000
 C1 4.90231706e-009
 C2 3.08634889e-014
 10 C3 -9.33005325e-019
 C4 -6.06316417e-024
 C5 6.11462814e-028
 C6 -8.64346302e-032
 C7 0.00000000e+000
 15 C8 0.00000000e+000
 C9 0.00000000e+000

20 Asphäre der Linse L803
 K 0.0000
 C1 -5.33460884e-009
 C2 9.73867225e-014
 C3 -3.28422058e-018
 25 C4 1.50550421e-022
 C5 0.00000000e+000
 C6 0.00000000e+000
 C7 0.00000000e+000
 C8 0.00000000e+000
 30 C9 0.00000000e+000

Asphäre der Linse L803`
 35 K 0.0000
 C1 5.33460884e-009
 C2 -9.73867225e-014
 C3 3.28422058e-018
 C4 -1.50550421e-022
 40 C5 0.00000000e+000
 C6 0.00000000e+000
 C7 0.00000000e+000
 C8 0.00000000e+000
 C9 0.00000000e+000
 45

Asphäre der Linse L805
 K 0.0000
 50 C1 2.42569449e-009
 C2 3.96137865e-014
 C3 -2.47855149e-018
 C4 7.95092779e-023
 C5 0.00000000e+000
 55 C6 0.00000000e+000
 C7 0.00000000e+000
 C8 0.00000000e+000
 C9 0.00000000e+000
 60

WO 02/093209

PCT/EP02/05050

Asphäre der Linse L806

5 K 0.0000
 C1 -6.74111232e-009
 C2 -2.57289693e-014
 C3 -2.81309020e-018
 C4 6.70057931e-023
 10 C5 5.36272344e-028
 C6 -4.81282974e-032
 C7 0.00000000e+000
 C8 0.00000000e+000
 C9 0.00000000e+000

15

Asphäre der Linse L811

K 0.0000
 20 C1 2.28889624e-008
 C2 -1.88393559e-014
 C3 2.86010656e-017
 C4 -3.18575336e-021
 C5 1.45896017e-025
 25 C6 -1.08492931e-029
 C7 0.00000000e+000
 C8 0.00000000e+000
 C9 0.00000000e+000

30

Asphäre der Linse L813

K 0.0000
 35 C1 3.40212872e-008
 C2 -1.08008877e-012
 C3 4.33814531e-017
 C4 -7.40125614e-021
 C5 5.66856812e-025
 C6 0.00000000e+000
 40 C7 0.00000000e+000
 C8 0.00000000e+000
 C9 0.00000000e+000

45

Asphäre der Linse L815

K 0.0000
 C1 -3.15395039e-008
 50 C2 4.30010133e-012
 C3 3.11663337e-016
 C4 -3.64089769e-020
 C5 1.06073268e-024
 C6 0.00000000e+000
 C7 0.00000000e+000
 55 C8 0.00000000e+000
 C9 0.00000000e+000

60

WO 02/093209

PCT/EP02/05050

5 Asphäre der Linse L816

	K	0.0000
	C2	-2.16574523e-008
	C3	-6.57182801e-013
	C3	4.46519932e-016
10	C4	-3.71571535e-020
	C5	0.00000000e+000
	C6	0.00000000e+000
	C7	0.00000000e+000
	C8	0.00000000e+000
15	C9	0.00000000e+000

20 Asphäre der Linse L817

	K	0.0000
	C1	2.15121397e-008
	C2	-1.65301726e-011
	C3	-5.03883747e-015
	C4	1.03441815e-017
25	C5	-6.29122773e-021
	C6	1.44097714e-024
	C7	0.00000000e+000
	C8	0.00000000e+000
30	C9	0.00000000e+000

WO 02/093209

PCT/EP02/05050

Patentansprüche:

1. Objektiv (611, 711), insbesondere ein Projektionsobjektiv für eine Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage (81), mit einer Mehrzahl von Linsen (L601-L630, L801-L817), mit mindestens einer Linse (1) aus Fluorid-Kristall,
5 dadurch gekennzeichnet,
daß die mindestens eine Linse (1) eine (100)-Linse mit einer Linsenachse (EA) ist, welche annähernd senkrecht auf den {100}-Kristallebenen oder auf den dazu äquivalenten Kristallebenen des Fluorid-Kristalls steht.
- 10 2. Objektiv (611, 711) nach Anspruch 1, wobei die (100)-Linse eine rotationssymmetrische Linse mit einer Symmetrieachse ist und die Symmetrieachse mit der Linsenachse (EA) der (100)-Linse zusammenfällt.
3. Objektiv (611, 711) nach einem der Ansprüche 1 bis 2 mit einer optischen Achse (OA), wobei die Linsenachse der (100)-Linse mit der optischen Achse(OA) des Objektivs
15 (611, 711) zusammenfällt.
4. Objektiv (611, 711) nach einem der Ansprüche 1 bis 3, wobei innerhalb des Objektivs (611, 711) Lichtstrahlen von einer Objektebene (O) zu einer Bildebene (O') verlaufen und mindestens ein Lichtstrahl (609, 713, 715) innerhalb der (100)-Linse einen Strahlwinkel bezüglich der Linsenachse aufweist, der größer als 25°, insbesondere
20 größer als 30° ist.
5. Objektiv (611, 711) nach einem der Ansprüche 1 bis 4, wobei innerhalb des Objektivs (611, 711) Lichtstrahlen von einer Objektebene (O) zu einer Bildebene (O') verlaufen und alle Lichtstrahlen innerhalb der (100)-Linse Strahlwinkel bezüglich der Linsenachse aufweisen, die maximal 45°, insbesondere maximal $\arcsin\left(\frac{NA}{n_{FK}}\right)$
25 betragen, wobei NA die bildseitige numerische Apertur bezeichnet und n_{FK} die Brechzahl des Fluorid-Kristalls.
6. Objektiv (611, 711) nach einem der Ansprüche 1 bis 5 mit einer Blendenebene (APE), wobei die Blendenebene (APE) einen Blendendurchmesser aufweist und wobei die

WO 02/093209

PCT/EP02/05050

- (100)- Linse einen Linsendurchmesser aufweist und wobei der Linsendurchmesser kleiner als 85%, insbesondere kleiner als 80% des Blendendurchmessers ist.
7. Objektiv (611, 711) nach einem der Ansprüche 1 bis 6 mit einer Bildebene (O'), wobei die (100)- Linse (L630, L817) die der Bildebene (O') nächste Linse ist.
- 5 8. Objektiv (611, 711), insbesondere Projektionsobjektiv für eine Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage, mit mindestens zwei Linsen oder Linsenteilen aus Fluorid-Kristall, wobei die Linsen oder die Linsenteile Linsenachsen aufweisen, welche jeweils annähernd in eine Hauptkristallrichtung weisen,
- 10 wobei auf einen Bildpunkt in einer Bildebene (O') ein Strahlbüschel mit Strahlen trifft, welche jeweils einen Azimutwinkel α_R , einen Öffnungswinkel θ_R und einen optischen Wegunterschied ΔOPL für zwei zueinander orthogonale lineare Polarisationszustände aufweisen, dadurch gekennzeichnet,
- 15 daß die Linsen oder die Linsenteile gegeneinander um die Linsenachsen derart verdreht angeordnet sind, daß die Verteilung der optischen Wegunterschiede $\Delta OPL(\alpha_R, \theta_R)$ des Strahlbüschels als Funktion des Azimutwinkels α_R und des Öffnungswinkels θ_R wesentlich reduzierte Werte aufweist im Vergleich zu Linsen oder Linsenteilen, deren Linsenachsen in die gleiche Hauptkristallrichtung weisen und die nicht gegeneinander
- 20 um die Linsenachsen verdreht angeordnet sind.
9. Objektiv (611, 711) nach Anspruch 8, wobei die optischen Wegunterschiede ΔOPL als Funktion des Azimutwinkels α_R für einen vorgegebenen Öffnungswinkel θ_0 weniger als 30%, insbesondere weniger als 20% variieren.
- 25 10. Objektiv (611, 711) nach einem der Ansprüche 8 oder 9, wobei die Linsen oder Linsenteile jeweils eine Doppelbrechungsverteilung $\Delta n(\alpha_L, \theta_L)$ aufweisen, deren Doppelbrechungswerte Δn von Azimutwinkeln α_L bezüglich einer zur Linsenachse senkrecht stehenden Bezugsrichtung und von Öffnungswinkeln θ_L bezüglich der Linsenachse abhängen,

WO 02/093209

PCT/EP02/05050

- wobei die Doppelbrechungsverteilung $\Delta n(\alpha_L, \theta_L)$ eine k-zählige Azimutalsymmetrie aufweist,
wobei zwischen den Bezugsrichtungen der einzelnen Linsen oder Linsenteile Drehwinkel γ definiert sind,
- 5 wobei eine Anzahl von n Linsen oder n Linsenteilen eine Gruppe bilden, innerhalb derer die Linsenachsen in die gleiche Hauptkristallrichtung oder eine dazu äquivalente Hauptkristallrichtung weisen und innerhalb der die Doppelbrechungsverteilungen $\Delta n(\alpha_L, \theta_L)$ bezüglich der Bezugsrichtungen den gleichen azimutalen Verlauf aufweisen, wobei für den Drehwinkel γ zwischen je zwei Linsen oder Linsenteilen einer Gruppe
- 10 gilt:
- $$\gamma = \frac{360^\circ}{k \cdot n} + m \cdot \frac{360^\circ}{k} \pm 10^\circ,$$
- wobei m eine ganze Zahl ist.
11. Objektiv nach Anspruch 10, wobei ein äußerster Aperturstrahl (609, 713, 715) des Strahlbüschels innerhalb der Linsen oder Linsenteile jeweils einen Öffnungswinkel θ_L
- 15 aufweist und wobei die Öffnungswinkel θ_L innerhalb der Linsen oder Linsenteile der Gruppe maximal um 30%, insbesondere maximal um 20% variieren.
12. Objektiv (611, 711) nach einem der Ansprüche 10 oder 11, wobei ein äußerster Aperturstrahl (609, 713, 715) des Strahlbüschels innerhalb der Linsen oder Linsenteile jeweils einen Strahlweg RL_L zurücklegt und wobei die Strahlwege RL_L innerhalb der
- 20 Linsen oder Linsenteile der Gruppe maximal um 30%, insbesondere maximal um 20% variieren.
13. Objektiv (611, 711) nach einem der Ansprüche 10 bis 12, wobei die bei Drehwinkel $\gamma = 0^\circ$ für die einzelnen Linsen oder Linsenteile einer Gruppe bestimmten optischen Wegunterschiede ΔOPL für einen äußersten Aperturstrahl (609, 713, 715) des
- 25 Strahlbüschels maximal um 30%, insbesondere maximal um 20% variieren.
14. Objektiv (611, 711) nach einem der Ansprüche 10 bis 13, wobei die Gruppe 2 bis 4 Linsen oder Linsenteile umfaßt.
15. Objektiv (611, 711) nach Anspruch 14, wobei die Linsen (L629, L630) oder Linsenteile der Gruppe benachbart angeordnet sind, insbesondere aneinander angesprengt sind.

WO 02/093209

PCT/EP02/05050

16. Objektiv (711) nach einem der Ansprüche 8 oder 9, wobei die Linsen oder Linsenteile jeweils eine Doppelbrechungsverteilung $\Delta n(\alpha_L, \theta_L)$ aufweisen, deren Doppelbrechungswerte Δn von Azimutwinkeln α_L bezüglich einer zur Linsenachse senkrecht stehenden Bezugsrichtung und von Öffnungswinkeln θ_R bezüglich der Linsenachse abhängen,
- 5 wobei die Doppelbrechungsverteilung $\Delta n(\alpha_L, \theta_L)$ eine k-zählige Azimutalsymmetrie aufweist, wobei zwischen den Bezugsrichtungen der einzelnen Linsen oder Linsenteile Drehwinkel γ definiert sind,
- 10 wobei eine Anzahl von n Untergruppen eine Gruppe bilden, innerhalb derer die Linsenachsen der Linsen oder Linsenteile in die gleiche Hauptkristallrichtung oder eine dazu äquivalente Hauptkristallrichtung weisen und innerhalb der die Doppelbrechungsverteilungen $\Delta n(\alpha_L, \theta_L)$ bezüglich der Bezugsrichtungen den gleichen azimutalen Verlauf aufweisen,
- 15 wobei die n Untergruppen jeweils mindestens eine Linse oder ein Linsenteil aufweisen, wobei die Drehwinkel γ zwischen den Linsen oder Linsenteile einer Untergruppe $\gamma = l \cdot \frac{360^\circ}{k} \pm 10^\circ$ betragen, wobei l eine ganze Zahl ist, wobei für den Drehwinkel γ zwischen je zwei Linsen oder Linsenteilen aus verschiedenen Untergruppen gilt:
- 20
$$\gamma = \frac{360^\circ}{k \cdot n} + m \cdot \frac{360^\circ}{k} \pm 10^\circ,$$
 wobei m eine ganze Zahl ist.
17. Objektiv (611, 711) nach einem der Ansprüche 10 bis 16, wobei das Objektiv (611, 711) mindestens zwei Gruppen mit jeweils gegeneinander verdrehten Linsen oder Linsenteilen aufweist.
- 25 18. Objektiv (611, 711) nach einem der Ansprüche 8 bis 17, wobei die Linsenachsen in die $\langle 111 \rangle$ -Kristallrichtung oder dazu äquivalente Hauptkristallrichtungen weisen und die Doppelbrechungsverteilung $\Delta n(\alpha_L, \theta_L)$ der Linsen oder Linsenteile eine 3-zählige Azimutalsymmetrie aufweist.

WO 02/093209

PCT/EP02/05050

19. Objektiv (611, 711) nach einem der Ansprüche 8 bis 17, wobei die Linsenachsen in die $\langle 100 \rangle$ -Kristallrichtung oder dazu äquivalente Hauptkristallrichtungen weisen und die Doppelbrechungsverteilung $\Delta n(\alpha_L, \theta_L)$ der Linsen oder Linsenteile eine 4-zählige Azimutalsymmetrie aufweist.
- 5 20. Objektiv (611, 711) nach einem der Ansprüche 8 bis 17, wobei die Linsenachsen in die $\langle 110 \rangle$ -Kristallrichtung oder dazu äquivalente Hauptkristallrichtungen weisen und die Doppelbrechungsverteilung $\Delta n(\alpha_L, \theta_L)$ der Linsen oder Linsenteile eine 2-zählige Azimutalsymmetrie aufweist.
21. Objektiv (611, 711) nach einem der Ansprüche 8 bis 20, wobei die Linsenachsen der Linsen oder Linsenteile einer ersten Gruppe in die $\langle 100 \rangle$ -Kristallrichtung oder in eine dazu äquivalente Hauptkristallrichtung weisen und die Linsenachsen der Linsen oder Linsenteile einer zweiten Gruppe in die $\langle 111 \rangle$ -Kristallrichtung oder in eine dazu äquivalente Hauptkristallrichtung weisen.
- 10
22. Objektiv (611, 711) nach einem der Ansprüche 8 bis 20, wobei die Linsenachsen der Linsen oder Linsenteile einer ersten Gruppe in die $\langle 100 \rangle$ -Kristallrichtung oder in eine dazu äquivalente Hauptkristallrichtung weisen und die Linsenachsen der Linsen oder Linsenteile einer zweiten Gruppe in die $\langle 110 \rangle$ -Kristallrichtung oder in eine dazu äquivalente Hauptkristallrichtung weisen.
- 15
23. Objektiv (611, 711) nach Anspruch 21 oder 22, wobei sich die Verteilung der optischen Wegunterschiede $\Delta OPL_1(\alpha_R, \theta_R)$ aus einer ersten Verteilung der optischen Wegunterschiede $\Delta OPL_1(\alpha_R, \theta_R)$, welche durch die Linsen oder Linsenteile von allen ersten Gruppen hervorgerufen wird, und einer zweiten Verteilung der optischen Wegunterschiede $\Delta OPL_2(\alpha_R, \theta_R)$, welche durch die Linsen oder Linsenteile von allen zweiten Gruppen hervorgerufen wird, zusammensetzt und sich der Betrag des
- 20
- 25 Maximalwerts der ersten Verteilung der optischen Wegunterschiede $\Delta OPL_1(\alpha_R, \theta_R)$ maximal um 30%, insbesondere maximal um 20% vom Betrag des Maximalwertes der zweiten Verteilung der optischen Wegunterschiede $\Delta OPL_2(\alpha_R, \theta_R)$ unterscheidet.
24. Objektiv (611) nach einem der Ansprüche 8 bis 23, wobei die Linsen oder Linsenteile zu einer Vielzahl von optischen Elementen mit optischen Flächen gehören, und wobei

WO 02/093209

PCT/EP02/05050

- mindestens eine optische Fläche mit einer Kompensations-Beschichtung (613) belegt ist, wobei die Kompensations-Beschichtung (613) derart ausgelegt ist, daß die Verteilung der optischen Wegunterschiede $\Delta OPL(\alpha_R, \theta_R)$ des Strahlbüschels als Funktion des Azimutwinkels α_R und des Öffnungswinkels θ_R wesentlich reduzierte Werte aufweist im Vergleich zu einem Objektiv ohne eine Kompensations-Beschichtung.
- 5
25. Objektiv (611) nach Anspruch 24, wobei das optische Element (L630) mit der Kompensations-Beschichtung (613) eine Elementachse aufweist, und wobei die Kompensations-Beschichtung (613) eine effektive Doppelbrechungsverteilung
- 10 aufweist, deren effektive Doppelbrechungswerte von Azimutwinkeln α_F bezüglich einer zur Elementachse senkrecht stehenden Bezugsrichtung und von Öffnungswinkeln θ_F bezüglich der Elementachse abhängen.
26. Objektiv (611) nach Anspruch 25, wobei die effektive Doppelbrechungsverteilung der Kompensations-Beschichtung (613) für den Öffnungswinkel $\theta_F=0^\circ$ annähernd Null ist.
- 15 27. Objektiv (611) nach einem der Ansprüche 25 und 26, wobei die effektive Doppelbrechungsverteilung primär nur vom Öffnungswinkel θ_F abhängt.
28. Objektiv (611) nach einem der Ansprüche 24 bis 27, wobei das optische Element (L630) mit der Kompensations-Beschichtung (613) eine der Linsen aus Fluorid-Kristall ist, und wobei die Elementachse die Linsenachse der Linse aus Fluorid-Kristall ist.
- 20 29. Objektiv (611) nach einem der Ansprüche 24 bis 28, wobei mehrere optische Elemente mit Kompensations-Beschichtungen belegt sind.
30. Objektiv (611) nach einem der Ansprüche 24 bis 29, wobei alle optischen Elemente mit Kompensations-Beschichtungen belegt sind.
31. Objektiv (611, 711) nach einem der Ansprüche 1 bis 30, wobei der Fluorid-Kristall ein
- 25 Kalzium-Fluorid-Kristall, ein Strontium-Fluorid-Kristall oder ein Barium-Fluorid-Kristall ist.
32. Objektiv (611), insbesondere Projektionsobjektiv für eine Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage, mit mehreren optischen Elementen, insbesondere Linsen aus Fluorid-Kristall, mit
- 30 optischen Flächen,

WO 02/093209

PCT/EP02/05050

- wobei auf einen Bildpunkt in einer Bildebene (O') ein Strahlbüschel mit Strahlen trifft, welche jeweils einen optischen Wegunterschied ΔOPL für zwei zueinander orthogonale lineare Polarisationszustände aufweisen, dadurch gekennzeichnet, dass mindestens eine optische Fläche mit einer Kompensations-Beschichtung (613) belegt ist, wobei die
- 5 Kompensations-Beschichtung derart ausgelegt ist, daß die optischen Wegunterschiede ΔOPL des Strahlbüschels wesentlich reduzierte Werte aufweisen im Vergleich zu einem Objektiv ohne eine Kompensations-Beschichtung.
33. Objektiv (611) nach Anspruch 32, wobei das optische Element (L630) mit der Kompensations-Beschichtung (613) eine Elementachse aufweist, und wobei die
- 10 Kompensations-Beschichtung (613) eine effektive Doppelbrechungsverteilung aufweist, deren effektive Doppelbrechungswerte von Azimutwinkeln α_F bezüglich einer zur Elementachse senkrecht stehenden Bezugsrichtung und von Öffnungswinkeln θ_F bezüglich der Elementachse abhängen.
34. Objektiv (611) nach Anspruch 33, wobei die effektive Doppelbrechungsverteilung der
- 15 Kompensations-Beschichtung (613) für den Öffnungswinkel $\theta_F=0^\circ$ annähernd Null ist.
35. Objektiv (611) nach einem der Ansprüche 33 und 34, wobei die effektive Doppelbrechungsverteilung der Kompensations-Beschichtung (613) primär vom Öffnungswinkel θ_F abhängt.
36. Objektiv (611) nach einem der Ansprüche 33 bis 37, wobei das optische Element
- 20 (L630) mit der Kompensations-Beschichtung (613) austauschbar ist.
37. Objektiv (611) nach einem der Ansprüche 32 bis 36, wobei mindestens zwei optische Elemente Linsen oder Linsenteile aus Fluorid-Kristall sind, wobei die Linsen oder die Linsenteile Linsenachsen aufweisen,
- wobei die Linsen oder die Linsenteile gegeneinander um die Linsenachsen derart
- 25 verdreht angeordnet sind, daß die Verteilung der optischen Wegunterschiede $\Delta OPL(\alpha_R, \theta_R)$ des Strahlbüschels als Funktion des Azimutwinkels α_R und des Öffnungswinkels θ_R wesentlich reduzierte Werte aufweist im Vergleich zu Linsen oder Linsenteilen, deren Linsenachsen in die gleiche Hauptkristallrichtung weisen und die nicht gegeneinander um die Linsenachsen verdreht angeordnet sind.

WO 02/093209

PCT/EP02/05050

38. Objektiv (611) nach Anspruch 37, wobei die optischen Wegunterschiede ΔOPL als Funktion des Azimutwinkels α_R für einen vorgegebenen Öffnungswinkel θ_0 weniger als 30%, insbesondere weniger als 20% variieren.
39. Objektiv (611) nach einem der Ansprüche 37 oder 38, wobei die Linsen oder
 5 Linsenteile jeweils eine Doppelbrechungsverteilung $\Delta n(\alpha_L, \theta_L)$ aufweisen, deren Doppelbrechungswerte Δn von Azimutwinkeln α_L bezüglich einer zur Linsenachse senkrecht stehenden Bezugsrichtung und von Öffnungswinkeln θ_R bezüglich der Linsenachse abhängen,
 wobei die Doppelbrechungsverteilung $\Delta n(\alpha_L, \theta_L)$ eine k-zählige Azimutalsymmetrie
 10 aufweist,
 wobei zwischen den Bezugsrichtungen der einzelnen Linsen oder Linsenteile Drehwinkel γ definiert sind,
 wobei eine Anzahl von n Linsen oder n Linsenteilen eine Gruppe bilden, innerhalb derer die Linsenachsen in die gleiche Hauptkristallrichtung oder eine dazu äquivalente
 15 Hauptkristallrichtung weisen und innerhalb der die Doppelbrechungsverteilungen $\Delta n(\alpha_L, \theta_L)$ bezüglich der Bezugsrichtungen den gleichen azimutalen Verlauf aufweisen, wobei für den Drehwinkel γ zwischen je zwei Linsen oder Linsenteilen einer Gruppe gilt:

$$\gamma = \frac{360^\circ}{k \cdot n} + m \cdot \frac{360^\circ}{k} \pm 10^\circ,$$

 20 wobei m eine ganze Zahl ist.
40. Objektiv (611) nach einem der Ansprüche 37 oder 38, wobei die Linsen oder
 Linsenteile jeweils eine Doppelbrechungsverteilung $\Delta n(\alpha_L, \theta_L)$ aufweisen, deren
 Doppelbrechungswerte Δn von Azimutwinkeln α_L bezüglich einer zur Linsenachse
 senkrecht stehenden Bezugsrichtung und von Öffnungswinkeln θ_R bezüglich der
 25 Linsenachse abhängen,
 wobei die Doppelbrechungsverteilung $\Delta n(\alpha_L, \theta_L)$ eine k-zählige Azimutalsymmetrie aufweist,

WO 02/093209

PCT/EP02/05050

- wobei zwischen den Bezugsrichtungen der einzelnen Linsen oder Linsenteile Drehwinkel γ definiert sind,
- wobei eine Anzahl von n Untergruppen eine Gruppe bilden, innerhalb derer die Linsenachsen der Linsen oder Linsenteile in die gleiche Hauptkristallrichtung oder eine dazu äquivalente Hauptkristallrichtung weisen und innerhalb derer die
- 5 Doppelbrechungsverteilungen $\Delta n(\alpha_L, \theta_L)$ bezüglich der Bezugsrichtungen den gleichen azimutalen Verlauf aufweisen,
- wobei die n Untergruppen jeweils mindestens eine Linse oder ein Linsenteil aufweisen, wobei die Drehwinkel γ zwischen den Linsen oder Linsenteile einer Untergruppe
- 10 $\gamma = l \cdot \frac{360^\circ}{k} \pm 10^\circ$ betragen, wobei l eine ganze Zahl ist,
- wobei für den Drehwinkel γ zwischen je zwei Linsen oder Linsenteilen aus verschiedenen Untergruppen gilt:
- $$\gamma = \frac{360^\circ}{k \cdot n} + m \cdot \frac{360^\circ}{k} \pm 10^\circ,$$
- wobei m eine ganze Zahl ist.
- 15 41. Objektiv (611) nach einem der Ansprüche 37 bis 40, wobei das optische Element (L630) mit der Kompensations-Beschichtung (613) eine der Linsen aus Fluorid-Kristall ist, und wobei die Elementachse die Linsenachse der Linse aus Fluoridkristall ist.
42. Objektiv (611) nach einem der Ansprüche 32 bis 41, wobei mehrere optische Elemente mit Kompensations-Beschichtungen belegt sind.
- 20 43. Objektiv (611, 711) nach einem der Ansprüche 1 bis 42, wobei das Objektiv (611, 711) eine bildseitige numerische Apertur NA aufweist und die bildseitige numerische Apertur NA größer als 0,7, insbesondere größer als 0,8 ist.
44. Objektiv (611, 711) nach einem der Ansprüche 1 bis 43, wobei das Objektiv (611, 711) für Wellenlängen kleiner 200nm ausgelegt ist.
- 25 45. Objektiv (611, 711) nach einem der Ansprüche 1 bis 44, wobei das Objektiv (611, 711) für Wellenlängen kleiner 160nm ausgelegt ist.
46. Objektiv (611) nach einem der Ansprüche 1 bis 45, wobei das Objektiv (611) ein refraktives Objektiv ist.

WO 02/093209

PCT/EP02/05050

47. Objektiv (711) nach einem der Ansprüche 1 bis 45, wobei das Objektiv (711) ein katadioptrisches Objektiv (711) mit Linsen und mindestens einem Spiegel (Sp2) ist.
48. Objektiv (611, 711) nach einem der Ansprüche 1 bis 47, wobei alle Linsen aus Kalzium-Fluorid sind.
- 5 49. Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage (81), umfassend ein Beleuchtungssystem (83), ein Objektiv (85) nach einem der Ansprüche 1 bis 48, das eine Struktur tragende Maske (89) auf ein lichtempfindliches Substrat (815) abbildet.
50. Verfahren zur Herstellung von Halbleiter-Bauelementen mit einer Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage (81) nach Anspruch 49.
- 10 51. Verfahren zur Herstellung von Objektiven (611, 711), insbesondere von Projektionsobjektiven für eine Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage, mit mindestens zwei Linsen oder Linsenteilen aus Fluorid-Kristall, wobei die Linsen oder die Linsenteile Linsenachsen aufweisen, welche jeweils
- 15 annähernd in eine Hauptkristallrichtung weisen, dadurch gekennzeichnet, daß für ein Strahlbüschel mit Strahlen, welche jeweils einen Azimutwinkel α_R , einen Öffnungswinkel θ_R und einen optischen Wegunterschied ΔOPL für zwei zueinander orthogonale lineare Polarisationszustände in einer Bildebene aufweisen, die Verteilung
- 20 der optischen Wegunterschiede $\Delta OPL(\alpha_R, \theta_R)$ für Linsen oder Linsenteile bestimmt wird, daß die Linsen oder die Linsenteile gegeneinander um die Linsenachsen derart verdreht angeordnet werden, daß die Verteilung der optischen Wegunterschiede $\Delta OPL(\alpha_R, \theta_R)$ des Strahlbüschels wesentlich reduzierte Werte aufweist im Vergleich zu Linsen oder
- 25 Linsenteilen, deren Linsenachsen in die gleiche Hauptkristallrichtung weisen und die nicht gegeneinander um die Linsenachsen verdreht angeordnet sind.
52. Verfahren nach Anspruch 51, wobei das Objektiv (611, 711) eine erste Gruppe mit Linsen oder Linsenteilen und eine zweite Gruppe mit Linsen oder Linsenteilen aufweist und die Linsenachsen der Linsen oder Linsenteile der ersten Gruppe in die $\langle 100 \rangle$ -
- 30 Kristallrichtung oder in eine dazu äquivalente Hauptkristallrichtung weisen und die

WO 02/093209

PCT/EP02/05050

- Linsenachsen der Linsen oder Linsenteile der zweiten Gruppe in die <111>-
Kristallrichtung oder in eine dazu äquivalente Hauptkristallrichtung weisen.
53. Verfahren nach Anspruch 51, wobei das Objektiv (611, 711) eine erste Gruppe mit
Linsen oder Linsenteilen und eine zweite Gruppe mit Linsen oder Linsenteilen aufweist
5 und die Linsenachsen der Linsen oder Linsenteile der ersten Gruppe in die <100>-
Kristallrichtung oder in eine dazu äquivalente Hauptkristallrichtung weisen und die
Linsenachsen der Linsen oder Linsenteile der zweiten Gruppe in die <110>-
Kristallrichtung oder in eine dazu äquivalente Hauptkristallrichtung weisen.
54. Verfahren nach einem der Ansprüche 51 bis 53,
10 wobei für ein Strahlbüschel mit Strahlen, welche jeweils einen Azimutwinkel α_R , einen
Öffnungswinkel θ_R und einen optischen Wegunterschied ΔOPL für zwei zueinander
orthogonale lineare Polarisationszustände in einer Bildebene aufweisen, eine
Verteilung der optischen Wegunterschiede $\Delta OPL(\alpha_R, \theta_R)$,
wobei aus der Verteilung der optischen Wegunterschiede $\Delta OPL(\alpha_R, \theta_R)$ eine effektive
15 Doppelbrechungsverteilung einer Kompensations-Beschichtung zur Reduzierung der
optischen Wegunterschiede $\Delta OPL(\alpha_R, \theta_R)$ bestimmt wird,
wobei die effektive Doppelbrechungswerte der Kompensations-Beschichtung von
Azimutwinkeln α_F bezüglich einer zu einer Elementachse des optischen Elements
senkrecht stehenden Bezugsrichtung und von Öffnungswinkeln θ_F bezüglich der
20 Elementachse abhängen,
wobei aus der Doppelbrechungsverteilung der Aufbau einer Kompensations-
Beschichtung (613) bestimmt wird, und
wobei ein optisches Element (L630) des Objektivs (611) mit der Kompensations-
Beschichtung (613) belegt wird.
- 25 55. Verfahren zur Kompensation von Doppelbrechungs-Effekten in Objektiven (611),
insbesondere in Projektionsobjektiven für eine Mikrolithographie-
Projektionsbelichtungsanlage, wobei das Objektiv (611) mehrere optische Elemente,
insbesondere Linsen aus Fluorid-Kristall, mit optischen Flächen aufweist,
wobei mindestens ein optisches Element (L630) austauschbar ist,

WO 02/093209

PCT/EP02/05050

- wobei auf einen Bildpunkt in einer Bildebene (O') ein Strahlbüschel mit Strahlen trifft, welche jeweils einen Azimutwinkel α_R , einen Öffnungswinkel θ_R und einen optischen Wegunterschied ΔOPL für zwei zueinander orthogonale lineare Polarisationszustände in einer Bildebene aufweisen,
- 5 wobei eine Verteilung der optischen Wegunterschiede $\Delta OPL(\alpha_R, \theta_R)$ bestimmt wird, wobei aus der Verteilung der optischen Wegunterschiede $\Delta OPL(\alpha_R, \theta_R)$ eine effektive Doppelbrechungsverteilung einer Kompensations-Beschichtung (613) bestimmt wird, deren effektive Doppelbrechungswerte von Azimutwinkeln α_F bezüglich einer zu einer Elementachse des optischen Elements senkrecht stehenden Bezugsrichtung und von
- 10 Öffnungswinkeln θ_F bezüglich der Elementachse abhängen, wobei aus der effektive Doppelbrechungsverteilung der Aufbau einer Kompensations-Beschichtung (613) bestimmt wird, wobei das austauschbare optische Element (L630) aus dem Objektiv entfernt wird, wobei das austauschbare optische Element (L630) mit der Kompensations-
- 15 Beschichtung (613) belegt wird und wobei das austauschbare optische Element (L630) mit der Kompensations-Beschichtung (613) wieder in das Objektiv (611) eingebaut wird.
56. Linsenherstellverfahren, dadurch gekennzeichnet, daß mehrere Platten aus gegeneinander hinsichtlich der Kristallorientierung verdrehtem Kristallmaterial,
- 20 vorzugsweise Fluorid-Kristall und insbesondere Kalziumfluorid, optisch nahtlos gefügt, insbesondere angesprengt werden und anschließend als ein einheitliches Blank formgebend bearbeitet und poliert werden.
57. Linsenherstellverfahren nach Anspruch 56, wobei die Platten jeweils eine Doppelbrechungsverteilung $\Delta n(\alpha_L, \theta_L)$ aufweisen, deren Doppelbrechungswerte Δn
- 25 von Azimutwinkeln α_L bezüglich einer zur Linsenachse senkrecht stehenden Bezugsrichtung und von Öffnungswinkeln θ_L bezüglich der Linsenachse abhängen und welche eine k-zählige Azimutalsymmetrie aufweist, wobei für eine Anzahl von n Platten die Flächennormalen in die gleiche Hauptkristallrichtung oder eine dazu äquivalente Hauptkristallrichtung weisen und die

WO 02/093209

PCT/EP02/05050

Doppelbrechungsverteilungen $\Delta n(\alpha_L, \theta_L)$ bezüglich der Bezugsrichtungen den gleichen azimutalen Verlauf aufweisen,

wobei zwischen den Bezugsrichtungen der einzelnen Platten Drehwinkel γ definiert sind, wobei für den Drehwinkel γ zwischen je zwei Platten gilt:

$$5 \quad \gamma = \frac{360^\circ}{k \cdot n} + m \cdot \frac{360^\circ}{k} \pm 10^\circ,$$

wobei m eine ganze Zahl ist.

58. Linsenherstellverfahren nach Anspruch 57, wobei zwei Platten nahtlos gefügt werden.

59. Linsenherstellverfahren nach einem der Ansprüche 57 und 58, wobei die Platten annähernd gleiche Dicke aufweisen.

10 60. Linsenherstellverfahren nach einem der Ansprüche 56 bis 59, wobei bei ersten Platten die Flächennormalen in die $\langle 111 \rangle$ -Kristallrichtung oder in eine dazu äquivalente Hauptkristallrichtung weisen und bei zweiten Platten die Flächennormalen in die $\langle 100 \rangle$ -Kristallrichtung oder in eine dazu äquivalente Hauptkristallrichtung weisen.

61. Linsenherstellverfahren nach Anspruch 60, wobei die ersten Platten eine annähernd gleiche erste Dicke aufweisen und die zweiten Platten eine annähernd gleiche zweite Dicke aufweisen und das Verhältnis der Summe der ersten Dicken zur Summe der zweiten Dicken 1.5 ± 0.2 ist.

62. Linsenherstellverfahren nach einem der Ansprüche 56 bis 59, wobei bei ersten Platten die Flächennormalen in die $\langle 110 \rangle$ -Kristallrichtung oder in eine dazu äquivalente Hauptkristallrichtung weisen und bei zweiten Platten die Flächennormalen in die $\langle 100 \rangle$ -Kristallrichtung oder in eine dazu äquivalente Hauptkristallrichtung weisen.

63. Linsenherstellverfahren nach Anspruch 62, wobei die ersten Platten eine annähernd gleiche erste Dicke aufweisen und die zweiten Platten eine annähernd gleiche zweite Dicke aufweisen und das Verhältnis der Summe der ersten Dicken zur Summe der zweiten Dicken 4.0 ± 0.4 ist.

64. Linsenherstellverfahren nach einem der Ansprüche 62 und 63, wobei zwei erste Platten mit einer zweiten Platte optisch nahtlos gefügt werden.

65. Linsenherstellverfahren nach einem der Ansprüche 62 und 63, wobei vier erste Platten mit zwei zweiten Platte optisch nahtlos gefügt werden.

WO 02/093209

PCT/EP02/05050

66. Linse, gekennzeichnet durch die Herstellung nach einem der Ansprüche 56 bis 65.
67. Objektiv (611, 711), insbesondere ein Projektionsobjektiv für eine Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage (81), dadurch gekennzeichnet, daß es eine Linse nach Anspruch 66 umfaßt.
- 5 68. Objektiv (611, 711) nach mindestens einem der Ansprüche 1 bis 48, dadurch gekennzeichnet, daß es eine Linse (L629, L630) nach Anspruch 66 umfaßt.
69. Verfahren zur Herstellung eines optischen Rohlings aus einem Kristallmaterial mit kubischer Kristallstruktur als Vorstufe zur Herstellung einer Linse oder eines Linsenteils für ein Objektiv (611, 711), insbesondere ein Projektionsobjektiv für eine
- 10 Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage, gekennzeichnet durch folgende Verfahrensschritte:
- a) Bestimmen der Orientierung einer definiert innerhalb der Kristallstruktur orientierten ersten Kristallrichtung;
- b) Bearbeiten des optischen Rohlings derart, dass die erste Kristallrichtung nahezu
- 15 senkrecht auf einer optischen Roh-Fläche des optischen Rohlings steht;
- c) Bestimmen einer Bezugsrichtung, welche senkrecht auf der ersten Kristallrichtung steht, wobei die Bezugsrichtung eine Projektion einer zweiten Kristallrichtung in eine zur ersten Kristallrichtung senkrecht liegende Ebene darstellt, und wobei die erste Kristallrichtung zur zweiten Kristallrichtung einen von Null verschiedenen
- 20 Winkel einnimmt;
- d) Markieren der Bezugsrichtung auf dem optischen Rohling oder auf einer Haltefassung des optischen Rohlings.
70. Verfahren nach Anspruch 69, wobei die Lage der ersten Kristallrichtung durch Messen der Richtung eines Bragg-Reflexes einer dieser ersten Kristallrichtung zugeordneten
- 25 ersten Kristallebenenschar bestimmt wird.
71. Verfahren nach Anspruch 70, wobei die Lage der ersten Kristallachse durch das Vergleichen der gemessenen Richtungen von Bragg-Reflexen der Kristallebenenschar bei mehreren Messpositionen bestimmt wird, welche bezüglich einer auf einer optischen Eintrittsfläche des Rohlings senkrecht stehenden Achse gegeneinander
- 30 verdreht sind.

WO 02/093209

PCT/EP02/05050

72. Verfahren nach einem der Ansprüche 69 bis 71, wobei die erste Kristallrichtung in
<100>- Kristallrichtung oder in <111>- Kristallrichtung oder in <110>-Kristallrichtung
oder eine zu diesen Kristallrichtungen äquivalente Kristallrichtung weist.
73. Verfahren nach einem der Ansprüche 69 bis 72, wobei das Kristallmaterial Kalzium-
5 Fluorid, Strontium-Fluorid oder Barium-Fluorid ist.
74. Verfahren nach einem der Ansprüche 69 bis 73, wobei die Lage der Bezugsrichtung
durch Messen der Richtung eines Bragg-Reflexes einer der zweiten Kristallachse
zugeordneten Kristallebenenschar bestimmt wird.
75. Verfahren nach einem der Ansprüche 69 bis 73, wobei die Lage der Bezugsrichtung mit
10 Hilfe des Laue-Verfahrens bestimmt wird.
76. Verfahren nach einem der Ansprüche 69 bis 75, wobei ein Lichtstrahl, dessen
Projektion in eine zur ersten Kristallrichtung senkrecht liegenden Ebene parallel zur
Bezugsrichtung ist, einen maximalen oder einen minimalen optischen Wegunterschied
für zwei zueinander orthogonale lineare Polarisationszustände erfährt.
- 15 77. Verfahren nach einem der Ansprüche 69 bis 76, wobei die erste Kristallachse in <100>-
Kristallrichtung oder in <111>- Kristallrichtung oder in eine dazu äquivalente
Kristallrichtung weist, und wobei die Projektion der zweiten Kristallrichtung in eine
zur ersten Kristallrichtung senkrecht liegenden Ebene parallel zur Projektion der
20 <110>-Kristallrichtung oder einer dazu äquivalenten Kristallrichtung in eine zur ersten
Kristallrichtung senkrecht liegenden Ebene ist.
78. Verfahren nach einem der Ansprüche 72 bis 77, wobei die erste Kristallachse in <111>-
Kristallrichtung oder eine dazu äquivalente Kristallrichtung und die zweite
Kristallrichtung in <331>-Kristallrichtung oder eine dazu äquivalente Kristallrichtung
weist.
- 25 79. Verfahren nach einem der Ansprüche 70 bis 78, wobei diejenigen Materialbereiche des
optischen Rohlings, die von Bragg-Meßstrahlung durchtreten wurden, abgetragen
werden.
80. Optischer Rohling aus einem Kristallmaterial mit kubischer Kristallstruktur als
Ausgangsprodukt zur Herstellung einer Linse oder eines Linsenteils für ein Objektiv

WO 02/093209

PCT/EP02/05050

- (611, 711), insbesondere für ein Projektionsobjektiv für eine Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage,
wobei der optische Rohling oder eine Haltefassung des optischen Rohlings eine Markierung aufweist, welche eine Bezugsrichtung markiert, welche senkrecht auf der
5 ersten Kristallrichtung steht und eine Projektion einer zweiten Kristallrichtung in eine zur ersten Kristallrichtung senkrecht liegende Ebene darstellt, wobei die erste Kristallrichtung zur zweiten Kristallrichtung einen von Null verschiedenen Winkel einnimmt.
81. Optischer Rohling nach Anspruch 80, hergestellt nach einem Verfahren gemäß einem
10 der Ansprüche 69 bis 79.
82. Verfahren zur Herstellung einer Linse oder eines Linsenteils aus einem optischem Rohling nach einem der Ansprüche 80 oder 81, gekennzeichnet durch folgenden Verfahrensschritt:
e) Formen der Linse oder des Linsenteils derart, dass die Richtung der ersten
15 Kristallachse nahezu parallel zu einer Linsenachse ist.
83. Verfahren zur Herstellung einer Linse oder eines Linsenteils aus einem optischen Rohling aus einem Kristallmaterial mit kubischer Kristallstruktur, gekennzeichnet durch folgende Verfahrensschritte:
a1) Formen der Linse oder des Linsenteils derart, dass die Richtung einer definiert
20 innerhalb der Kristallstruktur orientierten ersten Kristallachse nahezu parallel zu einer Linsenachse ist;
b1) Bestimmen einer Bezugsrichtung, welche senkrecht auf der ersten Kristallrichtung steht, wobei die Bezugsrichtung eine Projektion einer zweiten Kristallrichtung in eine zur ersten Kristallrichtung senkrecht liegende Ebene darstellt, und wobei die
25 erste Kristallrichtung zur zweiten Kristallrichtung einen von Null verschiedenen Winkel einnimmt;
c1) Markieren der Bezugsrichtung auf der Linse oder dem Linsenteil oder auf einer Haltefassung der Linse oder des Linsenteils.

WO 02/093209

PCT/EP02/05050

84. Verfahren nach Anspruch 83, wobei die erste Kristallrichtung in $\langle 100 \rangle$ -
Kristallrichtung oder in $\langle 111 \rangle$ - Kristallrichtung oder in $\langle 110 \rangle$ -Kristallrichtung oder
eine zu diesen Kristallrichtungen äquivalente Kristallrichtung weist.
85. Verfahren nach einem der Ansprüche 83 oder 84, wobei das Kristallmaterial Kalzium-
5 Fluorid, Strontium-Fluorid oder Barium-Fluorid ist.
86. Verfahren nach einem der Ansprüche 83 bis 85, wobei die Lage der Bezugsrichtung
durch Messen der Richtung eines Bragg-Reflexes einer der zweiten Kristallachse
zugeordneten Kristallebenenschar bestimmt wird.
87. Verfahren nach einem der Ansprüche 83 bis 86, wobei die Lage der Bezugsrichtung mit
10 Hilfe des Laue-Verfahrens bestimmt wird.
88. Verfahren nach einem der Ansprüche 83 bis 87, wobei ein Lichtstrahl, dessen
Projektion in eine zur ersten Kristallrichtung senkrecht liegenden Ebene parallel zur
Bezugsrichtung ist, einen maximalen oder einen minimalen optischen Wegunterschied
für zwei zueinander orthogonale lineare Polarisationszustände erfährt.
- 15 89. Verfahren nach einem der Ansprüche 83 bis 88, wobei die erste Kristallachse in $\langle 100 \rangle$ -
Kristallrichtung oder in $\langle 111 \rangle$ - Kristallrichtung oder in eine dazu äquivalente
Kristallrichtung weist, und wobei die Projektion der zweiten Kristallrichtung in eine
zur ersten Kristallrichtung senkrecht liegenden Ebene parallel zur Projektion der
20 $\langle 110 \rangle$ -Kristallrichtung oder einer dazu äquivalenten Kristallrichtung in eine zur ersten
Kristallrichtung senkrecht liegenden Ebene ist.
90. Verfahren nach einem der Ansprüche 86 bis 89, wobei beim Formen diejenigen
Materialbereiche der Linse oder des Linsenteils, die von Bragg-Meßstrahlung
durchtreten wurden, abgetragen werden.
91. Linse oder Linsenteil für ein Objektiv (611, 711), insbesondere für ein
25 Projektionsobjektiv für eine Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage,
wobei eine Linsenachse der Linse oder des Linsenteils in Richtung einer ersten
Kristallachse weist,
wobei die Linse oder das Linsenteil oder eine Haltefassung der Linse oder des
Linsenteils eine Markierung aufweist, welche eine Bezugsrichtung markiert, welche
30 senkrecht auf der ersten Kristallrichtung steht und eine Projektion einer zweiten

WO 02/093209

PCT/EP02/05050

Kristallrichtung in eine zur ersten Kristallrichtung senkrecht liegende Ebene darstellt, wobei die erste Kristallrichtung zur zweiten Kristallrichtung einen von Null verschiedenen Winkel einnimmt.

92. Linse oder Linsenteil nach Anspruch 91, wobei die Linse oder das Linsenteil nach
5 einem der Ansprüche 82 bis 90 hergestellt wird.
93. Objektiv (611, 711) nach einem der Ansprüche 8 bis 48, wobei das Objektiv (611, 711) eine Linse oder ein Linsenteil nach einem der Ansprüche 91 oder 92 umfasst.

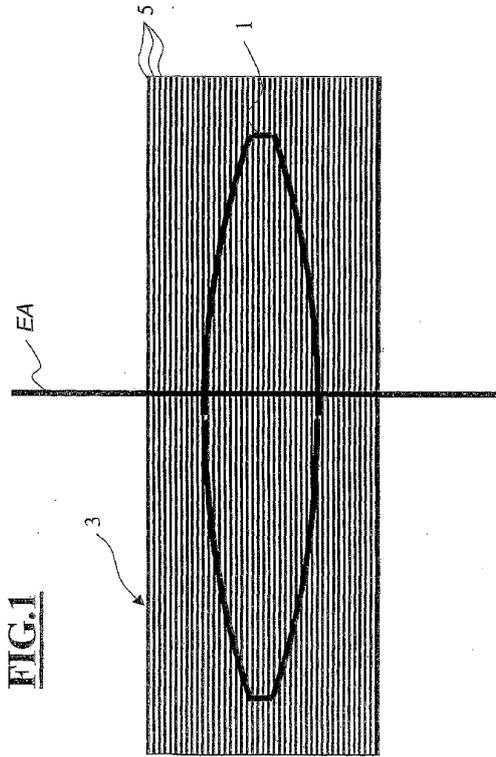


FIG.2A

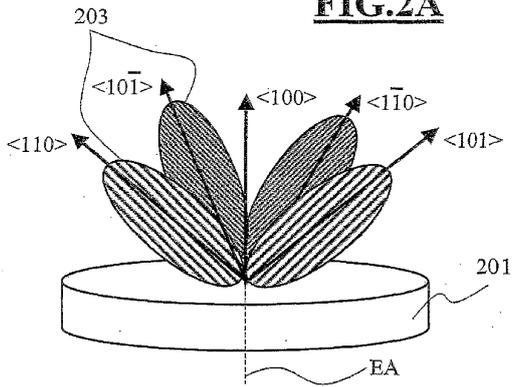


FIG.2B

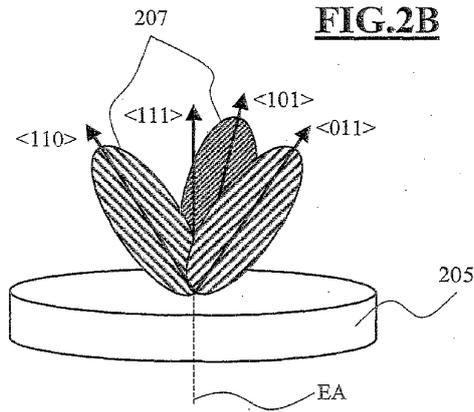


FIG.4A

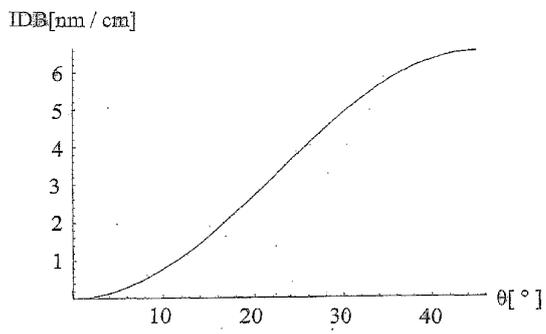


FIG.4B

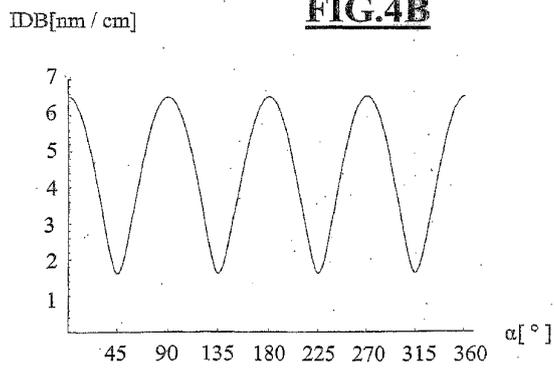


FIG.4C

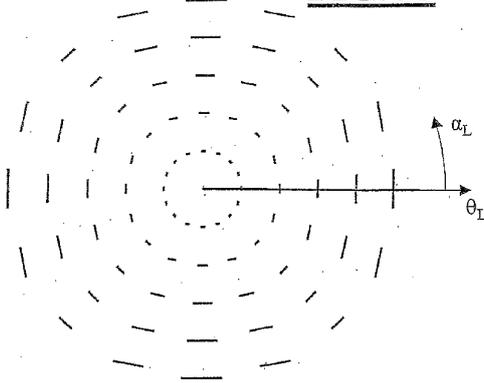
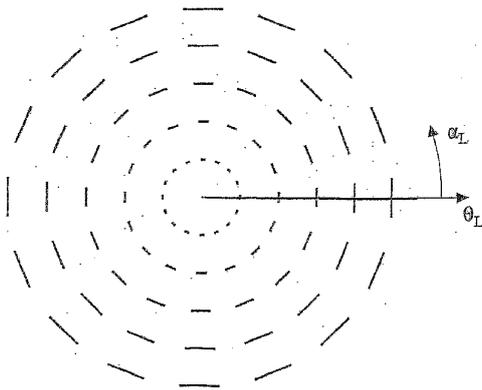


FIG.4D



WO 02/093209

PCT/EP02/05050

6/16

FIG.4E

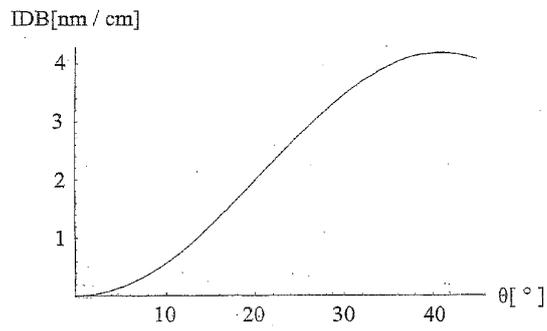


FIG.4F

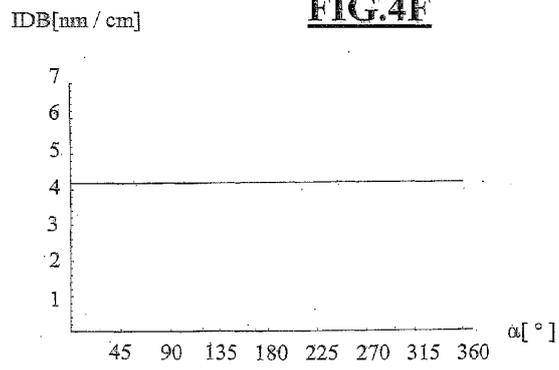


FIG.5A

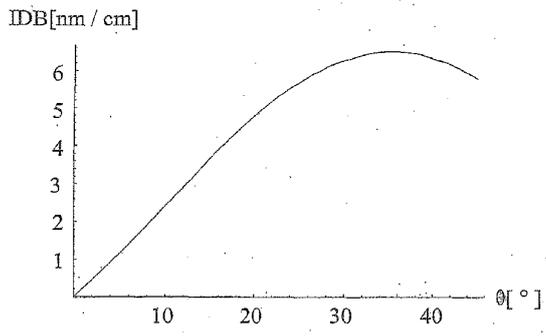
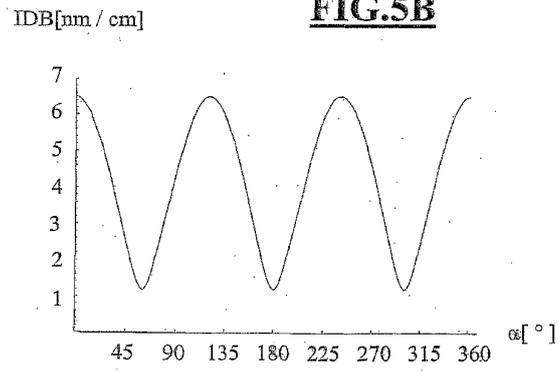


FIG.5B



WO 02/093209

PCT/EP02/05050

8/16

FIG.5C

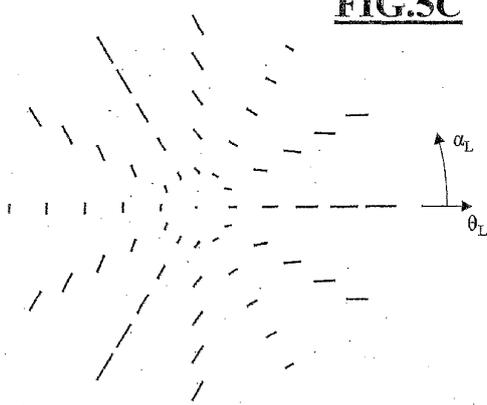


FIG.5D

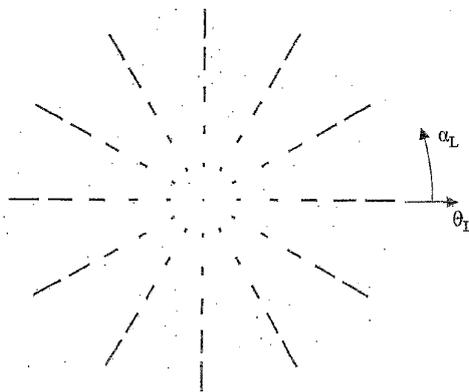


FIG.5E

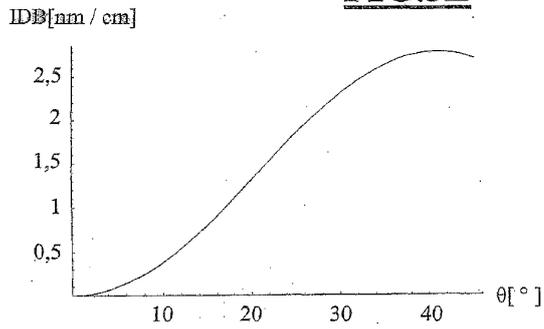


FIG.5F

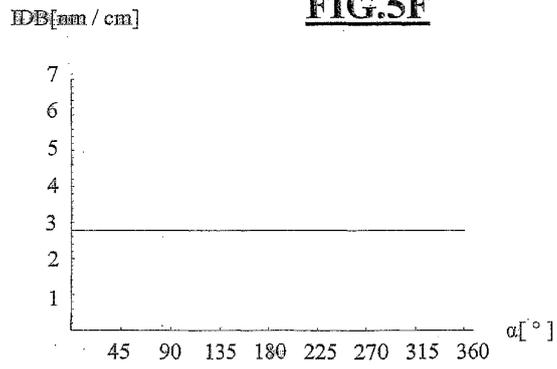


FIG.6A

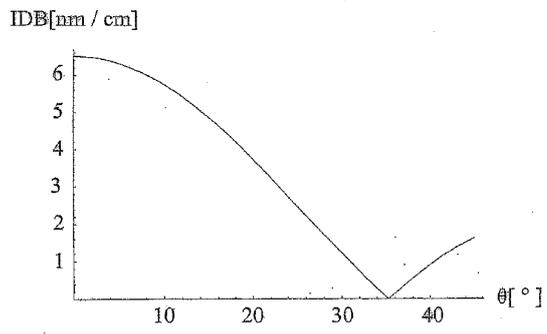
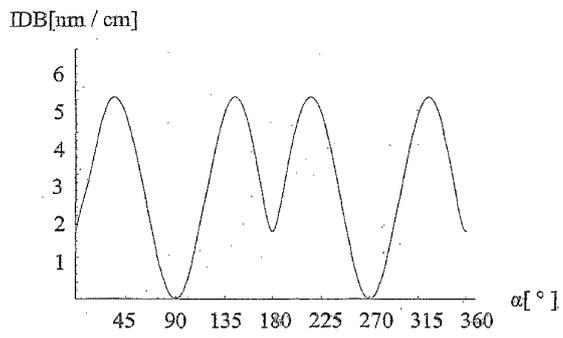


FIG.6B



WO 02/093209

PCT/EP02/05050

11/16

FIG.6C

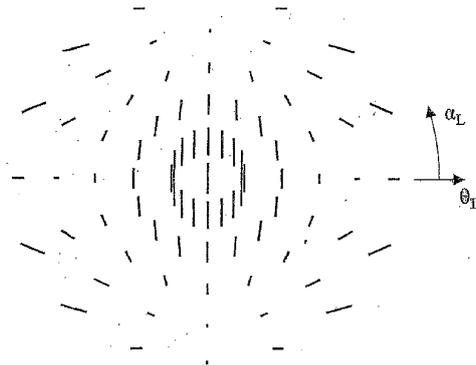
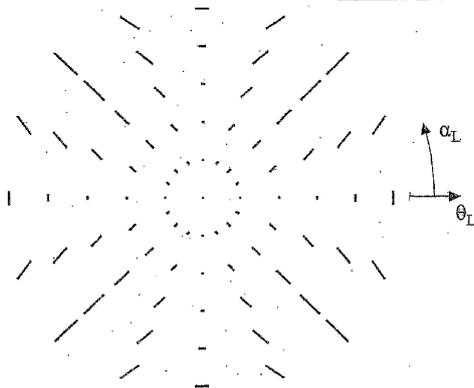


FIG.6D



WO 02/093209

PCT/EP02/05050

12/16

FIG.6E

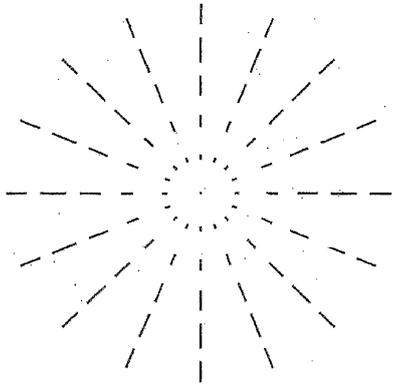


FIG.6F

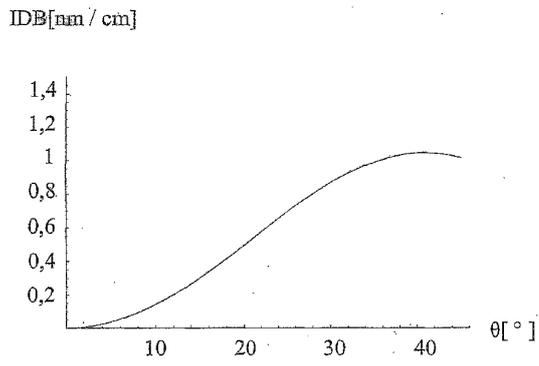
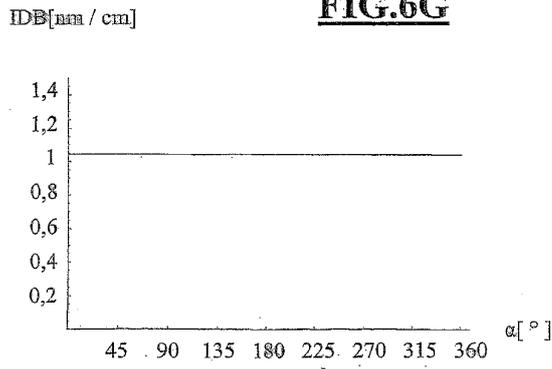
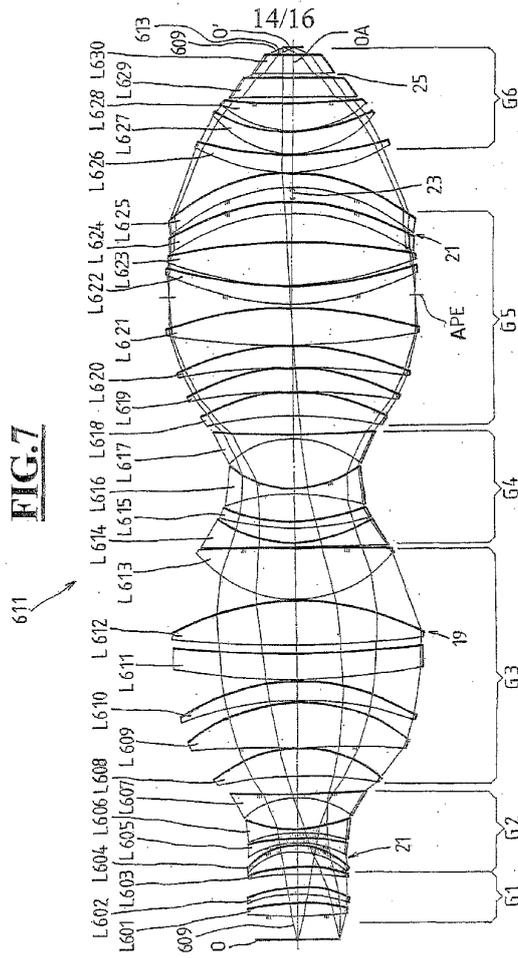


FIG.6G



WO 02/093209

PCT/EP02/05050



WO 02/093209

PCT/EP02/05050

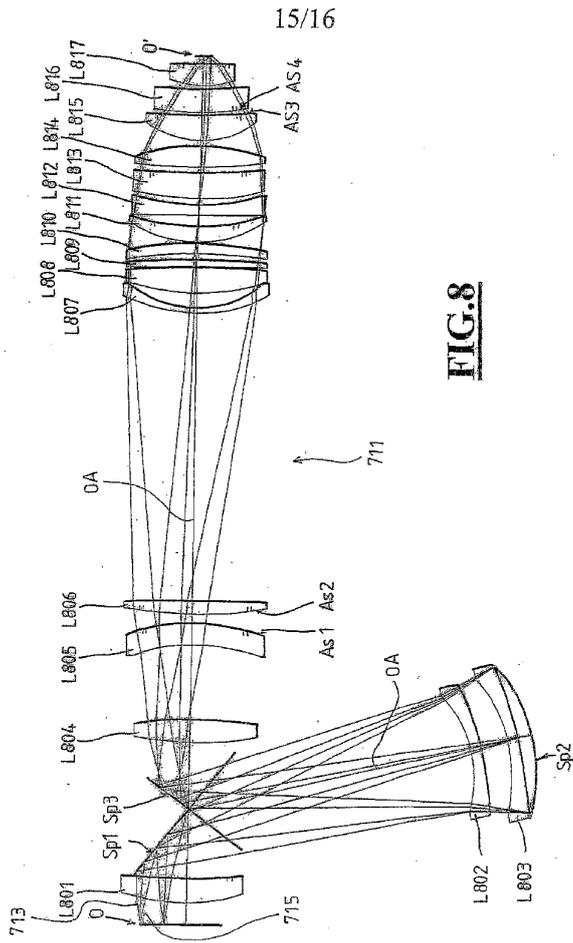
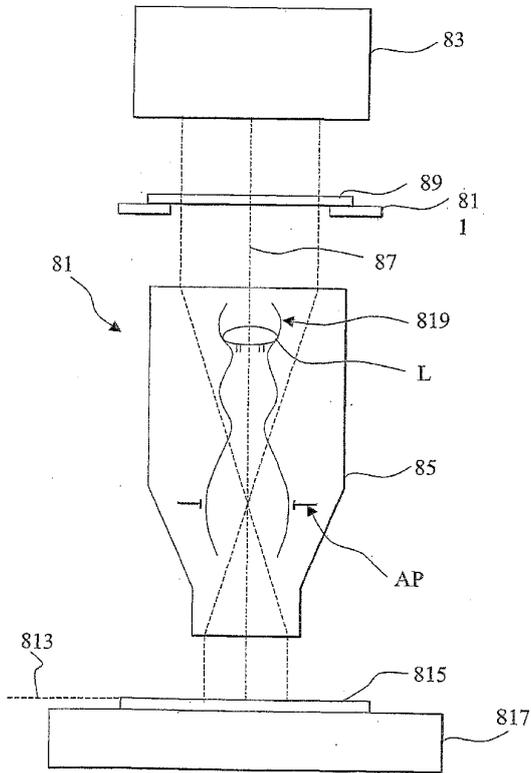


FIG.9



【国際公開パンフレット(コレクション)】

(12) NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES
PATENTWESENS (PCT) VERÖFFENTLICHTE INTERNATIONALE ANMELDUNG(19) Weltorganisation für geistiges Eigentum
Internationales Büro(43) Internationales Veröffentlichungsdatum
21. November 2002 (21.11.2002)

PCT

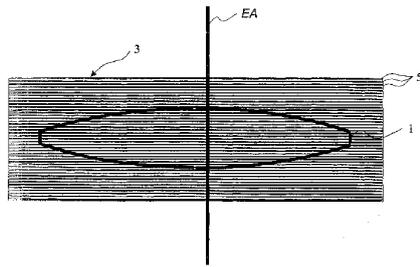
(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 02/093209 A3

(51) Internationale Patentklassifikation:	G02B 1/02, 5/30, G03F 7/20	101 25 487.3	23. Mai 2001 (23.05.2001)	DU
		101 27 320.7	6. Juni 2001 (06.06.2001)	DE
		102 10 782.3	12. März 2002 (12.03.2002)	DE
(21) Internationales Aktenzeichen:	PCT/EP02/05050	(71) Anmelder (nur für AT, BE, CH, CY, DE, DK, ES, FI, FR, GR, IE, IT, LU, MC, NL, PT, SE, TR): CARL ZEISS [DU/DU]; 89518 Heidenheim (Brenz) (DE).		
(22) Internationales Anmeldedatum:	8. Mai 2002 (08.05.2002)	(71) Anmelder (für alle Bestimmungsgaaten mit Ausnahme von US): CARL ZEISS SMT AG [DU/DU]; Carl Zeiss-Strasse 22, 73447 Oberkochen (DE).		
(25) Einreichungssprache:	Deutsch	(72) Erfinder; und		
(26) Veröffentlichungssprache:	Deutsch	(75) Erfinder/Anmelder (nur für US): KRÄHMER, Daniel [DE/DE]; Hegestrasse 28, 73431 Aalen (DE). GRUNER, Toralf [DE/DE]; Faleska-Meinig-Strasse 128, 09122		
(30) Angaben zur Priorität:				
	101 23 725.1	15. Mai 2001 (15.05.2001)	DE	
	101 23 727.8	15. Mai 2001 (15.05.2001)	DE	

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

(54) Title: LENS SYSTEM CONSISTING OF FLUORIDE CRYSTAL LENSES

(54) Bezeichnung: OBJEKTIV MIT FLUORID-KRISTALL-LINSEN



(57) Abstract: A lens system, especially a projection lens system for a microlithographic projection illumination system, comprising at least one fluoride crystal lens. The disruptive influence of birefringence is reduced by using a lens which is a lens (100) with a lens axis which is approximately perpendicular in relation to the crystal planes (100) or the equivalent crystal planes of the fluoride crystal. In lens systems consisting of at least two fluoride crystal lenses, it is useful to arrange the fluoride crystal lenses in such a way that they are twisted in relation to each other. The lens axes of the fluoride crystal lenses can thus point in crystal direction (111) or (110), in addition to direction (100). It is also possible to reduce the disruptive influence of birefringence by using groups with twisted (100) lenses and groups with other twisted lenses (111) or other twisted (110) lenses. The disruptive influence of birefringence can be reduced further by providing the optical element with a compensating coating.

(57) Zusammenfassung: Objektiv, insbesondere Projektionsobjektiv für eine Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage mit mindestens einer Fluorid-Kristall-Linse. Eine Reduzierung des störenden Einflusses der Doppelbrechung erzielt man, wenn diese Linse eine (100)-Linse mit

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

WO 02/093209 A3

WO 02/093209 A3 

Chemnitz (DE). **ULRICH, Wilhelm** [DE/DE]; Lederackerring 44, 73434 Aalen (DE). **ENKISCH, Birgit** [DE/DE]; Aalener Strasse 2a, 73447 Oberkochen (DE). **GERHARD, Michael** [DE/DE]; Bühelstrasse 4, 73432 Aalen (DE). **BRUNOTTE, Martin** [DE/DE]; Ilegelstrasse 47, 73431 Aalen (DE). **WAGNER, Christian** [DE/NL]; Steenstraat 131, NL-5521 KS Lierse (NL). **KAISER, Winfried** [DE/DI]; Fahrbachstrasse 150, 73431 Aalen (DE). **MAUL, Manfred** [DE/DE]; Elchweg 29, 73434 Aalen (DE). **ZACZEK, Christoph** [DE/DE]; Lauterner Strasse 37, 73540 Heubach (DE).

(84) Bestimmungsstaaten (regional): europäisches Patent (AT, BE, CH, CY, DE, DK, ES, FI, FR, GB, GR, IE, IT, LU, MC, NL, PT, SE, TR).

Erklärung gemäß Regel 4.17:

— *Erfindererklärung (Regel 4.17 Ziffer iv) nur für US*

Veröffentlicht:

— *mit internationalem Recherchenbericht*

(88) Veröffentlichungsdatum des internationalen

Recherchenberichts: 23. Oktober 2003

Zur Erklärung der Zweibuchstaben-Codes und der anderen Abkürzungen wird auf die Erklärungen ("Guidance Notes on Codes and Abbreviations") am Anfang jeder regulären Ausgabe der PCT-Gazette verwiesen.

(81) Bestimmungsstaaten (national): CN, DE, JP, KR, US.

einer Linsenchse ist, welche annähernd senkrecht auf den [100]-Kristallebenen oder auf den dazu äquivalenten Kristallebenen des Fluorid-Kristalls steht. Bei Objektiven mit mindestens zwei Fluorid-Kristall-Linsen ist es günstig, wenn die Fluorid-Kristall-Linsen gegeneinander verdreht angeordnet sind. Die Linsenchsen der Fluorid-Kristall-Linsen können dabei neben der (100)-Kristallrichtung auch in die (111)- oder in die (110)-Kristallrichtung weisen. Eine weitere Reduzierung des störenden Einflusses der Doppelbrechung erzielt man durch den gleichzeitigen Einsatz von Gruppen mit gegeneinander verdrehten (100)-Linsen und Gruppen mit gegeneinander verdrehten (111)-Linsen oder (110)-Linsen. Eine weitere Reduzierung des störenden Einflusses der Doppelbrechung erzielt man durch die Belegung eines optischen Elements mit einer Kompensations-Beschichtung.

【 国際調査報告 】

INTERNATIONAL SEARCH REPORT		International Application No. PCT/EP 02/05050
A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER IPC 7 G02B1/02 G02B5/30 G03F7/20		
According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC		
B. FIELDS SEARCHED Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols) IPC 7 G02B G03F B24B		
Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched		
Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practical, search terms used) EPO-Internal, PAJ, WPI Data, INSPEC		
C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category *	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
E	WO 02 093201 A (CORNING INC) 21 November 2002 (2002-11-21) abstract; figure 1	1
E	WO 02 097508 A (NIPPON KOGAKU KK) 5 December 2002 (2002-12-05) abstract; figures 1-4	1, 8, 49, 51
E	WO 02 099500 A (HOFFMAN JEFFREY M ; MCGUIRE JAMES P (US); OPTICAL RES ASSOCIATES (U) 12 December 2002 (2002-12-12) page 4 - page 5 page 50, line 3 - last line; figure 31 -/-	1-3, 8, 49-51, 56-58
<input checked="" type="checkbox"/> Further documents are listed in the continuation of box C. <input checked="" type="checkbox"/> Patent family members are listed in annex.		
* Special categories of cited documents: "A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance "E" earlier document but published on or after the international filing date "L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified) "O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means "P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed "T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention "X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone "Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, each combination being obvious to a person skilled in the art. "Z" document member of the same patent family		
Date of the actual completion of the international search	Date of mailing of the international search report	
27 February 2003	01 04 2003	
Name and mailing address of the ISA European Patent Office, P.O. Box 6818, Petersenstr. 2 NL - 2280 HW Rijswijk Tel: (+31-70) 340-2040, Tx: 31 651 epo nl Fax: (+31-70) 340-3016	Authorized officer Ciarrocca, M	

INTERNATIONAL SEARCH REPORT		International Application No. PCT/EP 02/05050
C.(Continuation) DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
P,X	BURNETT J H ET AL: "Intrinsic Birefringence in 157nm Materials" PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON 157NM LITHOGRAPHY, DANA POINT, CALIFORNIA, 15 May 2001 (2001-05-15), pages 1-13, XPO02218849 the whole document	1,8-14, 17-24, 31,44, 45,51,53
P,X	BURNETT J H ET AL: "Intrinsic Birefringence in calcium fluoride" PREPRINT HANDED OUT AT 2ND INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON 157NM LITHOGRAPHY IN DANA POINT, CALIFORNIA, 15 May 2001 (2001-05-15), XPO02232195 the whole document	1,8-14, 17-24, 31,44, 45,51-53
P,X	BURNETT J H ET AL: "Intrinsic birefringence in calcium fluoride and barium fluoride" PHYSICAL REVIEW B (CONDENSED MATTER AND MATERIALS PHYSICS), 15 DEC. 2001, APS THROUGH AIP, USA, vol. 64, no. 24, pages 241102/1-4, XPO02218846 ISSN: 0163-1829 page 241102-3, right-hand column, paragraph 2	1,8-14, 17-24, 31,44, 45,51-53
P,X	SHIRAIISHI N ET AL: "PROGRESS OF NIKON'S F2 EXPOSURE TOOL DEVELOPMENT" PROCEEDINGS OF THE SPIE, SPIE, BELLINGHAM, VA, US, vol. 4691, 5 - 7 March 2002, pages 594-601, XPO08010023 the whole document	1,8,51
X	US 6 201 634 B1 (SAKUMA SHIGERU ET AL) 13 March 2001 (2001-03-13)	8
Y		1-3,31, 44-46, 49,50
A	column 7, line 33 - line 44; figure 3 column 13, line 9 - line 30	32,51, 55,56,66
Y	Nicht-Vertrauliches Schreiben vom 07.05.01 "Re: Birefringence of calcium fluoride" von Chris Van Paski von International SEMATECH zu den Vertretern von Litho. PAG (Project Advisory Group) XPO02218847	1-3,31, 44-46, 49,50
A	the whole document	8,32,51, 55,56,66

	-/--	

INTERNATIONAL SEARCH REPORT		International Application No. PCT/EP 02/05050
C.(Continuation) DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	<p>PASTRNAK J ET AL: "Optical anisotropy of silicon single crystals" PHYSICAL REVIEW B (SOLID STATE), 15 APRIL 1971, USA, vol. 3, no. 8, pages 2567-2571, XP001109107 ISSN: 0556-2805 page 2569, right-hand column</p>	1
X	<p>WO 01 01182 A (CORNING INC ;MEDA GAUTAM (US); PRICE MICHAEL (US); RIVERA MICHAEL) 4 January 2001 (2001-01-04)</p>	8
A	<p>page 6, line 1 - line 26; figures 1-5</p>	1,31,32, 44-46, 49-51, 55,56,66
A	<p>US 5 652 745 A (ISHIKAWA TSUYOSHI ET AL) 29 July 1997 (1997-07-29) column 2, line 20 - line 24 column 4, line 22 - line 38; figure 1</p>	1,8,51
X	<p>WO 00 70407 A (SCHUSTER KARL HEINZ ;ZEISS CARL (DE); ZEISS STIFTUNG (DE)) 23 November 2000 (2000-11-23) page 10, paragraph 2; figure 2</p>	8
X	<p>PATENT ABSTRACTS OF JAPAN vol. 2000, no. 14, 5 March 2001 (2001-03-05) -& JP 2000 331927 A (CANON INC), 30 November 2000 (2000-11-30) abstract paragraph '0049!</p>	32,55
A	<p>abstract paragraph '0049!</p>	1,8,51
X	<p>PATENT ABSTRACTS OF JAPAN vol. 2000, no. 21, 3 August 2001 (2001-08-03) -& JP 2001 108801 A (FUKUDA TSUGUO;OPTRON INC), 20 April 2001 (2001-04-20) abstract; figures 3,4,6</p>	32
A	<p>abstract; figures 3,4,6</p>	55
A	<p>PATENT ABSTRACTS OF JAPAN vol. 1997, no. 10, 31 October 1997 (1997-10-31) & JP 09 166710 A (SANO FUJI KOKI KK), 24 June 1997 (1997-06-24) abstract</p>	32,55
A	<p>EP 0 103 485 A (SONY CORP) 21 March 1984 (1984-03-21) abstract; figure 4 page 2, line 33 -page 3, line 23; figures 1,2</p>	32,55

INTERNATIONAL SEARCH REPORT		International Application No. PCT/EP 02/05050
C. (Continuation) DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	DE 198 07 120 A (ZEISS CARL FA) 26 August 1999 (1999-08-26)	56,66
A	column 2, line 11 - line 26 column 2, line 43 - line 48	8,51
A	US 1 332 410 A (POTTS OSCERO W) 2 March 1920 (1920-03-02) page 1, line 56 - line 74; figures, 1-4	56,66
X	WO 91 14189 A (FIALA WERNER) 19 September 1991 (1991-09-19)	66
A	page 3, paragraph 2 page 4, last paragraph; figure 2 page 11, last paragraph - page 12, paragraph 1	8,51,56
X	EP 1 063 551 A (ZEISS CARL) 27 December 2000 (2000-12-27)	66
A	paragraph "0011"; paragraph "0020!"; figures 1,2 paragraph "0027!"; - paragraph "0029!"; figures 4,5	56
A	EP 0 857 985 A (ZEISS CARL ; ZEISS STIFTUNG (DE)) 12 August 1998 (1998-08-12) column 3, line 10 - line 21	56,66
A	"Re:Birefringence of calcium fluoride", Chris Van Peski von International SEMATECH, Schreiben vom 07.05.01 zu Herstellern von Linsen XP002218848 the whole document	1,8,31, 32, 49-51, 55,56,66
P,A	WO 01 50171 A (SCHUSTER KARL HEINZ ; BEIERL HELMUT (DE); ZEISS CARL (DE); ZEISS ST) 12 July 2001 (2001-07-12) cited in the application the whole document	4-7, 46-50

INTERNATIONAL SEARCH REPORT		International application No. EP02/05050
Box I Observations where certain claims were found unsearchable (Continuation of Item 1 of first sheet)		
This international search report has not been established in respect of certain claims under Article 17(2)(a) for the following reasons:		
1.	<input type="checkbox"/>	Claims Nos.: because they relate to subject matter not required to be searched by this Authority, namely:
2.	<input type="checkbox"/>	Claims Nos.: because they relate to parts of the international application that do not comply with the prescribed requirements to such an extent that no meaningful international search can be carried out, specifically:
3.	<input type="checkbox"/>	Claims Nos.: because they are dependent claims and are not drafted in accordance with the second and third sentences of Rule 6.4(a).
Box II Observations where unity of invention is lacking (Continuation of Item 2 of first sheet)		
This International Searching Authority found multiple inventions in this international application, as follows:		
SEE SUPPLEMENTAL SHEET		
1.	<input type="checkbox"/>	As all required additional search fees were timely paid by the applicant, this international search report covers all searchable claims.
2.	<input type="checkbox"/>	As all searchable claims could be searched without effort justifying an additional fee, this Authority did not invite payment of any additional fee.
3.	<input checked="" type="checkbox"/>	As only some of the required additional search fees were timely paid by the applicant, this international search report covers only those claims for which fees were paid, specifically claims Nos.: 1-68
4.	<input type="checkbox"/>	No required additional search fees were timely paid by the applicant. Consequently, this international search report is restricted to the invention first mentioned in the claims; it is covered by claims Nos.:
Remark on Protest		
	<input type="checkbox"/>	The additional search fees were accompanied by the applicant's protest.
	<input type="checkbox"/>	No protest accompanied the payment of additional search fees.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
EP02/05050

The International Searching Authority has determined that this international application contains multiple (groups of) inventions, namely

1. Claims 1-7, 31, 43-50

objective with lens made of fluoride crystal with an optical axis perpendicular to the {100} crystallographic plane.

2. Claims 8-30, 51-54 and 31, 43-50 where dependent on 8-30

objective with lenses of fluoride crystal with oppositely twisted optical axes, and method of production.

3. Claims 32-42, 55 and 43-50 where dependent on 32-42

objective with compensation coating to reduce the optical path differential between two orthogonally polarized beams.

4. Claims 56-68

method of producing lenses in which sheets of twisted crystalline material are joined together, and lenses produced thereby.

5. Claims 69-93

optical blank made of crystalline material with marking of the reference direction on the blank or its mount, and method of production thereof.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
 Information on patent family members

 International Application No.
 PCT/EP 02/05050

Patent document cited in search report	Publication date	Patent family member(s)	Publication date	
WO 02093201	A	21-11-2002	WO 02093201 A2	21-11-2002
WO 02097508	A	05-12-2002	WO 02097508 A1	05-12-2002
WO 02099500	A	12-12-2002	WO 02099500 A2	12-12-2002
US 6201634	B1	13-03-2001	JP 11326189 A	26-11-1999
			JP 2000128696 A	09-05-2000
			EP 1271185 A2	02-01-2003
			EP 0942297 A2	15-09-1999
			US 2001024314 A1	27-09-2001
WO 0101182	A	04-01-2001	EP 1224497 A1	24-07-2002
			WO 0101182 A1	04-01-2001
US 5652745	A	29-07-1997	JP 2894808 B2	24-05-1999
			JP 4068309 A	04-03-1992
			DE 4122709 A1	16-01-1992
			DE 9117205 U1	06-03-1997
			FR 2664394 A1	10-01-1992
			GB 2247099 A ,B	19-02-1992
WO 0070407	A	23-11-2000	DE 19942281 A1	16-11-2000
			WO 0033138 A1	08-06-2000
			WO 0070407 A1	23-11-2000
			EP 1141781 A1	10-10-2001
			EP 1097404 A1	09-05-2001
			JP 2002531876 T	24-09-2002
			JP 2002544569 T	24-12-2002
			US 2002149855 A1	17-10-2002
			US 2003007253 A1	09-01-2003
JP 2000331927	A	30-11-2000	NONE	
JP 2001108801	A	20-04-2001	NONE	
JP 09166710 1	A		NONE	
EP 0103485	A	21-03-1984	JP 59049508 A	22-03-1984
			DE 3374788 D1	14-01-1988
			EP 0103485 A1	21-03-1984
			US 4657350 A	14-04-1987
DE 19807120	A	26-08-1999	DE 19807120 A1	26-08-1999
			EP 0937999 A1	25-08-1999
			JP 11271680 A	08-10-1999
			TW 403842 B	01-09-2000
			US 6252712 B1	26-06-2001
US 1332410	A	02-03-1920	NONE	
WO 9114189	A	19-09-1991	WO 9114189 A1	19-09-1991
			AT 117810 T	15-02-1995
			AU 646249 B2	17-02-1994
			AU 7545591 A	10-10-1991
			CA 2078116 A1	16-09-1991
			DE 59104430 D1	09-03-1995
			EP 0520008 A1	30-12-1992

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
 Information on patent family members

 International Application No.
 PCT/EP 02/05050

Patent document cited in search report	Publication date	Patent family member(s)	Publication date	
WO 9114189	A	JP 6504137 T	12-05-1994	
		RU 2093866 C1	20-10-1997	
		US 5410375 A	25-04-1995	
EP 1063551	A	27-12-2000	DE 19929403 A1	28-12-2000
			EP 1063551 A1	27-12-2000
			JP 2001015431 A	19-01-2001
			TW 460709 B	21-10-2001
			US 6417974 B1	09-07-2002
EP 0857985	A	12-08-1998	DE 19704936 A1	13-08-1998
			EP 0857985 A1	12-08-1998
			JP 10239501 A	11-09-1998
			US 6451462 B1	17-09-2002
			US 2003017893 A1	16-01-2003
WO 0150171	A	12-07-2001	DE 10002626 A1	26-07-2001
			WO 0150171 A1	12-07-2001
			EP 1242843 A1	25-09-2002
			US 2003011894 A1	16-01-2003
			DE 10119861 A1	08-11-2001
			EP 1164399 A2	19-12-2001
			US 2002008861 A1	24-01-2002
			EP 1115019 A2	11-07-2001
			JP 2001221950 A	17-08-2001
			US 2002039175 A1	04-04-2002

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT		Inventar des Aktenzeichens PCT/EP 02/05050
A. KLASSIFIZIERUNG DES ANMELDUNGSGEGENSTANDES IPK 7 G02B1/02 G02B5/30 G03F7/20		
Nicht der internationalen Patentklassifikation (IPK) oder nach der nationalen Klassifikation und der IPK		
B. RESEARCHERTE GEBIETE Recherchierte Mindeststoff, -Mittelklassensystem und Klassifikationssymbole IPK 7 G02B G03F B24B		
Recherchierte aber nicht zum Mindeststoff gehörende Veröffentlichungen, soweit diese unter die recherchierten Gebiete fallen		
Während der internationalen Recherche konsultierte elektronische Datenbank (Name der Datenbank und evtl. verwendete Suchbegriffe) EPO-Internal, PAJ, WPI Data, INSPEC		
C. ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN		
Kategorie	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich in der Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
E	WO 02 093201 A (CORNING INC) 21. November 2002 (2002-11-21) Zusammenfassung; Abbildung 1 ---	1
E	WO 02 097508 A (NIPPON KOGAKU KK) 5. Dezember 2002 (2002-12-05) Zusammenfassung; Abbildungen 1-4 ---	1,8,49, 51
E	WO 02 099500 A (HOFFMAN JEFFREY M.; MCGUIRE JAMES P (US); OPTICAL RES ASSOCIATES (U) 12. Dezember 2002 (2002-12-12) Seite 4 - Seite 5 Seite 50, Zeile 3 - letzte Zeile; Abbildung 31 --- -/-	1-3,8, 49-51, 56-58
<input checked="" type="checkbox"/> Weitere Veröffentlichungen sind der Fortsetzung von Feld C zu entnehmen <input checked="" type="checkbox"/> Siehe Anhang Patentfamilie		
* Besondere Kategorien von angelegenen Veröffentlichungen: <ul style="list-style-type: none"> *A* Veröffentlichung, die den allgemeinen Stand der Technik definiert, aber nicht als besonders bedeutsam anzusehen ist *E* älteres Dokument, das jedoch erst am oder nach dem internationalen Anmeldedatum veröffentlicht worden ist *L* Veröffentlichung, die geeignet ist, einen Prioritätsanspruch zweifelsfrei einschwen zu lassen, oder durch die das Veröffentlichungsdatum einer anderen im Recherchenbericht genannten Veröffentlichung bezog, werden soll oder die aus einem anderen besonderen Grund angelegt ist (wie ausgeführt) *O* Veröffentlichung, die sich auf eine mündliche Offenbarung, eine Beratung, eine Ausstellung oder andere Maßnahmen bezieht *P* Veröffentlichung, die vor dem internationalen Anmeldedatum, aber nach dem beanspruchten Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist 		
** Spätere Veröffentlichung, die nach dem internationalen Anmeldedatum oder dem Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist und mit der Anmeldung nicht korrespondiert, sondern nur zum Vergleich des der Erfindung zugrundeliegenden Patentes oder der ihr zugrundeliegenden Technologie beigefügt ist		
X Veröffentlichung von besonderer Bedeutung, die beanspruchte Erfindung kann allein aufgrund dieser Veröffentlichung nicht als neu oder auf erfindungsgemäße Weise bestehend betrachtet werden		
Y Veröffentlichung von besonderer Bedeutung, die beanspruchte Erfindung kann nicht als auf erfindungsgemäße Weise bestehend betrachtet werden, wenn die Veröffentlichung mit einer oder mehreren anderen Veröffentlichungen dieser Kategorie in Verbindung gebracht wird und diese Verbindung für einen Fachmann nachvollziehbar ist		
Z Veröffentlichung, die Mitglied derselben Patentfamilie ist		
Datum des Abschlusses der internationalen Recherche	Abschlussdatum des internationalen Recherchenberichts	
27. Februar 2003	01 04 2003	
Name und Postenamt der internationalen Recherchbehörde Europäisches Patentamt, P. B. 1818 Palisaden 2 NL - 2500 XV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-3540, Tx. 3-651 epo.nl, Fax (+31-70) 340-3616	Sachverständiger Beauftragter Ciarrocca, M	

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT		Internationales Aktenzeichen PCT/EP 02/05050
C.(Fortsetzung) ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN		
Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch N°
P, X	BURNETT J H ET AL: "Intrinsic Birefringence in 157nm Materials" PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON 157NM LITHOGRAPHY, DANA POINT, CALIFORNIA, 15. Mai 2001 (2001-05-15), Seiten 1-13, XP002218849 das ganze Dokument	1,8-14, 17-24, 31,44, 45,51,53
P, X	BURNETT J H ET AL: "Intrinsic Birefringence in calcium fluoride" PREPRINT HARDED OUT AT 2ND INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON 157NM LITHOGRAPHY IN DANA POINT, CALIFORNIA, 15. Mai 2001 (2001-05-15), XP002232195 das ganze Dokument	1,8-14, 17-24, 31,44, 45,51-53
P, X	BURNETT J H ET AL: "Intrinsic birefringence in calcium fluoride and barium fluoride" PHYSICAL REVIEW B (CONDENSED MATTER AND MATERIALS PHYSICS), 15 DEC. 2001, APS THROUGH AIP, USA, Bd. 64, Nr. 24, Seiten 241102/1-4, XP002218846 ISSN: 0163-1829 Seite 241102-3, rechte Spalte, Absatz 2	1,8-14, 17-24, 31,44, 45,51-53
P, X	SHIRAIISHI N ET AL: "PROGRESS OF NIKON'S F2 EXPOSURE TOOL DEVELOPMENT" PROCEEDINGS OF THE SPIE, SPIE, BELLINGHAM, VA, US, Bd. 4691, 5. - 7. März 2002, Seiten 594-601, XP008010023 das ganze Dokument	1,8,51
X	US 6 201 634 B1 (SAKUMA SHIGERU ET AL) 13. März 2001 (2001-03-13)	8
Y		1-3,31, 44-46, 49,50
A	Spalte 7, Zeile 33 - Zeile 44; Abbildung 3 Spalte 13, Zeile 9 - Zeile 30	32,51, 55,56,66
Y	Nicht-Vertrauliches Schreiben vom 07.05.01 "Re: Birefringence of calcium fluoride" von Chris Van Peski von International SEMATECH zu den Vertretern von Litho. PAG (Project Advisory Group) XP002218847	1-3,31, 44-46, 49,50
A	das ganze Dokument	8,32,51, 55,56,66
	--- -/--	

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT		Internationales Aktenzeichen PCT/EP 02/05050
C/(Fortsetzung) ALS WESENTLICH ANGEBEHENE UNTERLAGEN		
Kategorie	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Beitrag Anspruch Nr.
A	PASTRNAK J ET AL: "Optical anisotropy of silicon single crystals" PHYSICAL REVIEW B (SOLID STATE), 15 APRIL 1971, USA, Bd. 3, Nr. 8, Seiten 2567-2571, XPO01109107 ISSN: 0556-2805 Seite 2569, rechte Spalte	1
X	WO 01 01182 A (CORNING INC ;MEDA GAUTAM (US); PRICE MICHAEL (US); RIVERA MICHAEL) 4. Januar 2001 (2001-01-04)	8
A	Seite 6, Zeile 1 - Zeile 26; Abbildungen 1-5	1,31,32, 44-46, 49-51, 55,56,66
A	US 5 652 745 A (ISHIKAWA TSUYOSHI, ET,AL) 29. Juli 1997 (1997-07-29) Spalte 2, Zeile 20 - Zeile 24 Spalte 4, Zeile 22 - Zeile 38; Abbildung 1	1,8,51
X	WO 00 70407 A (SCHUSTER KARL HEINZ ;ZEISS CARL (DE); ZEISS STIFTUNG (DE)) 23. November 2000 (2000-11-23) Seite 10, Absatz 2; Abbildung 2	8
X	PATENT ABSTRACTS OF JAPAN vol. 2000, no. 14, 5. März 2001 (2001-03-05) -& JP 2000 331927 A (CANON INC), 30. November 2000 (2000-11-30)	32,55
A	Zusammenfassung Absatz '0049!	1,8,51
X	PATENT ABSTRACTS OF JAPAN vol. 2000, no. 21, 3. August 2001 (2001-08-03) -& JP 2001 108801 A (FUKUDA TSUGUO;OPTRON INC), 20. April 2001 (2001-04-20)	32
A	Zusammenfassung; Abbildungen 3,4,6	55
A	PATENT ABSTRACTS OF JAPAN vol. 1997, no. 10, 31. Oktober 1997 (1997-10-31) & JP 09 166710 A (SANO FUJI KOKI KK), 24. Juni 1997 (1997-06-24)	32,55
	Zusammenfassung	

	-/--	

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT		Internationales Aktenzeichen PCT/EP 02/05050
C.(Fortsetzung) AUS WESSENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN		
Kategorie	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Beispielen genannten Teile	Beitr. Anspruch Nr.
A	EP 0 103 485 A (SONY CORP) 21. März 1984 (1984-03-21) Zusammenfassung; Abbildung 4 Seite 2, Zeile 33 -Seite 3, Zeile 23; Abbildungen 1,2 ----	32,55
X	DE 198 07 120 A (ZEISS CARL FA) 26. August 1999 (1999-08-26)	56,66
A	Spalte 2, Zeile 11 - Zeile 26 Spalte 2, Zeile 43 - Zeile 48	8,51
A	US 1 332 410 A (POTTS OSCERO W) 2. März 1920 (1920-03-02) Seite 1, Zeile 56 - Zeile 74; Abbildungen 1-4 ----	56,66
X	W0 91 14189 A (FIALA WERNER) 19. September 1991 (1991-09-19)	66
A	Seite 3, Absatz 2 Seite 4, letzter Absatz; Abbildung 2 Seite 11, letzter Absatz -Seite 12, Absatz 1 ----	8,51,56
X	EP 1 063 551 A (ZEISS CARL) 27. Dezember 2000 (2000-12-27)	66
A	Absatz '0011! Absatz '0020!; Abbildungen 1,2 Absatz '0027! - Absatz '0029!; Abbildungen 4,5 ----	56
A	EP 0 857 985 A (ZEISS CARL ;ZEISS STIFTUNG (DE)) 12. August 1998 (1998-08-12) Spalte 3, Zeile 10 - Zeile 21 ----	56,66
A	"Re:Birefringence of calcium fluoride", Chris Van Peski von International SEMATECH, Schreiben vom 07.05.01 zu Herstellern von Linsen XP002218848 das ganze Dokument ----	1,8,31, 32, 49-51, 55,56,66
P,A	W0 01 50171 A (SCHUSTER KARL HEINZ ;BEIERL HELMUT (DE); ZEISS CARL (DE); ZEISS ST) 12. Juli 2001 (2001-07-12) in der Anmeldung erwähnt das ganze Dokument -----	4-7, 46-50

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT		Internationale Anträge PCT/EP 02/05050
Feld I Bemerkungen zu den Ansprüchen, die sich als nicht recherchierbar erwiesen haben (Fortsetzung von Punkt 2 auf Blatt 1)		
Gemäß Artikel 17(2)a) wurde aus folgenden Gründen für bestimmte Ansprüche kein Recherchenbericht erstellt:		
1.	<input type="checkbox"/>	Ansprüche Nr. _____ weil sie sich auf Gegenstände beziehen, zu deren Recherche die Behörde nicht verpflichtet ist, nämlich _____
2.	<input type="checkbox"/>	Ansprüche Nr. _____ weil sie sich auf Teile der internationalen Anmeldung beziehen, die den vorgeschriebenen Anforderungen so wenig entsprechen, daß eine sinnvolle internationale Recherche nicht durchgeführt werden kann, nämlich _____
3.	<input type="checkbox"/>	Ansprüche Nr. _____ weil es sich dabei um abhängige Ansprüche handelt, die nicht entsprechend Satz 2 und 3 der Regel 6.4 a) abgefaßt sind.
Feld II Bemerkungen bei mangelnder Einheitlichkeit der Erfindung (Fortsetzung von Punkt 3 auf Blatt 1)		
Die internationale Recherchenbehörde hat festgestellt, daß diese internationale Anmeldung mehrere Erfindungen enthält:		
siehe Zusatzblatt		
1.	<input type="checkbox"/>	Da der Anmelder alle erforderlichen zusätzlichen Recherchegebühren rechtzeitig entrichtet hat, erstreckt sich dieser internationale Recherchenbericht auf alle recherchierbaren Ansprüche.
2.	<input type="checkbox"/>	Da für alle recherchierbaren Ansprüche die Recherche ohne einen Arbeitsaufwand durchgeführt werden könnte, der eine zusätzliche Recherchegebühr gerechtfertigt hätte, hat die Behörde nicht zur Zahlung einer solchen Gebühr aufgefordert.
3.	<input checked="" type="checkbox"/>	Da der Anmelder nur einige der erforderlichen zusätzlichen Recherchegebühren rechtzeitig entrichtet hat, erstreckt sich dieser internationale Recherchenbericht nur auf die Ansprüche, für die Gebühren entrichtet worden sind, nämlich auf die Ansprüche Nr. _____ 1-68
4.	<input type="checkbox"/>	Der Anmelder hat die erforderlichen zusätzlichen Recherchegebühren nicht rechtzeitig entrichtet. Der internationale Recherchenbericht beschränkt sich daher auf die in den Ansprüchen zuerst erwähnte Erfindung; diese ist in folgenden Ansprüchen enthalten:
Bemerkungen hinsichtlich eines Widerspruchs		
	<input type="checkbox"/>	Die zusätzlichen Gebühren wurden vom Anmelder unter Widerspruch gezahlt.
	<input checked="" type="checkbox"/>	Die Zahlung zusätzlicher Recherchegebühren erfolgte ohne Widerspruch.

Internationales Aktenzeichen PCT/EP 02/05050

WEITERE ANGABEN	PCT/ISA/ 210
<p>Die internationale Recherchenbehörde hat festgestellt, daß diese internationale Anmeldung mehrere (Gruppen von) Erfindungen enthält, nämlich:</p> <ol style="list-style-type: none">1. Ansprüche: 1-7,31,43-50 Objektiv mit Linse aus Fluorid-Kristall mit einer Linsenachse senkrecht auf den {100} Kristallebene2. Ansprüche: 8-30,51-54 und 31,43-50 wenn von 8-30 abhängig Objektiv mit Linsen aus Fluorid-Kristall mit gegeneinander verdrehten Linsenachsen und Herstellungsverfahren3. Ansprüche: 32-42,55 und 43-50 wenn von 32-42 abhängig Objektiv mit Kompensations-Beschichtung zur Reduzierung des optischen Wegunterschieds zwischen zwei orthogonal polarisierten Strahlen4. Ansprüche: 56-68 Linsenherstellverfahren in dem Platten aus verdrehtem Kristallmaterial zueinander gefügt werden und dadurch hergestellte Linse5. Ansprüche: 69-93 Optischer Rohling aus Kristallmaterial mit Markierung der Bezugsrichtung auf dem Rohling oder seiner Haltefassung und dessen Herstellungsverfahren	

INTERNATIONAL RESEARCH REPORT		Inventors' Address		
Angabe zu Veröffentlichungen, die zur selben Patentfamilie gehören		PCT/EP 02/05050		
Im Forschungsbericht angegebenes Patentdokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung	
WO 02093201	A	21-11-2002	WO 02093201 A2	21-11-2002
WO 02097508	A	05-12-2002	WO 02097508 A1	05-12-2002
WO 02099500	A	12-12-2002	WO 02099500 A2	12-12-2002
US 6201634	BI	13-03-2001	JP 11326189 A	26-11-1999
			JP 2000128696 A	09-05-2000
			EP 1271185 A2	02-01-2003
			EP 0942297 A2	15-09-1999
			US 2001024314 A1	27-09-2001
WO 0101182	A	04-01-2001	EP 1224497 A1	24-07-2002
			WO 0101182 A1	04-01-2001
US 5652745	A	29-07-1997	JP 2894808 B2	24-05-1999
			JP 4068509 A	04-03-1992
			DE 4122709 A1	16-01-1992
			DE 9117205 U1	06-03-1997
			FR 2664394 A1	10-01-1992
			GB 2247099 A, B	19-02-1992
WO 0070407	A	23-11-2000	DE 19942281 A1	16-11-2000
			WO 0033138 A1	08-06-2000
			WO 0070407 A1	23-11-2000
			EP 1141781 A1	10-10-2001
			EP 1097404 A1	09-05-2001
			JP 2002531878 T	24-09-2002
			JP 2002544569 T	24-12-2002
			US 2002149855 A1	17-10-2002
			US 2003007253 A1	09-01-2003
JP 2000331927	A	30-11-2000	KEINE	
JP 2001108801	A	20-04-2001	KEINE	
JP 09166710 I	A		KEINE	
EP 0103485	A	21-03-1984	JP 59049508 A	22-03-1984
			DE 3374788 D1	14-01-1988
			EP 0103485 A1	21-03-1984
			US 4657350 A	14-04-1987
DE 19807120	A	26-08-1999	DE 19807120 A1	26-08-1999
			EP 0937599 A1	25-08-1999
			JP 11271680 A	08-10-1999
			TW 403842 B	01-09-2000
			US 6252712 B1	26-06-2001
US 1332410	A	02-03-1920	KEINE	
WO 9114189	A	19-09-1991	WO 9114189 A1	19-09-1991
			AT 117810 T	15-02-1995
			AU 646249 B2	17-02-1994
			AU 7545591 A	10-10-1991
			CA 2078116 A1	16-09-1991
			DE 59104430 D1	09-03-1995
			EP 0520008 A1	30-12-1992

Formblatt PCT/ISA/210 (Anhang Patentfamilie) (Juli 1992)

INTERNATIONAL RESEARCH REPORT		Internationales Abgrenzzeichen		
Arbeiten zu Veröffentlichungen, die zur selben Patentfamilie gehören		PCT/EP 02/05050		
Im Forschungsbericht eingeführtes Patentdokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung	
WO 9114189	A	JP 6504137 T	12-05-1994	
		RU 2093866 C1	20-10-1997	
		US 5410375 A	25-04-1995	
EP 1063551	A	27-12-2000	DE 19929403 A1	28-12-2000
			EP 1063551 A1	27-12-2000
			JP 2001015431 A	19-01-2001
			TW 460709 B	21-10-2001
			US 6417974 B1	09-07-2002
EP 0857985	A	12-08-1998	DE 19704936 A1	13-08-1998
			EP 0857985 A1	12-08-1998
			JP 10239501 A	11-09-1998
			US 6451462 B1	17-09-2002
			US 2003012893 A1	16-01-2003
WO 0150171	A	12-07-2001	DE 10002626 A1	26-07-2001
			WO 0150171 A1	12-07-2001
			EP 1242843 A1	25-09-2002
			US 2003011894 A1	16-01-2003
			DE 10119861 A1	08-11-2001
			EP 1164399 A2	19-12-2001
			US 2002008861 A1	24-01-2002
			EP 1115019 A2	11-07-2001
			JP 2001221950 A	17-08-2001
			US 2002039175 A1	04-04-2002

フロントページの続き

- (31)優先権主張番号 101 27 320.7
 (32)優先日 平成13年6月6日(2001.6.6)
 (33)優先権主張国 ドイツ(DE)
- (31)優先権主張番号 102 10 782.3
 (32)優先日 平成14年3月12日(2002.3.12)
 (33)優先権主張国 ドイツ(DE)
- (81)指定国 EP(AT, BE, CH, CY, DE, DK, ES, FI, FR, GB, GR, IE, IT, LU, MC, NL, PT, SE, TR), CN, DE, JP, KR, US
- (72)発明者 ウーリッヒ, ヴィルヘルム
 ドイツ連邦共和国・7 3 4 3 4 アーレン・レーダーアッカリンク・4 4
- (72)発明者 エンキッシュ, ビルギット
 ドイツ連邦共和国・7 3 4 4 7 オーベルコーヒエン・アーレナー シュトラーセ・2 エイ
- (72)発明者 ゲルハルト, ミヒャエル
 ドイツ連邦共和国・7 3 4 3 2 アーレン・ビュールシュトラーセ・4
- (72)発明者 ブルノッテ, マルティン
 ドイツ連邦共和国・7 3 4 3 1 アーレン・ハイゲルシュトラーセ・4 7
- (72)発明者 ヴァグナー, クリスティアン
 オランダ国・エヌエル - 5 5 2 1 ケイエス イーセル・スティーンシュトラート・1 3 1
- (72)発明者 カイザー, ヴィンフリート
 ドイツ連邦共和国・7 3 4 3 1 アーレン・ファールバッハシュトラーセ・1 5 0
- (72)発明者 マウル, マンフレッド
 ドイツ連邦共和国・7 3 4 3 4 アーレン・エルヒヴェック・2 9
- (72)発明者 ツァクツェック, クリストフ
 ドイツ連邦共和国・7 3 5 4 0 ホイバッハ・ラウテルナー シュトラーセ・3 7
- Fターム(参考) 2H087 KA21 LA01 NA01 NA09 PA15 PA17 PB20 RA05 RA12 RA13
 RA32 TA01 TA03 TA05 UA04
 5F046 CB12 CB25