

(19) 日本国特許庁(JP)

再公表特許(A1)

(11) 国際公開番号

W02003/001271

発行日 平成16年10月14日(2004.10.14)

(43) 国際公開日 平成15年1月3日(2003.1.3)

(51) Int. Cl.⁷

G02B 13/24
G03F 7/20
H01L 21/027

F I

G02B 13/24
G03F 7/20 521
H01L 21/30 515D

審査請求 未請求 予備審査請求 有 (全 35 頁)

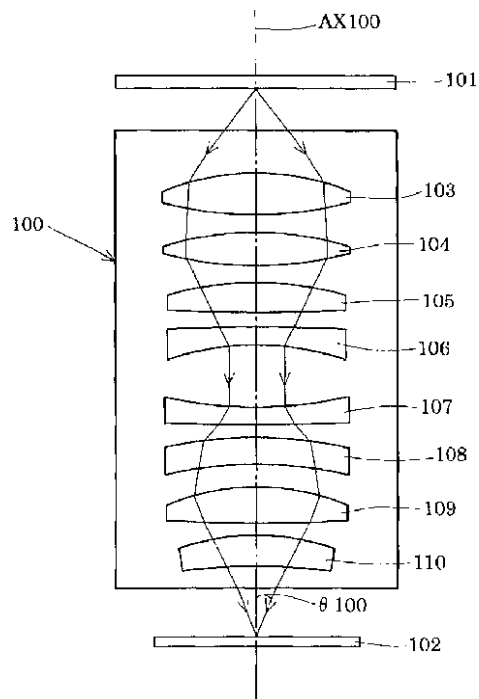
| | | | |
|--------------|------------------------------|----------|---|
| 出願番号 | 特願2003-507610 (P2003-507610) | (71) 出願人 | 000004112 株式会社ニコン 東京都千代田区丸の内3丁目2番3号 |
| (21) 国際出願番号 | PCT/JP2002/006131 | (74) 代理人 | 100095256 弁理士 山口 孝雄 |
| (22) 国際出願日 | 平成14年6月19日(2002.6.19) | (72) 発明者 | 白石 直正 東京都千代田区丸の内3丁目2番3号 株式会社ニコン内 |
| (31) 優先権主張番号 | 特願2001-185825 (P2001-185825) | (72) 発明者 | 大村 泰弘 東京都千代田区丸の内3丁目2番3号 株式会社ニコン内 |
| (32) 優先日 | 平成13年6月20日(2001.6.20) | | |
| (33) 優先権主張国 | 日本国(JP) | | |
| (31) 優先権主張番号 | 特願2001-206935 (P2001-206935) | | |
| (32) 優先日 | 平成13年7月6日(2001.7.6) | | |
| (33) 優先権主張国 | 日本国(JP) | | |

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 光学系および該光学系を備えた露光装置

(57) 【要約】

たとえば蛍石のような複屈折性の結晶材料を用いても、複屈折の影響を実質的に受けることなく良好な光学性能を確保することのできる光学系。光軸(AX100)と結晶軸[111]とが一致する複数の結晶レンズから構成された第1レンズ群(105, 106)と、光軸と結晶軸[100]とが一致する複数の結晶レンズから構成された第2レンズ群(109, 110)とを備えている。第1レンズ群は第1角度だけ相対回転した位置関係を有する第1Aレンズ群と第1Bレンズ群とを有し、第2レンズ群は第2角度だけ相対回転した位置関係を有する第2Aレンズ群と第2Bレンズ群とを有する。



【特許請求の範囲】

【請求項 1】

立方晶系に属する結晶で形成された複数の光学素子を含む光学系において、前記光学系の光軸と結晶軸 [1 1 1] または該結晶軸と光学的に等価な結晶軸とがほぼ一致するように設定された複数の光学素子から構成された第 1 素子群と、前記光軸と結晶軸 [1 0 0] または該結晶軸と光学的に等価な結晶軸とがほぼ一致するように設定された複数の光学素子から構成された第 2 素子群とを備え、前記第 1 素子群は、前記光軸を中心として第 1 角度だけ相対的に回転した位置関係を有する第 1 A 素子群と第 1 B 素子群とを有し、前記第 2 素子群は、前記光軸を中心として第 2 角度だけ相対的に回転した位置関係を有する第 2 A 素子群と第 2 B 素子群とを有し、前記光軸に対して所定範囲の角度をなす光束の前記第 1 A 素子群における光学素子中の光路長と前記第 1 B 素子群における光学素子中の光路長とがほぼ等しく、前記光軸に対して前記所定範囲の角度をなす光束の前記第 2 A 素子群における光学素子中の光路長と前記第 2 B 素子群における光学素子中の光路長とがほぼ等しく、前記光軸に対して前記所定範囲の角度をなす光束の前記第 1 素子群における光学素子中の光路長と前記第 2 素子群における光学素子中の光路長とが所定の倍率にしたがって設定されていることを特徴とする光学系。

【請求項 2】

請求の範囲第 1 項に記載の光学系において、前記第 1 素子群における光学素子中の光路長は、前記第 2 素子群における光学素子中の光路長の約 1.5 倍に設定されていることを特徴とする光学系。

【請求項 3】

請求の範囲第 2 項に記載の光学系において、前記第 2 素子群における光学素子中の光路長の 1.5 倍と前記第 1 素子群における光学素子中の光路長との差が、前記光束の波長を (nm) としたとき、 $\pm 1.0 \times 10^{-6} \times 10^3$ (cm) 以内に設定されていることを特徴とする光学系。

【請求項 4】

請求の範囲第 1 項乃至第 3 項のいずれか 1 項に記載の光学系において、前記第 1 A 素子群における光学素子中の光路長と前記第 1 B 素子群における光学素子中の光路長との差が、前記光束の波長を (nm) としたとき、 $\pm 0.5 \times 10^{-6} \times 10^3$ (cm) 以内に設定されていることを特徴とする光学系。

【請求項 5】

請求の範囲第 1 項乃至第 4 項のいずれか 1 項に記載の光学系において、前記第 2 A 素子群における光学素子中の光路長と前記第 2 B 素子群における光学素子中の光路長との差が、前記光束の波長を (nm) としたとき、 $\pm 0.5 \times 10^{-6} \times 10^3$ (cm) 以内に設定されていることを特徴とする光学系。

【請求項 6】

請求の範囲第 1 項乃至第 5 項のいずれか 1 項に記載の光学系において、前記所定範囲の角度は、前記光学系の像側開口数の 0.6 倍に対応する角度よりも大きく且つ前記像側開口数の 0.9 倍に対応する角度よりも小さいことを特徴とする光学系。

【請求項 7】

請求の範囲第 1 項乃至第 6 項のいずれか 1 項に記載の光学系において、前記第 1 A 素子群、前記第 1 B 素子群、前記第 2 A 素子群、および前記第 2 B 素子群のそれぞれは、少なくとも 1 つの光学素子を有することを特徴とする光学系。

【請求項 8】

立方晶系に属する結晶で形成された複数の光学素子を含む光学系において、前記光学系の光軸と結晶軸 [1 1 0] または該結晶軸と光学的に等価な結晶軸とがほぼ一致するように設定された複数の光学素子からそれぞれ構成された第 3 素子群と第 4 素子群とを備え、

前記第 3 素子群は、前記光軸を中心として第 3 角度だけ相対的に回転した位置関係を有する第 3 A 素子群と第 3 B 素子群とを有し、

前記第 4 素子群は、前記光軸を中心として第 4 角度だけ相対的に回転した位置関係を有する第 4 A 素子群と第 4 B 素子群とを有し、

前記第 3 素子群と前記第 4 素子群とは、前記光軸を中心として第 5 角度だけ相対的に回転した位置関係を有し、

前記光軸に対して所定範囲の角度をなす光束の前記第 3 A 素子群における光学素子中の光路長と前記第 3 B 素子群における光学素子中の光路長とがほぼ等しく、

前記光軸に対して前記所定範囲の角度をなす光束の前記第 4 A 素子群における光学素子中の光路長と前記第 4 B 素子群における光学素子中の光路長とがほぼ等しく、

前記光軸に対して前記所定範囲の角度をなす光束の前記第 3 素子群における光学素子中の光路長と前記第 4 素子群における光学素子中の光路長とが所定の倍率にしたがって設定されていることを特徴とする光学系。

10

【請求項 9】

請求の範囲第 8 項に記載の光学系において、

前記第 3 素子群における光学素子中の光路長と前記第 4 素子群における光学素子中の光路長とがほぼ等しく設定されていることを特徴とする光学系。

【請求項 10】

請求の範囲第 9 項に記載の光学系において、

前記第 3 素子群における光学素子中の光路長と前記第 4 素子群における光学素子中の光路長との差が、前記光束の波長を (nm) としたとき、 $\pm 1.0 \times 10^{-6} \times \lambda^3$ (cm) 以内に設定されていることを特徴とする光学系。

20

【請求項 11】

請求の範囲第 8 項乃至第 10 項のいずれか 1 項に記載の光学系において、

前記第 3 A 素子群における光学素子中の光路長と前記第 3 B 素子群における光学素子中の光路長との差が、前記光束の波長を (nm) としたとき、 $\pm 0.5 \times 10^{-6} \times \lambda^3$ (cm) 以内に設定されていることを特徴とする光学系。

【請求項 12】

請求の範囲第 8 項乃至第 11 項のいずれか 1 項に記載の光学系において、

前記第 4 A 素子群における光学素子中の光路長と前記第 4 B 素子群における光学素子中の光路長との差が、前記光束の波長を (nm) としたとき、 $\pm 0.5 \times 10^{-6} \times \lambda^3$ (cm) 以内に設定されていることを特徴とする光学系。

30

【請求項 13】

請求の範囲第 8 項乃至第 12 項のいずれか 1 項に記載の光学系において、

前記光軸と結晶軸 [100] または該結晶軸と光学的に等価な結晶軸とがほぼ一致するように設定された複数の光学素子から構成された第 5 素子群をさらに備え、

前記第 5 素子群は、前記光軸を中心として第 6 角度だけ相対的に回転した位置関係を有する第 5 A 素子群と第 5 B 素子群とを有し、

前記光軸に対して前記所定範囲の角度をなす光束の前記第 5 A 素子群における光学素子中の光路長と前記第 5 B 素子群における光学素子中の光路長とがほぼ等しく、

前記光軸に対して前記所定範囲の角度をなす光束の前記第 3 素子群における光学素子中の光路長と前記第 4 素子群における光学素子中の光路長との和と、前記第 5 素子群における光学素子中の光路長とが所定の倍率にしたがって設定されていることを特徴とする光学系。

40

【請求項 14】

請求の範囲第 13 項に記載の光学系において、

前記第 3 素子群および前記第 4 素子群における光学素子中の光路長の和は、前記第 5 素子群における光学素子中の光路長の約 4 倍に設定されていることを特徴とする光学系。

【請求項 15】

請求の範囲第 14 項に記載の光学系において、

50

前記第 5 素子群における光学素子中の光路長の約 4 倍と前記第 3 素子群および前記第 4 素子群における光学素子中の光路長の和との差が、前記光束の波長を (nm) としたとき、 $\pm 2.7 \times 10^{-6} \times 3$ (cm) 以内に設定されていることを特徴とする光学系。

【請求項 16】

請求の範囲第 13 項乃至第 15 項のいずれか 1 項に記載の光学系において、前記第 5 A 素子群における光学素子中の光路長と前記第 5 B 素子群における光学素子中の光路長との差が、前記光束の波長を (nm) としたとき、 $\pm 0.5 \times 10^{-6} \times 3$ (cm) 以内に設定されていることを特徴とする光学系。

【請求項 17】

請求の範囲第 13 項乃至第 16 項のいずれか 1 項に記載の光学系において、前記第 3 A 素子群、前記第 3 B 素子群、前記第 4 A 素子群、前記第 4 B 素子群、前記第 5 A 素子群、および前記第 5 B 素子群のそれぞれは、少なくとも 1 つの光学素子を有することを特徴とする光学系。

10

【請求項 18】

請求の範囲第 8 項乃至第 17 項のいずれか 1 項に記載の光学系において、前記所定範囲の角度は、前記光学系の像側開口数の 0.6 倍に対応する角度よりも大きく且つ前記像側開口数の 0.9 倍に対応する角度よりも小さいことを特徴とする光学系。

【請求項 19】

請求の範囲第 13 項乃至第 18 項のいずれか 1 項に記載の光学系において、前記第 5 A 素子群と前記第 5 B 素子群とは前記光軸に沿って互いに近接して配置されていることを特徴とする光学系。

20

【請求項 20】

立方晶系に属する結晶で形成された複数の光学素子を含む光学系において、前記光学系の光軸と結晶軸 [110] または該結晶軸と光学的に等価な結晶軸とがほぼ一致するように設定された複数の光学素子からそれぞれ構成された第 6 素子群と第 7 素子群と第 8 素子群と第 9 素子群とを備え、前記第 7 素子群は、前記第 6 素子群に対して前記光軸を中心として所定の向きに第 7 角度だけ回転した位置関係を有し、前記第 8 素子群は、前記第 7 素子群に対して前記光軸を中心として前記所定の向きに前記第 7 角度だけ回転した位置関係を有し、前記第 9 素子群は、前記第 8 素子群に対して前記光軸を中心として前記所定の向きに前記第 7 角度だけ回転した位置関係を有し、前記光軸に対して所定範囲の角度をなす光束の前記第 6 素子群における光学素子中の光路長と、前記光軸に対して前記所定範囲の角度をなす光束の前記第 7 素子群における光学素子中の光路長と、前記光軸に対して前記所定範囲の角度をなす光束の前記第 8 素子群における光学素子中の光路長と、前記光軸に対して前記所定範囲の角度をなす光束の前記第 9 素子群における光学素子中の光路長とが互いにほぼ等しいことを特徴とする光学系。

30

【請求項 21】

請求の範囲第 20 項に記載の光学系において、前記第 6 素子群における光学素子中の光路長と、前記第 7 素子群における光学素子中の光路長と、前記第 8 素子群における光学素子中の光路長と、前記第 9 素子群における光学素子中の光路長とから任意に選択された 2 つの光路長の差が、前記光束の波長を (nm) としたとき、 $\pm 0.5 \times 10^{-6} \times 3$ (cm) 以内に設定されていることを特徴とする光学系。

40

【請求項 22】

請求の範囲第 20 項または第 21 項に記載の光学系において、前記光軸と結晶軸 [100] または該結晶軸と光学的に等価な結晶軸とがほぼ一致するように設定された複数の光学素子から構成された第 10 素子群をさらに備え、前記第 10 素子群は、前記光軸を中心として第 8 角度だけ相対的に回転した位置関係を有する第 10 A 素子群と第 10 B 素子群とを有し、

50

前記光軸に対して前記所定範囲の角度をなす光束の前記第10A素子群における光学素子中の光路長と前記第10B素子群における光学素子中の光路長とがほぼ等しいことを特徴とする光学系。

【請求項23】

請求の範囲第22項に記載の光学系において、

前記第10A素子群における光学素子中の光路長と前記第10B素子群における光学素子中の光路長との差が、前記光束の波長を (nm) としたとき、 $\pm 0.5 \times 10^{-6} \times 3$ (cm) 以内に設定されていることを特徴とする光学系。

【請求項24】

請求の範囲第22項または第23項に記載の光学系において、

前記第6素子群における光学素子中の光路長と前記第7素子群における光学素子中の光路長と前記第8素子群における光学素子中の光路長と前記第9素子群における光学素子中の光路長との和と、前記第10素子群における光学素子中の光路長とが所定の倍率にしたがって設定されていることを特徴とする光学系。

10

【請求項25】

請求の範囲第24項に記載の光学系において、

前記第6素子群乃至前記第9素子群における光学素子中の光路長の和は、前記第10素子群における光学素子中の光路長の約4倍に設定されていることを特徴とする光学系。

【請求項26】

請求の範囲第25項に記載の光学系において、

前記第10素子群における光学素子中の光路長の約4倍と前記第6素子群乃至前記第9素子群における光学素子中の光路長の和との差が、前記光束の波長を (nm) としたとき、 $\pm 2.7 \times 10^{-6} \times 3$ (cm) 以内に設定されていることを特徴とする光学系。

20

【請求項27】

請求の範囲第20項乃至第26項のいずれか1項に記載の光学系において、

前記光学系の光軸と結晶軸 [111] または該結晶軸と光学的に等価な結晶軸とがほぼ一致するように設定された複数の光学素子から構成された第11素子群をさらに備え、前記第11素子群は、前記光軸を中心として第9角度だけ相対的に回転した位置関係を有する第11A素子群と第11B素子群とを有し、

前記光軸に対して前記所定範囲の角度をなす光束の前記第11A素子群における光学素子中の光路長と前記第11B素子群における光学素子中の光路長とがほぼ等しいことを特徴とする光学系。

30

【請求項28】

請求の範囲第27項に記載の光学系において、

前記第11A素子群における光学素子中の光路長と前記第11B素子群における光学素子中の光路長との差が、前記光束の波長を (nm) としたとき、 $\pm 0.5 \times 10^{-6} \times 3$ (cm) 以内に設定されていることを特徴とする光学系。

【請求項29】

請求の範囲第27項または第28項に記載の光学系において、

前記第6素子群乃至前記第9素子群における光学素子中の光路長の和の3倍と前記第11素子群における光学素子中の光路長の8倍との総和は、前記第10素子群における光学素子中の光路長の約1.2倍に設定されていることを特徴とする光学系。

40

【請求項30】

請求の範囲第29項に記載の光学系において、

前記第6素子群乃至前記第9素子群における光学素子中の光路長の和を L_{69} (cm) とし、前記第10素子群における光学素子中の光路長を L_{10} (cm) とし、前記第11素子群における光学素子中の光路長を L_{11} (cm) とし、前記光束の波長を (nm) としたとき、

$$| 3 \times L_{69} - 1.2 \times L_{10} + 8 \times L_{11} | \leq 8.0 \times 10^{-6} \times 3$$

の条件を満足することを特徴とする光学系。

50

【請求項 3 1】

請求の範囲第 2 0 項乃至第 3 0 項のいずれか 1 項に記載の光学系において、前記所定範囲の角度は、前記光学系の像側開口数の 0 . 6 倍に対応する角度よりも大きく且つ前記像側開口数の 0 . 9 倍に対応する角度よりも小さいことを特徴とする光学系。

【請求項 3 2】

請求の範囲第 2 0 項乃至第 3 1 項のいずれか 1 項に記載の光学系において、前記第 6 素子群乃至前記第 1 0 素子群のそれぞれは、少なくとも 1 つの光学素子を有することを特徴とする光学系。

【請求項 3 3】

請求の範囲第 1 項乃至第 3 2 項のいずれか 1 項に記載の光学系において、前記結晶はフッ化カルシウム結晶またはフッ化バリウム結晶であることを特徴とする光学系。

10

【請求項 3 4】

マスクを照明するための照明系と、前記マスクに形成されたパターンの像を感光性基板上に形成するための請求の範囲第 1 項乃至第 3 3 項のいずれか 1 項に記載の光学系とを備えていることを特徴とする露光装置。

【請求項 3 5】

請求の範囲第 3 4 項に記載の露光装置を用いて前記マスクのパターンを前記感光性基板に露光する露光工程と、前記露光工程により露光された前記感光性基板を現像する現像工程とを含むことを特徴とするマイクロデバイスの製造方法。

20

【発明の詳細な説明】

技術分野

本発明は、光学系および該光学系を備えた露光装置に関し、特に半導体素子や液晶表示素子などのマイクロデバイスをフォトリソグラフィ工程で製造する際に使用される露光装置に好適な投影光学系に関するものである。

背景技術

半導体集積回路や液晶ディスプレイ等の電子デバイス（マイクロデバイス）の微細パターンの形成に際して、形成すべきパターンを 4 ~ 5 倍程度に比例拡大して描画したフォトマスク（レチクルとも呼ぶ）のパターンを、投影露光装置を用いてウエハ等の感光性基板（被露光基板）上に縮小投影する方法が用いられている。この種の投影露光装置では、半導体集積回路の微細化に対応するために、その露光波長が短波長側へシフトし続けている。現在、露光波長は KrF エキシマレーザーの 248 nm が主流となっているが、より短波長の ArF エキシマレーザーの 193 nm も実用化段階に入りつつある。さらに、波長 157 nm の F₂ レーザーや波長 126 nm の Ar₂ レーザー等の、いわゆる真空紫外域と呼ばれる波長帯の光を供給する光源を使用する投影露光装置の提案も行なわれている。また、投影光学系の大開口数（NA）化によっても高解像度化が可能であるため、露光波長の短波長化のための開発だけでなく、より大きい開口数を有する投影光学系の開発もなされている。

30

このように波長の短い紫外域の露光光に対しては、透過率や均一性の良好な光学材料（レンズ材料）は限定される。ArF エキシマレーザーを光源とする投影光学系では、レンズ材料として合成石英ガラスも使用可能であるが、1 種類のレンズ材料では色収差の補正を十分に行うことができないので、一部のレンズにフッ化カルシウム結晶（蛍石）が用いられる。一方、F₂ レーザーを光源とする投影光学系では、使用可能なレンズ材料は事実上フッ化カルシウム結晶（蛍石）に限定される。

40

最近、このように波長の短い紫外線に対しては、立方晶系であるフッ化カルシウム結晶（蛍石）においても、複屈折が生じることが報告されている。電子デバイスの製造に用いられる投影光学系のような超高精度の光学系においては、レンズ材料の複屈折に伴って生じる収差は致命的であり、複屈折の影響を実質的に回避したレンズ構成およびレンズ設計の採用が不可欠である。

50

発明の開示

本発明は、前述の課題に鑑みてなされたものであり、たとえば蛍石のような複屈折性の結晶材料を用いても、複屈折の影響を実質的に受けることなく良好な光学性能を確保することのできる光学系および該光学系を備えた露光装置を提供することを目的とする。

また、本発明は、結晶材料を用いて良好な光学性能を有する光学系が搭載された露光装置を用いて、高解像度の露光技術にしたがって高性能のマイクロデバイスを製造することのできるマイクロデバイス製造方法を提供することを目的とする。

前記課題を解決するために、本発明の第1発明では、立方晶系に属する結晶で形成された複数の光学素子を含む光学系において、

前記光学系の光軸と結晶軸 [1 1 1] または該結晶軸と光学的に等価な結晶軸とがほぼ一致するように設定された複数の光学素子から構成された第1素子群と、 10

前記光軸と結晶軸 [1 0 0] または該結晶軸と光学的に等価な結晶軸とがほぼ一致するように設定された複数の光学素子から構成された第2素子群とを備え、

前記第1素子群は、前記光軸を中心として第1角度だけ相対的に回転した位置関係を有する第1A素子群と第1B素子群とを有し、

前記第2素子群は、前記光軸を中心として第2角度だけ相対的に回転した位置関係を有する第2A素子群と第2B素子群とを有し、

前記光軸に対して所定範囲の角度をなす光束の前記第1A素子群における光学素子中の光路長 L_{1A} と前記第1B素子群における光学素子中の光路長 L_{1B} とがほぼ等しく、

前記光軸に対して前記所定範囲の角度をなす光束の前記第2A素子群における光学素子中の光路長 L_{2A} と前記第2B素子群における光学素子中の光路長 L_{2B} とがほぼ等しく、 20

前記光軸に対して前記所定範囲の角度をなす光束の前記第1素子群における光学素子中の光路長 $L_1 (= L_{1A} + L_{1B})$ と前記第2素子群における光学素子中の光路長 $L_2 (= L_{2A} + L_{2B})$ とが所定の倍率にしたがって設定されていることを特徴とする光学系を提供する。

第1発明の好ましい態様によれば、前記第1素子群における光学素子中の光路長 L_1 は、前記第2素子群における光学素子中の光路長 L_2 の約1.5倍に設定されている。この場合、前記第2素子群における光学素子中の光路長 L_2 の1.5倍と前記第1素子群における光学素子中の光路長 L_1 との差が、前記光束の波長を (nm) としたとき、 $\pm 1.0 \times 10^{-6} \times 3 (cm)$ 以内に設定されていることが好ましい。 30

また、第1発明の好ましい態様によれば、前記第1A素子群における光学素子中の光路長 L_{1A} と前記第1B素子群における光学素子中の光路長 L_{1B} との差が、前記光束の波長を (nm) としたとき、 $\pm 0.5 \times 10^{-6} \times 3 (cm)$ 以内に設定されている。さらに、前記第2A素子群における光学素子中の光路長 L_{2A} と前記第2B素子群における光学素子中の光路長 L_{2B} との差が、前記光束の波長を (nm) としたとき、 $\pm 0.5 \times 10^{-6} \times 3 (cm)$ 以内に設定されていることが好ましい。また、前記所定範囲の角度は、前記光学系の像側開口数の0.6倍に対応する角度よりも大きく且つ前記像側開口数の0.9倍に対応する角度よりも小さいことが好ましい。

さらに、第1発明の好ましい態様によれば、前記第1A素子群と前記第1B素子群とは前記光軸に沿って互いに近接して配置され、前記第2A素子群と前記第2B素子群とは前記光軸に沿って互いに近接して配置されている。また、前記第1素子群と前記第2素子群とは前記光軸に沿って互いに近接して配置されていることが好ましい。さらに、前記第1A素子群、前記第1B素子群、前記第2A素子群および前記第2B素子群のうちの少なくとも1つの素子群は、前記光軸に沿って互いに近接して配置された複数の光学素子から構成されていることが好ましい。また、前記第1素子群と前記第2素子群との組を複数備えていることが好ましい。 40

本発明の第2発明では、立方晶系に属する結晶で形成された複数の光学素子を含む光学系において、

前記光学系の光軸と結晶軸 [1 1 0] または該結晶軸と光学的に等価な結晶軸とがほぼ一致するように設定された複数の光学素子からそれぞれ構成された第3素子群と第4素子群 50

とを備え、

前記第3素子群は、前記光軸を中心として第3角度だけ相対的に回転した位置関係を有する第3A素子群と第3B素子群とを有し、

前記第4素子群は、前記光軸を中心として第4角度だけ相対的に回転した位置関係を有する第4A素子群と第4B素子群とを有し、

前記第3素子群と前記第4素子群とは、前記光軸を中心として第5角度だけ相対的に回転した位置関係を有し、

前記光軸に対して所定範囲の角度をなす光束の前記第3A素子群における光学素子中の光路長 L_{3A} と前記第3B素子群における光学素子中の光路長 L_{3B} とがほぼ等しく、

前記光軸に対して前記所定範囲の角度をなす光束の前記第4A素子群における光学素子中の光路長 L_{4A} と前記第4B素子群における光学素子中の光路長 L_{4B} とがほぼ等しく、

前記光軸に対して前記所定範囲の角度をなす光束の前記第3素子群における光学素子中の光路長 $L_3 (= L_{3A} + L_{3B})$ と前記第4素子群における光学素子中の光路長 $L_4 (= L_{4A} + L_{4B})$ とが所定の倍率にしたがって設定されていることを特徴とする光学系を提供する。

第2発明の好ましい態様によれば、前記第3素子群における光学素子中の光路長 L_3 と前記第4素子群における光学素子中の光路長 L_4 とがほぼ等しく設定されている。この場合、前記第3素子群における光学素子中の光路長 L_3 と前記第4素子群における光学素子中の光路長 L_4 との差が、前記光束の波長を (nm) としたとき、 $\pm 1.0 \times 10^{-6} \times 10^3 (cm)$ 以内に設定されていることが好ましい。

また、第2発明の好ましい態様によれば、前記第3A素子群における光学素子中の光路長 L_{3A} と前記第3B素子群における光学素子中の光路長 L_{3B} との差が、前記光束の波長を (nm) としたとき、 $\pm 0.5 \times 10^{-6} \times 10^3 (cm)$ 以内に設定されている。さらに、前記第4A素子群における光学素子中の光路長 L_{4A} と前記第4B素子群における光学素子中の光路長 L_{4B} との差が、前記光束の波長を (nm) としたとき、 $\pm 0.5 \times 10^{-6} \times 10^3 (cm)$ 以内に設定されていることが好ましい。

さらに、第2発明の好ましい態様によれば、前記光軸と結晶軸 $[100]$ とがほぼ一致するように設定された複数の光学素子から構成された第5素子群をさらに備え、前記第5素子群は、前記光軸を中心として第6角度だけ相対的に回転した位置関係を有する第5A素子群と第5B素子群とを有し、前記光軸に対して前記所定範囲の角度をなす光束の前記第5A素子群における光学素子中の光路長 L_{5A} と前記第5B素子群における光学素子中の光路長 L_{5B} とがほぼ等しく、前記光軸に対して前記所定範囲の角度をなす光束の前記第3素子群における光学素子中の光路長 $L_3 (= L_{3A} + L_{3B})$ と前記第4素子群における光学素子中の光路長 $L_4 (= L_{4A} + L_{4B})$ との総和光路長 $L_{34} (= L_3 + L_4)$ と、前記第5素子群における光学素子中の光路長 $L_5 (= L_{5A} + L_{5B})$ とが所定の倍率にしたがって設定されている。

この場合、前記第3素子群および前記第4素子群における光学素子中の総和光路長 L_{34} は、前記第5素子群における光学素子中の光路長 L_5 の約4倍に設定されていることが好ましい。また、この場合、前記第5素子群における光学素子中の光路長 L_5 の約4倍と前記第3素子群および前記第4素子群における光学素子中の総和光路長 L_{34} との差が、前記光束の波長を (nm) としたとき、 $\pm 2.7 \times 10^{-6} \times 10^3 (cm)$ 以内に設定されていることが好ましい。さらに、前記第5A素子群における光学素子中の光路長 L_{5A} と前記第5B素子群における光学素子中の光路長 L_{5B} との差が、前記光束の波長を (nm) としたとき、 $\pm 0.5 \times 10^{-6} \times 10^3 (cm)$ 以内に設定されていることが好ましい。

また、第2発明の好ましい態様によれば、前記所定範囲の角度は、前記光学系の像側開口数の0.6倍に対応する角度よりも大きく且つ前記像側開口数の0.9倍に対応する角度よりも小さい。さらに、前記第3A素子群と前記第3B素子群とは前記光軸に沿って互いに近接して配置され、前記第4A素子群と前記第4B素子群とは前記光軸に沿って互いに近接して配置されていることが好ましい。また、前記第3素子群と前記第4素子群とは前

10

20

30

40

50

記光軸に沿って互いに近接して配置されていることが好ましい。さらに、前記第3 A 素子群、前記第3 B 素子群、前記第4 A 素子群および前記第4 B 素子群のうちの少なくとも一つの素子群は、前記光軸に沿って互いに近接して配置された複数の光学素子から構成されていることが好ましい。また、前記第3 素子群と前記第4 素子群との組を複数備えていることが好ましい。さらに、前記第5 A 素子群と前記第5 B 素子群とは前記光軸に沿って互いに近接して配置されていることが好ましい。

本発明の第3 発明では、立方晶系に属する結晶で形成された複数の光学素子を含む光学系において、

前記光学系の光軸と結晶軸 [1 1 0] または該結晶軸と光学的に等価な結晶軸とがほぼ一致するように設定された複数の光学素子からそれぞれ構成された第6 素子群と第7 素子群と第8 素子群と第9 素子群とを備え、

10

前記第7 素子群は、前記第6 素子群に対して前記光軸を中心として所定の向きに第7 角度だけ回転した位置関係を有し、

前記第8 素子群は、前記第7 素子群に対して前記光軸を中心として前記所定の向きに前記第7 角度だけ回転した位置関係を有し、

前記第9 素子群は、前記第8 素子群に対して前記光軸を中心として前記所定の向きに前記第7 角度だけ回転した位置関係を有し、

前記光軸に対して所定範囲の角度をなす光束の前記第6 素子群における光学素子中の光路長 L_6 と、前記光軸に対して前記所定範囲の角度をなす光束の前記第7 素子群における光学素子中の光路長 L_7 と、前記光軸に対して前記所定範囲の角度をなす光束の前記第8 素子群における光学素子中の光路長 L_8 と、前記光軸に対して前記所定範囲の角度をなす光束の前記第9 素子群における光学素子中の光路長 L_9 とが互いにほぼ等しいことを特徴とする光学系を提供する。

20

第3 発明の好ましい態様によれば、前記第6 素子群における光学素子中の光路長 L_6 と、前記第7 素子群における光学素子中の光路長 L_7 と、前記第8 素子群における光学素子中の光路長 L_8 と、前記第9 素子群における光学素子中の光路長 L_9 とから任意に選択された2 つの光路長の差が、前記光束の波長を (nm) としたとき、 $\pm 0.5 \times 10^{-6} \times 10^3$ (cm) 以内に設定されている。

また、第3 発明の好ましい態様によれば、前記光軸と結晶軸 [1 0 0] または該結晶軸と光学的に等価な結晶軸とがほぼ一致するように設定された複数の光学素子から構成された第10 素子群をさらに備え、前記第10 素子群は、前記光軸を中心として第8 角度だけ相対的に回転した位置関係を有する第10 A 素子群と第10 B 素子群とを有し、前記光軸に対して前記所定範囲の角度をなす光束の前記第10 A 素子群における光学素子中の光路長 L_{10A} と前記第10 B 素子群における光学素子中の光路長 L_{10B} とがほぼ等しい。この場合、前記第10 A 素子群における光学素子中の光路長 L_{10A} と前記第10 B 素子群における光学素子中の光路長 L_{10B} との差が、前記光束の波長を (nm) としたとき、 $\pm 0.5 \times 10^{-6} \times 10^3$ (cm) 以内に設定されていることが好ましい。

30

また、第3 発明の好ましい態様によれば、前記第6 素子群における光学素子中の光路長 L_6 と前記第7 素子群における光学素子中の光路長 L_7 と前記第8 素子群における光学素子中の光路長 L_8 と前記第9 素子群における光学素子中の光路長 L_9 との総和光路長 L_{69} ($= L_6 + L_7 + L_8 + L_9$) と、前記第10 素子群における光学素子中の光路長 L_{10} ($= L_{10A} + L_{10B}$) とが所定の倍率にしたがって設定されている。この場合、前記第6 素子群乃至前記第9 素子群における光学素子中の総和光路長 L_{69} は、前記第10 素子群における光学素子中の光路長 L_{10} の約4 倍に設定されていることが好ましい。また、この場合、前記第10 素子群における光学素子中の光路長 L_{10} の約4 倍と前記第6 素子群乃至前記第9 素子群における光学素子中の総和光路長 L_{29} との差が、前記光束の波長を (nm) としたとき、 $\pm 2.7 \times 10^{-6} \times 10^3$ (cm) 以内に設定されていることが好ましい。さらに、前記第6 素子群乃至前記第9 素子群および前記第10 素子群のうち少なくとも一方を複数組有することが好ましい。

40

さらに、第3 発明の好ましい態様によれば、前記光学系の光軸と結晶軸 [1 1 1] とがほ

50

ば一致するように設定された複数の光学素子から構成された第11素子群をさらに備え、前記第11素子群は、前記光軸を中心として第9角度だけ相対的に回転した位置関係を有する第11A素子群と第11B素子群とを有し、前記光軸に対して前記所定範囲の角度をなす光束の前記第11A素子群における光学素子中の光路長 L_{11A} と前記第11B素子群における光学素子中の光路長 L_{11B} とがほぼ等しい。この場合、前記第11A素子群における光学素子中の光路長 L_{11A} と前記第11B素子群における光学素子中の光路長 L_{11B} との差が、前記光束の波長を (nm) としたとき、 $\pm 0.5 \times 10^{-6} \times 3$ (cm)以内に設定されていることが好ましい。また、前記第11素子群を複数組有することが好ましい。

また、第3発明の好ましい態様によれば、前記第6素子群乃至前記第9素子群における光学素子中の総和光路長 L_{69} の3倍と前記第11素子群における光学素子中の光路長 L_{11} の8倍との総和 $(= 3 \times L_{69} + 8 \times L_{11})$ は、前記第10素子群における光学素子中の光路長 L_{10} の約1.2倍に設定されている。

この場合、前記第6素子群乃至前記第9素子群における光学素子中の総和光路長 L_{69} (cm)と、前記第10素子群における光学素子中の光路長 L_{10} (cm)と、前記第11素子群における光学素子中の光路長 L_{11} (cm)との間には、前記光束の波長を (nm) としたとき、 $|3 \times L_{69} - 1.2 \times L_{10} + 8 \times L_{11}| \leq 8.0 \times 10^{-6} \times 3$ の条件が成立していることが好ましい。また、前記所定範囲の角度は、前記光学系の像側開口数の0.6倍に対応する角度よりも大きく且つ前記像側開口数の0.9倍に対応する角度よりも小さいことが好ましい。

第1発明～第3発明の好ましい態様によれば、前記結晶はフッ化カルシウム結晶である。また、前記結晶はフッ化バリウム結晶であることが好ましい。さらに、少なくとも1つの凹面反射鏡をさらに備えていることが好ましい。また、ArFエキシマレーザーの発振波長に対して最適に収差補正されているか、あるいは F_2 レーザーの発振波長に対して最適に収差補正されていることが好ましい。

本発明の第4発明では、マスクを照明するための照明系と、前記マスクに形成されたパターンの像を感光性基板上に形成するための第1発明～第3発明の光学系とを備えていることを特徴とする露光装置を提供する。

本発明の第5発明では、第4発明の露光装置を用いて前記マスクのパターンを前記感光性基板上に露光する露光工程と、前記露光工程により露光された前記感光性基板を現像する現像工程とを含むことを特徴とするマイクロデバイスの製造方法を提供する。

発明を実施するための最良の形態

本発明の実施形態を、添付図面に基づいて説明する。

第1図は、本発明の各実施形態にかかる投影光学系を備えた露光装置の構成を概略的に示す図である。本発明の各実施形態では、露光装置に搭載される投影光学系に本発明を適用している。第1図を参照すると、各実施形態にかかる露光装置は、たとえばArFエキシマレーザーや F_2 レーザーのような光源1を備えている。光源1から供給された光束は、送光系2を経由して、照明光学系3に導かれる。照明光学系3は、図示した折り曲げミラー3aおよび3bや不図示のオプティカルインテグレータ(照度均一化素子)等からなり、レチクル(マスク)101をほぼ均一な照度で照明する。

レチクル101は、たとえば真空吸着によりレチクルホルダー4に保持され、レチクルステージ5の作用によって移動可能に構成されている。レチクル101を透過した光束は、投影光学系300を介して集光され、半導体ウエハ102のような感光性基板上に、レチクル101上のパターンの投影像を形成する。ウエハ102も、たとえば真空吸着によりウエハホルダー7に保持され、ウエハステージ8の作用によって移動可能に構成されている。こうして、ウエハ102をステップ移動させつつ一括露光を行うことにより、ウエハ102の各露光領域にレチクル101のパターン投影像を順次転写することができる。

また、投影光学系300に対してレチクル101およびウエハ102を相対移動させつつ走査露光(スキャン露光)を行うことにより、ウエハ102の各露光領域にレチクル101のパターン投影像を順次転写することも可能である。なお、実際の電子デバイスへの回

10

20

30

40

50

路パターンの露光に際しては、前の工程で形成されたパターンの上に次の工程のパターンを正確に位置合わせして露光する必要があるため、露光装置にはウエハ102上の位置検出マークの位置を正確に検出するためのアライメント顕微鏡10が搭載されている。

光源1としてF₂レーザーやArFエキシマレーザー（あるいは波長126nmのAr₂レーザーなど）を用いる場合、送光系2、照明光学系3および投影光学系300の光路が、たとえば窒素のような不活性ガスでパージされている。特に、F₂レーザーを用いる場合には、レチクル101、レチクルホルダー4およびレチクルステージ5がケーシング6によって外部の雰囲気と隔離され、このケーシング6の内部空間も不活性ガスでパージされている。同様に、ウエハ102、ウエハホルダー7およびウエハステージ8がケーシング9によって外部の雰囲気と隔離され、このケーシング9の内部空間も不活性ガスでパ

10

ジされている。第2図は、本発明の第1実施形態にかかる投影光学系の構成を概略的に示す図である。第1実施形態では、波長（nm）が193nmのArFレーザーに対して収差補正が最適化された屈折型の投影光学系に本発明を適用している。第1実施形態の投影光学系100（第1図の投影光学系300に対応）では、レチクル101上の1点を射出した光束が、光軸AX100に沿って配置されたレンズ103~110を介して、感光性基板としての半導体ウエハ102上の1点に集光する。こうして、ウエハ102上には、レチクル101に描画されたパターンの投影像が形成される。

第1実施形態では、レンズ103~110のうち、レンズ105、106、109および110はフッ化カルシウム結晶（蛍石）で形成され、その他のレンズは合成石英ガラスで形成されている。第3図は、蛍石の結晶軸方位を説明する図である。第3図を参照すると、蛍石の結晶軸は、立方晶系のXYZ座標系に基づいて規定される。すなわち、+X軸に沿って結晶軸[100]が、+Y軸に沿って結晶軸[010]が、+Z軸に沿って結晶軸[001]がそれぞれ規定される。

20

また、XZ平面において結晶軸[100]および結晶軸[001]と45°をなす方向に結晶軸[101]が、XY平面において結晶軸[100]および結晶軸[010]と45°をなす方向に結晶軸[110]が、YZ平面において結晶軸[010]および結晶軸[001]と45°をなす方向に結晶軸[011]がそれぞれ規定される。さらに、+X軸、+Y軸および+Z軸に対して等しい鋭角をなす方向に結晶軸[111]が規定される。なお、第3図では、+X軸、+Y軸および+Z軸で規定される空間における結晶軸のみを

30

図示しているが、他の空間においても同様に結晶軸が規定される。蛍石では、第3図中実線で示す結晶軸[111]、およびこれと等価な不図示の結晶軸[-111]、[1-11]、[11-1]では、複屈折がほぼ零（最小）である。同様に、第3図中実線で示す結晶軸[100]、[010]、[001]においても、複屈折がほぼ零（最小）である。一方、第3図中破線で示す結晶軸[110]、[101]、[011]、およびこれと等価な不図示の結晶軸[-110]、[-101]、[01-1]では、複屈折が最大である。

上述したように、蛍石結晶の結晶軸[100]および[111]の方向に進む光については、複屈折性（直交する偏光面を有する2つの光束間の屈折率差）は生じない。したがって、蛍石レンズ（光学素子）の結晶軸[111]または[100]と投影光学系100の光軸AX100（ひいては蛍石レンズの光軸）とが一致するように設定すれば、光軸AX100と平行に進む結像光に対して複屈折は生じないことになる。逆に、結晶軸[011]に沿って進む結像光に対しては、複屈折量が最大となる。

40

本発明では、相対的な結晶軸方位を厳密に定義する必要がある場合には、たとえば結晶軸[011]と光学的に等価な複数の結晶軸を、[011]、[0-11]、[110]などのように、符号や配列位置を変えて表記（列記）する。しかしながら、相対的な結晶軸方位を厳密に定義する必要がない場合には、結晶軸[011]の表記をもって、[011]、[0-11]、[110]の様な複数の光学的に等価な結晶軸を一括的に表わすものとする。

ところで、投影光学系100の解像度を向上させるには、ウエハ上102への光束の最大

50

入射角 100 (第2図参照)の正弦である像側NA(像側開口数)を例えば0.85程度に拡大する必要がある。したがって、投影光学系100内を通る光束の進行方向(ひいては各レンズ103~110を通る光束の進行方向)を、すべて光軸AX100と平行に設定することは不可能である。第4A図および第4B図は、第1実施形態にかかる投影光学系中の蛍石レンズにおける光路を説明する図である。

蛍石レンズ105, 106, 109, 110に着目すると、第4A図および第4B図に示すように、ウエハ上102に最大入射角100で入射する光束(像側NAに相当する光束)100eに関する蛍石レンズ105, 106, 109, 110の光路(105e, 106e, 109e, 110e)は光軸AX100と平行でない。また、ウエハ上102への入射角が最大入射角100の6割~9割程度の光束(すなわち像側NAの6割~9割程度に相当する光束)100mについても、蛍石レンズ105, 106, 109, 110の光路(105m, 106m, 109m, 110m)は光軸AX100と平行でない。その結果、結晶軸[111]とは平行にならないこれらの光束に基づいて、蛍石結晶の複屈折に起因する波面収差(以下、「複屈折の影響」と称する)が生じることになる。

第5A図および第5B図は、蛍石レンズの光軸を結晶軸[111]と一致させた場合の複屈折について説明する図である。第5A図を参照すると、蛍石レンズ109の光軸(ひいては光軸AX100)が、結晶軸[111]と一致するように設定されている。ここで、結晶軸[111]は第5A図の紙面に対して垂直に上方(+z方向)に向いており、各矢印は他の結晶軸の向きを示している。このとき、光軸AX100に垂直な面内には、結晶軸[-110]と[1-10]とが反対向きに配置される。一方、+z方向において光軸AX100と約35°をなす方向ベクトルを光軸AX100を中心として回転させることにより得られる円錐の側面上には、[011], [110], [101]の3本の結晶軸が光軸AX100を回転中心として120°の角度間隔で並ぶ。

これらの結晶軸[011], [110], [101]は、上述したように、その進行方向への光について複屈折量が最大になる結晶軸である。ここで、光軸AX100を中心とした円の径方向に沿って偏光面を有する光(以下、「R偏光」と称する)の屈折率と、光軸AX100を中心とした円の周方向に沿って偏光面を有する光(以下、「偏光」と称する)の屈折率との差として複屈折値を定義する。第5A図を参照すると、結晶軸[111]を光軸とする蛍石レンズ109では、120°の角度間隔を隔てた3つの結晶軸[011], [110], [101]によって、周方向(回転方向)に120°の周期で複屈折値が変動する回転異方性が生じることになる。

一方、第5B図を参照すると、蛍石レンズ110の光軸(ひいては光軸AX100)も、結晶軸[111]と一致するように設定されている。しかしながら、光軸AX100に垂直な面内における結晶軸[-110]の向きが、第5A図の蛍石レンズ109の場合に比して、 $106 = 60^\circ$ だけ-z軸廻りに回転している。換言すると、第5A図の蛍石レンズ109と第5B図の蛍石レンズ110とは、ともに光軸AX100と結晶軸[111]とが一致するように設定されているが、光軸AX100を中心として60°だけ相対的に回転した位置関係を有する。

第5B図を参照すると、蛍石レンズ110では、複屈折値の回転異方性が120°周期であることに変わりはないが、その最大値および最小値の位置が光軸AX100を中心として60°だけ回転することになる。このように、共に結晶軸[111]を光軸とし且つ光軸を中心にしてその結晶方位が相対的に60°回転している厚さの等しい2枚の蛍石レンズを組み合わせるにより、各結晶レンズが有する120°周期の回転異方性が相殺されて、光軸を中心とする方位角についてほぼ同様な複屈折量(R偏光と偏光との屈折率差)を有するレンズ群が形成されることが、本件発明者によって明らかになった。

ただし、この構成によって複屈折の影響が解消される訳ではない。上述の通り、R偏光と偏光との屈折率差は光軸を中心とした方位角に対してほぼ一樣になるだけであって、屈折率差自体は残存しているからである。なお、本件発明者の解析によって、結晶軸[111]を光軸とし且つ他の結晶軸(光軸AX111に垂直な結晶軸[-110]等)が相対的に60°回転している2枚のほぼ等しい厚さの蛍石レンズでは、R偏光に対する屈折率

10

20

30

40

50

(n_{R111})が偏光に対する屈折率(n_{111})よりも高くなることが判明した。そこで、第1実施形態では、光軸を中心とした方位角に対してほぼ一様な残存複屈折の除去のために、結晶軸[111]を光軸とするレンズペア(109, 110)に加えて、結晶軸[100]を光軸とするレンズのペア(105, 106)を用いる。第6A図および第6B図は、蛍石レンズの光軸を結晶軸[100]と一致させた場合の複屈折について説明する図である。第6A図を参照すると、蛍石レンズ105の光軸(ひいては光軸AX100)が、結晶軸[100]と一致するように設定されている。ここで、結晶軸[100]は第6図の紙面に対して垂直に上方(+z方向)に向いており、各矢印は他の結晶軸の向きを示している。

このとき、光軸AX100に垂直な面内には、結晶軸[001]と[00-1]とが反対向きに配置される。また、結晶軸[001]および[00-1]に直交するように、結晶軸[010]と[0-10]とがやはり反対向きに配置される。一方、+z方向において光軸AX100と約45°をなす方向ベクトルを光軸AX100を中心として回転させることにより得られる円錐の側面上には、[110], [101], [1-10], [10-1]の4本の結晶軸が光軸AX100を回転中心として90°の角度間隔で並ぶ。

これらの結晶軸[110], [101], [1-10], [10-1]は、上述したように、その進行方向への光について複屈折量が最大になる結晶軸である。第6A図を参照すると、結晶軸[100]を光軸とする蛍石レンズ105では、90°の角度間隔を隔てた4つの結晶軸[110], [101], [1-10], [10-1]によって、周方向(回転方向)に90°の周期で複屈折値が変動する回転異方性が生じることになる。

一方、第6B図を参照すると、蛍石レンズ106の光軸(ひいては光軸AX100)も、結晶軸[100]と一致するように設定されている。しかしながら、光軸AX100に垂直な面内における結晶軸[001]の向きが、第6A図の蛍石レンズ105の場合に比して、 $110 = 45^\circ$ だけ-z軸廻りに回転している。換言すると、第6A図の蛍石レンズ105と第6B図の蛍石レンズ106とは、ともに光軸AX100と結晶軸[100]とが一致するように設定されているが、光軸AX100を中心として45°だけ相対的に回転した位置関係を有する。

第6B図を参照すると、蛍石レンズ106では、複屈折値の回転異方性が90°周期であることに変わりはないが、その最大値および最小値の位置が光軸AX100を中心として45°だけ回転することになる。このように、共に結晶軸[100]を光軸とし且つ光軸を中心にしてその結晶方位が相対的に45°回転している厚さの等しい2枚の蛍石レンズを組み合わせることにより、各結晶レンズが有する90°周期の回転異方性が相殺されて、光軸を中心とする方位角についてほぼ同様な複屈折量(R偏光と偏光との屈折率差)を有するレンズ群が形成されることが、本件発明者によって明らかになった。

この場合にも、上述の構成によって複屈折の影響が解消される訳ではない。上述の通り、R偏光と偏光との屈折率差は光軸を中心とした方位角に対してほぼ一様になるだけであって、屈折率差自体は残存しているからである。なお、本件発明者の解析によって、結晶軸[100]を光軸とし且つ他の結晶軸(光軸AX100に垂直な結晶軸[001]等)が相対的に45°回転している2枚のほぼ等しい厚さの蛍石レンズでは、R偏光に対する屈折率(n_{R100})が偏光に対する屈折率(n_{100})よりも低くなることが判明した。

すなわち、結晶軸[111]を光軸としたレンズペア(109, 110)と、結晶軸[100]を光軸としたレンズペア(105, 106)とで、複屈折の符号が逆になる。したがって、結晶軸[111]を光軸としたレンズペア(109, 110)と結晶軸[100]を光軸としたレンズペア(105, 106)とを組み合わせることにより、複屈折の影響をある程度除去することが可能である。ところで、結晶軸[100]を光軸としたレンズペア(105, 106)の複屈折量すなわち($n_{R100} - n_{100}$)と、結晶軸[111]を光軸としたレンズペア(109, 110)での複屈折量すなわち($n_{R111} - n_{111}$)とでは、互いに複屈折量が異なる。従って、この複屈折量に基づいて、結晶軸[100]を光軸としたレンズペア(105, 106)の光路長と、結晶軸[111]

]を光軸としたレンズペア(109, 110)との光路長を設定することにより、複屈折の影響をほぼ完全に除去することが可能である。具体的には、結晶軸[100]を光軸としたレンズペア(105, 106)の複屈折量すなわち($n_{R100} - n_{100}$)は、結晶軸[111]を光軸としたレンズペア(109, 110)での複屈折量すなわち($n_{R111} - n_{111}$)の約-1.5倍になる。このため、結晶軸[111]を光軸としたレンズペア(109, 110)の光路長を、結晶軸[100]を光軸としたレンズペア(105, 106)の光路長の約1.5倍に設定すればよい。そうすることによって、複屈折の影響をほぼ完全に除去することが可能である。

第1実施形態では、以上の関係を第2図の投影光学系100に適用している。すなわち、蛍石レンズ105, 106, 109, 110のうち、蛍石レンズ105および106の厚さを、蛍石レンズ109および110の厚さに比べて薄く設定している。そして、蛍石レンズ105および106の光軸を共に蛍石の結晶軸[100]に一致させ、蛍石レンズ109および110の光軸を共に蛍石の結晶軸[111]に一致させている。なお、蛍石レンズ109と110とは光軸に垂直な面内にある結晶軸[-110]が光軸を回転中心として相対的に60°回転した位置関係を有するように設定し、蛍石レンズ105と106とは光軸に垂直な面内にある結晶軸[001]が光軸を回転中心として相対的に45°回転した位置関係を有するように設定している。

そして、像側NA(最大NA)の6割~9割に相当する光束(すなわち光軸AX100に対して像側NAの0.6倍~0.9倍に対応する角度をなす光束)100mについて、蛍石レンズ105内の光路長105mと蛍石レンズ106内の光路長106mとの差が $\pm 0.5 \times 10^{-6} \times 3$ (cm)以内になるように設定している。同様に、蛍石レンズ109内の光路長109mと蛍石レンズ110内の光路長110mとの差が $\pm 0.5 \times 10^{-6} \times 3$ (cm)以内になるように設定している。さらに、結晶軸[100]を光軸とする第2レンズ群(105, 106)での光路長の総和(105m+106m)の1.5倍と、結晶軸[111]を光軸とする第1レンズ群(109, 110)での光路長の総和(109m+110m)との差が $\pm 1.0 \times 10^{-6} \times 3$ (cm)以内になるように設定している。

これによって、結晶軸[111]を光軸とする第1レンズ群(109, 110)内および結晶軸[100]を光軸とする第2レンズ群(105, 106)内において、光軸AX100を中心とした方位角に対する複屈折の均一化がそれぞれ図られる。加えて、結晶軸[111]を光軸とする第1レンズ群(109, 110)と結晶軸[100]を光軸とする第2レンズ群(105, 106)との組み合わせにより、光軸AX100を中心とした方位角に対してそれぞれ均一化された複屈折が互いに相殺され、その結果として複屈折の影響をほぼ完全に消し去ることが可能になる。

なお、上述の第1実施形態では、結晶軸[111]を光軸とする第1レンズ群(109, 110)および結晶軸[100]を光軸とする第2レンズ群(105, 106)は、それぞれ一对の蛍石レンズから構成されている。しかしながら、結晶軸[111]を光軸とする第1レンズ群および結晶軸[100]を光軸とする第2レンズ群のうちの少なくとも一方が3枚以上の蛍石レンズから構成される変形例も可能である。第7A図および第7B図は、第1実施形態の変形例にかかる投影光学系中の第1レンズ群および第2レンズ群の構成および光路を説明する図である。以下、第7A図および第7B図を参照して、第1実施形態の変形例を説明する。

第7A図を参照すると、結晶軸[100]を光軸とする第2レンズ群が、一对の蛍石レンズ105aおよび105bからなる第2Aレンズ群と、1つの蛍石レンズ106aからなる第2Bレンズ群とから構成されている。ここで、蛍石レンズ105aと105bとは、光軸に垂直な面内での結晶軸[001]の向きが互いに同じである。そして、蛍石レンズ106aでは、光軸に垂直な面内での結晶軸[001]の向きが、蛍石レンズ105aおよび105bに比して相対的に45°回転している。変形例の第2レンズ群においては、像側NAの6割~9割に相当する光束101mについて、第2Aレンズ群中の光路長の総和(105am+105bm)と第2Bレンズ群中の光路長(106am)との差を ± 0

$.5 \times 10^{-6} \times 3$ (cm) 以内に抑えることにより、光軸 AX101 からの方位角に依らず複屈折をほぼ一定にすることができる。

一方、第7B図を参照すると、結晶軸 [111] を光軸とする第1レンズ群が、一对の蛍石レンズ109aおよび109bからなる第1Aレンズ群と、1つの蛍石レンズ110aからなる第1Bレンズ群とから構成されている。ここで、蛍石レンズ109aと109bとは、光軸に垂直な面内での結晶軸 [-110] の向きが互いに同じである。そして、蛍石レンズ110aでは、光軸に垂直な面内での結晶軸 [-110] の向きが、蛍石レンズ109aおよび109bに比して相対的に60°回転している。変形例の第1レンズ群においては、像側NAの6割~9割に相当する光束102mについて、第1Aレンズ群中の光路長の総和(109am+109bm)と第1Bレンズ群中の光路長(110am)との差を $\pm 0.5 \times 10^{-6} \times 3$ (cm) 以内に抑えることにより、光軸 AX101 からの方位角に依らず複屈折をほぼ一定にすることができる。

さらに、結晶軸 [100] を光軸とする第2レンズ群での光路長の総和(105am+106am+105bm)の1.5倍と、結晶軸 [111] を光軸とする第1レンズ群での光路長の総和(109am+109bm+110am)との差を $\pm 1.0 \times 10^{-6} \times 3$ (cm) 以内に設定することにより、光軸 AX101 からの方位角に対してほぼ一定の複屈折を相殺し、複屈折の影響をほぼ完全に消し去ることが可能になる。

なお、上述の変形例では、第1Bレンズ群および第2Bレンズ群は、それぞれ1枚の蛍石レンズから構成されている。しかしながら、これに限定されることなく、第1Aレンズ群および第2Aレンズ群と同様に、第1Bレンズ群および第2Bレンズ群をそれぞれ複数枚の蛍石レンズで構成することもできる。この場合、第1Bレンズ群中の光路長の総和および第2Bレンズ群中の光路長の総和も、それぞれ複数枚の蛍石レンズ中の光路長の総和になることはいうまでもない。

また、上述の変形例において、第2Aレンズ群では、結像光束の光路に沿って、一对の蛍石レンズ105aと105bとが比較的近接して配置されている。また、第1Aレンズ群では、結像光束の光路に沿って、一对の蛍石レンズ109aと109bとが近接して配置されている。しかしながら、一般的に、第1Aレンズ群、第1Bレンズ群、第2Aレンズ群および第2Bレンズ群の各レンズ群において、複数の蛍石レンズが近接して配置される構成に限定されるものではない。

たとえば、各レンズ群中の蛍石レンズの間に、石英ガラスからなる石英レンズや結晶材料から形成されているが他の結晶軸を光軸とする結晶レンズ(以下、これらを「考慮外レンズ」と総称する)が配置されていても、本発明の効果は発揮される。ただし、各レンズ群中に配置される考慮外レンズが比較的大きなパワー(屈折力)を有する場合には、これらの考慮外レンズの屈折作用により、各レンズ群(1A, 1B, 2A, 2B)で露光光束の光軸となす角度が大きく異なってしまい、本発明による複屈折の解消効果が薄らぐ恐れがある。このため、第1Aレンズ群、第1Bレンズ群、第2Aレンズ群および第2Bレンズ群の各レンズ群では、結像光束の光路に沿って、複数の蛍石レンズが近接して配置されることが望ましい。

同様に、第1Aレンズ群と第1Bレンズ群とは第1レンズ群を構成し、その相互作用によって複屈折を解消するので、第1Aレンズ群と第1Bレンズ群の間にも大きなパワーを有するレンズが配置されないことが望ましい。そして、第1Aレンズ群と第1Bレンズ群とは結像光束の光路に沿って近接して配置されることがさらに望ましい。これは、第2レンズ群を構成する第2Aレンズ群と第2Bレンズ群との間においても同様である。

なお、第1実施形態にかかる投影光学系においては問題がないが、投影光学系の設計タイプによっては、第1レンズ群と第2レンズ群との間に大きなパワーを有するレンズを配置した場合に、第1レンズ群と第2レンズ群との間の複屈折の相殺効果が薄れてしまうこともある。このような投影光学系においては、第1レンズ群と第2レンズ群の間に大きなパワーを有するレンズを配置しないことが望ましい。そして、第1レンズ群と第2レンズ群とは結像光束の光路に沿って近接して配置されることがさらに望ましい。なお、以上の実施形態においては、蛍石等の結晶で形成された各レンズ内の結像光束は、全てウエハ等の

10

20

30

40

50

感光性基板（被露光基板）102に向かって収束していく光束であるとしている。この場合には、蛍石結晶の結晶軸[111]を光軸とするレンズペア（第1レンズ群）においては、両レンズの結晶方位を、光軸である結晶軸[111]を中心にして相互に60度回転させると良いことは、上記実施形態で述べた通りである。ただし、ペアとなる2枚のレンズあるいはそれ以上のレンズの間にパワーの大きなレンズが介在する等の理由により、特定のレンズにおける光束が感光性基板102に向かって発散するように変化する場合には、このレンズによって生じる複屈折は、他のレンズで生じる複屈折とは回転異方性が異なってくる。

すなわち、発散光束の場合には、光軸（結晶軸[111]）に対する角度が収束光束とは逆になる。第5A図を参照すると、収束光束の光軸AX100となす角がプラスであり、第5A図中の光軸AXに対して右側から入射する場合に、発散光束は光軸AX100となす角がマイナスとなり、第5A図中の光軸AXに対して左側から入射することになる。このとき、発散光束が受ける複屈折作用は、第5B図に示した、光軸（結晶軸[111]）を中心にして60度回転したレンズに収束光束が入射した場合の作用と同じになる。従って、結晶軸[111]を光軸とする第1レンズ群中で、その内部を通る結像光束が、一方で収束となり他方で発散となっているレンズペアについては、光軸を中心にして60度回転させる必要はなく、同じ結晶軸が光軸に垂直な面内の同一方向を向いていた方が良い。一方、蛍石結晶の結晶軸[100]を光軸とするレンズペア（第2レンズ群）では、第6A図および第6B図より、収束光束および発散光束のいずれに対しても複屈折の作用は同じなので、その内部を通る結像光束が一方で収束になり他方で発散となっているレンズペアについても、光軸を中心にして45度回転させた方が良いことに変わりはない。

第8図は、本発明の第2実施形態にかかる投影光学系の構成を概略的に示す図である。第2実施形態では、波長（nm）が157nmのF₂レーザーに対して収差補正が最適化された反射屈折型の投影光学系に本発明を適用している。第2実施形態の投影光学系200（第1図の投影光学系300に対応）では、レチクル201（第1図のレチクル101に対応）上の1点を射出した光束が、光路変更手段としての反射プリズム203で偏向された後、光軸AX200bに沿って配置されたレンズ205および206を介して、凹面反射鏡204に入射する。

凹面反射鏡204で反射された光束は、レンズ206および205を介して、反射プリズム203で再び偏向される。反射プリズム203で偏向された光束は、光軸AX200aに沿って配置されたレンズ207~212を介して、ウエハ202（第1図のウエハ102に対応）上の1点に集光する。こうして、ウエハ202上には、レチクル201に描画されたパターンの投影像が形成される。第2実施形態では、すべてのレンズ205~212がフッ化カルシウム結晶（蛍石）で形成されている。

第2実施形態の投影光学系200において、蛍石の複屈折の影響を顕著に生じさせるレンズ群は、その内部における結像光束の進行方向が光軸AX200aまたはAX200bに対して大きな角度をなすようなレンズ群である。第8図を参照すると、凹面反射鏡204の近傍に配置された蛍石レンズ205および206、並びにウエハ202の近傍に配置された蛍石レンズ210, 211, 212において、結像光束の進行方向が光軸AX200aまたはAX200bに対して大きな角度をなしている。なお、どのレンズが複屈折の影響を顕著に生じさせるかはレンズ設計に依存して変動するので、複屈折の影響を顕著に生じさせるレンズが常に上述のようなレンズであるわけではない。

特に、反射屈折型の投影光学系200では、凹面反射鏡204の近傍に配置された蛍石レンズ205および206を結像光束が往復2回透過するため、これらの蛍石レンズ205および206の複屈折の影響は倍加されることになる。そこで、第2実施形態では、蛍石レンズ205および206からなる第1レンズ群において、結晶軸[111]を光軸AX200b（ひいては蛍石レンズ205および206の光軸）と一致させている。そして、蛍石レンズ205と206とは、光軸に垂直な面内にある結晶軸[-110]が光軸を中心として相対的に60°回転するように配置されている。したがって、蛍石レンズ205は第1Aレンズ群を構成し、蛍石レンズ206は第1Bレンズ群を構成している。

10

20

30

40

50

一方、蛍石レンズ 210, 211, 212 からなる第 2 レンズ群では、結晶軸 [100] を光軸 AX200a と一致させている。ここで、3 枚の蛍石レンズ 210 ~ 212 のうち、最も厚い蛍石レンズ 210 で第 2 A レンズ群を構成し、他の 2 枚の蛍石レンズ 211 および 212 で第 2 B レンズ群を構成している。すなわち、蛍石レンズ 210 と蛍石レンズ 211 および 212 とは、光軸に垂直な面内にある結晶軸 [001] が光軸を中心として相対的に 90° 回転するように配置されている。

第 9 A 図および第 9 B 図は、第 2 実施形態にかかる投影光学系中の蛍石レンズにおける光路を説明する図である。第 9 A 図および第 9 B 図では、ウエハ上 202 に最大入射角 200 (第 8 図を参照) で入射する光束 (像側 NA に相当する光束) を参照符号 200e で示している。第 2 実施形態では、像側 NA の 6 割 ~ 9 割に相当する光束 200m について、第 1 A レンズ群中の光路長の総和 (205am + 205bm) と第 1 B レンズ群中の光路長の総和 (206am + 206bm) との差が $\pm 0.5 \times 10^{-6} \times 3$ (cm) 以内になるように設定している。また、像側 NA の 6 割 ~ 9 割に相当する光束 200m について、第 2 A レンズ群中の光路長 (210m) と第 2 B レンズ群中の光路長の総和 (211m + 212m) との差が $\pm 0.5 \times 10^{-6} \times 3$ (cm) 以内になるように設定している。

そして、像側 NA の 6 割 ~ 9 割に相当する光束 200m について、結晶軸 [111] を光軸とする第 1 レンズ群中の光路長の総和 (205am + 205bm + 206am + 206bm) と、結晶軸 [100] を光軸とする第 2 レンズ群中の光路長の総和 (210m + 211m + 212m) の 1.5 倍との差が $\pm 1.0 \times 10^{-6} \times 3$ (cm) 以内になるように設定している。こうして、第 2 実施形態においても第 1 実施形態と同様に、第 1 レンズ群と第 2 レンズ群との組み合わせにより、複屈折の影響をほぼ完全に消し去ることが可能になる。

ところで、上述の第 2 実施形態では、全てのレンズ 205 ~ 212 が蛍石で形成されているため、第 1 レンズ群 (205, 206) および第 2 レンズ群 (210, 211, 212) 以外の他の蛍石レンズ 207 ~ 209 においても複屈折が生じている。しかしながら、蛍石レンズ 207 ~ 209 では、結像光束の進行方向の光軸に対してなす角度が比較的小さい。したがって、蛍石レンズ 207 ~ 209 の光軸を結晶軸 [111] または [100] と一致させることにより、各蛍石レンズ 207 ~ 209 で発生する複屈折量を小さく抑えることができ、ひいては蛍石レンズ 207 ~ 209 による複屈折の影響を小さく抑えることができる。

ただし、これらの蛍石レンズ 207 ~ 209 による複屈折の影響を無視することができない場合には、蛍石レンズ 207 ~ 209 (実際には 4 つ以上のレンズが必要) で第 1 レンズ群および第 2 レンズ群を構成し、第 1 レンズ群および第 2 レンズ群に対して本発明を適用すればよい。すなわち、第 1 レンズ群では光軸を結晶軸 [111] と一致させ、第 2 レンズ群では光軸を結晶軸 [100] と一致させる。そして、第 1 レンズ群を構成する第 1 A レンズ群と第 1 B レンズ群とを光軸を中心として結晶軸方位が所定の角度関係となるように設定するとともに、第 2 レンズ群を構成する第 2 A レンズ群と第 2 B レンズ群とを光軸を中心として結晶軸方位が所定の角度関係となるように設定する。さらに、像側 NA の 6 割 ~ 9 割に相当する光束について各レンズ群 (1 A, 1 B, 2 A, 2 B) 内の光路長が所定の関係を満たすように設定することにより、複屈折の影響をさらに高精度に補正することが可能になる。

なお、上述の第 1 実施形態および第 2 実施形態では、第 1 A レンズ群内の光路長の総和と第 1 B レンズ群内の光路長の総和との差に対する許容値および第 2 A レンズ群内の光路長の総和と第 2 B レンズ群内の光路長の総和との差に対する許容値を、 $\pm 0.5 \times 10^{-6} \times 3$ (cm) に設定している。この許容値の具体的な数値は、波長が 193 (nm) の ArF レーザー光源の場合すなわち第 1 実施形態の場合には ± 3.6 (cm) となる。また、波長が 157 (nm) の F₂ レーザー光源の場合すなわち第 2 実施形態の場合には ± 1.9 (cm) となる。

一方、第 2 レンズ群内の光路長の総和の 1.5 倍と第 1 レンズ群内の光路長の総和との差

に対する許容値を、 $\pm 1.0 \times 10^{-6} \times \lambda^3$ (cm) に設定している。この許容値の具体的な数値は、波長が 193 (nm) の ArF レーザ光源の場合すなわち第 1 実施形態の場合には ± 7.2 (cm) となる。また、波長が 157 (nm) の F₂ レーザ光源の場合すなわち第 2 実施形態の場合には ± 3.8 (cm) となる。上記の様に、光路長差の許容値を表す式において波長の 3 乗の係数が掛かるのは、結晶材料中の光の進行方向に依存する複屈折の場合、屈折率の変動量すなわち結像光束の波面のずれ量 (単位は長さ) が λ^{-2} に比例して生じ、これは波面収差 (位相) としては λ^{-3} に比例して結像特性に悪影響を与える量であるためである。

なお、上記光路長差の規格は、 k_1 ファクター = 0.35 程度の微細度のパターン (線幅 = $k_1 \times \lambda / NA$; λ は露光波長) を想定した場合に、結像特性に大きな影響を与えないための許容値であり、露光するパターンサイズがより小さい場合にはさらに厳しい規格が必要であることはいうまでもない。ここで、光路長とは、結晶材料中の光路の長さ (幾何学的な長さ) そのものを指しており、屈折率を掛けた値や屈折率で割った値ではない。また、上述の第 1 実施形態および第 2 実施形態では、像側 NA (最大 NA) の 6 割 ~ 9 割に相当する光束すなわち光軸に対して像側 NA の 0.6 倍 ~ 0.9 倍に対応する角度をなす光束について、各レンズ群 (1A, 1B, 2A, 2B) における結晶レンズ中の合計光路長の差や、第 1 レンズ群と第 2 レンズ群との間における結晶レンズ中の合計光路長の差を問題にしている。これは、像側 NA の 7 割以内に相当する光束が結像光束全体の約 50% に相当するため、像側 NA の 7 割程度に相当する光束について複屈折の解消効果を最大に発揮させることにより、結像光束全体で最もバランスよく複屈折の解消が可能になるためである。

ただし、複屈折によって生じる収差の種類や、投影光学系が露光すべきパターンの種類によっては、像側 NA により近い部分の光束の収差が結像特性に対してより大きな影響を与えることもある。したがって、像側 NA の 7 割を中心としてやや最大 NA 側に配位の広がった光束、すなわち像側 NA の 6 割 ~ 9 割に相当する光束について、複屈折の解消効果を最大とするように設定することが望ましい。

さらに、上述の第 1 実施形態および第 2 実施形態では、本発明の説明を簡略化するために、レチクル 101 (201) 上の 1 点を発した結像光束についてのみ着目している。しかしながら、良好な結像性能を得るためには、レチクル 101 (201) 上の有効照明エリア内の全ての点からウエハ 102 (202) 上の有効露光エリア内に達する結像光束について、本発明の上記関係を満たすべきであることは言うまでもない。

なお、本発明の第 3 実施形態として、結晶軸 [110] を光軸とするレンズ群を組み合わせることで複屈折の影響を解消する方法もある。第 10A 図 ~ 第 10D 図は、蛍石レンズの光軸を結晶軸 [110] と一致させた場合の複屈折について説明する図である。例えば、第 2 図に示す第 1 実施形態の投影光学系に対して第 3 実施形態を適用すると、第 10A 図および第 10B 図に示すように、蛍石レンズ 105 および 106 の光軸はともに結晶軸 [110] と一致するように設定される。

そして、蛍石レンズ 105 と 106 とは、光軸 AX 102 に垂直な面内に存在する結晶軸 [001] が光軸を中心として相対的に 90° 回転するように配置される。換言すると、蛍石レンズ 106 は、結晶軸 [001] の向きが蛍石レンズ 105 を基準として 106 = 90° だけ -z 軸廻りに回転している。こうして、蛍石レンズ 105 は第 3A レンズ群を構成し、蛍石レンズ 106 は第 3B レンズ群を構成し、蛍石レンズ 105 と 106 とは第 3 レンズ群を構成する。

結晶軸 [110] を光軸とする組み合わせでは、結晶軸 [111] を光軸とする組み合わせや結晶軸 [100] を光軸とする組み合わせよりも、複屈折 (R 偏光と 偏光との間の屈折率差) を小さく抑えることが可能である。ただし、結晶軸 [110] を光軸とする組み合わせでは、光軸を中心とした方位角に対する複屈折の均一性は悪く、90° 周期の不均一性が残存してしまう。

そこで、第 3 実施形態では、第 10C 図および第 10D 図に示すように、蛍石レンズ 109 および 110 の光軸もともに結晶軸 [110] と一致するように設定する。そして、蛍

石レンズ109と110とを、光軸AX102に垂直な面内に存在する結晶軸[001]が光軸を中心として相対的に90°回転するように配置する。さらに、蛍石レンズ105および106と蛍石レンズ109および110とが、光軸AX102を中心として45°だけ相対的に回転した位置関係を有するように設定する。

すなわち、蛍石レンズ105を基準として、蛍石レンズ106は結晶軸[001]の向きが106=90°だけ-z軸廻りに回転し、蛍石レンズ109は結晶軸[001]の向きが109=45°だけ-z軸廻りに回転し、蛍石レンズ110は結晶軸[001]の向きが110=135°だけ-z軸廻りに回転している。こうして、蛍石レンズ109は第4Aレンズ群を構成し、蛍石レンズ110は第4Bレンズ群を構成し、蛍石レンズ109と110とは第4レンズ群を構成する。

10

以上のように、第3実施形態では、90°周期の不均一性を有する一对のレンズペアすなわち第3レンズ群と第4レンズ群とを45°だけ相対回転させて配置することにより、90°周期の不均一性がほぼ完全に相殺される。また、前述のように、結晶軸[110]を光軸として90°だけ相対回転させて配置したレンズペアによる残存複屈折は小さいので、90°回転ペアをさらに45°回転させて配置することにより、十分な複屈折の除去効果を得ることができる。

なお、第3実施形態においても、90°回転ペアを構成する第3レンズ群および第4レンズ群は、2枚の蛍石レンズからなる構成に限定されることなく、3枚以上の蛍石レンズによってそれぞれ構成することもできる。また、像側NAの6割~9割に相当する光束について、第3Aレンズ群の光路長と第3Bレンズ群の光路長との差を $\pm 0.5 \times 10^{-6} \times 10^3$ (cm)以内に設定するとともに、第4Aレンズ群の光路長と第4Bレンズ群の光路長との差を $\pm 0.5 \times 10^{-6} \times 10^3$ (cm)以内に設定することが望ましい。さらに、像側NAの6割~9割に相当する光束について、第3レンズ群での光路長の総和と、第2レンズ群での光路長の総和との差を、 $\pm 1.0 \times 10^{-6} \times 10^3$ (cm)以内に設定することが望ましい。

20

なお、以上の第3実施形態では、結晶軸[110]を光軸とするレンズのうち、近接して配置される第3レンズ群に属する2枚の蛍石レンズ(レンズ105およびレンズ106)、および近接して配置される第4レンズ群に属する2枚の蛍石レンズ(レンズ109およびレンズ110)では、各レンズ群において、光軸に垂直な面内に存在する結晶軸[001]が光軸を中心として90°だけ回転するようにそれぞれ配置するものとしている。また、第3レンズ群と第4レンズ群とは、光軸を中心として相対的に90°だけ回転するように配置するものとしている。しかしながら、結晶軸[110]を光軸とするレンズ群すなわち[110]レンズ群において、各レンズの光軸を中心とした回転角度の関係は、これに限定されるものではない。

30

すなわち、蛍石レンズ105, 蛍石レンズ106, 蛍石レンズ109, 蛍石レンズ110の4枚のレンズについて、光軸に垂直な面内に存在する結晶軸[001]が光軸を中心として45°ずつ離れて存在するように、各レンズの回転角度の関係を定めることにより、第3実施形態と同等の複屈折除去効果を得ることができる。この場合、4枚の蛍石レンズのうち、第1のレンズに対して第2のレンズが光軸を中心として所定の向きに45°だけ回転した位置関係を有し、第2のレンズが第3のレンズに対して光軸を中心として同じ所定の向きに45°だけ回転した位置関係を有し、第3のレンズが第4のレンズに対して光軸を中心として同じ所定の向きに45°だけ回転した位置関係を有する。

40

また、蛍石レンズ105, 蛍石レンズ106, 蛍石レンズ109, 蛍石レンズ110がそれぞれ複数枚の蛍石レンズから構成されていても良いことは、上述した他の実施形態と同様である。この場合、少なくとも4枚の蛍石レンズのうちの各レンズは、光軸に垂直な面内に存在する結晶軸[001]が光軸を中心として45°ずつ離れた所定の方位に一致する4つのレンズ群、すなわち第6レンズ群、第7レンズ群、第8レンズ群および第9レンズ群のいずれか1つのレンズ群に分類され、光軸を中心として所定角度だけ回転して配置される。

そして、たとえば像側NAの6割~9割に相当する光束について、第6レンズ群中の光路

50

長の総和 L_6 と第 7 レンズ群中の光路長の総和 L_7 と第 8 レンズ群中の光路長の総和 L_8 と第 9 レンズ群中の光路長の総和 L_9 とが互いにほぼ等しくなるように設定される。具体的には、第 6 レンズ群中の光路長の総和 L_6 と第 7 レンズ群中の光路長の総和 L_7 と第 8 レンズ群中の光路長の総和 L_8 と第 9 レンズ群中の光路長の総和 L_9 とのうち、任意に選択された 2 つの光路長の総和の差が $\pm 0.5 \times 10^{-6} \times 3$ (cm) 以内になるように設定する。こうして、第 3 実施形態と同様に、複屈折の影響を小さく抑えることができる。

前述のように、結晶軸 $[110]$ を光軸とし光軸中心に相対回転させて配置した $[110]$ レンズ群では、結晶軸 $[111]$ を光軸として 60° だけ相対回転させた $[111]$ レンズ群や結晶軸 $[100]$ を光軸として 45° だけ相対回転させた $[100]$ レンズ群よりも、複屈折の影響を小さく抑えることが可能である。また、 $[110]$ レンズ群に残存する複屈折において、前述の R 偏光に対する屈折率 (n_{R110}) が前述の 偏光に対する屈折率 (n_{110}) よりも高くなるのが、本件発明者の解析により明らかとなった。

すなわち、 $[110]$ レンズ群に残存する複屈折の符号は、 $[111]$ レンズ群に残存する複屈折と同符号であり、 $[100]$ レンズ群に残存する複屈折と逆符号である。したがって、 $[110]$ レンズ群と $[100]$ レンズ群とを組み合わせる使用することにより、複屈折の影響を相殺することが可能になる。さらに、 $[110]$ レンズ群と $[100]$ レンズ群と $[111]$ レンズ群とを組み合わせる使用することにより、複屈折の影響を相殺することが可能になる。

さらに詳細には、 $[110]$ レンズ群における R 偏光に対する屈折率 n_{R110} と 偏光に対する屈折率 n_{110} との差と、 $[100]$ レンズ群における R 偏光に対する屈折率 n_{R100} と 偏光に対する屈折率 n_{100} との差と、 $[111]$ レンズ群における R 偏光に対する屈折率 n_{R111} と 偏光に対する屈折率 n_{111} との差との間には、次の式 (1) に示す関係が成立することが、本件発明者の解析により明らかとなった。

$$(n_{R110} - n_{110}) : (n_{R100} - n_{100}) : (n_{R111} - n_{111}) = 3 : -12 : 8 \quad (1)$$

なお、上述の式 (1) において、屈折率 n_{R100} と屈折率 n_{100} との差と、屈折率 n_{R111} と屈折率 n_{111} との差とに着目すると、次の式 (2) に示す関係が得られる。式 (2) は、「結晶軸 $[100]$ を光軸としたレンズペア (105, 106) の複屈折量すなわち ($n_{R100} - n_{100}$) は、結晶軸 $[111]$ を光軸としたレンズペア (109, 110) での複屈折量すなわち ($n_{R111} - n_{111}$) の約 -1.5 倍になる」という旨の第 1 実施形態における記載と整合している。

$$(n_{R100} - n_{100}) : (n_{R111} - n_{111}) = -12 : 8 \quad (2)$$

したがって、立方晶系に属する結晶で形成された複数のレンズ (光学素子) を含む光学系において、たとえば像側 NA の 6 割 ~ 9 割に相当する光束について、 $[110]$ レンズ群中の光路長の総和 L_{110} と、 $[100]$ レンズ群中の光路長の総和 L_{100} と、 $[111]$ レンズ群中の光路長の総和 L_{111} との間に、次の式 (3) に示す関係が成立するとき、複屈折の影響を最小限に抑えることができる。

$$3 \times L_{110} - 12 \times L_{100} + 8 \times L_{111} = 0 \quad (3)$$

ただし、各結晶軸を光軸とするレンズ群 ($[110]$ レンズ群、 $[100]$ レンズ群、 $[111]$ レンズ群) が、前述の通り、所望の回転角度の関係および所望の光路長の関係を有するレンズ群からなることは言うまでもない。実際には、式 (3) の左辺の値を厳密に 0 に設定することは難しいが、式 (3) の左辺の値が $\pm 8.0 \times 10^{-6} \times 3$ (cm) 以内になるように設定することにより、複屈折の影響を実質的に回避することが可能になる。この式 (3) の左辺の許容値も、前述の許容値と同様に、 k_1 ファクター = 0.35 程度の微細度のパターンの露光を前提とした許容値である。したがって、より微細なパターンを露光する場合には、より厳しい許容値を設定する必要があり、微細でないパターンを露光する場合には、これよりも緩い許容値で十分であることは、言うまでもない。

なお、式 (3) は、必ずしも $[110]$ レンズ群と $[100]$ レンズ群と $[111]$ レンズ群とをすべて含む場合の各光路長の関係だけを規定するものではない。例えば、 $[11$

1] レンズ群を含むことなく [110] レンズ群と [100] レンズ群とだけを含む光学系において複屈折の影響を低減するには、[110] レンズ群中の光路長の総和 L_{110} と、[100] レンズ群中の光路長の総和 L_{100} との間に、次の式(4)に示す関係が成立すれば良い。

$$3 \times L_{110} - 12 \times L_{100} = 0 \quad (4)$$

同様に、[110] レンズ群を含むことなく [111] レンズ群と [100] レンズ群とだけを含む光学系において複屈折の影響を低減するには、[111] レンズ群中の光路長の総和 L_{111} と、[100] レンズ群中の光路長の総和 L_{100} との間に、次の式(5)に示す関係が成立すれば良い。

$$12 \times L_{100} - 8 \times L_{111} = 0 \quad (5)$$

これらの式(4)および(5)においても、その左辺の値を厳密に0に設定することは難しいが、式(4)の左辺の値および式(5)の左辺の値がともに $\pm 8.0 \times 10^{-6} \times 3$ (cm) 以内になるように設定することにより、複屈折の影響を実質的に回避することが可能になる。この許容値に基づいて、式(5)を式(6)に示すように変形し、さらに式(6)を式(7)に示すように変形することができる。

$$|12 \times L_{100} - 8 \times L_{111}| \leq 8.0 \times 10^{-6} \times \lambda^3 \quad (6)$$

$$|1.5 \times L_{100} - L_{111}| \leq 1.0 \times 10^{-6} \times \lambda^3 \quad (7)$$

同様に、この許容値に基づいて、式(4)を式(8)に示すように変形し、さらに式(8)を式(9)に示すように変形することができる。

$$|3 \times L_{110} - 12 \times L_{100}| \leq 8.0 \times 10^{-6} \times \lambda^3 \quad (8)$$

$$|L_{110} - 4 \times L_{100}| \leq 2.7 \times 10^{-6} \times \lambda^3 \quad (9)$$

ここで、式(7)は、「結晶軸 [100] を光軸とする第2レンズ群 (105, 106) での光路長の総和 ($105m + 106m$) の1.5倍と、結晶軸 [111] を光軸とする第1レンズ群 (109, 110) での光路長の総和 ($109m + 110m$) との差が $\pm 1.0 \times 10^{-6} \times 3$ (cm) 以内になるように設定」という旨の第1実施形態における記載と整合している。また、式(9)は、[110] レンズ群中の光路長の総和 L_{110} と、[100] レンズ群中の光路長の総和 L_{100} の4倍との差が、 $\pm 2.7 \times 10^{-6} \times 3$ (cm) 以内であれば、良好な結像特性を得ることができることを意味している。

なお、光学系の設計によっては、結晶軸 [110] を光軸と一致させるべきレンズが多数存在する可能性がある。その場合には、結晶軸 [110] を光軸と一致させるべきレンズを、上記4つのレンズ群 (第6レンズ群 ~ 第9レンズ群) に分け、各レンズ群間で光軸に垂直な面内に存在する結晶軸 [001] が光軸を中心として 45° ずつ離れて存在するように、各レンズを光軸中心に回転させればよい。

あるいは、結晶軸 [110] を光軸と一致させるべきレンズを、8個のレンズ群に分けることもできる。すなわち、上記4つのレンズ群 (第6レンズ群 ~ 第9レンズ群) の組を2つ設け、各組の4つのレンズ群において、光軸に垂直な面内に存在する結晶軸 [001] が光軸を中心として 45° ずつ離れて存在するように、各レンズを光軸中心に回転させる。この場合、各組の4つのレンズ群において、複屈折の回転異方性がそれぞれ最小に抑えられているので、第1組の4つのレンズ群と第2組の4つのレンズ群との間で、結晶方向 (光軸に垂直な面内に存在する結晶軸 [001] の方向) の関係についての制約は特にない。

このようなレンズ群への分割は、上記の4群または8群に限定されるものではなく、[110] レンズ群を形成する4つのレンズ群を任意の組数だけ設ける分割、すなわち4の整数倍 (4, 8, 12, ...) のレンズ群への分割であれば良い。この場合、各組の [110] レンズ群内では、光軸に垂直な面内に存在する結晶軸 [001] が光軸を中心として 45° ずつ離れて存在するように、各レンズを光軸中心に回転させる。そして、たとえば像側 NA の6割 ~ 9割に相当する光束について、結晶軸 [001] が同一方向を向く各レ

10

20

30

40

50

レンズ群内の光路長の和が互いにほぼ等しくなるように設定すればよい。さらに、複数組の [1 1 0] レンズ群内の光路長の総和 L_{110} が上記関係式 (3) , (4) , (5) を満たすことにより、複屈折の悪影響は実質的に無くなる。

また、結晶軸 [1 0 0] を光軸と一致させるべきレンズが多数存在する可能性もあり、その場合には、[1 0 0] レンズ群を複数組だけ形成することも可能である。このときも、各組の [1 0 0] レンズ群内では、各レンズにおける結晶軸方向の回転関係は 45° に設定されるが、異なる組の [1 0 0] レンズ群の間では、結晶軸方向の関係についての制約は特にない。そして、複数組の [1 0 0] レンズ群内の光路長の総和 L_{100} が上記関係式 (3) , (4) , (5) を満たすことにより、複屈折の悪影響は実質的に無くなる。

さらに、結晶軸 [1 1 1] を光軸と一致させるべきレンズが多数存在する場合にも同様に、[1 1 1] レンズ群を複数組だけ形成することができる。この場合も、各組の [1 1 1] レンズ群内では、各レンズにおける結晶軸方向の回転関係は 60° に設定されるが、異なる組の [1 1 1] レンズ群の間では、結晶軸方向の関係についての制約は特にない。そして、複数組の [1 1 1] レンズ群内の光路長の総和 L_{111} が上記関係式 (3) , (4) , (5) を満たすことにより、複屈折の悪影響は実質的に無くなる。

第 1 1 図は、本発明の第 4 実施形態にかかる投影光学系の構成を概略的に示す図である。第 4 実施形態では、第 2 実施形態と同様に、波長 (nm) が 157 nm の F_2 レーザーに対して収差補正が最適化された反射屈折型の投影光学系に本発明を適用している。第 4 実施形態の投影光学系 3 0 0 では、レチクル 3 0 1 (第 1 図のレチクル 1 0 1 に対応) 上の 1 点を射出した光束が、光路変更手段としての反射プリズム 3 0 3 で偏向された後、光軸 $A X 3 0 0 b$ に沿って配置されたレンズ 3 0 5 および 3 0 6 を介して、凹面反射鏡 3 0 4 に入射する。

凹面反射鏡 3 0 4 で反射された光束は、レンズ 3 0 6 および 3 0 5 を介して、反射プリズム 3 0 3 で再び偏向される。反射プリズム 3 0 3 で偏向された光束は、光軸 $A X 3 0 0 a$ に沿って配置されたレンズ 3 0 7 ~ 3 1 4 を介して、ウエハ 3 0 2 (第 1 図のウエハ 1 0 2 に対応) 上の 1 点に集光する。こうして、ウエハ 3 0 2 上には、レチクル 3 0 1 に描画されたパターンの投影像が形成される。第 4 実施形態では、すべてのレンズがフッ化カルシウム結晶 (蛍石) で形成されている。

さらに詳細には、第 4 実施形態では、蛍石レンズ 3 0 5 および 3 0 6 において、結晶軸 [1 1 0] を光軸 $A X 3 0 0 b$ と一致させている。また、蛍石レンズ 3 1 1 および 3 1 2 において、結晶軸 [1 1 0] を光軸 $A X 3 0 0 a$ と一致させている。さらに、蛍石レンズ 3 1 3 および 3 1 4 において、結晶軸 [1 0 0] を光軸 $A X 3 0 0 a$ と一致させている。換言すれば、蛍石レンズ 3 0 5 , 3 0 6 , 3 1 1 , 3 1 2 は [1 1 0] レンズ群を構成し、蛍石レンズ 3 1 3 および 3 1 4 は [1 0 0] レンズ群を構成している。

第 1 2 A 図および第 1 2 B 図は、第 4 実施形態にかかる投影光学系中の蛍石レンズにおける光路を説明する図である。第 1 2 A 図および第 1 2 B 図では、ウエハ上 3 0 2 に最大入射角 3 0 0 (第 1 1 図を参照) で入射する光束 (像側 NA に相当する光束) を参照符号 3 0 0 e で示している。また、像側 NA の 6 割 ~ 9 割に相当する光束を参照符号 3 0 0 m で示している。第 1 2 A 図を参照すると、蛍石レンズ 3 0 5 および 3 0 6 では、結像光束が往復で 2 回レンズ内を通過する。したがって、像側 NA の 6 割 ~ 9 割に相当する光束 3 0 0 m について、蛍石レンズ 3 0 5 内の光路長は $(3 0 5 a m + 3 0 5 b m)$ であり、蛍石レンズ 3 0 6 内の光路長は $(3 0 6 a m + 3 0 6 b m)$ である。

一方、第 1 2 B 図を参照すると、像側 NA の 6 割 ~ 9 割に相当する光束 3 0 0 m について、蛍石レンズ 3 1 1 内の光路長は $3 1 1 m$ であり、蛍石レンズ 3 1 2 内の光路長は $3 1 2 m$ であり、蛍石レンズ 3 1 3 内の光路長は $3 1 3 m$ であり、蛍石レンズ 3 1 4 内の光路長は $3 1 4 m$ である。第 4 実施形態では、結晶軸 [1 1 0] を光軸とする蛍石レンズ 3 0 5 , 3 0 6 , 3 1 1 , 3 1 2 内の各光路長 $(3 0 5 a m + 3 0 5 b m , 3 0 6 a m + 3 0 6 b m , 3 1 1 m , 3 1 2 m)$ が $\pm 0.5 \times 10^{-6} \times 3$ (cm) の範囲でほぼ等しくなるように、各レンズの厚さ等を設定している。

換言すれば、蛍石レンズ 3 0 5 , 3 0 6 , 3 1 1 , 3 1 2 内の各光路長 $(3 0 5 a m + 3$

05bm, 306am + 306bm, 311m, 312m)のうち任意に選択された2つの光路長の差が $\pm 0.5 \times 10^{-6} \times 3^3$ (cm)以内になるように、各レンズの厚さを設定している。そして、蛍石レンズ305, 306, 311, 312においては、各光軸(Ax300a, Ax300b)に垂直な面内に存在する結晶軸[100]が光軸を中心として45°ずつ離れて存在するように、各レンズの回転角度の関係を設定している。また、結晶軸[100]を光軸とする蛍石レンズ313および314についても、その各光路長(313m, 314m)が $\pm 0.5 \times 10^{-6} \times 3^3$ (cm)の範囲でほぼ等しくなるように、各レンズの厚さを設定している。換言すれば、蛍石レンズ313内の光路長313mと蛍石レンズ314内の光路長314mとの差が $\pm 0.5 \times 10^{-6} \times 3^3$ (cm)以内になるように、各レンズの厚さを設定している。そして、蛍石レンズ313と314とでは、光軸Ax300aに垂直な面内に存在する結晶軸[001]が45°だけ相対的に回転した位置関係を有するように設定されている。

こうして、第4実施形態では、結晶軸[110]を光軸とする4枚のレンズからなる[110]レンズ群と、結晶軸[100]を光軸とする2枚のレンズからなる[100]レンズ群との間で、複屈折の影響の相殺が生じ、良好な結像特性を得ることが可能になる。さらに、[110]レンズ群内の各蛍石レンズ305, 306, 311, 312の光路長の総和(305am + 305bm + 306am + 306bm + 311m + 312m = L110)と、[100]レンズ群内の各蛍石レンズ313, 314の光路長の総和(313m + 314m = L100)とが上記関係式(8)または(9)を満足するように設定することにより、上記相殺効果を最大限に発揮させることができ、複屈折の影響を極小にすることができる。

すなわち、[110]レンズ群内の光路長の総和L110と、[100]レンズ群内の光路長の総和L100との間で、 $(3 \times L110 - 12 \times L100)$ の絶対値が $8.0 \times 10^{-6} \times 3^3$ (cm)以下の値になるように、あるいは $(L110 - 4 \times L100)$ の絶対値が $2.7 \times 10^{-6} \times 3^3$ (cm)以下の値になるように設定することにより、上記相殺効果を最大限に発揮させることができ、複屈折の影響を極小にすることができる。なお、第4実施形態においても、その他の蛍石レンズ(レンズ307~310)を、更に複屈折を解消する組み合わせに設定して、複屈折解消効果を一層発揮させることも可能である。

なお、以上の各実施形態において、光軸を結晶軸[111]と一致させる[111]レンズ群については、複屈折の解消のために複数のレンズ間で光軸を中心として60°回転して配置している。しかしながら、[111]レンズ群においては、その結晶方位が光軸を中心として3回回転対称(周期120°の回転対称)になるので、上記60°の回転が、 $60 + 120 = 180^\circ$ や、 $60 + 240 = 300^\circ$ の回転であっても良いことは、言うまでもない。

同様に、光軸を結晶軸[100]と一致させる[100]レンズ群では、複屈折の解消のためのレンズ回転角を、光軸を中心として45°としている。しかしながら、[100]レンズ群においては、その結晶方位が光軸を中心として4回回転対称(周期90°の回転対称)になるので、上記45°の回転が、 $45 + 90 = 135^\circ$ や、 $45 + 180 = 225^\circ$ や、 $45 + 270 = 315^\circ$ の回転であっても良いことは、言うまでもない。

なお、上述の各実施形態では、複屈折性の光学材料としてフッ化カルシウム結晶(蛍石)を用いているが、これに限定されることなく、他の一軸性結晶、たとえばフッ化バリウム結晶(BaF_2)、フッ化リチウム結晶(LiF)、フッ化ナトリウム結晶(NaF)、フッ化ストロンチウム結晶(SrF_2)、フッ化ベリリウム結晶(BeF_2)など、紫外線に対して透明な他の結晶材料を用いることもできる。このうち、フッ化バリウム結晶は、すでに直径200mmを越す大型の結晶材料も開発されており、レンズ材料として有望である。この場合、フッ化バリウム(BaF_2)などの結晶軸方位も本発明に従って決定されることが好ましい。また、上述の各実施形態では、投影光学系に本発明を適用しているが、これに限定されることなく、レチクル(マスク)を照明する照明光学系に本発明を適用することもできる。

上述の各実施形態の露光装置では、照明装置によってレチクル（マスク）を照明し（照明工程）、投影光学系を用いてマスクに形成された転写用のパターンを感光性基板に露光する（露光工程）ことにより、マイクロデバイス（半導体素子、撮像素子、液晶表示素子、薄膜磁気ヘッド等）を製造することができる。以下、各実施形態の露光装置を用いて感光性基板としてのウエハ等に所定の回路パターンを形成することによって、マイクロデバイスとしての半導体デバイスを得る際の手法の一例につき第13図のフローチャートを参照して説明する。

先ず、第13図のステップ301において、1ロットのウエハ上に金属膜が蒸着される。次のステップ302において、その1ロットのウエハ上の金属膜上にフォトレジストが塗布される。その後、ステップ303において、各実施形態の露光装置を用いて、マスク上のパターンの像がその投影光学系を介して、その1ロットのウエハ上の各ショット領域に順次露光転写される。その後、ステップ304において、その1ロットのウエハ上のフォトレジストの現像が行われた後、ステップ305において、その1ロットのウエハ上でレジストパターンをマスクとしてエッチングを行うことによって、マスク上のパターンに対応する回路パターンが、各ウエハ上の各ショット領域に形成される。

その後、更に上のレイヤの回路パターンの形成等を行うことによって、半導体素子等のデバイスが製造される。上述の半導体デバイス製造方法によれば、極めて微細な回路パターンを有する半導体デバイスをスループット良く得ることができる。なお、ステップ301～ステップ305では、ウエハ上に金属を蒸着し、その金属膜上にレジストを塗布、そして露光、現像、エッチングの各工程を行っているが、これらの工程に先立って、ウエハ上にシリコンの酸化膜を形成後、そのシリコンの酸化膜上にレジストを塗布、そして露光、現像、エッチング等の各工程を行っても良いことはいうまでもない。

また、各実施形態の露光装置では、プレート（ガラス基板）上に所定のパターン（回路パターン、電極パターン等）を形成することによって、マイクロデバイスとしての液晶表示素子を得ることもできる。以下、第14図のフローチャートを参照して、このときの手法の一例につき説明する。第14図において、パターン形成工程401では、各実施形態の露光装置を用いてマスクのパターンを感光性基板（レジストが塗布されたガラス基板等）に転写露光する、所謂光リソグラフィ工程が実行される。この光リソグラフィ工程によって、感光性基板上には多数の電極等を含む所定パターンが形成される。その後、露光された基板は、現像工程、エッチング工程、レジスト剥離工程等の各工程を経ることによって、基板上に所定のパターンが形成され、次のカラーフィルター形成工程402へ移行する。

次に、カラーフィルター形成工程402では、R（Red）、G（Green）、B（Blue）に対応した3つのドットの組がマトリックス状に多数配列されたり、またはR、G、Bの3本のストライプのフィルターの組を複数水平走査線方向に配列されたりしたカラーフィルターを形成する。そして、カラーフィルター形成工程402の後に、セル組み立て工程403が実行される。セル組み立て工程403では、パターン形成工程401にて得られた所定パターンを有する基板、およびカラーフィルター形成工程402にて得られたカラーフィルター等を用いて液晶パネル（液晶セル）を組み立てる。セル組み立て工程403では、例えば、パターン形成工程401にて得られた所定パターンを有する基板とカラーフィルター形成工程402にて得られたカラーフィルターとの間に液晶を注入して、液晶パネル（液晶セル）を製造する。

その後、モジュール組み立て工程404にて、組み立てられた液晶パネル（液晶セル）の表示動作を行わせる電気回路、バックライト等の各部品を取り付けて液晶表示素子として完成させる。上述の液晶表示素子の製造方法によれば、極めて微細な回路パターンを有する液晶表示素子をスループット良く得ることができる。

なお、上述の各実施形態では、露光装置に搭載される投影光学系に対して本発明を適用しているが、これに限定されることなく、この投影光学系を検査するための光学系、例えば収差計測用光学系などを含む他の一般的な光学系に対して本発明を適用することもできる。また、上述の各実施形態では、193nmの波長光を供給するArFエキシマレーザー

10

20

30

40

50

光源や157nmの波長光を供給するF₂レーザー光源を用いているが、これに限定されることなく、たとえば126nmの波長光を供給するArレーザー光源などを用いることもできる。

産業上の利用の可能性

以上説明したように、本発明では、たとえば蛍石のような複屈折性の結晶材料を用いても、複屈折の影響を実質的に受けることなく良好な光学性能を有する光学系を実現することができる。したがって、本発明の光学系を露光装置に組み込むことにより、高解像な投影光学系を介した高精度な投影露光により、良好なマイクロデバイスを製造することができる。

【図面の簡単な説明】

第1図は、本発明の各実施形態にかかる投影光学系を備えた露光装置の構成を概略的に示す図である。

第2図は、本発明の第1実施形態にかかる投影光学系の構成を概略的に示す図である。

第3図は、蛍石の結晶軸方位について説明する図である。

第4A図および第4B図は、第1実施形態にかかる投影光学系中の蛍石レンズにおける光路を説明する図である。

第5A図および第5B図は、蛍石レンズの光軸を結晶軸[111]と一致させた場合の複屈折について説明する図である。

第6A図および第6B図は、蛍石レンズの光軸を結晶軸[100]と一致させた場合の複屈折について説明する図である。

第7A図および第7B図は、第1実施形態の変形例にかかる投影光学系中の第1レンズ群および第2レンズ群の構成および光路を説明する図である。

第8図は、本発明の第2実施形態にかかる投影光学系の構成を概略的に示す図である。

第9A図および第9B図は、第2実施形態にかかる投影光学系中の蛍石レンズにおける光路を説明する図である。

第10A図～第10D図は、蛍石レンズの光軸を結晶軸[110]と一致させた場合の複屈折について説明する図である。

第11図は、本発明の第4実施形態にかかる投影光学系の構成を概略的に示す図である。

第12A図および第12B図は、第4実施形態にかかる投影光学系中の蛍石レンズにおける光路を説明する図である。

第13図は、マイクロデバイスとしての半導体デバイスを得る際の手法のフローチャートである。

第14図は、マイクロデバイスとしての液晶表示素子を得る際の手法のフローチャートである。

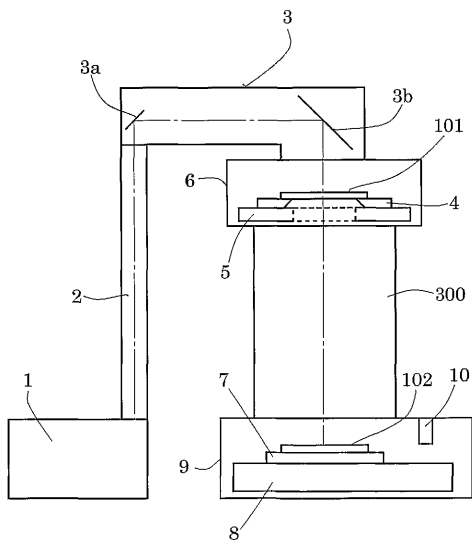
10

20

30

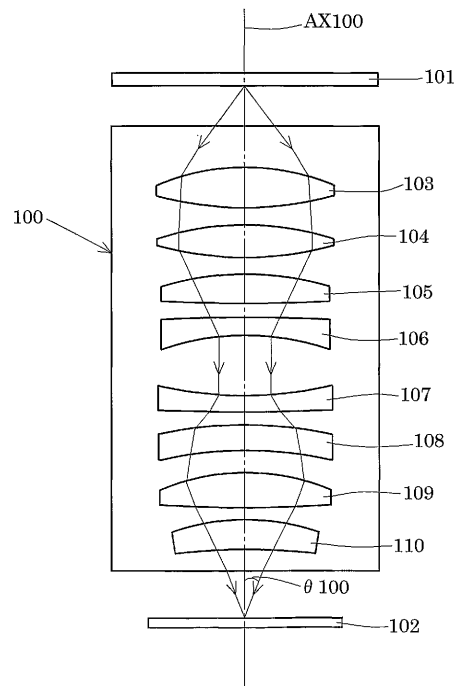
【 図 1 】

第 1 図



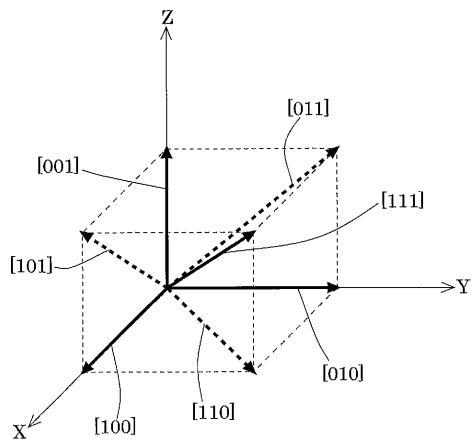
【 図 2 】

第 2 図



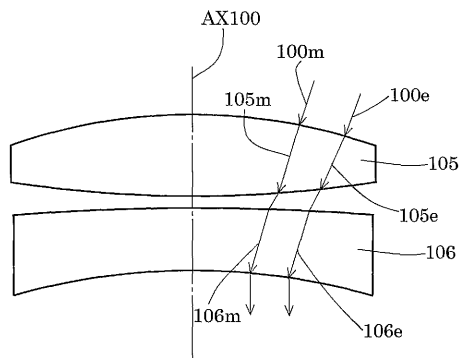
【 図 3 】

第 3 図



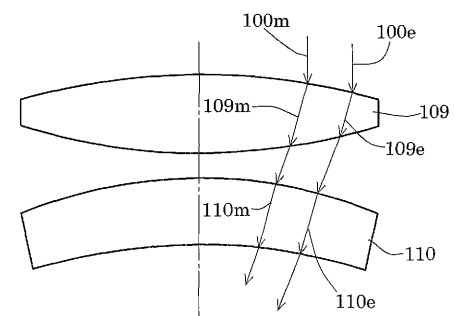
【 図 4 A 】

第 4 A 図



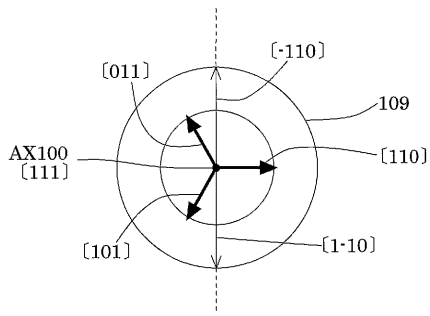
【 図 4 B 】

第 4 B 図

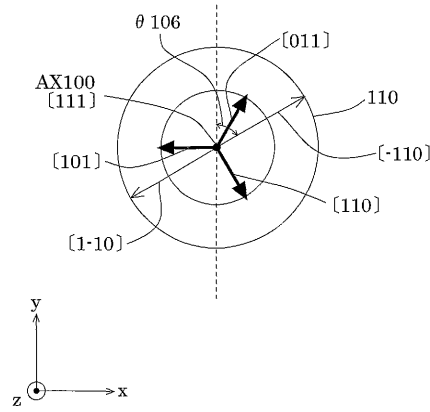


【 图 5 A 】

第 5 A 图

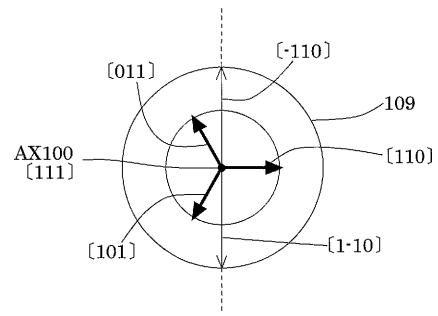


第 5 B 图

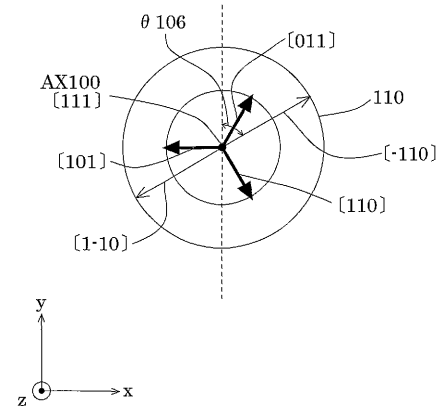


【 图 5 B 】

第 5 A 图

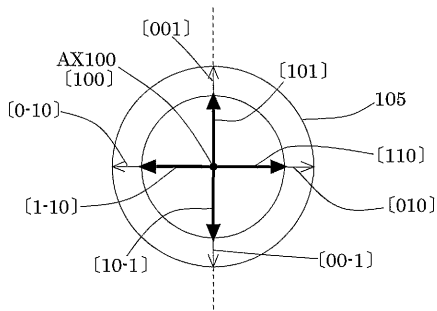


第 5 B 图

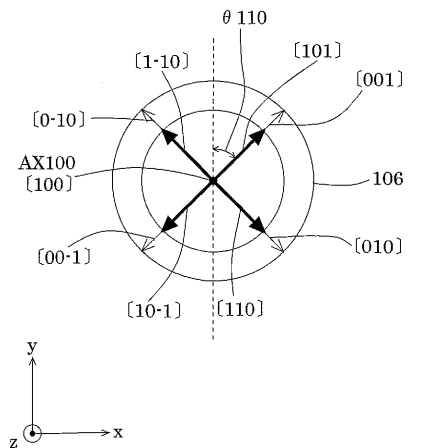


【 图 6 A 】

第 6 A 图

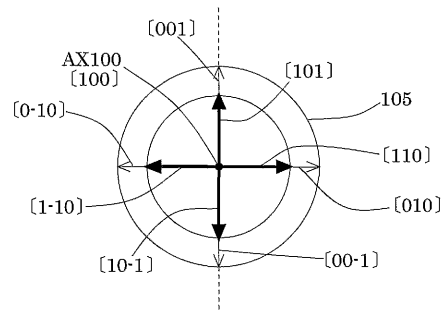


第 6 B 图

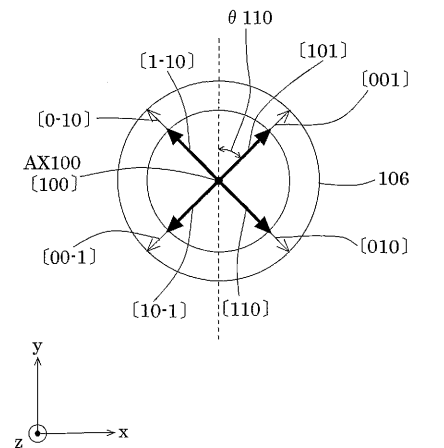


【 图 6 B 】

第 6 A 图

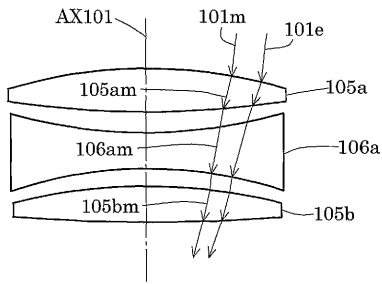


第 6 B 图



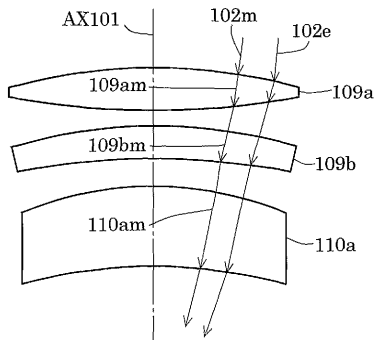
【 図 7 A 】

第 7 A 図



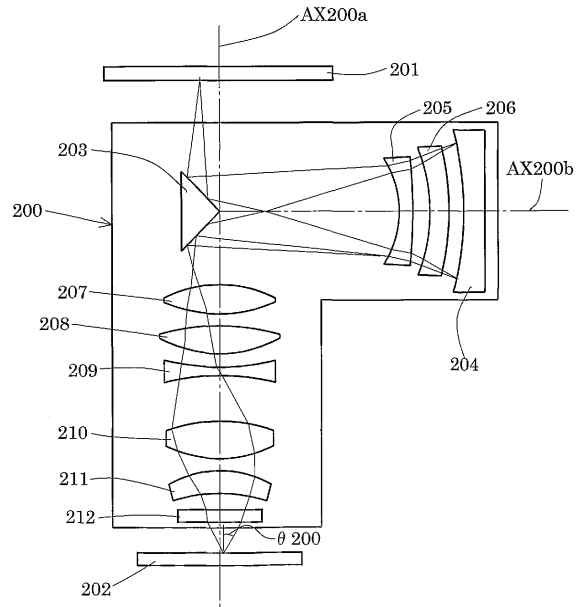
【 図 7 B 】

第 7 B 図



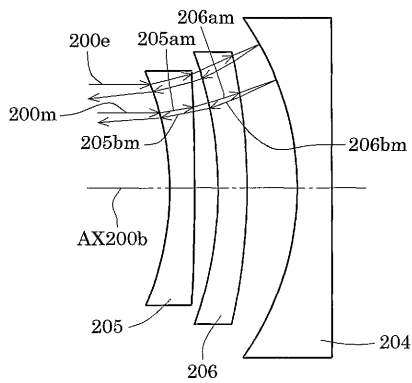
【 図 8 】

第 8 図



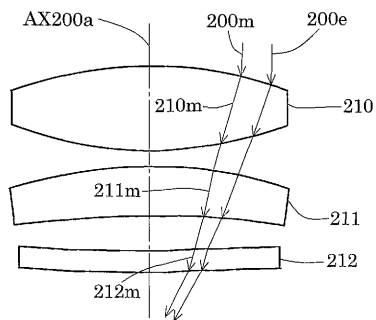
【 図 9 A 】

第 9 A 図



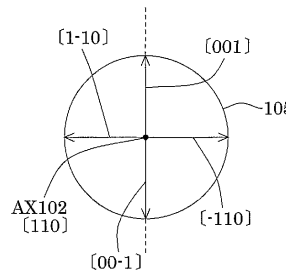
【 図 9 B 】

第 9 B 図

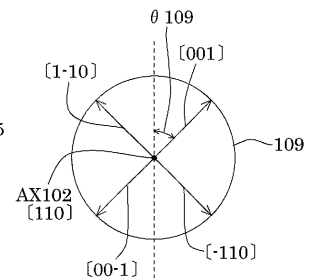


【 図 10 A 】

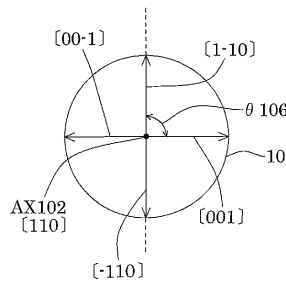
第 10 A 図



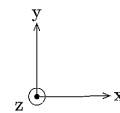
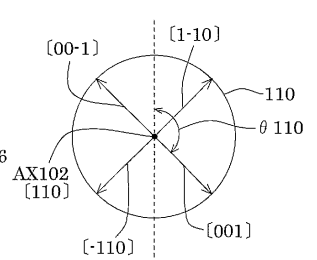
第 10 C 図



第 10 B 図

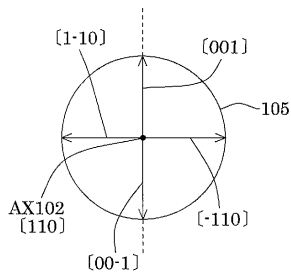


第 10 D 図

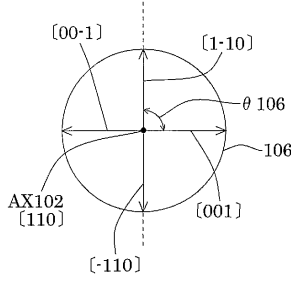


【 図 1 0 B 】

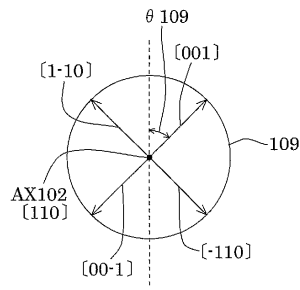
第 1 0 A 図



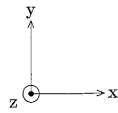
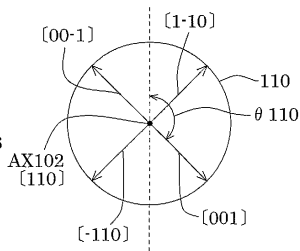
第 1 0 B 図



第 1 0 C 図

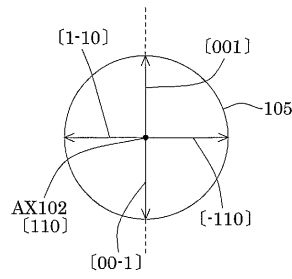


第 1 0 D 図

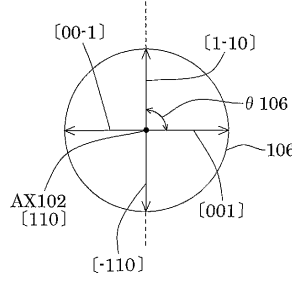


【 図 1 0 C 】

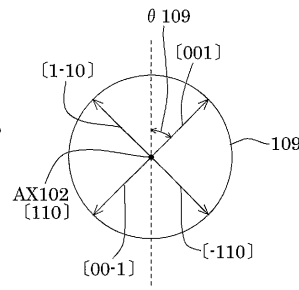
第 1 0 A 図



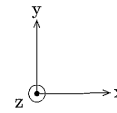
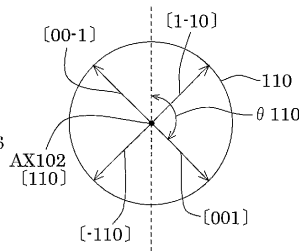
第 1 0 B 図



第 1 0 C 図

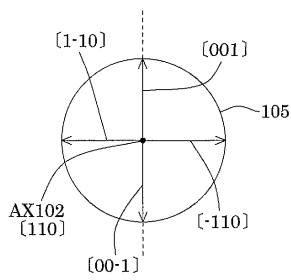


第 1 0 D 図

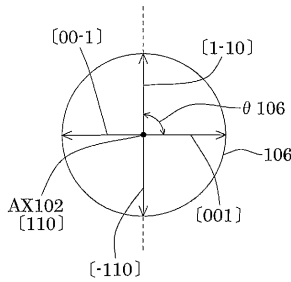


【 図 1 0 D 】

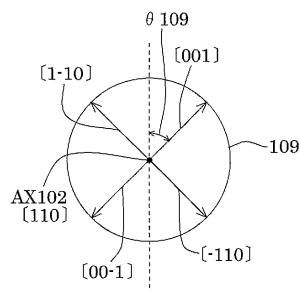
第 1 0 A 図



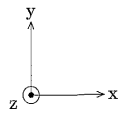
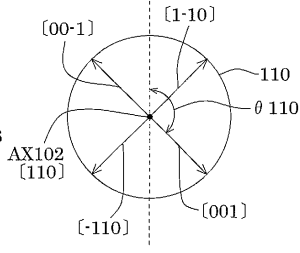
第 1 0 B 図



第 1 0 C 図

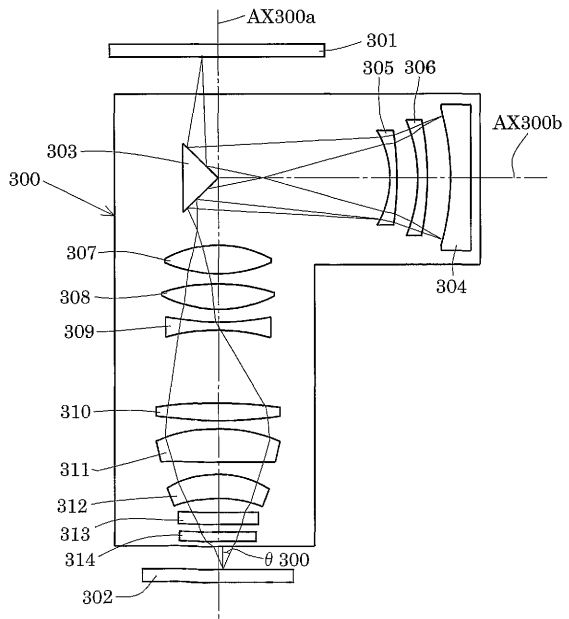


第 1 0 D 図



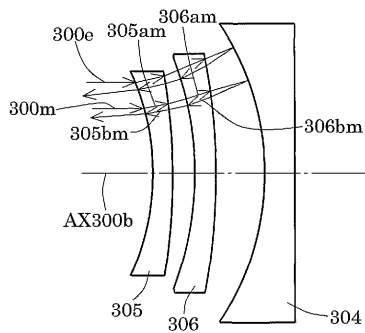
【 図 1 1 】

第 1 1 図



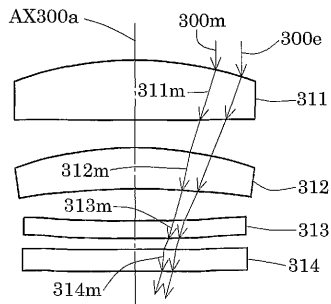
【図12A】

第12A図



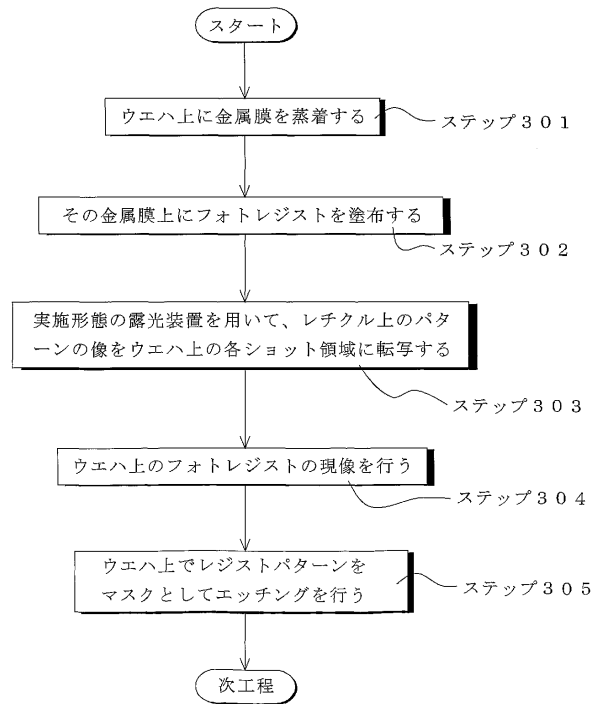
【図12B】

第12B図



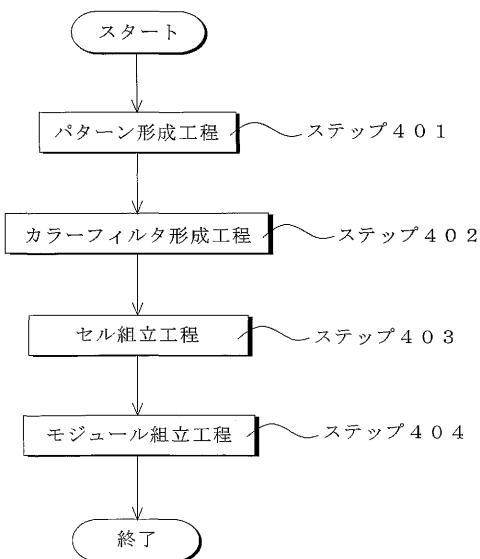
【図13】

第13図



【図14】

第14図



【 国際調査報告 】

| INTERNATIONAL SEARCH REPORT | | International application No. PCT/JP02/06131 |
|---|---|---|
| A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER Int.Cl. ¹ G02B13/24, G02B13/14, H01L21/027 | | |
| 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) Int.Cl. ³ G02B13/24, G02B13/14, H01L21/027 | | |
| Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched Jitsuyo Shinan Koho 1926-1996 Toroku Jitsuyo Shinan Koho 1994-2002 Kokai Jitsuyo Shinan Koho 1971-2002 Jitsuyo Shinan Toroku Koho 1996-2002 | | |
| Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used) | | |
| C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT | | |
| Category* | Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages | Relevant to claim No. |
| A | WO 00/41226 A1 (Nikon Corp.), 13 July, 2000 (13.07.00), Full text; all drawings & AU 200018912 A & EP 1063684 A1 & CN 1293822 A & KR 2001088279 A & US 6366404 B1 & US 2002/0085176 A1 | 1-35 |
| A | JP 8-107060 A (Nikon Corp.), 23 April, 1996 (23.04.96), Full text; all drawings (Family: none) | 1-35 |
| A | JP 2000-331927 A (Canon Inc.), 30 November, 2000 (30.11.00), Full text; all drawings (Family: none) | 1-35 |
| <input checked="" type="checkbox"/> Further documents are listed in the continuation of Box C. <input type="checkbox"/> See patent family 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 "I" 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, such combination being obvious to a person skilled in the art "&" document member of the same patent family | | |
| Date of the actual completion of the international search 30 August, 2002 (30.08.02) | | Date of mailing of the international search report 17 September, 2002 (17.09.02) |
| Name and mailing address of the ISA/ Japanese Patent Office | | Authorized officer |
| Facsimile No. | | Telephone No. |

Form PCT/ISA/210 (second sheet) (July 1998)

| INTERNATIONAL SEARCH REPORT | | International application No. PCT/JP02/06131 |
|---|--|---|
| C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT | | |
| Category* | Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages | Relevant to claim No. |
| A | JP 11-54411 A (Canon Inc.), 26 February, 1999 (26.02.99), Full text; all drawings (Family: none) | 1-35 |
| A | WO 00/64825 A1 (Nikon Corp.), 02 November, 2000 (02.11.00), Full text; all drawings & EP 1114802 A1 | 1-35 |

Form PCT/ISA/210 (continuation of second sheet) (July 1998)

| | | | |
|---|--|------------------|----------------|
| 国際調査報告 | | 国際出願番号 | PCT/JPO2/06131 |
| A. 発明の属する分野の分類 (国際特許分類 (IPC)) Int. Cl ⁷ G02B 13/24, G02B 13/14, H01L 21/027 | | | |
| B. 調査を行った分野 調査を行った最小限資料 (国際特許分類 (IPC)) Int. Cl ⁷ G02B 13/24, G02B 13/14, H01L 21/027 | | | |
| 最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの 日本実用新案公報 1926-1996年 日本国公開実用新案公報 1971-2002年 日本国登録実用新案公報 1994-2002年 日本国実用新案登録公報 1996-2002年 | | | |
| 国際調査で利用した電子データベース (データベースの名称、調査に使用した用語) | | | |
| C. 関連すると認められる文献 | | | |
| 引用文献の カテゴリー* | 引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示 | 関連する 請求の範囲の番号 | |
| A | WO 00/41226 A1 (株式会社ニコン) 2000.07.13、全文、全図 & AU 200018912 A & EP 1063684 A1 & CN 1293822 A & KR 2001088279 A & US 6366404 B1 & US 2002/0085176 A1 | 1-35 | |
| A | JP 8-107060 A (株式会社ニコン) 1996.04.23、全文、全図 (ファミリーなし) | 1-35 | |
| A | JP 2000-331927 A(キヤノン株式会社)2000.11.30、全文、全図 (ファミリーなし) | 1-35 | |
| <input checked="" type="checkbox"/> C欄の終きにも文献が列挙されている。 <input type="checkbox"/> パテントファミリーに関する別紙を参照。 | | | |
| * 引用文献のカテゴリー 「A」 特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの 「B」 国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの 「L」 優先権主張に拠る発明を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献 (理由を付す) 「O」 口頭による開示、使用、展示等に言及する文献 「P」 国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願 の日の後に公表された文献 「T」 国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの 「X」 特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの 「Y」 特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの 「&」 同一パテントファミリー文献 | | | |
| 国際調査を完了した日 | 30.08.02 | 国際調査報告の発送日 | 7.09.02 |
| 国際調査機関の名称及びあて先 日本国特許庁 (ISA/J P) 郵便番号100-8915 東京都千代田区霞が関三丁目4番3号 | 特許庁審査官 (権限のある職員) 森内 正明 (印) | 2V | 9222 |
| | 電話番号 03-3581-1101 内線 3269 | | |

| 国際調査報告 | | 国際出版番号 PCT/JP02/06131 |
|-----------------------|--|-----------------------|
| C (続き) . 関連すると認められる文献 | | |
| 引用文献の カテゴリー* | 引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示 | 関連する 請求の範囲の番号 |
| A | JP 11-54411 A (キヤノン株式会社) 1999.02.26、全文、全図 (ファミリーなし) | 1-35 |
| A | WO 00/64825 A1 (株式会社ニコン) 2000.11.02、全文、全図 & EP 1114802 A1 | 1-35 |

フロントページの続き

(81)指定国 AP(GH,GM,KE,LS,MW,MZ,SD,SL,SZ,TZ,UG,ZM,ZW),EA(AM,AZ,BY,KG,KZ,MD,RU,TJ,TM),EP(AT, BE,CH,CY,DE,DK,ES,FI,FR,GB,GR,IE,IT,LU,MC,NL,PT,SE,TR),OA(BF,BJ,CF,CG,CI,CM,GA,GN,GQ,GW,ML,MR,NE,SN, TD,TG),AE,AG,AL,AM,AT,AU,AZ,BA,BB,BG,BR,BY,BZ,CA,CH,CN,CO,CR,CU,CZ,DE,DK,DM,DZ,EC,EE,ES,FI,GB,GD,GE, GH,GM,HR,HU,ID,IL,IN,IS,JP,KE,KG,KP,KR,KZ,LC,LK,LR,LS,LT,LU,LV,MA,MD,MG,MK,MN,MW,MX,MZ,NO,NZ,OM,PH,P L,PT,RO,RU,SD,SE,SG,SI,SK,SL,TJ,TM,TN,TR,TT,TZ,UA,UG,UZ,VN,YU,ZA,ZM,ZW

(注)この公表は、国際事務局(WIPO)により国際公開された公報を基に作成したものである。なおこの公表に係る日本語特許出願(日本語実用新案登録出願)の国際公開の効果は、特許法第184条の10第1項(実用新案法第48条の13第2項)により生ずるものであり、本掲載とは関係ありません。