(19)日本国特許庁(JP)　(12)特　許　公　報(B2)　(11)特許番号

特許第4261803号
(P4261803)

(45)発行日　平成21年4月30日(2009.4.30)　(24)登録日　平成21年2月20日(2009.2.20)

| (51)Int.Cl. | | F I | | |
|---|---|---|---|---|
| H01L 21/027 | (2006.01) | H01L | 21/30 | 531A |
| G02B 5/10 | (2006.01) | H01L | 21/30 | 527 |
| G03F 7/20 | (2006.01) | H01L | 21/30 | 517 |
| | | G02B | 5/10 | A |
| | | G03F | 7/20 | 503 |

請求項の数 25　(全 28 頁)

| | |
|---|---|
| (21)出願番号 | 特願2002-13558(P2002-13558) |
| (22)出願日 | 平成14年1月22日(2002.1.22) |
| (65)公開番号 | 特開2002-319537(P2002-319537A) |
| (43)公開日 | 平成14年10月31日(2002.10.31) |
| 審査請求日 | 平成16年11月25日(2004.11.25) |
| (31)優先権主張番号 | 10102934.9 |
| (32)優先日 | 平成13年1月23日(2001.1.23) |
| (33)優先権主張国 | ドイツ(DE) |
| (31)優先権主張番号 | 10127298.7 |
| (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 | 10138313.4 |
| (32)優先日 | 平成13年8月10日(2001.8.10) |
| (33)優先権主張国 | ドイツ(DE) |

(73)特許権者　503263355
カール・ツァイス・エスエムティー・アーゲー
ドイツ連邦共和国、７３４４７　オベルコッヘン、ルドルフ・エーバー・シュトラーセ　２
(74)代理人　100082005
弁理士　熊倉　禎男
(74)代理人　100067013
弁理士　大塚　文昭
(74)代理人　100086771
弁理士　西島　孝喜
(74)代理人　100109070
弁理士　須田　洋之

最終頁に続く

(54)【発明の名称】波長が１９３ｎｍ以下の照明光学系のための集光器

(57)【特許請求の範囲】

【請求項１】

波長が１９３ｎｍ以下、好ましくは１２６ｎｍ以下、特に好ましくはＥＵＶ波長の光を平面に照射するのに用いる照明光学系のための集光器であって、

光源（１）から放射される光を受け入れる開口と、

共通の回転軸周りに入れ子式に設けられた多数の反射鏡椀形状部（４０，４２，４４，４６；６０，６２，６４，６６，６８，７０，７２，７４，７８，８０；２００，２０２，２０４，２０５，２０６，２０７，２０８，２０９）と、

を有し、

前記平面（７）は、環状部分（３０，３２，３４；２３０，２３２，２３４）から成る照明すべき領域を有し、

多数の前記反射鏡椀形状部の各々には、前記光の環状開口部分（２０，２２，２４；２１０，２１２，２１４）が割り当てられ、

かつ、前記環状部分（３０，３２，３４；２３０，２３２，２３４）の各々には、前記環状開口部分（２０，２２，２４；２１０，２１２，２１４）が割り当てられている集光器において、

複数の前記環状開口部分（２０，２２，２４；２１０，２１２，２１４）が重なり合わず、

複数の前記環状部分（３０，３２，３４；２３０，２３２，２３４）が重なり合わずに前記平面（７）で略連続的に隣り合ってつながり、

前記反射鏡椀形状部（４０，４２，４４，４６；６０，６２，６４，６６，６８，７０，７２，７４，７８，８０；２００，２０２，２０４，２０５，２０６，２０７，２０８，２０９）の、前記回転軸方向の大きさ、表面パラメータ、および位置は、前記平面（７）における前記個々の環状部分（３０，３２，３４；２３０，２３２，２３４）の照射強度が略同じになるように構成されており、

前記集光器は集束する光束を形成することを特徴とする集光器。

【請求項２】

前記反射鏡椀形状部（４０，４２，４４，４６；６０，６２，６４，６６，６８，７０，７２，７４，７８，８０）の大きさは、前記回転軸方向において異なっていることを特徴とする請求項１に記載の集光器。

【請求項３】

前記反射鏡椀形状部（４０，４２，４４，４６；６０，６２，６４，６６，６８，７０，７２，７４，７８，８０；２００，２０２，２０４，２０５，２０６，２０７，２０８，２０９）の、前記回転軸に関する開始点と終点との間の中間点により、前記反射鏡椀形状部の位置が指定され、外側の前記反射鏡椀形状部の位置は、内側の前記反射鏡椀形状部の位置よりも前記平面（７）から離れていることを特徴とする請求項１または２に記載の集光器。

【請求項４】

第１の前記環状部分の半径方向の広がりの、この第１の環状部分に割り当てられた前記環状開口部分の角度の大きさに対する第１の比と、

第２の前記環状部分の半径方向の広がりの、この第２の環状部分に割り当てられた前記環状開口部分の角度の大きさに対する第２の比とから得られる商が、

前記第１の環状開口部分に流入し、第１の前記反射鏡椀形状部の反射率損失分だけ減少している第１の光度と、

前記第２の環状開口部分に流入し、第２の前記反射鏡椀形状部の反射率損失分だけ減少している第２の光度とから得られる商にほぼ等しくなるように構成されていることを特徴とする請求項項１から３のいずれか１項に記載の集光器。

【請求項５】

前記光源（１）が等方的に光を放射し、

かつ、第１の前記環状部分の半径方向の広がりの、この第１の環状部分に割り当てられた前記環状開口部分の角度の大きさに対する第１の比が、

第２の前記環状部分の半径方向の広がりの、この第２の環状部分に割り当てられた前記環状開口部分の角度の大きさに対する第２の比にほぼ等しくなるように構成されていることを特徴とする請求項１から４のいずれか１項に記載の集光器。

【請求項６】

少なくとも２つの前記環状部分（３０，３２，３４）の半径方向の大きさが等しい大きさとされるとともに、内側にある前記環状部分（３０）に割り当てられた前記反射鏡椀形状部（４０；６０）の回転軸方向の大きさが、外側にある前記環状部分（３２）に割り当てられた前記反射鏡椀形状部（４２；６２）の回転軸方向の大きさよりも大きく形成されていることを特徴とする請求項１から５のいずれか１項に記載の集光器。

【請求項７】

前記反射鏡椀形状部（４０，４２，４４，４６；６０，６２，６４，６６，６８，７０，７２，７４，７８，８０）が、非球面の環状の一部分とされていることを特徴とする請求項１から６のいずれか１項に記載の集光器。

【請求項８】

前記反射鏡椀形状部（４０，４２，４４，４６；６０，６２，６４，６６，６８，７０，７２，７４，７８，８０）が、楕円面、または放物面、または双曲面の環状の一部分とされていることを特徴とする請求７に記載の集光器。

【請求項９】

少なくとも１つの前記反射鏡椀形状部（２００，２０２，２０４，２０５，２０６，２

０７，２０８，２０９）が、第１の光学面（２００．２，２０２．２，２０４．２）を有する第１のセグメント（２００．１，２０２．１，２０４．１）と、第２の光学面（２００．４，２０２．４，２０４．４）を有する第２のセグメント（２００．３，２０２．３，２０４．３）とを有していることを特徴とする請求項１から５のいずれか１項に記載の集光器。

【請求項１０】

前記第１の環状セグメント（２００．１，２０２．１，２０４．１）は、双曲面の一部分とされ、前記第２の環状セグメント（２００．３，２０２．３，２０４．３）は、楕円面の一部分とされていることを特徴とする請求項９に記載の集光器。

【請求項１１】

前記第１の環状セグメント（２００．１，２０２．１，２０４．１）は、双曲面の一部分とされ、前記第２の環状セグメント（２００．３，２０２．３，２０４．３）は、方物面の一部分とされていることを特徴とする請求項９に記載の集光器。

【請求項１２】

少なくとも２つの隣り合う前記環状開口部分が互いに不連続に離間されて形成されていることを特徴とする請求項１から１１のいずれか１項に記載の集光器。

【請求項１３】

該集光器（３）の最も内側の前記環状開口部分は、中央に開口遮蔽部を有し、前記開口遮蔽部の開口数$NA_{min}$は、最大０．３０、好ましくは、最大０．２０、特に好ましくは、最大０．１とされていることを特徴とする請求項１から１２のいずれか１項に記載の集光器。

【請求項１４】

該集光器（３）の最も内側の前記環状開口部分の内部に絞り（１８０）が設けられていることを特徴とする請求項１３に記載の集光器。

【請求項１５】

開口の開口数$NA_{max}$は、少なくとも０．４、好ましくは少なくとも０．５，特に好ましくは少なくとも０．７とされていることを特徴とする請求項１から１４のいずれか１項に記載の集光器。

【請求項１６】

前記反射鏡椀形状部を少なくとも３個、好ましくは、６個以上、特に好ましくは、１０個以上有していることを特徴とする請求項１から１５のいずれか１項に記載の集光器。

【請求項１７】

前記光源（１）から放射される光束の光線は、前記反射鏡椀形状部（４０，４２，４４，４６；６０，６２，６４，６６，６８，７０，７２，７４，７８，８０；２００，２０２，２０４，２０５，２０６，２０７，２０８，２０９）の表面接線に対して２０°より小さい入射角をなして入射するように構成されていることを特徴とする請求項１から１６のいずれか１項に記載の集光器。

【請求項１８】

１９３ｎｍ以下、好ましくは、１２６ｎｍ以下、特に好ましくは、ＥＵＶ領域の波長用の照明光学系であって、

光源（１）と、

少なくとも１つの集光器（３）と、

照明すべき平面（７；１０３）とを有してなる照明光学系において、

前記集光器は、請求項１から１７のいずれか１項に記載の集光器（３）とされていることを特徴とする照明光学系。

【請求項１９】

１９３ｎｍ以下、好ましくは、１２６ｎｍ以下、特に好ましくは、ＥＵＶ領域の波長用の、請求項１８に記載の照明光学系であって、

複数の第１の格子素子（１５０）を有する第１の光学素子（１０２）をさらに有していることを特徴とする照明光学系。

【請求項２０】
１９３ｎｍ以下、好ましくは、１２６ｎｍ以下、特に好ましくは、ＥＵＶ領域の波長用の、請求項１８または１９に記載の照明光学系であって、
前記集光器（３）が前記照明すべき平面（７；１０３）において環状の領域を照明するよう構成され、
かつ、前記第１の光学素子（１０２）が前記照明すべき平面（７；１０３）に設けられて、前記第１の光学素子（１０２）の前記第１の格子素子（１５０）がほぼ前記環状の領域の内部に配設されていることを特徴とする照明光学系。
【請求項２１】
１９３ｎｍ以下、好ましくは１２６ｎｍ以下、特に好ましくはＥＵＶ領域の波長用の、請求項１９または２０に記載の照明光学系であって、
結像させるための、及び／又は、フィールドを形成するための光学素子（１０６，１０８，１１０）をさらに有していることを特徴とする照明光学系。
【請求項２２】
１９３ｎｍ以下、好ましくは、１２６ｎｍ以下、特に好ましくは、ＥＵＶ領域の波長用の、請求項１９から２１のいずれか１項に記載の照明光学系であって、
前記集光器（３）と前記照明すべき平面（１０３）との間に前記光源（１）に共役な面を有し、この面に前記光源（１）の中間像（Ｚ）が結像されるように構成されていることを特徴とする照明光学系。
【請求項２３】
１９３ｎｍ以下、好ましくは、１２６ｎｍ以下、特に好ましくは、ＥＵＶ領域の波長用の、請求項１９から２２のいずれか１項に記載の照明光学系であって、
前記中間像（Ｚ）において、または、前記中間像（Ｚ）の近くにおいて、絞り（２０２）が設けられ、該絞りは、少なくとも前記光源（１）および前記集光器（３）を有する空間を、空間的及び／又は圧力的に、後方に設けられた照明光学系から分離するように設けられていることを特徴とする照明光学系。
【請求項２４】
請求項１９から２３のいずれか１項に記載の照明光学系と、
該照明光学系により照明されるマスクと、
感光性の対象物に前記マスクを結像させるための投影光学系（１２６）とを有してなるＥＵＶ投影露光装置。
【請求項２５】
請求項２４に記載のＥＵＶ投影露光装置を用いて、マイクロエレクトロニクス構成部材、特に半導体構成素子を製造する方法。
【発明の詳細な説明】
【０００１】
【発明の属する技術分野】
本発明は、波長が１９３ｎｍ以下、好ましくは１２６ｎｍ以下、特に好ましくはＥＵＶ（極短紫外線）領域の波長による照明光学系に用いられ、光源から放射される光を受け入れる物側の開口と、共通の回転軸周りに入れ子式に配設された多数の反射鏡椀形状部とを有し、各反射鏡椀形状部には、物側の開口の環状開口要素が一つ一つ対応するように配設されており、上記集光器は、さらに複数の環状要素から成る平面に照明すべき領域を有し、各環状要素には、上記環状開口要素が一つ一つ対応するように配設されている集光器に関するものである。本発明は、さらに、上記のような集光器を有する照明光学系、本発明による照明光学系を有する投影露光装置、ならびに微細構造を露光するための方法を提供する。
【０００２】
【従来の技術】
波長が１９３ｎｍ以下、特にＸ線の領域の波長のための入れ子式の集光器は、多くの文献から周知となっている。

【０００３】
例えば米国特許第５７６８３３９号明細書には、Ｘ線のためのコリメータが示されている。この発明では、コリメータが複数の放物面形状の反射鏡を有している。米国特許第５７６８３３９号明細書に記載のコリメータは、Ｘ線光源から等方に放射される光束を平行な光線にするのに用いられる。
【０００４】
米国特許第１８６５４４１号明細書からＸ線のための入れ子式の集光器が周知となっている。この発明は、米国特許第５７６８３３９号明細書の場合と同様に、光源から等方に放射されるＸ線を平行な光線束にするために使用される。
【０００５】
米国特許第５７６３９３０号明細書には、ピンチプラズマ光源のための入れ子式の集光器が示されている。この集光器は、光源から放射される光線を集め、光導入器に集束させるものである。
【０００６】
米国特許第５７４５５４７号明細書には、多重経路光学系の複数の構成が示されている。これらの多重光路光学系は、多重反射によって光源からの光線、特にＸ線を一点に集束させるのに用いられる。
【０００７】
特に高い移送効率を実現するために、米国特許第５７４５５４７号明細書に記載の発明は、楕円形に形成された反射鏡を提案している。
【０００８】
独国特許第３００１０５９号公報より、Ｘ線リソグラフィーシステムに使用するための、Ｘ線光源とマスクとの間に放物面形状に構成された入れ子式の反射鏡を有する構成が周知となっている。これらの反射鏡は、拡散するＸ線を平行な光束にして出力させるように配置されている。
【０００９】
独国特許第３００１０５９号公開公報に記載の構成もまた、専らＸ線によるリソグラフィーのために優れた平行光を実現するためにのみ用いられている。
【００１０】
国際公開第９９／２７５４２号パンフレットより周知の入れ子式の反射鏡の構成は、Ｘ線近接リソグラフィーシステムにおいて光源からの光を再集束させ、光源の虚像を結像させるために用いられる。入れ子式になった椀形状の鏡は、楕円面の形状を有している。
【００１１】
米国特許第６０６４０７２号明細書より、高エネルギーの光子源のための入れ子式の反射鏡が周知となっている。この反射鏡は、拡散するＸ線を平行に進む光束にするために用いられる。
【００１２】
国際公開第００／６３９２２号パンフレットには、中性子線を平行にするために使用される入れ子式の集光器が示されている。
【００１３】
国際公開第０１／０８１６２号パンフレットより周知のＸ線用の入れ子式の集光器は、個々の椀形反射鏡の内側の反射面の表面粗度が１２$Å_{rms}$より小さいことを特徴としている。国際公開第０１／０８１６２号パンフレットに示される集光器には、多重反射光学系、特にヴォルター（Wolter）光学系も設けられ、例えばＸ線リソグラフィーに対して要求される高い解像度を特徴としている。
【００１４】
独国特許第１９９０３８０７号公開公報または、国際公開第９９／５７７３２号パンフレットなどに記載のＥＵＶリソグラフィーのための照明光学系に対しては、解像度の他に、均一性もしくは一様性、ならびにテレセントリックであることに対して高度な要求が課される。このような光学系の場合、光源の光は、所定のいくつかの光源用のために集光器に

よって集められる。

【００１５】

【発明が解決しようとする課題】

本発明の課題は、照明光学系に必要な均一性ならびにテレセントリック性に対する高い要求を満足するような、１９３ｎｍ以下、好ましくは１２６ｎｍ以下、特に好ましくはＥＵＶ（極短紫外線）領域の波長を用いる照明光学系のための集光器を提供することである。特に、できる限り均一な照明が実現される必要がある。

【００１６】

【課題を解決するための手段】

このような課題は、本発明により、光源から放射される光を受け入れるとともに請求項１に記載の特徴を有する物側の開口を備えた集光器によって解決される。本発明による集光器は、共通の回転軸周りに入れ子式に設けられた多数の回転対称な反射鏡椀形状部を有している。各反射鏡椀形状部には、物側の開口の環状開口要素が一つ一つ対応している。照明すべき領域は、或る平面内にあり、複数の環状要素から構成されている。各環状要素には、環状開口要素が一つ一つ対応している。これらの複数の環状開口要素、ならびに、これらに対応している複数の環状要素は、重なり合わない。そして、上記複数の環状要素は、上記平面においてほぼ連続的に互いにつながっている。本発明によれば、反射鏡椀形状部の回転軸方向の大きさおよび表面パラメータ、さらに反射鏡椀形状部の位置は、個々の環状要素の照射強度がほぼ同じになるように選択されている。

【００１７】

発明者は、本発明のように入れ子式の集光器を形成することによって、一平面のある領域に非常に均一な照明が実現できるという知見を得た。特に好ましいのは、反射鏡椀形状部が楕円面、放物面または双曲面の環状の一部分である場合である。放物面の場合は、完全に平行な光束が得られ、従って無限遠の光源像が得られる。例えば米国特許第６１９８７９３号明細書に記載されるように、照明すべき面に設けられた第１の格子素子を有する第１の光学素子を用いて、第２の光源を作り出す場合、放物面の環状セグメントとして形成されている反射鏡椀形状部において、個々の格子素子は、集光作用を有さなければならない。米国特許第６１９８７９３号明細書に開示された内容は、本願に包括的に取り入れられている。

【００１８】

このような集光作用を集光器に持たせることもできる。本発明によるこのような集光器は、楕円面の一部とされている椀形状部を有しており、これにより集束する光束が形成されるようになっている。楕円面の一部とされた椀形状部を有する集光器に、集光作用を持たせることによって、第１の光学素子の第１の格子素子を例えば平らな切り子面として形成することができる。

【００１９】

双曲面の一部とされた椀形状部を有する集光器を用いると、拡散する光束が得られ、集光器をできるだけ小さな寸法で形成する必要がある場合には、特に有利になる。

【００２０】

従来技術による入れ子式の集光器に対して、本発明による集光器の特徴は、異なる椀形状部からなる反射鏡の回転軸方向の長さが異なる点である。この特徴によって照明すべき平面において環状の領域に非常に均一な照明が実現される。反射鏡の寸法と距離を冒頭部分で引用した従来技術の場合のようにほぼ等しくすると、平行にされた光線または集束された光線を得ることはできるが、環状の領域における均一な照明を得ることはできない。さらに角度による反射損失は、集光器をそれに適合させた構成とすることによって補償されるので、前記平面において均一な照明が実現される。

【００２１】

本発明による集光器の好ましい実施の形態において、外側の反射鏡椀形状部の位置は、内側の反射鏡椀形状部の位置よりも照明すべき平面から離れている。このとき反射鏡椀形状部の位置とは、集光器の回転軸上に関した、椀形状部の起点と終点との間の中間点の値を

意味するものとする。内側の反射鏡椀形状部とは、２つの反射鏡椀形状部、すなわち内側および外側の反射鏡椀形状部のうち回転軸までの距離が小さい反射鏡椀形状部のことをいう。入れ子式の集光器を用いるとはいっても、専ら離散的な近似においてのみ均一化が得られるのにすぎないのであるから、集光器はできるだけ多くの椀形状部を有していることが好ましい。本発明による集光器は、好適に４個以上、特に好適には７個以上、さらに好ましくは１０個以上の椀形状の反射鏡を有している。

【００２２】

等方的に光を放射する光源の場合、本発明による集光器により、確実に、同じ大きさの角度部分が同じ大きさの面に写される。さらに、角度に依存した反射損失は、集光器をそれに合わせて形成することによって補償されるので、照明すべき平面に均一な照明が得られる。

【００２３】

光源が等方的でない場合、放射特性は、集光器によって均一な照明に変換することができる。

【００２４】

好ましい実施の形態では、少なくとも２つの環状要素の半径方向の幅が等しい大きさとされ、内側の環状要素に対応した、集光器の反射鏡椀形状部の回転軸方向の長さは、外側の環状要素に対応した、集光器の反射鏡椀形状部の回転軸方向の長さよりも大きい。内側の環状要素とは、２つの環状要素、すなわち内側の環状要素および外側の環状要素のうち、回転軸までの距離が小さいものをいう。

【００２５】

本発明による集光器は、好ましくは次のように形成されている。すなわち、第１の環状要素の半径方向の広がりの、この第１の環状要素に対応した環状開口要素の角度の広がりに対する第１の比と、第２の環状要素の半径方向の広がりの、この第２の環状要素に対応した環状開口要素の角度の広がりとの第２の比とから得られる商の大きさが、第１の環状開口要素に流入する第１の光度と、第２の環状開口要素に流入する第２の光度とから得られる商に対して等しくなる。すなわち、以下の式

【数１】

$$\frac{dA_1}{d\Omega_1} \div \frac{dA_2}{d\Omega_2} = I(\alpha_1) \div I(a_2)$$

が成立する。

【００２６】

本発明の別の方法による実施の形態では、一つの反射鏡椀形状部において多重反射が生じるように入れ子式の反射鏡椀形状部を形成する。

【００２７】

１つの椀形状部において多重反射を行うことにより、反射角度を小さく保持することができる。

【００２８】

表面接線に対して２０度未満の小さい入射角度をなして表面すれすれに入射する場合の反射において、モリブデン、ニオブ、ルテニウム、ロジウム、パラジウムまたは金などの材料を用いる場合、反射率は、表面接線に対する入射角とともに略直線的な振る舞いをする。このため、反射損失は、例えば１６度での１回の反射、もしくは、８度での２回の反射では、大体同じになる。しかしながら、集光器の最大の開口を得ることができるようにするには、２回以上の反射を用いることが好ましい。

【００２９】

特に好ましいのは、２つの反射を有する光学系である。２つの反射を有する集光器は、例

えば、双曲面の環状の部分をなす第１の反射鏡椀形状部と、楕円面の環状の部分をなす第２の反射鏡椀形状部とを有する入れ子式のヴォルター（Wolter）光学系として形成することができる。

【００３０】

ヴォルター（Wolter）光学系は、Wolter, Annalen der Physik 10, 94-114, 1952 などの文献から周知である。双曲面と楕円面との組み合わせによって形成され、光線が反射した位置から当該光線が光軸を横切る位置までの距離が実とされるような、つまり、光源の中間像を実像として有するようなヴォルター光学系については、J. Optics, Vol. 15, 270-280, 1984 を参照してほしい。

【００３１】

ヴォルター光学系の特に優れた点は、表面接線に対して２０度より小さい入射角での２つの反射を用いるヴォルター光学系の場合、開口角度８０°に対応して、最大の集光の開口が$NA_{max}$～０．９８５まで選択可能とされ、このとき、７０％より大きい反射率を有するような、かすめるようなすれすれの斜入射角のもとでの高い反射率の反射領域が存在することである。

【００３２】

本発明の第１の実施の形態では、椀形状部の第１の環状セグメントおよび第２の環状セグメントは、連続的に互いにつながっておらず、第１の環状セグメントと第２の環状セグメントとの間には、反射鏡椀形状部の使用されない領域、いわゆる間隙が設けられている。

【００３３】

本発明は、集光器の他に、このような集光器を有する照明光学系も提供している。照明光学系は、好ましくは、米国特許第６１９８７９３号明細書に示すように、第１の格子素子を有する第１の光学素子と、第２の格子素子を有する第２の光学素子とを備えた２重に切り子面が形成された照明光学系とされ、この米国特許第６１９８７９３号明細書の開示内容は、包括的に本願に取り入れられている。

【００３４】

第１の格子素子、及び／又は、第２の格子素子は、平らな切り子面とされるか、あるいは、集光作用ないし拡散作用を有する切り子面とすることができる。

【００３５】

本発明の実施の形態では、第１の格子素子を有する第１の光学素子上で、環状の領域のみが照明される。その場合、第１の格子素子は、このような環状領域内に設けられることが好ましい。

【００３６】

本発明による集光器を有する照明光学系は、マイクロリソグラフィーのための投影露光装置において好適に使用される。このような投影露光装置は、ＰＣＴ／ＥＰ　００／０７２５８に開示され、その開示内容は、包括的に本願に取り入れられている。投影露光装置は、照明装置の後方に設けられた投影光学系、例えば米国特許第６２４４７１７号明細書に示されるように４枚の反射鏡を有する投影光学系を有し、この明細書の開示内容は、包括的に本願に取り入れられている。

【００３７】

【発明の実施の形態】

以下に本発明を図面に基づいて例を挙げながら説明する。

【００３８】

本願では、Neumann/Schroederによる"Bauelemente der Optik", Hauser-Verlag 1992, p. 28-29 に従って、以下の表に記載された光学技術上の概念を用いる。

表１：光学技術上の概念

【表１】

| 物理量 | 式 | 単位 |
|---|---|---|
| 光束 $\Phi_e$<br>（放射束） | $\phi_e = \frac{\partial Q}{\partial t}$ | Watt [W] |
| 放射強度 $E_e$<br>（放射照度、または線束密度） | $E_e = \frac{d\Phi_e}{dA_0}$ | Watt/cm$^2$ |
| 光度 $I_e$<br>（放射強度） | $I_e = \frac{d\Phi_e}{d\Omega}$ | Watt/<br>Sterradian |
| 光線密度 $L_e$<br>（放射輝度） | $L_e = \frac{d\Phi_e}{dA_S \cdot \cos\alpha \cdot d\Omega}$ | Watt/cm$^2$/<br>Sterradian |

【００３９】
図１には、光源１、集光器３、光源像５および中間平面７（平面）を有する光学系の原理が示されている。光源１は、一定の光度で空間に光線を放射する。この光度は、通常、角度ψ、およびφ（図示されぬｚ軸周りの角度）に依存して、Ｉ（ψφ）となる。
【００４０】
軸対称の光源の場合は、以下の式が成立する。
Ｉ（ψφ）＝Ｉ（ψ）
【００４１】
後方に設けられた集光器３により、放射された光が集められ、束ねられる。集光器３によって、光源１の像が形成されるが、ここで、光源像５は、図１に示すように、実像であるか、虚像であるかのいずれであってもよい。また、光源１が、すでに或る物理的な光源の像であっても構わない。集光器３の後方の平面７では、いずれの場合も所定の照明９が得られる。この照明は、集光器の像側の空間での角度ψ´における立体角要素（Raumwinkel-element）である放射円錐１１の光度を投影したものに相当する。一つの平面７において照明が均一化されていると、集光器の後方に設けられる他のどの平面においても、光源１の像５が位置する像面からその平面が十分に離れている限り、おのずと照明は均一化される。像側の空間における放射円錐１１に、物側の空間における放射円錐１３が対応し、この放射円錐１３は、角度ψにおける立体角要素に放射される光源の光度Ｉ（ψ）で満たされている。
【００４２】
本発明によれば、任意の光源１によって、或る光源像が形成される。このような光源像は、実像（すなわち、光の方向に関して集光器３から右側）であってもよいし、虚像（すなわち、光の方向に関して集光器３から左側）であってもよいし、あるいは無限遠に像を結ぶものであってもよい。
【００４３】
さらに、本発明により、任意の光源１の放射特性が変換され、中間像の前方あるいは後方で非常に均一な照明が得られる。
【００４４】
本発明により、以下の式が成立する。
式（２．１）
【数２】

$$(2.1) \quad E = \frac{\Phi}{dA} = \frac{R(\alpha) I^*(\alpha) d\Omega}{dA} = const.$$

ここで、
Ｅ：平面７における照射強度
Φ：光束
ｄＡ：平面７における面素
ｄΩ：物側の開口内の角度要素
$I^*$（α）：角度αでの光源の光度
Ｒ（α）：集光器の反射率が有限かつ角度に依存するために生じる光の損失に比例した減衰因子（ここで、Ｉ（α）＝Ｒ（α）・$I^*$（α）を以下において用いることとする。）である。
【００４５】
従って、照射強度の等しい２つの環状要素については、以下の式が成立する。
式（２．２）
【数３】

$$(2.2) \quad E = \frac{\Phi_1}{dA_1} = \frac{I(\alpha_1) d\Omega_1}{dA_1} = \frac{\Phi_2}{dA_2} = \frac{I(\alpha_2) d\Omega_2}{dA_2}$$

上記の式から以下の関係式が導かれる。
式（２．３）
【数４】

$$(2.3) \quad \frac{d\Omega_2}{dA_2} \div \frac{d\Omega_1}{dA_1} = I(\alpha_1) \div I(\alpha_2)$$

【００４６】
等方的でない光源、または反射損失Ｒ（α）の差が大きい場合、環状開口要素、あるいは平面７上の環状要素を式（２．３）を満たすように選択しなければならない。
【００４７】
一般に、中間像を形成すると同時に放射特性を適合させるという課題は、反射鏡やレンズといったような単純な光学素子によって解決することはできない。本願で光学系の光軸と同一とされたｚ軸周りに回転対称な放射特性であれば、少なくとも離散した領域に対しては、特殊な種類のフレネル光学系を介して同じ照明を実現することができる。
【００４８】
この点について以下に、光源１の中間像が実像である場合を例にして説明する。中間像が虚像である場合、または光源像が無限遠に形成される場合については、当業者によって類似の構成が容易に想到されよう。
【００４９】
図２に示すように、光源１の周囲に例えば３つの角度部分、すなわち環状開口要素２０，２２，２４を選択する。これらの環状開口要素は、光源１から半径方向に、それぞれの角度部分、すなわち環状開口要素に等しい出力で光が放射されるように配設されている。高

密度プラズマ集束光源（Dense Plasma Focus Quelle）のような等方的に放射する光源１の場合は、同一の角度変化量ｄαを選択し、非等方的に放射する光源の場合は、以下の式が得られるように、角度間隔を対応させて適合させる。

式（２．４）

【数５】

$$(2.4) \qquad \Phi = \int_{\alpha_i}^{\alpha_{i+1}} I(\alpha)\, d\alpha = \Phi_i = const.$$

ここで、

$\Phi_i$ ：光束

Ｉ（α）：角度αにおける光源の光度

$\alpha_i$：ｉ番目の角度部分の緯度

$\alpha_{i+1}$：$\alpha_{i+1} = \alpha_i + d\alpha_i$となる、ｉ番目の部分の外側の角度で、$d\alpha_i$はｉ番目の角度部分の幅である。一般には異なる値となる角度変化量$d\alpha_i$が式（２．４）によって決定される。

【００５０】

図２には、環状開口要素２０，２２，２４が示されている。図に示されているのは、$NA_{min}$と$NA_{max}$との間に、３つの部分２０，２２，２４が配置される例である。部分２２および２４は、互いに連続しているが、部分２０および２２の間には、小さな間隙２６が存在している。

【００５１】

環状の開口の部分すなわち環状開口要素２０，２２，２４のそれぞれに対して、環状要素３０，３２，３４が照明すべき平面７において対応するように割り当てられている。環状要素３０，３２，３４は、環状要素の周辺光線間の距離ｄｒが等しい大きさになるように選択される。こうして以下の式が成立する。

式（２．５）

【数６】

$$(2.5) \qquad r_i = r_1 + i \cdot dr$$

ここで、

$r_i$：照明すべき平面７におけるｉ番目の環状要素の回転軸ＲＡからの距離

ｄｒ：高さ変化量、すなわち半径方向の広がり

$r_1$：任意の開始高さ（入れ子式の集光器の場合には、明瞭な中央の遮蔽部）である。

【００５２】

図３には、環状要素３０，３２，３４を有する平面７における照明が示されている。

【００５３】

選択された光線の交点上で、集光器３のそれぞれの楕円形の椀形状部が決定される。中間像が虚像の場合は、これらの椀形状部は、双曲線形状になり、光源像が無限遠の場合は、放物線形状になる。このとき、それぞれの環状開口要素２０，２２，２４において代表的な光線が１つ選択されている。

【００５４】

このように楕円面形、または、双曲線ないし放物線形の椀形状部に対しては、この図で光源１および光源像５に相当する物点および像点と、さらにもう１点とが与えられれば十分

である。ここでは、しかし、２点、つまり集光器の椀形状部の開始点および終点が与えられている。すなわち、この問題に対する条件が多すぎるのである。けれども、照明の目的で光源を結像させるための結像特性は、通常ほとんど気にしなくてもよいため、大したことのない若干の焦点ぼけを生じるものの、例えば楕円または双曲線または放物線に、楔形や円錐台形の形状をなした円錐部分を付け加えることができる。別の方法としては、現れる間隙はごく小さく選択できてしまうことから、わずかな遮蔽部は甘受するというものがある。間隙の大きさは、椀形状部の配置ならびに特に数量により最小化することができる。間隙は、例えば、前方において、つまり、光源から受け入れられる出力において生じるように、そして、後方において、つまり、照明すべき平面には生じないように選択される。

【００５５】

集光器が多くの椀形状部を有する場合は、特に、円錐台形のみから集光器を構成することもできる。このような構成は、加工上の観点から有利である。

【００５６】

反射損失と遮蔽とを無視する条件のもとでなら、角度部分すなわち環状開口要素２０～２４、及び、面部分すなわち環状要素３０～３４のいずれによっても、確実にそれぞれ等しい光束Φが与えられる。

【００５７】

もっとも、原理的には、角度に依存した、したがって、角度の各部分に依存したこの反射損失は、それに見合うだけの$\alpha_i$の角度変化量をあてがうことによって補償するということも可能である。このとき、本発明により平面７を非常に均一に照明することを意図しているので、等しい変化量を有する環状部分に割り当てられている環状開口部分は、同じ大きさにはならない。

【００５８】

図４には、ｚ軸周りに回転対称に設けられた楕円面の部分からなる入れ子式の集光器３が示されており、このような集光器３によって平面７が非常に均一に照明される。ｚ軸周りに回転対称であるので、集光器３の半分だけが断面視して示されている。

【００５９】

図４には、椀形状部４０，４２，４４，４６の一群が示されている。これらの椀形状部４０，４２，４４，４６は、ｚ軸からほぼ等距離に設けられている。ここで、ｚ軸からの距離は、椀形状部の最大直径に相当し、この最大直径は、椀形状部の番号ｉにほぼ比例している。図４には、さらに光源１、照明すべき平面７および光源像５が示されている。他の構成要素の符号は、上述の図において用いられた符号に対応している。

【００６０】

これに代わるものとして、図５に示すように、椀形状部の長さを減少させた構成も可能である。例えば最も内側に設けられた角度部分すなわち環状開口要素２０を２つの角度部分すなわち環状開口要素２０．１および２０．２に分割することができる。それに応じて平面７において対応する最も内側の環状要素３０も、２つの環状要素３０．１および３０．２に分割することができる。こうして内側の２つの部分に対して２つの椀形状部４０．１および４０．２が形成され、これらは、図５から明らかなように椀形状部４０よりも短くなる。上述の図に示されたものと同一の構成要素には、同一の符号を付している。

【００６１】

屈折光学系についても同様の構成が考えられる。図６に示す通り、屈折光学系では、上記の入れ子式の反射鏡椀形状部４０，４２，４４，４６を、オフ・アクシスの円環状のレンズ部分５０，５２，５４，５６に置き換えることができる。

【００６２】

図６は、複数のオフ・アクシスの円環状のレンズ部分の構成を示している。このような構成により、光源の或る所定の放射特性に対して平面７の均一な照明が実現される。ｚ軸周りに回転対称に設けられた光学系は、断面によって半分しか示されていない。異なる大きさの角度要素が、等しい大きさの高さ部分へと偏向され、それによって光源の放射が等方

的でない場合も均一な照明が実現される。
【００６３】
入れ子式の反射型の集光器は、必然的に中央の遮蔽部を有する。つまり、或る所定の開口角$NA_{min}$を下回ると、光源の光線は、受け入れられない。従ってこのような光線は、後続の照明光学系に到達しないように、絞りによって遮断されなければならない。絞りは、例えば集光器の領域に設けられる。
【００６４】
以下に本発明を、一実施の形態に基づいてより詳しく説明する。
【００６５】
本発明により、等方的な光源の場合に、楕円群を用いて点から点への結像により実像が得られるものとし、このとき、椀形状部の直径は、ほぼ等間隔に選択されるものとする。
【００６６】
楕円は、以下の式を満たすように定義される。
式（３．１）
【数７】

$$\frac{z^2}{\alpha^2}+\frac{x^2}{b^2}=1 \qquad (3.1)$$

ここで、
式（３．２）
【数８】

$$e=\sqrt{a^2-b^2} \qquad (3.2)$$

が成立する。
【００６７】
図７には、例としてｉ番目の楕円型部分が示されている。この部分は、ｚ軸周りに回転対称であるので、半分のみが断面で示されている。
【００６８】
図７には、反射鏡椀形状部に関して、表１による計算に使用された値が示されている。上述の図に示されるものと同一の構成要素に関しては、同一の符号が使用されている。図に示すのは、以下の通りである。
ｖ（ｉ）：ｉ番目の反射鏡椀形状部のｉ番目の開始点
ｘ（ｖ（ｉ））：ｉ番目の開始点のｘ座標
ｚ（ｖ（ｉ））：ｉ番目の開始点のｚ座標、すなわち回転軸ＲＡに関する開始点
ｈ（ｉ）：ｉ番目の反射鏡椀形状部のｉ番目の終点
ｘ（ｈ（ｉ））：ｉ番目の終点のｘ座標
ｚ（ｈ（ｉ））：ｉ番目の終点のｚ座標，すなわち回転軸ＲＡに関する終点
ｍ（ｉ）：ｉ番目の椀形状部の開始点と終点との間の中間点
ｘ（ｍ（ｉ））：中間点のｘ座標
ｚ（ｍ（ｉ））：中間点のｚ座標、すなわち回転軸ＲＡに関するｉ番目の椀形状部の開始点と終点との間の中間点
ａ，ｂ：楕円のパラメーター
ｒ（ｉ）：ｉ番目の椀形状部に対するｉ番目の環状要素の、照明すべき平面における回転

軸ＲＡからの距離
ＮＡ（ｉ）：ｉ番目の椀形状部に対するｉ番目の環状開口要素の内側の縁を通る光線の開口角の正弦
【００６９】
図８は、前記のように定義されたパラメーターを用いて計算された実施の形態について得られた椀形状部６０，６２，６４，６６，６８，７０，７２，７４，７６，８０の楕円群を示している。データは、表２に記載されている。表２に記載された全ての長さは、ｍｍによるものである。表面接線に対する入射角は、全て１９°以下である。最大光線の表面接線に対する入射角は、図８による実施形態では、１８．５４°である。
【００７０】
初期値として以下の値が選択された。
平面７と光源像５の距離：ｚ＝９００ｍｍ
焦点間距離の半分：ｅ＝１０００ｍｍ
平面７上の高さ変化量：ｄｒ＝７．５ｍｍ
平面７における中央の遮蔽部：$r_{min}$約２２．５ｍｍ（$NA'_{min}$約０．０２５）
光源１における最小の開口$NA_{min}$：$NA_{min}$＝０．１２
最大の開口：３３°に対応して$NA_{max}$＜０．５５
光源１における角度変化量：$d\alpha_i$＝２．４°＝一定値（すなわち光源の等方的な放射特性）
表２：楕円群のパラメータ
【表２】

| i | r(i) | NA(i) | a | b | x(h(i)) | z(h(i)) | x(v(i)) | z(v(i)) | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 60 | 22.507 | 0.120 | 1002.009 | 63.442 | 52.266 | −567.601 | 43.117 | −734.837 | |
| 62 | 30.007 | 0.161 | 1003.391 | 82.423 | 66.429 | −593.993 | 57.195 | −722.489 | |
| 64 | 37.507 | 0.203 | 1005.130 | 101.423 | 80.551 | −610.765 | 71.258 | −715.251 | |
| 66 | 45.007 | 0.243 | 1007.231 | 120.475 | 94.679 | −622.848 | 85.334 | −710.997 | |
| 68 | 52.507 | 0.284 | 1009.699 | 139.612 | 108.838 | −632.382 | 99.443 | −708.705 | |
| 70 | 60.007 | 0.324 | 1012.540 | 158.863 | 123.046 | −640.449 | 113.597 | −707.824 | |
| 72 | 67.507 | 0.363 | 1015.762 | 178.250 | 137.317 | −647.655 | 127.810 | −708.034 | |
| 74 | 75.007 | 0.402 | 1019.374 | 197.798 | 151.664 | −654.371 | 142.092 | −709.139 | |
| 76 | 82.507 | 0.440 | 1023.386 | 217.529 | 166.097 | −660.836 | 156.455 | −711.012 | |
| 78 | 90.007 | 0.477 | 1027.808 | 237.466 | 180.628 | −667.215 | 170.909 | −713.571 | |
| 80 | 97.507 | 0.513 | 1032.654 | 257.632 | 195.269 | −673.626 | 185.464 | −716.763 | |
| | | | | | | | | | |

【００７１】

図９には、照明の均一性の目安として、図８および表２に示す実施の形態の横倍率βが、像側の開口角の関数として示されている。横倍率βは、角度に関しては一定でなくてもよいが、平面７における最大半径$r_{max}$に対しては、或る所定の横倍率に設定されなくてはならない。

【００７２】

図１０には、理想的な横倍率β－ｉｄｅａｌと、離散的な方法で光線を平行にする目的を達成する実際の横倍率βとが、平面７における半径ｒとの関係において示されている。理想的な横倍率からのずれは、例えば図５に示すように内側の椀形状部をそれぞれ２つに分

けるなどして、椀形状部の数を増大させることによって減少させることができる。このような方法により平面７において、さらに良好な照明の均一化が達成される。

【００７３】

図１１は、マイクロエレクトロニクスの構成部材などを製造するための、本発明を応用することのできる投影露光装置を原理的に示す図である。投影露光装置は、光源の中間像ないし光源１を有している。図では４本の光線によってのみ代表的に示された光源１から放射される光は、本発明による入れ子式の集光器３に集められ、多数の第１の格子素子、いわゆるフィールドハニカムを有する反射鏡１０２に向けられる。この図においては、第１の格子素子は平坦とされている。反射鏡１０２は、フィールドハニカム反射鏡とも呼ばれる。フィールドハニカム面１０３における照明は、図１２に示すように、設定された環状領域で非常に均一に行われる。フィールド面１０３は、集光器の光軸に対して正確に垂直に設けられていないので、図１に示される照明すべき平面７に正確には対応しない。しかしながら、わずかな傾斜角があっても、導出に何ら変化を及ぼすものではなく、照明がわずかに歪むのみで、結局、集光器の光軸に垂直な平面の場合に得られるであろう均一性から無視できる程しか違わない。照明光学系は、米国特許第６１９８７９３号明細書に開示されているような２重に切り子面が設けられた照明光学系であり、この発明の内容は、本願に包括的に取り入れられている。従って光学系は、複数の格子素子１０４を有する第２の光学素子を備えている。これらの格子素子は、瞳ハニカムと呼ばれる。光学素子１０６，１０８，１１０（反射鏡）は、主に、物面１１４に照明領域となるフィールドを形成するのに用いられる。物面上のレチクルは、反射型のマスクである。レチクルは、走査型のシステムとして構成されたＥＵＶ投影光学系においては、図に示す方向１１６に移動可能とされている。照明光学系の射出瞳は、非常に均一に照明される。射出瞳は、後方に設けられた投影光学系の入射瞳と一致している。投影光学系の入射瞳は、図に示されていない。投影光学系の入射瞳は、レチクルから反射された主光線と投影光学系の光軸との交点に存在している。

【００７４】

例えば米国特許出願第０９／５０３６４０号明細書に記載の６枚の反射鏡１２８．１，１２８．２，１２８．３，１２８．４，１２８．５，１２８．６を有する投影光学系１２６によって、上記レチクルが露光すべき対象物１２４に結像される。

【００７５】

図１２は、第１の格子素子を有する第１の光学素子の面における照明の分布と照明の平均値とを示している。照射強度Ｅ（ｒ）が、入れ子式の集光器の回転軸ｚからの半径方向の距離ｒとの関係において示されている。均一な照明が離散的にしか得られないことがはっきりわかる。

【００７６】

図１３は、ＥＵＶ投影露光装置の原理を示す図であり、図１１の装置と異なる点は、光源１が中間像Ｚとして結像されることである。さらに本図では、第１の格子素子は、集光作用を有している。光源１の中間像Ｚは、集光器３と第１の切り子面反射鏡１０２との間に形成される。その他の全ての構成要素は、図１１に示す構成要素と同一であるため、同一の符号を付す。

【００７７】

以下の図１４ないし図２１においては、ヴォルター光学系として形成された、本発明による入れ子式の集光器が示されている。

【００７８】

ヴォルター光学系は、光源１を光源の中間像Ｚに実像として結像させるために、好ましくは双曲面と楕円面とを組み合わせたものからなるか、無限遠に結像するために双曲面と放物面との組み合わせからなるものであるが、このヴォルター光学系の特徴は、正弦条件が広範囲で満たされていること、つまり双曲面と楕円面との組み合わせによる拡大ないし横倍率が、大きな開口領域にわたって略一定になっていることである。図９に示すように、単に楕円面型の椀形状部のみ有する均一照明のための集光器の場合、横倍率βは、椀形状

部内で大きく変化する。これに対して、ヴォルター光学系の場合には、横倍率βは、椀形状部内で概ね一定となる。この様子は、図１７における８枚の椀形状部が入れ子式に設けられた光学系について、図１４に示されている。図１７に示された光学系は、入れ子式の反射鏡椀形状部のそれぞれがヴォルター光学系とされ、双曲面の一部とされた第１の光学面を有する第１の環状セグメント（環状の部分）と、楕円面の一部とされた第２の光学面を有する第２の環状セグメント（環状の部分）を有している。

【００７９】

図１４に示す通り、ヴォルター光学系の椀形状部は、ほとんど一定の横倍率βを有するので、理想的に平面を均一に照明するためには、物側の開口に間隙が生ずることが必要である。物側の開口における間隙は、回転軸までの距離が最大である椀形状部に浅い角度で入射する場合、回転軸までの距離が最小である椀形状部よりも反射率が小さくなるという理由からも特に必要となる。反射鏡の材料としては、好ましくはモリブデン、ニオブ、ルテニウム、ロジウム、パラジウムあるいは金が想定される。前記のような反射率の違いは、横倍率を増加させることによって補償しなくてはならない。従って、均一な照明を行うために、椀形状部ごとに横倍率を変化させなければならない。このとき集光器に続く開口を隙間なく満たすか、入れ子式の集光器の後方に設けられた面７を隙間なく照明したい場合には、物側の開口には、間隙が生じる。このような間隙は、図１ないし図１３において説明したような、例えば楕円面形の椀形状部を有する集光器では見られない。というのも、このような楕円形の椀形状部を有する集光器においては、横倍率が椀形状部にわたって変化し、それによって平面７を均一に隙間なく照明できるばかりでなく、隙間の無い物側の開口も得ることができるからである。

【００８０】

図１５には、本発明による入れ子式の集光器から、代表的に３つの椀形状部が示されている。それぞれの反射鏡椀形状部２００，２０２および２０４は、第１の光学面２００．２，２０２．２，２０４．２を有する第１の環状セグメント２００．１，２０２．１，２０４．１（第１のセグメント）と、第２の光学面２００．４，２０２．４，２０４．４を有する第２の環状セグメント２００．３，２０２．３，２０４．３（第２のセグメント）とを備えている。それぞれの反射鏡椀形状部２００，２０２および２０４は、ｚ軸周りに回転対称に設けられている。最も内側の椀形状部２００の横倍率は、６．７で、２番目の椀形状部２０２の横倍率は、７．０で、最も外側の椀形状部２０４の横倍率は、７．５である。図１５からわかるように、それぞれの反射鏡椀形状部２００，２０２および２０４に割り当てられた環状開口要素２１０，２１２，２１４は、互いに隣り合っていない。すなわち図１５に示す集光器の物側の開口は、個々の環状開口要素２１０，２１２，２１４の間に間隙２２０，２２２，２２４を有している。それぞれの反射鏡椀形状部２００，２０２および２０４に割り当てられた、平面７における環状要素２３０，２３２，２３４は、平面７の領域を均一に照明するように、概ね互いに連続的につながっている。

【００８１】

図１５に示す実施の形態では、第１の光学面２００．２，２０２．２，２０４．２と第２の光学面２００．４，２０２．４，２０４．４も間隙を有さずに直接につながっている。

【００８２】

図１６には、本発明のさらなる実施の形態が示され、ヴォルター光学系として構成されている反射鏡椀形状部２００，２０２の２つだけが代表的に示されている。図１５に示されるのと同一の構成要素には、同一の符号が付されている。図１６に示す実施の形態では、第１の光学面２００．２，２０２．２と第２の光学面２００．４，２０２．４は、直接つながっていない。光学面の間には、それぞれ間隙または使用されない領域２４０，２４２がある。しかしながら本実施の形態では、使用されない領域において、反射鏡椀形状部は、それぞれの反射鏡椀形状部の第１のセグメントおよび第２のセグメント２００．１，２０２．１，２００．３，２０２．３の交点まで延長される。

【００８３】

図１６に示すような間隙、ないし使用されない領域を有する構成は、拡がりを持った光源

の場合に好適である。

【００８４】

集光器を構成する際は、常に集光効率と照明の均一性をつきあわせて検討する必要がある。照明すべき平面７において±１５％の均一性のみを実現しようとする場合には、図１７に示すような８つの椀形状部からなる集光器が使用される。このとき符号２００，２０２，２０４，２０５，２０６，２０７，２０８，２０９は、それぞれ２つの反射鏡セグメントを有する反射鏡椀形状部を表し、それぞれの椀形状部がヴォルター光学系をなしている。

【００８５】

図１７に示す集光器は、光源１と光源の中間像Ｚとの距離が１５００ｍｍであり、物側の開口は約０．７２であり、像側の開口は約０．１１５である。平面の接線に対する全体の入射角度は、１３°以下である。図１７に示す実施の形態において最大光線の、表面接線に対する入射角度は、１１．９°である。

【００８６】

図１７では、さらに、最も内側の反射鏡椀形状部の内側に、絞り１８０（中央の開口遮蔽部）が示されている。入れ子式の反射による集光器は、反射鏡椀形状部の大きさが有限であるため、必然的に中央部が遮蔽される。すなわち一定の開口角度$NA_{min}$以下になると、光源の光線が受け入れられない。絞り１８０は、中央の椀形状部を通って直接到達してくる光が、後続の照明光学系に迷光として到達しないよう防止する。

【００８７】

絞り１８０は、例えば光源の後方７８ｍｍに設けられ、開口遮蔽$NA_{obs}$約０．１９に対応して直径が３０．３ｍｍである。像側の開口遮蔽$NA'_{obs}$は、それに対応して約０．０２７７である。

【００８８】

図１８には、図１７に示す集光器の反射鏡椀形状部２００，２０２，２０４，２０５，２０６，２０７，２０８，２０９に対し、例えば第１の反射鏡椀形状部２００の第１のセグメント２００．１および第２のセグメント２００．３の二つのセグメントを有して構成されたヴォルター光学系を特徴付ける座標が、一例として示されている。ＺＳは、光源１の位置を基準とした、曲面の頂点のｚ位置を示し、ＺＶおよびＺＨは、曲面の頂点の位置ＺＳを基準とした、双曲面である第１のセグメント２００．１の開始位置および終了位置を示す。楕円面である反射鏡椀形状部の第２のセグメント２００．３に関しても、符号ＺＳ、ＺＶおよびＺＨが同じような意味で用いられる。

【００８９】

個々の反射鏡椀形状部の曲率半径Ｒおよび円錐定数Ｋと、与えられた定義によって、図１７に示す集光器の構成のデータは、以下の表３のようになる。反射鏡椀形状部のコーティングとしては、ルテニウムが選択された。

表３：図１７に示す集光器の構成のデータ

【表３】

| | 双曲面 | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| 椀形状部 | R [mm] | K | ZS [mm] | ZV [mm] | ZH [mm] |
| 1 | 1.5866 | −1.0201 | −0.79 | 108.99 | 185.86 |
| 2 | 2.3481 | −1.0286 | −1.17 | 107.92 | 183.90 |
| 3 | 3.5076 | −1.0399 | −1.74 | 107.56 | 182.35 |
| 4 | 5.0414 | −1.0571 | −2.49 | 105.05 | 179.53 |
| 5 | 7.2534 | −1.0814 | −3.56 | 102.83 | 177.68 |
| 6 | 10.4354 | −1.1182 | −5.07 | 99.95 | 175.90 |
| 7 | 15.0523 | −1.1755 | −7.22 | 94.87 | 173.09 |
| 8 | 22.3247 | −1.2660 | −10.50 | 88.88 | 169.39 |
| | 楕円面 | | | | |
| 椀形状部 | R [mm] | K | ZS [mm] | ZV [mm] | ZH [mm] |
| 1 | 2.3724 | −0.9971 | −160.94 | 349.66 | 433.46 |
| 2 | 3.3366 | −0.9960 | −168.17 | 353.68 | 440.17 |
| 3 | 4.6059 | −0.9945 | −181.56 | 363.50 | 454.10 |
| 4 | 6.4739 | −0.9923 | −184.74 | 364.03 | 457.33 |
| 5 | 9.0813 | −0.9893 | −189.80 | 366.19 | 463.15 |
| 6 | 12.8589 | −0.9849 | −193.20 | 365.14 | 466.03 |
| 7 | 18.4682 | −0.9783 | −195.28 | 362.33 | 470.02 |
| 8 | 26.8093 | −0.9688 | −202.36 | 362.94 | 480.72 |

【００９０】

図１７に示す８枚の椀形状部を有するヴォルター光学系の実施の形態においては、全ての椀形状部がほぼ１つの平面１８１で終端するように構成されている。これによって全ての椀形状部は、平面１８１において把持させることができる。絞り１８０は、この平面または、その近傍に設けられることが好ましい。

【００９１】

図１９には、図２０に示す照明光学系の平面７の位置で算出される照明の分布が示されている。図２０に示す照明光学系は、光源のすぐ後方に、図１７に示す８つの椀形状部からなる入れ子式の集光器を有している。図１９に示す照射強度の計算は、反射鏡椀形状部をルテニウムでコーティングし、角度に依存する反射率に基づいて行われた。その他のコーティングを行う場合には、それに応じて、構成を適するように合わせればよい。

【００９２】

図１９では、絞り１８０によって中央が遮蔽されていることがはっきり認められる。中央の遮蔽部には、符号１８２が付されている。平面７における強度の推移は、符号１８４によって示されている。集光器の回転軸ＲＡに対して対称な２つの強度のピーク１８４．１，１８４．２が明瞭に認められ、これらのピークが平面７では、環状の照明として現れる。破線で示された曲線１８６は、図２０に示す照明光学系の第１の光学素子１０２上の第１の格子素子が設けられている領域を示している。

【００９３】

図１７に示す入れ子式の集光器を有する投影露光装置の光学素子、およびいくつかの光線の経路が図２０に示されている。図１１に示す投影露光装置の場合と同一の構成要素には、同一の符号が付されている。

【００９４】
図１１に示す投影露光装置と異なり、本図の照明光学系は、「Ｘ」字型に折り畳まれておらず、コンパクトな組み立てスペースに合っている。また光学系の長さを減少させるために、図１７のような構造を有する入れ子式の集光器３の像側の開口をＮＡ＝０．１１５に増大させており、そのためには、ヴォルター光学系として構成することがとりわけ有利となる。物側の開口は、ＮＡ約０．７１である。ウェーハステージが設けられている物面１１４に、機械的および電気的な構成部材を組み立てるためのスペースを用意するため、集光器３の後方には、平面鏡２００が光学系を折り畳むのにさらに挿入されている。光学系全体の長さは３ｍより短く、高さは１．７５ｍより低い。
【００９５】
平面反射鏡２００は、本実施の形態では、回折型の分光フィルターとして形成されたものである。つまり格子から形成されている。光源の中間像Ｚの近くに絞り２０２を設けることと相俟って、所望の波長、本図の場合は、１３．５ｎｍよりもはるかに大きい波長を有するような、望ましくない光線が、絞り２０２の後方に設けられた照明光学系の部分に入射することが防止される。
【００９６】
絞り２０２はさらに、光源１、入れ子式の集光器３、および格子として形成された平面鏡２００を有する空間２０４を、後続の照明光学系２０６から空間的に分離することにも用いられる。中間焦点Ｚの近くにバルブを設けることによって２つの空間を分離する場合には、さらに圧力的に分離することも可能となる。空間的ないし圧力的に空間を分離することによって、光源から発生する汚れが絞り２０２の後方に設けられた照明光学系に到達することが防止される。
【００９７】
図２０に示す照明光学系は、図１７および表３に示す８枚の椀形状部を有する入れ子式の集光器３を有している。図２０に示す構成の平面反射鏡２００は、０次と、用いられた回折次数との間に、回折角２°を有する分光フィルターとして形成されている。第１の光学素子１０２は、それぞれが５４ｍｍ×２．７５ｍｍの大きさを有する１２２個の第１の格子素子を有している。第２の光学素子１０４は、それぞれ１０ｍｍの直径を有し、上記１２２個の複数の第１の格子素子に対応させるように割り当てられた１２２個の第２の格子素子を有している。表４に記載された光学素子の場所の指定は、全て物面１１４における基準座標系に基づいている。それぞれの光学素子に割り当てられた局所的な座標系の、局所的なｘ軸周りの角度αの回転は、基準座標系を局所的な座標系の場所に並進移動させることによって求められる。図２０に示す照明光学系の光学素子のパラメータは、表４に与えられている。表４では、物面１１４に対する個々の光学素子の光軸との交点の位置が示され、ｘ軸を中心とした座標系の回転角αが記載されている。また、右手系の座標系と時計回りの回転に基づいている。光学素子の局所的な座標系の他に、中間焦点Ｚと入射瞳Ｅの局所的な座標系も挙げられている。フィールドを形成する反射鏡１１０は、回転双曲面の軸の外側の一部分からまる。表４には、図２０に示す照明光学系の光学素子が示され、そのうち、入れ子式の集光器３を除く全ての素子に対しての座標系が図２１に示されている。全ての光学素子には、図２０の場合と同一の符号が付されている。
【００９８】
この光学系は、物面１１４、すなわちレチクルにおける照明開口がＮＡ＝０．０３１２５となる場合に、フィールド半径１３０ｍｍが得られるように構成されている。これは、露光すべき対象物の面１２４で開口ＮＡ＝０．２５を有する後続の４：１投影光学系の入射瞳Ｅにおいて、シグマ値（充填度）がσ＝０．５となることに対応するものである。
表４：図２０に示す光学系の構成のデータ
【表４】

| 位置 | Y | Z | α | 頂点曲率半径 | 円錐定数 |
|---|---|---|---|---|---|
| 光源 1 | 2148.137 | −1562.205 | 70.862 | (反射鏡面ではない) | |
| 平面鏡ないし分光フィルター 200 | 1184.513 | −1227.797 | 147.434 | 平面 | |
| 中間焦点 Z | 883.404 | −893.382 | 42.000 | (反射鏡面ではない) | |
| 切り子面の形成された第１の光学素子 102 | 302.599 | −248.333 | 36.000 | −898.54 | 球面状 |
| 切り子面の形成された第１の光学素子 104 | 773.599 | −1064.129 | 214.250 | −1090.15 | 球面状 |
| 反射鏡 106 | 126.184 | −250.216 | 31.500 | 288.1 | 球面状 |
| 反射鏡 108 | 372.926 | −791.643 | 209.600 | −855.8 | 球面状 |
| 反射鏡 110 の鏡面の頂点 | −227.147 | 118.541 | −4.965 | −80.5 | −1.1485701 |
| 物面 114 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 平面 | |
| 入射瞳 E | −130.000 | −1236.867 | 0.000 | (反射鏡面ではない) | |

【００９９】

図１から図１３に示す入れ子式の集光器と同様、ヴォルター光学系の椀形状部も成型技術を用いて簡単に製造することができる。

【０１００】

図２２には、図２０に示す照明光学系の平面７に設けられた第１の光学素子１０２および局所的なｘ－ｙ座標系が示されている。１２２個の第１の格子素子１５０が配設されているのが明らかに分かる。

【０１０１】

第１の格子素子１５０は、互いに離間された１０個のブロック１５２．１，１５２．２，１５２．３，１５２．４，１５２．５，１５２．６，１５２．７，１５２．８，１５２．９，１５２．１０に分けて配設されている。平面７において集光器３の中央の遮蔽部１５

４によって照明されない領域には、第１の格子素子１５０が設けられていない。個々の第１の格子素子１５０の間の照射強度の差は、図１７に示す入れ子式の集光器を用いると、最大でも±１５％を下回る。

【０１０２】

図２３は、第２の光学素子１０４に設けられた第２の格子素子１５６を示している。第２の格子素子１５６の像は、照明光学系の射出瞳を連続的に所定のシグマ値（充填度）σ＝０．５に至るまで充填する。射出瞳における充填度の定義に関しては、国際公開第０１／０９６８４号パンフレットを参照してほしい。この明細書の開示内容は、本願に包括的に取り入れられている。

【０１０３】

本発明によって、任意の光源を光源の像に形成する集光器が初めて示された。光源像は、実像、虚像となるか、または無限遠にある場合がある。任意の光源の放射特性は、中間像の前方または後方の面において非常に均一な照明が得られるように変換される。

【図面の簡単な説明】

【図１】　集光器の原理を説明する図である。

【図２】　光源の周囲の環状開口要素の概略図である。

【図３】　一平面内の環状要素の概略図である。

【図４】　楕円面の一部から成る入れ子式の集光器を示す図である。

【図５】　椀形状部の数が図４と異なる楕円面の一部から成る入れ子式の集光器を示す図である。

【図６】　屈折型の入れ子式の集光器を示す図である。

【図７】　入れ子式の集光器のｉ番目の楕円型の部分を示すである。

【図８】　表１に示す実施の形態による入れ子式の集光器の楕円群を示す図である。

【図９】　表１の実施形態による横倍率βを、像側の開口角との関係において示す図である。

【図１０】　表１の実施形態による横倍率βを、平面７におけるｘ方向の半径ｒとの関係において示す図である。

【図１１】　本発明による入れ子式の集光器を有する投影露光装置を示す図である。

【図１２】　図１１に示す投影露光装置の第１の格子素子の平面における環状要素の照明分布（照射強度）を、光学系の回転軸までの半径方向の距離ｚとの関係で示す図である。

【図１３】　入れ子式の集光器による中間像を有する投影露光装置を示す図である。

【図１４】　図１７に示す８枚の椀形状部を有する入れ子式のヴォルター光学系の横倍率βを示す図である。

【図１５】　入れ子式のヴォルター光学系から３枚の椀形状部を取り出して示す図である。

【図１６】　入れ子式のヴォルター光学系から２枚の椀形状部を取り出して示す図である。

【図１７】　８枚の椀形状部を有する入れ子式のヴォルター光学系を示す図である。

【図１８】　２回の反射によるヴォルター光学系として構成された集光器の椀形状部の座標を説明するための概略図である。

【図１９】　図１７に示す集光器を有する図２０に示す光学系の第１の格子素子の平面内の環状要素の照明分布（照射強度）を示す図である。

【図２０】　図１７の入れ子式の集光器を有するＥＵＶ投影露光装置を示す図である。

【図２１】　図１７の入れ子式の集光器を有する図２０のＥＵＶ投影露光装置の全ての反射鏡の座標系を示す図である。

【図２２】　第１の格子素子を有する図２０の照明光学系の第１の光学素子の図である。

【図２３】　第２の格子素子を有する図２０の照明光学系の第２の光学素子の図である。

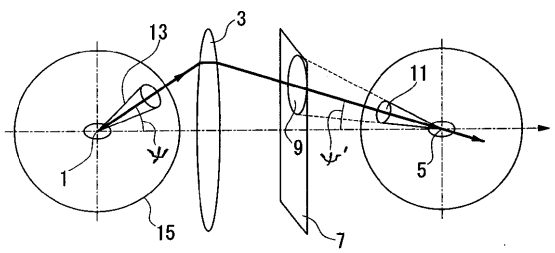
【符号の説明】

１・・・光源

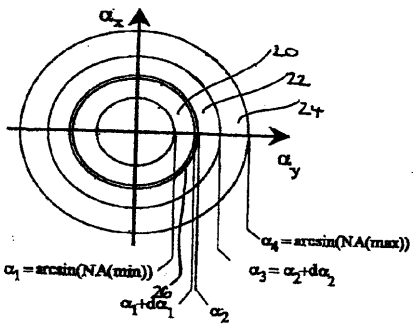
３・・・集光器

７，１０３・・・平面
４０，４２，４４，４６，６０，６２，６４，６６，６８，７０，７２，７４，７８，８０，２００，２０２，２０４，２０５，２０６，２０７，２０８，２０９・・・反射鏡椀形状部
３０，３２，３４，２３０，２３２，２３４・・・環状要素
２０，２２，２４；２１０，２１２，２１４・・・環状開口要素
１０２・・・切り子面反射鏡（第１の光学素子）
１０６，１０８，１１０・・・反射鏡（光学素子）
１２６・・・投影光学系
１５０・・・第１の格子素子
２００．１，２０２．１，２０４．１・・・第１の環状セグメント（第１のセグメント）
２００．２，２０２．２，２０４．２・・・第１の光学面
２００．３，２０２．３，２０４．３・・・第２の環状セグメント（第２のセグメント）
２００．４，２０２．４，２０４．４・・・第２の光学面
Ｚ・・・中間像

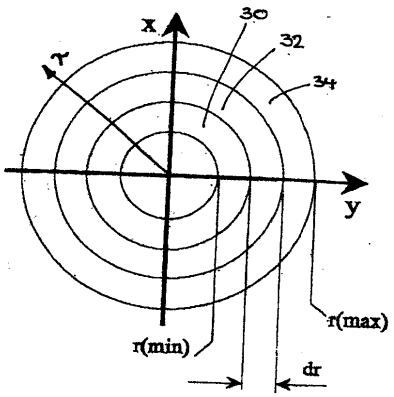
【図１】



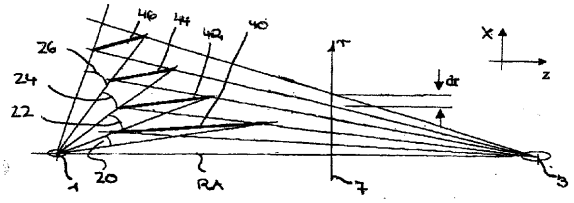

【図２】



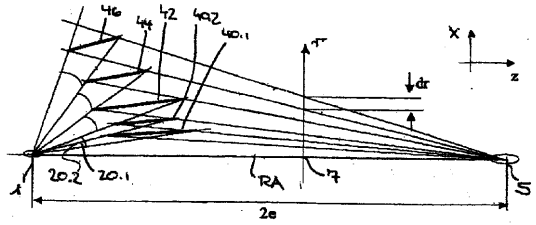

【図３】



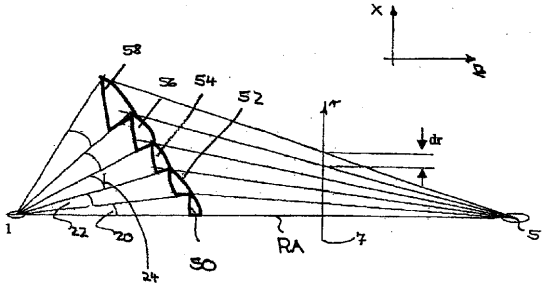

【図４】



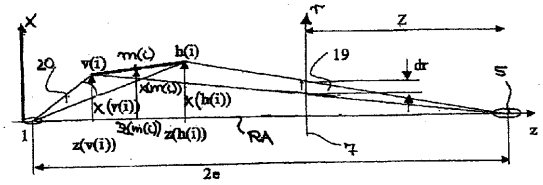
【図５】



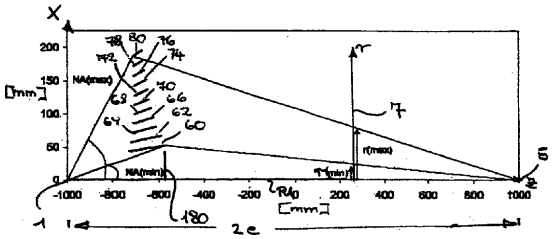

【図６】



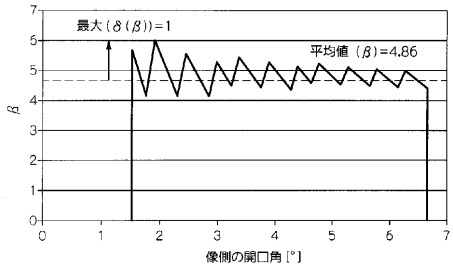

【図７】



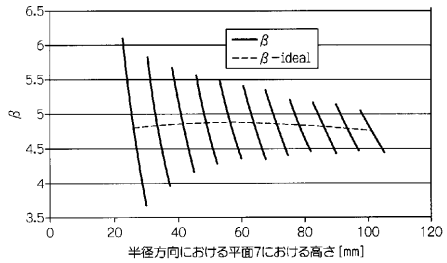

【図８】



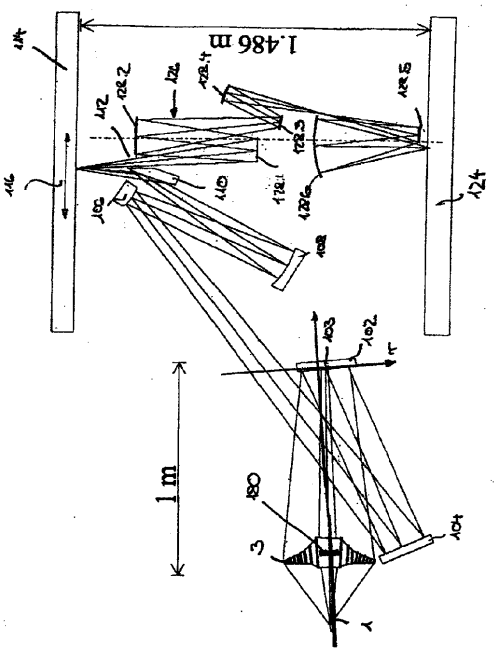

【図９】



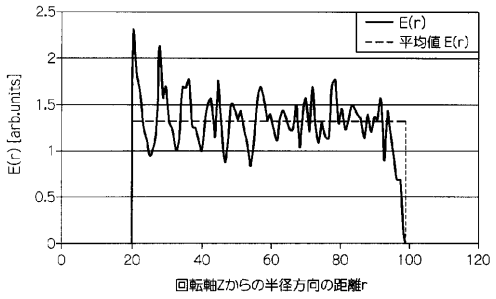

【図１０】



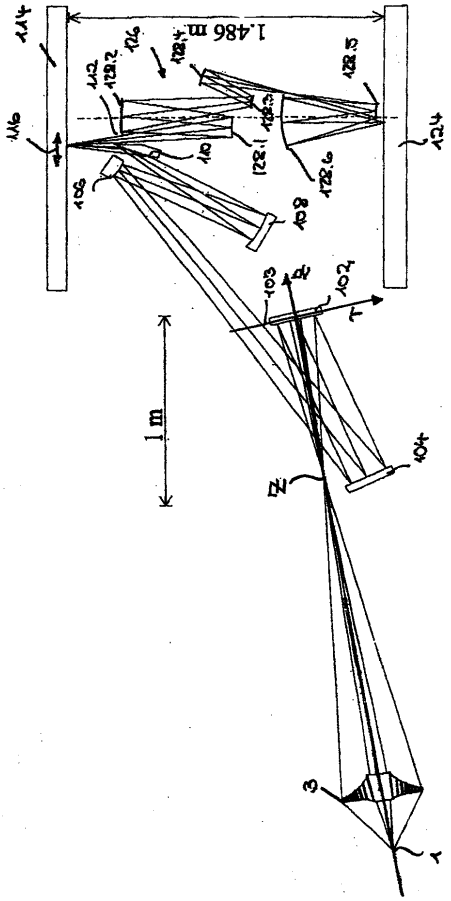

【図１１】



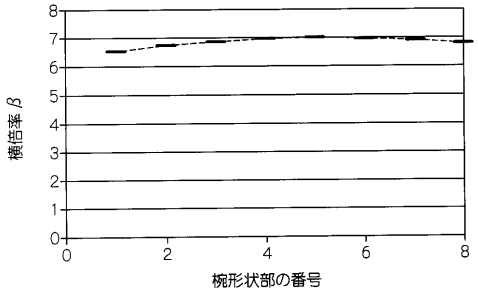
【図１２】



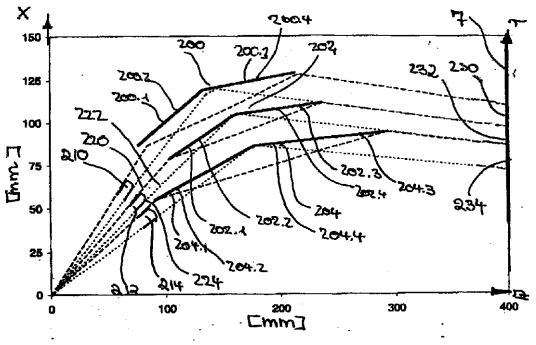

【図１３】



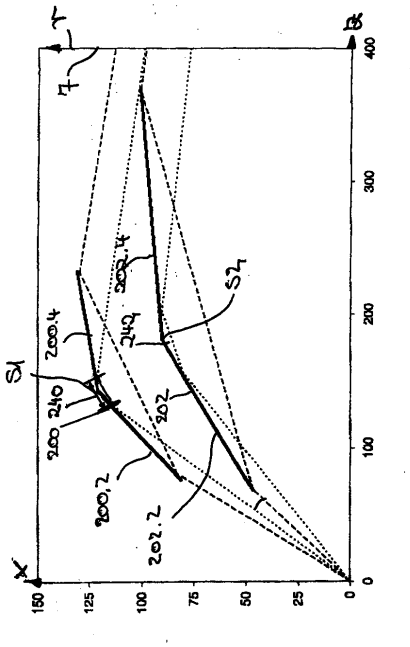

【図１４】



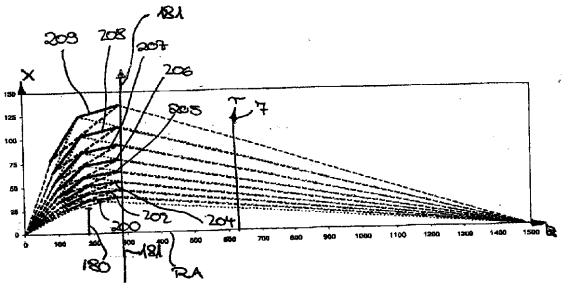

【図１５】



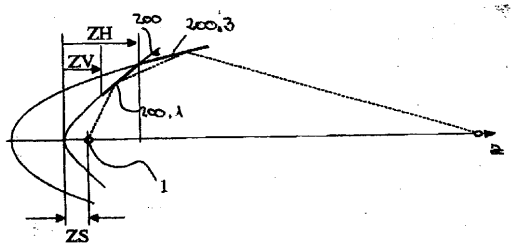

【図１６】



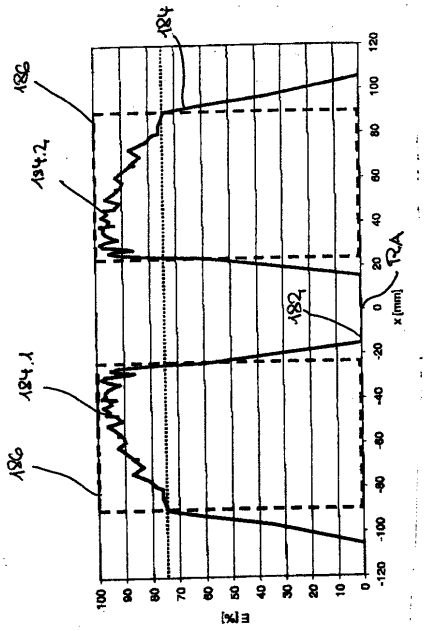
【図１７】



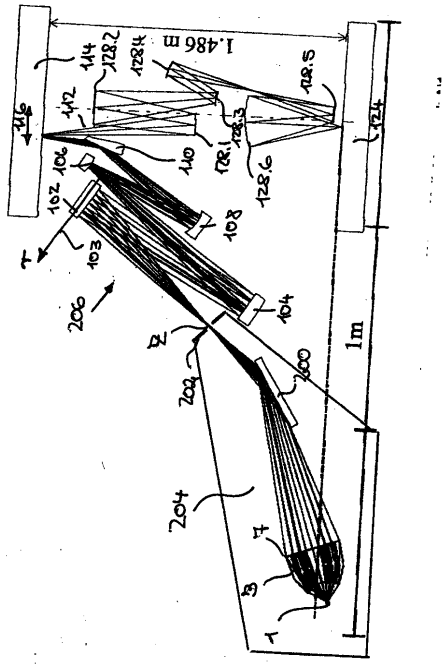
【図１８】



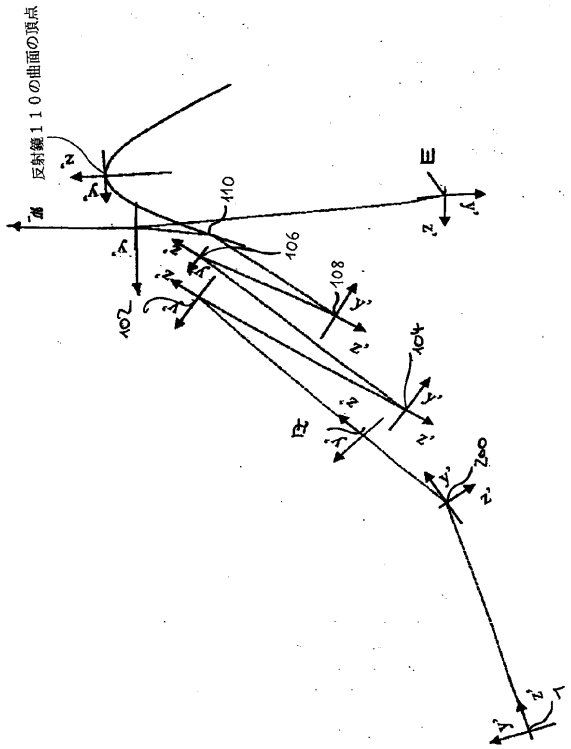
【図１９】



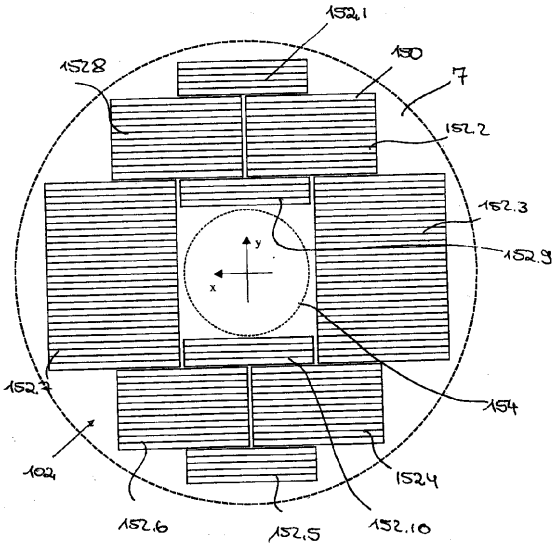
【図２０】



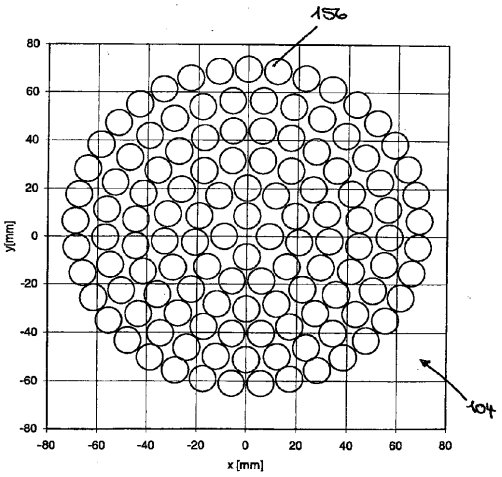
【図２１】



【図２２】


152.1
150
7
1528
152.2
152.3
152.9
y
x
152.7
154
102
152.4
152.6
152.5
152.10

【図２３】


156
104
y[mm]
x [mm]
80
60
40
20
0
-20
-40
-60
-80

フロントページの続き

(72)発明者　ヴォルフガング・ジンガー
ドイツ・７３４３１・アーレン・エガーラントシュトラーセ・４５
(72)発明者　ヨハネス・ヴァングラー
ドイツ・８５５５１・ケーニヒスブロン・アン・デア・ロイテ・１５
(72)発明者　マルティン・アントーニ
ドイツ・７３４３４・アーレン・シュラデンベルクシュトラーセ・７

審査官　渡戸　正義

(56)参考文献　特開昭５４－０５５１７７（ＪＰ，Ａ）
米国特許第０５７６８３３９（ＵＳ，Ａ）
特開平１１－０４０４８０（ＪＰ，Ａ）
米国特許第０５７４５５４７（ＵＳ，Ａ）

(58)調査した分野(Int.Cl.，ＤＢ名)
H01L 21/027
G03F 7/20 - 7/24
G02B 5/08 - 5/10
G21K 1/06
G21K 5/00 - 5/02