

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第5475785号
(P5475785)

(45) 発行日 平成26年4月16日(2014.4.16)

(24) 登録日 平成26年2月14日(2014.2.14)

(51) Int.Cl.

H01L 21/027 (2006.01)
G03F 7/20 (2006.01)

F 1

H01L 21/30 529
H01L 21/30 516E
H01L 21/30 531A
GO3F 7/20 521

請求項の数 17 (全 21 頁)

(21) 出願番号 特願2011-528238 (P2011-528238)
 (86) (22) 出願日 平成21年9月23日 (2009.9.23)
 (65) 公表番号 特表2012-504324 (P2012-504324A)
 (43) 公表日 平成24年2月16日 (2012.2.16)
 (86) 國際出願番号 PCT/EP2009/006856
 (87) 國際公開番号 WO2010/034472
 (87) 國際公開日 平成22年4月1日 (2010.4.1)
 審査請求日 平成24年9月11日 (2012.9.11)
 (31) 優先権主張番号 08017088.9
 (32) 優先日 平成20年9月29日 (2008.9.29)
 (33) 優先権主張国 歐州特許庁 (EP)

(73) 特許権者 503263355
 カール・ツァイス・エスエムティー・ゲーエムベーハー
 ドイツ連邦共和国、73447 オーバーコッヘン、ルドルフ・エーバー・シュトラーセ 2
 (74) 代理人 100147485
 弁理士 杉村 憲司
 (74) 代理人 100134005
 弁理士 澤田 達也
 (74) 代理人 100147692
 弁理士 下地 健一
 (72) 発明者 フロリアン バッハ
 ドイツ国 73447 オベルコッヘン
 イエナ シュトラーセ 31
 最終頁に続く

(54) 【発明の名称】マイクロリソグラフィ投影露光装置の照明システム

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

マイクロリソグラフィ投影露光装置(10)の照明システムであって、
 a) 一次光源(30)と、
 b) システム瞳面(70)と、
 c) ミラー・アレイ(46)であって、
 i) 前記一次光源(30)と前記システム瞳面(70)との間に配置され、
 ii) 複数のアダプティブミラー素子($M_{i,j}$)を含み、該ミラー素子($M_{i,j}$)は
 それぞれ、

ミラー支持体(100)及び反射性コーティング(102)を含むと共に、

前記一次光源(30)により生成される光(34)を前記システム瞳面(70)に
 向けるように構成される、

ミラー・アレイ(46)と、

を備え、前記ミラー素子($M_{i,j}$)は、異なる熱膨張係数を有し互いに取り付け固定され
 る構造(100、102)を含み、

該照明システム(12)は、前記ミラー素子($M_{i,j}$)の形状を個別に変えるために前
 記構造内の温度分布を可変に変更するように構成される温度制御デバイス(90)を備え
 る、照明システム。

【請求項 2】

10

20

前記構造は、前記ミラー支持体(100)及び前記反射性コーティング(102)を含む、請求項1に記載の照明システム。

【請求項3】

前記構造は、前記反射性コーティング(102)を形成する層を含む、請求項1又は2に記載の照明システム。

【請求項4】

前記温度制御デバイス(90)は、前記ミラー支持体(100)に取着される加熱部材又は冷却部材(114、114')を備える、請求項1～3のいずれか1項に記載の照明システム。

【請求項5】

前記加熱部材は、導電抵抗線(114')のパターンを含む、請求項4に記載の照明システム。

【請求項6】

前記加熱部材又は冷却部材は、ペルチェ素子(130)を含む、請求項4又は5に記載の照明システム。

【請求項7】

前記温度制御デバイス(90)は、前記ミラー素子($M_{i,j}$)の前記反射性コーティング(102)の標的領域(106)に放射線を選択的に向けるように構成される放射システムを含む、請求項1～6のいずれか1項に記載の照明システム。

【請求項8】

前記反射性コーティング(102)は、前記放射線に対して吸収性がある、請求項7に記載の照明システム。

【請求項9】

前記放射システムは、放射線ビーム(94)を生成する二次光源(92)と、前記標的領域(106)上で前記放射線ビームを移動させるように構成される空間光変調器(96)とを備える、請求項7又は8に記載の照明システム。

【請求項10】

前記標的領域(106)は、ミラー素子($M_{i,j}$)ごとに異なる、請求項7～9のいずれか1項に記載の照明システム。

【請求項11】

前記温度制御デバイス(90)は、前記異なる熱膨張係数により生じる屈曲力を考慮に入れることにより前記ミラー素子($M_{i,j}$)の形状を予測するように構成される、請求項1～10のいずれか1項に記載の照明システム。

【請求項12】

前記温度制御デバイス(90)は、前記ミラー素子($M_{i,j}$)の不均一な温度プロファイルにより生じる屈曲力を考慮に入れることにより前記ミラー素子の形状を予測するように構成される、請求項1～11のいずれか1項に記載の照明システム。

【請求項13】

前記ミラー素子($M_{i,j}$)は、凹面鏡面を有し、前記温度制御デバイス(290)は、前記ミラー素子($M_{i,j}$)が2つの直交面で異なる焦点距離(f_a 及び f_b)を有するように前記構造内の温度分布を変更するように構成される、請求項1～12のいずれか1項に記載の照明システム。

【請求項14】

前記一次光源(230)は、50nm未満の波長を有する投影光を生成するように構成され、前記ミラー素子($M_{i,j}$)の光軸が、光伝播方向で前記ミラーアレイ(246)の直前にあるミラー(272)の光軸と共に20度よりも大きい角度を形成する、請求項13に記載の照明システム。

【請求項15】

前記光源(230)に対称軸(Ax)が関連付けられ、該対称軸は、水平面に対して45度未満の角度を形成する、請求項14に記載の照明システム。

10

20

30

40

50

【請求項 16】

前記ミラー素子（M_{i j}）は、熱障壁（118a、118b）を備え、該熱障壁（118a、118b）は、該熱障壁（118a、118b）の両側に配置される材料（124、100）よりも小さな熱伝導係数を有する、請求項1～15のいずれか1項に記載の照明システム。

【請求項 17】

各ミラー素子（M_{i j}）が、支持構造に対して傾斜可能に装着される、請求項1～16のいずれか1項に記載の照明システム。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

10

【0001】

本発明は、包括的には、マイクロリソグラフィ露光装置においてマスクを照明する照明システムに関し、詳細には、ミラーのアレイを備えるシステムに関する。

【背景技術】

【0002】

マイクロリソグラフィ（フォトリソグラフィ又は単にリソグラフィとも呼ぶ）は、集積回路、液晶ディスプレイ、及び他の微細構造デバイスの加工技術である。マイクロリソグラフィのプロセスは、エッチングのプロセスと共に、基板上、例えばシリコンウェーハ上に形成されている薄膜積層体にフィーチャをパターニングするために用いられる。加工層ごとに、最初に、遠紫外（DUV）光又は軟X線（EUV）等に対して感放射線性の材料であるフォトレジストでウェーハをコーティングする。次に、フォトレジストを載せたウェーハを投影露光装置において投影光に露光させる。この装置は、パターンを含んでいる透過性又は反射性マスクをフォトレジストに投影することで、マスクパターンにより決定される特定の場所でのみフォトレジストが露光されるようにする。露光後、フォトレジストを現像してマスクパターンに対応する像を生成する。続いて、エッチングプロセスによりパターンをウェーハ上の薄膜積層体に転写する。最後に、フォトレジストを除去する。異なるマスクでこのプロセスを繰り返すことで、多層微細構造部品が得られる。

20

【0003】

投影露光装置は通常、マスクを照明する照明システム、マスクを位置合わせするマスクステージ、投影対物レンズ、及びフォトレジストでコーティングされたウェーハを位置合わせするウェーハアライメントステージを含む。照明システムは、例えば矩形又は湾曲スリットの形状を有し得るマスク上の視野を照明する。

30

【0004】

微細構造デバイスの製造技術の進歩に伴い、照明システムに対する需要も高まり続けている。理想的には、照明システムは、マスク上の照明視野の各点に規定の放射照度及び角度分布の投影光を照明する。「角度分布」という用語は、マスク平面内の特定の点に向かって収束する光束の全光エネルギーが、光束を構成する光線の様々な方向に分配される状態を説明するものである。

【0005】

マスクに当たる投影光の角度分布は、フォトレジストに投影されるパターンの種類に通常は適合される。例えば、比較的大きなサイズのフィーチャには、小さなサイズのフィーチャとは異なる角度分布が必要であり得る。最も一般的に用いられる投影光角度分布は、通常照明設定、輪帯照明設定、二重極照明設定、及び四重極照明設定と呼ばれる。これらの用語は、照明システムのシステム瞳面における放射照度分布を指す。例えば、輪帯照明設定では、システム瞳面において環状の領域しか照明されない。したがって、投影光の角度分布に小さな角度範囲しかないため、全光線が同様の角度でマスクに斜めに当たる。

40

【0006】

EUV投影露光装置では、照明システムは通常、EUV光源により生成された投影光をシステム瞳面に向けることでシステム瞳面において所望の強度分布が得られるようにする、ミラーアレイ（ファセットミラーと呼ぶ場合もある）を備える。

50

【0007】

特許文献1は、DUV照明システムが瞳面を照明するミラーアレイを用いることを提案している。マスク平面での異なる角度分布の生成の柔軟性を高めるために、ミラーのそれぞれが2つの垂直傾斜軸に対して傾斜し得る。ミラーアレイと瞳面との間に配置される集光レンズが、ミラーにより形成される反射角を瞳面内の場所に変換する。この既知の照明システムは、瞳面上に複数の光スポットを生成することを可能にし、各光スポットは、特定の1つの微小ミラーに関連付けられ、このミラーを傾斜させることにより瞳面にわたって移動自在である。適当なアクチュエータ、例えば圧電アクチュエータを用いて限られた範囲で形状を変えることができる鏡面を有するアダプティブミラーを用いることにより、スポットのサイズを変えることも提案されている。

10

【0008】

特許文献2は、マイクロリソグラフィ露光装置の投影対物レンズに収容されている選択されたミラーの特定の部分を加熱することを可能にする補正デバイスを開示している。のために、ミラーの加熱すべき部分を光線が走査する。このデバイスは、所望の、特に回転対称の温度分布を達成できるように温度を非常に選択的に上昇させることを可能にする。一実施形態では、所望の温度分布は、加熱されたミラーが所定の形状に変化することにより対物レンズの他の光学素子で生じる収差を補正するように決定される。

【0009】

特許文献3は、マイクロリソグラフィ露光装置のEUV投影対物レンズの大きなミラーの1つに補正光を向ける、該対物レンズの補正デバイスを開示している。補正光は、ミラー基板の熱膨張係数がゼロになる温度に反射面付近の温度が近付くように制御される。

20

【0010】

特許文献4は、マイクロリソグラフィ露光装置のEUV投影対物レンズの別の補正デバイスを開示している。一実施形態では、対物レンズの大きなミラーの1つに赤外線が向かれる。赤外光は、ミラーの形状が高エネルギーEUV投影光の衝撃を受けても実質的に変わらないように制御される。他の実施形態では、加熱デバイス又は冷却デバイスが同じ目的でミラー支持体に一体化される。

【0011】

上述の特許文献1に開示されているようなアダプティブミラーを含むミラーアレイは、反射能を向上させて、後続のコンデンサの非理想的な光学特性を、又は材料欠陥及び製造公差により生じる収差を補正することができるため、特に有利である。しかしながら、この文献で提案されている圧電アクチュエータの使用にはいくつかの大きな欠点がある。鏡面の所望の曲率を得るためにには、このようなアクチュエータを多数設ける必要があり、これによりシステムの複雑性が増す。例えば、圧電アクチュエータを個別に制御するために、非常に多数のリード線を設けなければならない。100cm²未満の総面積に数千個のミラー素子を含むミラーアレイでは、電線密度が重要になる。それ以外にも、様々な温度条件下でミラー素子の所望の表面形状を得ることが困難である。

30

【先行技術文献】

【特許文献】

【0012】

【特許文献1】国際公開第2005/026843号

40

【特許文献2】米国特許第2005/0018269号

【特許文献3】国際公開第2004/092843号

【特許文献4】欧州特許第0532236号

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0013】

したがって、システムの複雑性を制限しつつも、システム瞳面におけるミラー素子により生成される光束のスポット形状を非常に正確かつ可変に変えることを可能にする照明システムを提供することが、本発明の目的である。

50

【課題を解決するための手段】**【0014】**

この目的は、一次光源、システム瞳面、及びミラーアレイを備える照明システムによって達成される。ミラーアレイは、一次光源とシステム瞳面との間に配置される。アレイは複数のアダプティブミラー素子を含み、各ミラー素子が支持構造に対して傾斜可能に装着され得る。各ミラー素子は、ミラー支持体及び反射性コーティングを含み、一次光源により生成された光をシステム瞳面へ向けるように構成される。本発明によれば、ミラー素子は、異なる熱膨張係数を有し互いに取り付け固定される構造を含む。照明システムは、ミラー素子の形状を変えるために構造内の温度分布を可変に変更するように構成される温度制御デバイスをさらに備える。

10

【0015】

したがって、本発明は、温度コントローラに用いられるバイメタル板と同様に、温度が変わると熱膨張係数の異なる材料からなる板が屈曲する効果を利用する。本発明はさらに、特定の標的領域を加熱又は冷却されるときのミラー素子の温度プロファイルを非常に正確に計算することが可能なだけでなく、この温度プロファイルの結果として生じる変形を予測することも可能であるという考えに基づく。本発明の状況では、この予測は、異なる熱膨張係数により生じる屈曲力を考慮に入れなければならない。しかしながら、ミラー素子の不均一な温度プロファイルにより生じる屈曲力も考慮に入れられ得る。

【0016】

高性能のミラーアレイでは、投影光の吸収により誘発されるミラー変形に起因した光学収差を防止するために、そのような計算がいずれにせよ行われるべきである。したがって、計算の観点から、本発明による温度誘発ミラー適応は、システムの複雑性を実質的に増大させない。

20

【0017】

ハードウェアの観点から、多種多様な異なる変形を高精度に発生させるために、ミラーの非常に少数の領域及び/又は小さな領域を慎重に加熱又は冷却すれば十分であることが分かった。多数の圧電素子の制御と比較して、非常に少数の、例えば2つ又は4つのヒータ部材又はクーラ部材を制御するために必要な配線等は大幅に少ない。

【0018】

本発明は、ミラー素子が異なる熱膨張係数を有し互いに取り付け固定される構造を含むことしか必要としない。好ましくは、構造は、一対の平行面を有する平面構造又は湾曲構造である。ミラー素子は通常、両方が異なる熱膨張係数を有するミラー支持体及びそれに塗布される反射性コーティングを含むため、普通はそのような構造がいずれにせよ存在する。熱膨張係数の差が大きいほど温度変化の結果としての屈曲作用が大きくなるため、ミラー素子が温度変化に対して高感度であることが望まれる場合、熱膨張係数の差を大きくすべきである。金属は、大きな熱膨張係数が幅広く利用可能である材料種別であるため、いくつかの実施形態では構造が金属製である。

30

【0019】

しかしながら、屈曲作用を生む構造は、必ずしも反射性コーティング及びミラー支持体である必要はない。反射性コーティングは、屈折率が交互に変わると共に熱膨張係数も異なる薄層の積層体により普通は形成されるため、温度プロファイルの変化後にこれらの層により生じる屈曲作用は、所望の表面形状を得るのに十分であり得る。

40

【0020】

他方、より大きな屈曲作用が望まれる場合、反射性コーティングの寄与では不十分であり得る。その場合、ミラー支持体を熱膨張係数の異なる少なくとも2つの層を含む層構造により形成させることが考えられ得る。

【0021】

一実施形態では、温度制御デバイスは、ミラー支持体に取着される加熱部材又は冷却部材を備える。非常に少数のこののような加熱部材又は冷却部材で、ミラー素子の複雑な変形をもたらすことが可能である。冷却部材及び/又は加熱部材は、ペルチェ素子により形成

50

されてもよく、加熱部材は、ミラー支持体の下側に直接取着される導電抵抗線のパターンを含んでもよい。

【0022】

冷却部材の使用は、一次光源が50nm未満、好ましくは25nm未満、最も好ましくは13nm～14nmの波長を有する投影光を生成するように構成されるEUV照明システムで特に有利である。入射する高エネルギーEUV投影光の大部分がミラー素子により吸収されてそれらを加熱することから、ミラー素子をいずれにせよ冷却しなければならない場合が多いため、冷却は、局所分解的に(*locally resolved manner*)行われ得る。すなわち、ミラー素子の冷却の程度が部分ごとに異なる。例えば、ミラー素子にペルチェ素子のアレイが設けられてもよく、ペルチェ素子は、例えば縞又は橜円の輪郭を有し得る特定の領域に配置されているペルチェ素子のみが作動されてミラー素子の隣接部分を冷却するように制御される。

【0023】

好適な実施形態では、温度制御デバイスは、ミラー素子の反射性コーティング上の標的領域に放射線を選択的に向けるように構成される放射システムを備える。これにより、ミラー素子の形状を変えることが可能となるため、各ミラー素子に利用可能な限られた空間に付加的な電気部品を一切収容する必要なく、ミラー素子の反射能を変更することが可能となる。したがって、放射システムは、ミラー素子の形状のある種の遠隔制御を可能にする。

【0024】

ミラー素子の反射面及び放射システムにより生成される放射線の波長は、反射面に放射線に対して吸収性があるように決定されるべきである。これにより、最大の加熱効果が確保されると同時に、反射される放射線により生じる望ましくない作用が低減される。

【0025】

放射システムは、ミラー支持体の所望の標的領域に対応する開口の配列を含む絞りを備え得る。絞りは、放射線源により照明され、標的領域のみが放射線で照明されるようにミラーアレイに結像させる。異なる絞りを挿入することにより、放射線に露光される標的領域を変えることさえ可能である。絞りの開口を適宜決定することにより、ミラー素子ごとに異なる標的領域を有することも可能である。

【0026】

放射システムが放射線ビームを生成する二次光源及び放射線ビームを標的領域上で移動させるように構成される空間光変調器を備えていれば、各ミラー素子で個別に変えることができる標的領域がより容易に提供され得る。この場合、標的領域は、移動する放射線ビームにより「書き込まれる」。所望であれば、空間光変調器を適宜制御することにより、ミラー素子のいずれかで任意の標的領域が加熱され得る。このような放射システムは、標的領域が線パターンである実施形態で特に適している。各ミラー素子が十分に高いリフレッシュレートで加熱されることを確実にするために、2つ以上の二次光源及び空間光変調器を設ける必要があり得る。

【0027】

一実施形態では、ミラー素子は凹面鏡面を有し、温度制御デバイスは、ミラー素子が2つの直交平面で異なる焦点距離を有するように構造内の温度分布を変更するように構成される。このような非点収差ミラー素子は、球面ミラーが大きな入射角で当たる光を反射する場合にできるであろう収差を抑えるため、特に有利である。

【0028】

非点収差的に変形するミラー素子が、EUV照明システムで特に有用である。その場合、大きな収差を引き起こすことなく、ミラー素子の光軸が(それらの傾斜角に関係なく)、光伝播方向でミラーアレイの直前にあるミラーの光軸と共に20度よりも大きい、好ましくは30度よりも大きい角度を形成することができる。投影光ビームの偏向が大きいほど、特に装着技術及び空間要件に関してより有利かつ好都合に照明システムの光学素子を配置することが可能となる。

10

20

30

40

50

【0029】

例えば、光源に関連する対称軸は、このとき水平面に対して45度未満、好ましくは20度未満の角度を形成し得る。このような構成では、半導体設備の最下部又は照明システムの残りの部分から非常に高い場所に嵩張る光源を配置する必要がなく、EUV照明システムのミラーと並べて好都合に配置することができる。

【0030】

アレイに対して多数の非点収差ミラー素子を生産するのは困難であり費用がかかるため、温度制御システムを用いたミラー素子の非点形状の生成が有利である。システム瞳面のスポット形状をさらに変えるために温度制御システムがいずれにせよ設けられれば、球面ミラー又は少なくとも回転対称ミラーを用いると共に、大きな偏向角を可能にするのに必要な非点形状を生成するために温度制御システムも用いるのが、より簡単かつ安価である。しかしながら、ミラー素子が最初から、すなわち温度制御システムを用いて得られる変形の結果としてではなく、必要な非点収差作用を有することもできることを理解されたい。

10

【0031】

この場合、照明システムは、光源とシステム瞳面との間に配置されるミラーアレイを備える。アレイは複数のミラー素子を含み、各ミラー素子が、支持構造に対して傾斜可能に装着され、一次光源により生成された光をシステム瞳面へ向けるように構成される。ミラー素子は非点収差凹面鏡面を有する。すなわち、ミラー素子は、2つの直交平面で異なる焦点距離を有する。温度制御デバイスも設けることは義務ではない。

20

【0032】

一実施形態では、ミラー素子は熱障壁を備え、熱障壁は、熱障壁の両側に配置される材料よりも小さな熱伝導係数を有する。このような熱障壁は、標的領域及び隣接材料で生成される冷熱が長期間にわたりミラー素子のこの部分に制限されたままとなることを確実にする。換言すれば、標的領域及び隣接材料と周囲材料との間の温度差の減少が速すぎない。これにより、ミラー素子の安定した光学特性を確保するために標的領域が温度制御デバイスにより加熱又は冷却されなければならないリフレッシュレートを低減させることが可能となる。

【0033】

添付図面と共に以下の詳細な説明を参照すれば、本発明の特徴及び利点がより容易に理解され得る。

30

【図面の簡単な説明】

【0034】

【図1】本発明による投影露光装置の大幅に簡略化した斜視図である。

【図2】図1に示す投影露光装置に収容されている照明システムの子午線断面図である。

【図3】図2に示す照明システムに収容されているミラー素子の斜視図である。

【図4a】X軸に沿った図3のミラー素子の温度プロファイルである。

【図4b】Y軸に沿った図3のミラー素子の温度プロファイルである。

【図5】レーザビームが標的領域に向けられているミラーアレイの斜視図である。

【図6a】ミラー素子における加熱放射線を受ける標的領域である。

40

【図6b】ミラー素子における加熱放射線を受ける標的領域である。

【図6c】ミラー素子における加熱放射線を受ける標的領域である。

【図6d】ミラー素子における加熱放射線を受ける標的領域である。

【図7】異なるミラー素子群に異なる標的領域を関連付ける工程を示すミラーアレイの上面図である。

【図8】加熱部材がミラー支持体の下側に取着される別の実施形態によるミラー素子の斜視図である。

【図9】加熱部材として用いられる導電抵抗線が取着されるミラー支持体の底面図である。

【図10】ミラー素子が熱障壁を備える実施形態によるミラー素子の斜視図である。

50

【図11】瞳規定ミラー（pupil defining mirror）として非点収差凹面ミラー素子を有するミラーアレイを備えるEUV投影露光装置の概略子午線断面図である。

【図12】図11に示すミラーアレイの上面図である。

【図13】図12に示すミラーアレイのミラー素子の拡大斜視図である。

【図14】冷却部材としてペルチェ素子が用いられる実施形態によるミラー素子の斜視図である。

【発明を実施するための形態】

【0035】

I. 投影露光装置の全体構造

図1は、投影光ビームを生成するための照明システム12を備える投影露光装置10の高度に単純化した斜視図である。投影光ビームは、微細構造18を含むマスク16上の視野14を照明する。この実施形態では、照明視野14は、ほぼリングセグメントの形状を有する。しかしながら、照明視野14の他の形状、例えば矩形も考えられる。

【0036】

投影対物レンズ20が、照明視野14内の構造18を、基板24上に堆積させた感光層22、例えばフォトレジスト上に結像する。シリコンウェーハにより形成され得る基板24は、感光層22の上面が投影対物レンズ20の像平面に正確に位置付けられるようにウェーハステージ（図示せず）上に配置される。マスク16は、マスクステージ（図示せず）により投影対物レンズ20の物体平面に位置決めされる。投影対物レンズ20の倍率が1未満であるため、照明視野14内の構造18の縮小像14'が感光層22に投影される。

【0037】

投影中、マスク16及び基板24は、Y方向と一致する走査方向に沿って移動する。したがって、照明視野14は、照明視野14よりも大きな構造領域を連続的に投影できるようマスク16を走査する。このようなタイプの投影露光装置は、「ステップアンドスキヤン装置」又は単に「スキャナ」と呼ばれる場合が多い。マスク16の速度と基板24の速度との比は、投影対物レンズ20の倍率に等しい。投影対物レンズ20が像を反転させた場合、マスク16及び基板24は、図1に矢印A1及びA2で示すように互い逆方向に移動する。しかしながら、本発明は、マスク16及び基板24がマスクの投影中に移動しないステップツールで用いられてもよい。

【0038】

図示の実施形態では、照明視野14は、投影対物レンズ20の光軸26に対して中心合わせされていない。このような軸外照明視野14は、特定のタイプの投影対物レンズ20で必要とされ得る。他の実施形態では、照明視野14は、光軸26に対して中心合わせされる。

【0039】

II. 照明システムの全体構造及び機能

図2は、図1に示す照明システム12のより詳細な子午線断面図である。明確にするために、図2の図は、大幅に簡略化されており一定の縮尺ではない。これは特に、種々の光学ユニットが非常に少数の光学素子によってしか表されていないことを意味する。現実には、これらのユニットは、それよりも大幅に多いレンズ及び他の光学素子を備え得る。

【0040】

照明システム12は、ハウジング28と、図示の実施形態ではエキシマレーザ30として実現される光源とを含む。エキシマレーザ30は、約193nmの波長を有する投影光を放出する。他のタイプの光源及び他の波長、例えば248nm又は157nmも考えられる。

【0041】

図示の実施形態では、エキシマレーザ30により放出される投影光はビーム拡大ユニット30に入り、そこで光ビームが幾何学的光束を変えることなく拡大される。ビーム拡大ユニット32は、図2に示すように複数のレンズを含み得るか、又は例えばミラー配列と

10

20

30

40

50

して実現され得る。投影光は、実質的に平行ビーム34としてビーム拡大ユニット32から出射する。他の実施形態では、このビームは大きな発散度を有し得る。平行ビーム34は、照明システム12の全体的寸法を小さくするために設けられる平面折り返しミラー36に当たる。

【0042】

折り返しミラー36から反射した後、ビーム34は、マイクロレンズ40のアレイ38に当たる。マイクロレンズ40の後焦点面に又はその付近に、ミラーアレイ46が配置される。図5にも示されているように、ミラーアレイ46は、互いに対しても垂直に位置合わせされていることが好ましい2つの傾斜軸56x、56y(図5を参照)を中心に互いに独立して傾斜し得る複数の小さなアダプティブミラー素子M_{i,j}を含む。ミラー素子M_{i,j}の総数は、100個を超えるか、又は数千個でさえあり得る。鏡面には回折構造が設けられ得る。この実施形態では、ミラー素子M_{i,j}の数は、マイクロレンズアレイ38に含まれるマイクロレンズ40の数に等しい。したがって、各マイクロレンズ40が、ミラーアレイ46の1つのミラー素子M_{i,j}に収束光束を向ける。

10

【0043】

ミラー素子は、非常に高精度に製造されるべきである。プリフォームへの材料の付加若しくはプリフォームからの材料の除去、ダイを用いるか若しくはガルバニック効果を伴う成形プロセス、又はリソグラフィプロセスを用いることにより、高精度が得られ得る。

【0044】

個々のミラー素子M_{i,j}の傾斜運動は、照明システム12の全体システム制御部52に接続されるミラー制御ユニット50により制御される。ミラー素子M_{i,j}の所望の傾斜角を設定するために用いられるアクチュエータがミラー制御ユニット50から制御信号を受け取ることで、個々のミラー素子M_{i,j}それぞれが、制御信号に応じて可変の反射角で入射光線を反射することが可能となる。図示の実施形態では、個々のミラー素子M_{i,j}を配置できる連続した反射角範囲がある。他の実施形態では、アクチュエータは、限られた数の離散的な傾斜角のみを設定できるように構成される。

20

【0045】

ミラー素子M_{i,j}から反射された光束は、第1のコンデンサ58に当たり、第1のコンデンサ58は、わずかに発散した光束がこのとき少なくとも実質的に平行な光束として光インテグレータ72に当たることを確実にし、光インテグレータ72は、複数の二次光源を生成する。光インテグレータ72は、光線と照明システム12の光軸OAとの間に形成される角度範囲を拡大する。他の実施形態では、光インテグレータ72に当たる光束がより大きな発散度を有するように、第1のコンデンサ58を省いてもよい。

30

【0046】

光インテグレータ72は、図示の実施形態では、平行な円筒形マイクロレンズ(cylindrical microlenses:シリンドリカルマイクロレンズ)の2つの直交アレイをそれぞれが含む2つの基板74、76からなるフライアイレンズとして実現される。光インテグレータの他の構成、例えば、回転対称面を有するが矩形の境界を有するマイクロレンズアレイからなるインテグレータも構想される。照明システム12に適した様々なタイプの光インテグレータが記載されている、国際公開第2005/078522号、米国特許出願公開第2004/0036977号、及び米国特許出願公開第2005/0018294号を参照されたい。

40

【0047】

参照符号70は、マスク14に当たる光の角度分布を実質的に定める照明システム12のシステム瞳面を示す。システム瞳面70は、通常は平面であるか又はわずかに湾曲しており、光インテグレータ72に又はその直近に配置される。システム瞳面70における光の角度分布が後続の視野平面における強度分布に直接変換されると、光インテグレータ72は、マスク16上の照明視野14の基本的な幾何学的形状を実質的に決定する。光インテグレータ72が走査方向YよりもX方向に大きく角度範囲を拡大するため、照明視野14は、走査方向Yに沿ってよりもX方向に沿って大きな寸法を有する。

50

【0048】

光インテグレータ72により生成される二次光源から出射する投影光は、図2では簡単のために単一のレンズのみで表されている第2のコンデンサ78に入る。第2のコンデンサ78は、システム瞳面70と視野絞り82が配置される後続の中間視野平面80との間のフーリエ関係を保証する。第2のコンデンサ78は、二次光源により生成される光束を中間視野平面80で重ね合わせることにより、中間視野平面80の非常に均一な照明を達成する。視野絞り82は、複数の可動ブレードを含み得ると共に、マスク16上の照明視野14の鮮明なエッジを確保する。

【0049】

視野絞り対物レンズ84が、中間視野平面80とマスク16が配置されるマスク平面86との間に光学的共役をもたらす。したがって、視野絞り82は、視野絞り対物レンズ84によりマスク16に鮮明に結像される。視野絞り82及び視野絞り対物レンズ84は、他の実施形態では省いてもよい。

10

【0050】

上述したように、システム瞳平面70における強度分布は、後続の中間視野平面80における角度分布に変換される。視野絞り対物レンズ84の倍率が1である場合、その角度分布及び中間視野平面80がマスク平面86に再現され（視野絞り対物レンズ84により導入される収差がなければ）、倍率の絶対値が1ではない場合、角度分布は拡大又は縮小される。したがって、ミラーアレイ46を用いてシステム瞳平面70における強度分布を変更することにより、マスク平面86における角度分布を変えることが可能である。

20

【0051】

角度分布（すなわち照明設定）を変える場合、個々のミラー素子 $M_{i,j}$ のそれぞれにより生成されるスポットがシステム瞳平面70において組み合わさって所望の強度分布に対応するパターンになるように、ミラーアレイ46の個々のミラー素子 $M_{i,j}$ を傾斜させる。

【0052】

ミラー素子 $M_{i,j}$ が平面状の反射面を有する場合、システム瞳平面70において生成されるスポットの形状は、主にマイクロレンズ40の屈折力及びマイクロレンズ40に当たるビーム34の発散度に応じて変わる。ミラー素子 $M_{i,j}$ から出射する光束は、ミラー素子 $M_{i,j}$ の空間的向きを特徴付ける傾斜角に多少依存する（independent on）発散度を有する。したがって、第1の集光レンズ58を通過する光束は、少なくとも実質的に同じ直径及び発散度を有する。

30

【0053】

しかしながら、集光レンズ58は、理想的な光学特性を有していない。これは、図示の実施形態の場合、全ての光束それぞれでミラー素子 $M_{i,j}$ から反射された光束の完璧なコリメーションが達成できないことを意味する。その代わりに、コリメート効果は、光束がコンデンサ58に当たる場所及び方向に少なくともわずかに応じて変わる。

【0054】

結果として、コンデンサ58から出射する光束の一部はコリメートされることなく、わずかに収束又は発散し得る。それゆえ、システム瞳面70における光束の直径（すなわちスポットサイズ）もわずかに変わる。これらの偏差から、システム瞳平面70における強度分布が所望の強度分布からずれることになる。これらの偏差が一定の限度を超えた場合、マスク平面86における角度分布の許容不可能な偏差が観察され得る。

40

【0055】

第1のコンデンサ58がコリメートされずに発散又は収束する光束を生成するように設計される場合も、同様の考察が当てはまる。第1のコンデンサ58の非理想的な光学特性は、同じくシステム瞳面70における強度分布の悪化、ひいてはマスク平面86における角度分布の不良を招き得る。

【0056】

このような望ましくない作用を回避するために、ミラーアレイ46のミラー素子 $M_{i,j}$

50

は適応性がある。したがって、ミラー素子の形状は、それらの反射能を変えるように変えることができる。反射能を増減させることにより、反射ビームの発散度を変えることが可能である。ミラー素子 $M_{i,j}$ が第 1 のコンデンサ 58 の中心にビームを向ける場合、必要な反射能は、ミラー素子 $M_{i,j}$ が第 1 のコンデンサ 58 の円周にビームを向ける状況と比較して異なる必要があり得る。

【0057】

ミラー素子の形状の変化は、時変的なものを含む他の望ましくない光学的作用がマスク平面 86 における角度分布の悪化を引き起こす場合にも有利であり得る。例えば、投影光の吸収により生じる加熱の結果として、マイクロレンズ 40 の屈折力の変化が起こり得る。ミラー素子 $M_{i,j}$ の形状の変化は、製造公差により導入される収差を補正するためにも役立ち得る。

10

【0058】

以下では、ミラー素子 $M_{i,j}$ の形状を変えるために用いられる温度制御デバイスに関する様々な実施形態を説明する。

【0059】

I I I . 温度制御デバイス

照明システム 12 は、第 1 の実施形態によるレーザビーム 94 を生成する赤外レーザ源 92 を含む温度制御デバイス 90 を備え、これはハウジング 28 内に収容される。温度制御デバイス 90 は、ミラー素子 $M_{i,j}$ の標的領域上でレーザビーム 94 を移動させるように構成される空間光変調器 96 をさらに含む。この実施形態では、空間光変調器 96 は、適当なアクチュエータを用いて 2 つの直交軸に関して傾斜させることができる傾斜可能ミラー 98 を備える。このような傾斜可能ミラー 98 は、Microvision により出願された国際公開第 2005/078506 号に記載のように MEMS 技術を用いて実現することができる。傾斜可能ミラー 98 を用いて、ミラー 98 を適宜傾斜させることによりミラーアレイ 46 の任意の点にレーザビーム 94 を向けることが可能である。代替的な実施形態では、空間光変調器 96 は、回転可能なプリズム又は電気光学素子の組み合わせを含み、これは、素子に印加される電圧を変えることにより素子を通過する光ビームの方向を変えることを可能にする。

20

【0060】

空間光変調器 96 は、レーザビーム 94 がミラー素子 $M_{i,j}$ の標的領域上で連続的又は間欠的に移動するように制御される。レーザ光の波長は、ミラー素子によりほぼ完全に、又は少なくとも 80 % を超えて吸収されるように選択される。吸収されたレーザ光は、レーザ光が空間光変調器 96 により向けられた標的領域内の温度を上昇させる。

30

【0061】

これは、単一のミラー素子 $M_{i,j}$ の拡大斜視図である図 3 に示されている。ミラー素子 $M_{i,j}$ は、ミラー支持体 100 及びミラー支持体 100 の上に塗布される反射性コーティング 102 を含む。反射性コーティング 102 は、例えば屈折率が交互に変わる複数の薄層により形成され得る。反射性コーティングは、投影光の波長の最大反射を確保するようにこの波長に特定的に適合される。レーザ源 92 により生成されるような赤外線に対して、このような反射性コーティングは通常はほぼ完全に吸収性である。

40

【0062】

ミラー支持体 100 自体は、図 3 に破線で示すように、互いに取り付け固定される 2 つ以上の個別の平行構造により形成され得る。

【0063】

参照符号 104 は、照明システム 12 の動作中に投影光が当たる反射性コーティング 102 の投影光領域を示す。これに X 方向及び Y 方向に沿って隣接して、レーザビーム 94 が向けられる標的領域 106a、106b、106c、及び 106d が示されている。他の実施形態では、投影光領域 104 は、図 3 に示すよりも実質的に大きく、標的領域 106a ~ 106d は、投影光領域 104 に部分的に又は完全に重なり得る。標的領域 106a ~ 106d における赤外線の吸収が、標的領域 106a ~ 106d の付近の温度を上昇

50

させる。

【0064】

これは、X方向及びY方向に沿ったミラー素子M_{i,j}の温度プロファイルを示す図4a及び図4bのグラフに示されている。実線108は、投影光領域104に当たる投影光によってのみ生成される温度プロファイルを示す。反射性コーティング102は、投影光に対して高い反射率を有するが、図4a及び図4bに実線108で示すように、少量の吸收光が温度の上昇をもたらす。図4aにおいて、破線110a及び110cは、対向する標的領域106a及び106cそれぞれに当たる赤外線によってのみ生成される温度プロファイルを示す。図4bにおいて、破線110b及び110dは、対向する標的領域106b及び106dそれぞれに当たる赤外線によってのみ生成される温度プロファイルを示す。上記のプロファイルを合計することにより得られる全温度プロファイルは、点線で示されている。
10

【0065】

反射性コーティング102及びミラー支持体100は、互いに異なる熱膨張係数を有する。図4a及び図4bに示す温度プロファイルにより、交差配置で配置されている2つのバイメタル板と同様の効果が得られる。それゆえ、ミラー素子M_{i,j}は、図4a及び図4bに示す温度プロファイルが大きくなるとX方向及びY方向に沿って伸びる2つの直交屈曲軸に関して屈曲し始める。

【0066】

図3では、ミラー支持体100の熱膨張係数が反射性コーティング102の熱膨張係数よりも大きいと想定されている。その場合、温度上昇によりミラー素子M_{i,j}が図示のように凹状に屈曲することになる。加熱された領域104及び106a～106dの交差状配置の結果として、屈曲は少なくとも実質的に回転対称である。したがって、空間光変調器96を用いてレーザビーム94をミラー素子M_{i,j}に向けることにより、X方向及びY方向に沿って同一の正の反射能が生成される。この反射能は、ミラー素子M_{i,j}が実質的に傾斜している場合にシステム瞳平面70における反射ビームのスポット形状を一定に保つのに役立ち得る。
20

【0067】

図5は、ミラーアレイ46の斜視図である。ミラー素子M_{3,5}が、2つの直交傾斜軸56x及び56yに関して傾斜した位置で示されている。レーザビーム94は、異なるミラー素子M_{6,5}に向けられている。点線94'は、実質的に直線に沿ってミラー素子M_{6,5}の反射性コーティング102にわたって向けられた後の時点のレーザビーム94を示す。
30

【0068】

当然ながら、ミラー素子M_{i,j}の標的領域を加熱することにより様々な他の変形が得られ得る。反射性コーティングの熱膨張係数がミラー支持体100の熱膨張係数よりも小さくなく大きい場合、温度上昇によりミラー素子M_{i,j}が凸状に屈曲することになる。室温で実質的な曲率を有するようにミラー素子を製造することも可能であり、温度制御デバイス90を用いて温度を上昇させることによりこの曲率が小さくなる。

【0069】

ミラー素子M_{i,j}の形状の変化は、特に、赤外線により照明される標的領域のサイズ及び場所に応じて実質的に決まる。図6a～図6dは、ミラー素子M_{i,j}で生成され得る種々の標的領域を示す。
40

【0070】

図6aは、正方形の鏡面を対称に等しく二等分する細長い縞の幾何学的形状を有する標的領域106-1を示す。この標的領域106-1の付近で温度が上昇すると、ミラー素子M_{i,j}は、縞の長手方向に直交する方向に関してのみ屈曲する。このような変形は、照明システム12の非点収差作用を補正するのに役立ち得る。

【0071】

図6bに示す標的領域106-2は、図3に示す標的領域106a～106dと同様である。それゆえ、ミラー素子M_{i,j}は、標的領域106-2に赤外線を向けた場合にその
50

形状が同様に変わる。ミラー素子 $M_{i,j}$ の中心にさらなる熱が生成されるため、得られる曲率プロファイルはわずかに異なる。

【0072】

図6a及び図6bに示す標的領域には、移動するレーザビーム94で単純に生成される線パターンであるといえるという利点がある。

【0073】

図6cは、円形ディスクの幾何学的形状を有する標的領域106-3を示す。このようなディスクは、最も回転対称性の良い屈曲力をもたらす。

【0074】

図6dは、同じくミラー素子 $M_{i,j}$ を少なくとも実質的に回転対称に屈曲させるが、図3、図6b、及び図6cに示す実施形態と比較してわずかに異なる曲率プロファイルを有する標的領域106-4を示す。

【0075】

標的領域106の温度を上昇させることにより得られるミラー素子 $M_{i,j}$ の変形は、ミラー支持体100及び反射性コーティング102に存在する内部応力にも左右される。例えば、製造プロセス後に機械的応力が残るように反射性コーティング102を形成する層を作ることが可能である。このような応力は、層の温度を上昇させることにより解放又は増加させることができる。機械的応力の方向を適宜選択することにより、標的領域106の温度の変化後に得られる変形に影響を及ぼすことが可能である。

【0076】

上記では、全ミラー素子 $M_{i,j}$ が温度制御デバイス90を用いて同様に加熱されると想定した。しかしながら、多くの場合、ミラーアレイ46内の位置に応じてミラー素子 $M_{i,j}$ を様々に変形させる必要がある。例えば、ミラーアレイ46の中心から離れるほどミラー素子の反射能を高める必要があり得る。

【0077】

このような標的領域106の例示的な構成を図7に示す。この実施形態のミラーアレイ46は、矩形格子パターンで配置された121個のミラー素子 $M_{i,j}$ を含む。ここで、中心のミラー素子 $M_{i,j}$ は全く変形させないものと想定する。温度制御デバイス90を用いて、他の全てのミラー素子でほぼ回転対称の変形がもたらされるものとし、ミラーアレイ46の中心からの距離の増加に伴って曲率が大きくなるものとする。それゆえ、標的領域106は、ミラー素子 $M_{i,j}$ が中心から離れるほど大きくなっている。

【0078】

レーザビーム94は、反射性コーティング102の反射特性を変更するためにも用いられ得る。レーザビーム94がミラー素子 $M_{i,j}$ の特定の場所で十分に長く留まれば、反射性コーティングの反射率が実質的に低下するような程度まで温度が上昇する。反射性コーティング102の反射率のこのような意図的な低下は、例えばビームが不均一である結果として投影光が投影光に露光された領域104において同様の低下を招いた場合に有用であり得る。その場合、レーザビーム94は、(低いが)均一な反射率が領域104の一部で回復されることを確実にする。

【0079】

システム瞳面70における投影光の強度及び角度分布に所望の光学的効果を与えるために、反射率の低下を意図的にもたらすことも可能である。このような低下は過渡的であっても永久的であってもよい。

【0080】

I V . 代替的な実施形態

図8は、別の実施形態によるミラー素子 $M_{i,j}$ の斜視図である。ミラー素子 $M_{i,j}$ は、固体関節(solid state articulations)112a、112b、112c、及び112dを用いてキャリア構造110に接続される。これらの関節112a、112b、112c、及び112dは、長手方向スリット113が作られた後でキャリア構造110に残るブリッジにより形成される。簡単のために、対向する関節対112a、112c及び112

10

20

30

40

50

b、112dによりそれぞれ定められる傾斜軸56x、56yを中心にミラー素子M_{i,j}を傾斜させるように構成されるアクチュエータは、図8に示されていない。

【0081】

この実施形態では、温度制御デバイス90は、キャリア構造110のスリット113により同じく画定されるキャリアプレート116にミラー素子M_{i,j}を接続する複数の加熱部材114を備える。加熱部材114は、ミラー素子M_{i,j}でほぼいかなる任意の温度プロファイルも生成できるように個別に駆動させることができる。同じくこの実施形態では、ミラー素子M_{i,j}に含まれている熱膨張係数の異なる構造により、ミラー素子M_{i,j}で生成される温度プロファイルがミラー素子M_{i,j}の光学特性を変更する変形をもたらすことが確実になる。

10

【0082】

図8では、加熱部材114は、電圧が印加された場合に温度上昇する小さなブロックとして表されている。代替的な実施形態では、加熱部材は、図9のミラー支持体100の底面図に示すように導電抵抗線のパターンにより形成される。ここでは、ミラー支持体100の底面に電熱線114'が配置されており、ミラー素子M_{i,j}で様々な温度プロファイルを生成できるように電圧源に個別に接続され得る。

【0083】

図10に示す実施形態では、ミラー素子M_{i,j}は、図示の実施形態ではミラー素子M_{i,j}の全長にわたってY方向に沿って延びる2つの平行熱障壁118a、118bを備える。熱障壁118a、118bは、矩形断面を有し、熱障壁118a、118bの両側の材料、例えばSiよりも小さな熱伝導係数を有する材料、例えばSiO₂により形成される。熱障壁118a、118bの熱絶縁材料は、ミラー支持体100にエッチングにより形成されている場合がある第1の溝120a及び第2の溝120bに収納される。第1の溝120aと第2の溝120bとの間には、それよりも浅く広い第3の溝122が形成される。第3の溝122を埋める材料124及びミラー支持体100の周囲材料の熱膨張係数は互いに異なる。

20

【0084】

標的領域106がレーザビーム94により照明された場合、標的領域106で熱が生成され、この局所的に生成された熱は、ミラー支持体100全体に分布する傾向がある。しかしながら、熱障壁118a、118bにより、標的領域106で生成された熱は側方へ流れ難い。したがって、温度の上昇が熱障壁118aと118bとの間の空間により長い時間制限され、この空間において、材料124及びミラー支持体100の熱膨張係数が異なる結果として、標的領域106の長手方向に対して垂直に延びる屈曲軸に沿ったミラー支持体100の屈曲が引き起こされる。最終的に、熱は、大きな熱伝導係数を有しミラー支持体100をヒートシンク128に接続するコンタクトソケット126を介して、熱障壁118aと118bとの間の空間から流出する。

30

【0085】

ミラー支持体の所望の変形をもたらすミラー支持体の部分に熱がより長く制限されるため、レーザビーム92が標的領域106を照明するリフレッシュレートを低減させることができる。

40

【0086】

異方性熱膨張係数を有する材料でも同様の効果が得られる。例えば、標的領域106の下にある材料124のXZ平面内での熱膨張係数が直交方向に沿ってよりも小さい場合、熱は、ミラー支持体100の隣接材料へよりもZ方向に沿って、すなわちソケット126を介してヒートシンク128へ速く流れる。エピタキシャル成長させることができる結晶材料は、このような異方性熱膨張係数を有する場合が多い。

【0087】

上記の実施形態は例示にすぎないことを理解されたい。例えば、反射性コーティングの形状は、(温度制御デバイス90を用いた温度の上昇前後で)例えば、平面状、回転対称湾曲状、楕円形、又は鞍形であり得る。他の実施形態では、ミラー支持体は、温度変化に

50

より誘発される変形に対するミラー素子の感度を高めるために薄膜にすぎない。

【0088】

さらに他の実施形態では、温度制御デバイスは、冷却流体を流すことができるミラー支持体内のチャネル等の冷却部材を含む。

【0089】

さらに、マイクロリソグラフィ露光装置の投影対物レンズに配置されるミラーアレイにおいて、本発明を用いることも構想され得る。これは本発明の特許請求の範囲内にないが、本出願人は、請求項をこの方向に広げる権利を留保する。この場合、投影対物レンズは一次光源を含まず、ミラー素子はシステム瞳面に光を向かない。その代わりに、ミラーアレイ自体が投影対物レンズの瞳面に配置され得る。

10

【0090】

V. EUV 照明システム

本発明の上記の実施形態は、全て EUV 照明システムに関する。しかしながら、後述する実施形態から明らかとなるように、本発明は、EUV 照明システムでも有利に用いられ得る。このようなシステムでは、投影光の波長（動作波長とも呼ぶ）は、50 nm 未満、好ましくは 25 nm 未満、最も好ましくは 13 nm ~ 14 nm 未満である。このような短い波長では透明屈折材料が利用不可能であるため、EUV 投影露光装置の全光学素子（当然ながら絞り以外）がカトプトリック（すなわち、反射性）タイプである。

【0091】

図 11 は、全体的に 210 で示す EUV 投影露光装置の概略的であり一定の縮尺ではない子午線断面図である。光学素子の曲率及び他の細部は、簡単のために図示されていない。EUV 投影露光装置 210 は、微細反射構造を含みマスクステージ（図示せず）上に配置されるマスク 216 を照明する照明システム 212 を備える。マスク 216 から反射された投影光が、投影対物レンズ 220 に入り、投影対物レンズ 220 は、レチクル 216 に照明された反射構造を、基板ステージ（図示せず）上に配置されている基板 224 上に取着される感光層 222 に結像する。

20

【0092】

照明システム 212 は、概略的に 230 で示す光源を備え、これには対称軸 AX が関連付けられる。通常、この対称軸 AX は、光源 230 に含まれる凹面ミラーの光軸と一致する。そのようなミラーがない場合、この軸 AX は、投影光ビーム自体の対称性により定められる。

30

【0093】

光源 230 により放出される光は、ミラー素子（ミラーファセットと呼ぶ場合もある）のアレイを含み得る視野規定ミラー（field defining mirror）272 に当たる。視野規定ミラー 272 から反射された後、投影光は、瞳規定ミラーアレイ 246 に当たる。図 12 の上面図に示すように、瞳規定ミラーアレイ 246 は、最初から全て球形又は少なくとも回転対称である複数の凹面ミラー素子 $M_{i,j}$ を含む。これは、ミラー素子 $M_{i,j}$ の曲率 C_a 及び C_b が任意の直交対面で同一であることを意味する。各ミラー素子 $M_{i,j}$ は、支持構造に対して傾斜可能に装着され、ミラー支持体及び反射性コーティングを含み、照明システム 212 の瞳面に投影光を向けるように構成される。EUV 投影光は、瞳規定ミラーアレイ 246 により 2 つのミラー M1 及び M2 に向けられた後で、最後にマスク 216 を照明する。

40

【0094】

照明システム 210 は、図示の実施形態では図 2 に示す温度制御デバイス 90 と本質的に同じ構成を有する温度制御デバイス 290 をさらに備える。すなわち、温度制御デバイス 210 は、レーザビーム 294 を生成する赤外レーザ源 292 を含む。温度制御デバイス 210 は、レーザビーム 294 を瞳規定ミラーアレイ 246 の標的領域上で移動させるように構成される空間光変調器 296 をさらに含む。この実施形態では、空間光変調器 296 は、適当なアクチュエータを用いて 2 つの直交軸に関して傾斜させることができるミラー 298 を含む。したがって、ミラー 298 を適宜傾斜させることにより、瞳規定ミラ

50

一アレイ 246 の任意の点にレーザビーム 294 を向けることが可能である。レーザ源 292 により生成される光の波長は、瞳規定ミラーアレイ 246 の標的領域によりほぼ完全に、又は少なくとも 80% を超えて吸収されるように選択される。

【0095】

瞳規定ミラーアレイ 246 の顕著な特徴は、ミラー素子 $M_{i,j}$ の光軸が、光伝播方向で瞳規定ミラーアレイ 246 の直前にある視野規定ミラー 272 の光軸と共に非常に大きな角度（図示の実施形態では 35 度）を形成することである。前のミラーがミラー素子を含む場合、この条件は、ミラー素子の傾斜位置に関係なくそれらの光軸に個別に当てはまる。角度 θ は、好ましくは 20 度よりも大きく、より好ましくは 30 度よりも大きい。

10

【0096】

ミラーアレイ 246 のビーム偏向能力の尺度であるこの角度 θ は、従来よりもはるかに大きい。従来技術の EUV 投影露光装置では、全ミラーの偏向角 θ はできる限り小さく抑えられる。これにより、ミラー M1 とマスク 216 との間の光路に関して図 11 に示すものと同様に、照明システム及び投影対物レンズを実質的に上下に通過する光路が得られる。しかしながら、これには、装置の底部（好ましくは、半導体設備の最下部でさえある）又は上部に嵩張る光源も配置しなければならず、その場合に複雑な装着構造が必要であるという欠点がある。

【0097】

関与するミラーが球面鏡面を有する場合、偏向角が大きいと収差をもたらすことになるため、従来技術の照明システムは、偏向角 θ をできる限り小さく抑えることを試みる。非球面ミラー、特に回転非対称の非球面ミラーの生産は困難で費用がかかり、これは、図 11 に示すミラーアレイ 246 及び 272 の場合のようにファセットミラーが多数の個別のミラー素子を含む場合に特に当てはまる。

20

【0098】

図示の実施形態では、最初から球形又は回転対称であるミラーにより導入されるであろう収差が温度制御デバイス 290 を用いて以下の方法で補正されるため、偏向角 θ を大きくすることができる。

【0099】

投影露光装置 210 を作動させると、空間光変調器 296 は、レーザビーム 294 がミラー素子 $M_{i,j}$ の変形をもたらす特定の方法でミラー素子 $M_{i,j}$ を加熱するように制御される。この変形は、ミラー素子 $M_{i,j}$ の表面形状が回転対称から非点収差的に変化するように決定される。そのため、個々のミラー素子 $M_{i,j}$ それぞれの標的領域は、例えば図 6a に示すような幾何学的形状を有し得る。ここで、「非点収差的」という用語は、ミラー素子 $M_{i,j}$ の曲率が 2 つの直交面で互いに異なることを示すために用いられる（図 12 の拡大切り抜き部の曲率 C_a 及び C_b を参照）。その場合、図 13 の斜視図に示すように、一平面のミラー素子 $M_{i,j}$ の焦点距離 f_a は、直交面の焦点距離 f_b よりも大きくなる。焦点距離間のこの差は、1%（すなわち、 $f_a > 1.01 \times f_b$ ）にも及び、さらには 10% にも及び得る。

30

【0100】

好ましくは、変形は、子午面及び矢状面における曲率半径 R_a 、 R_b が $R_a = R / \cos(\theta)$ 及び $R_b = R - \cos(\theta)$ により与えられるように決定され、式中、 R は各ミラーの球面部分の曲率半径であり、 θ は入射角である。瞳規定ミラーアレイ 246 のミラー素子 $M_{i,j}$ のこのような非点収差反射面により、偏向角 θ が大きい場合でも収差が小さく抑えられる。

40

【0101】

このような小さな収差を達成するには、ミラーの焦点距離がミラーの被照明面と比較して大きい必要があることに留意すべきである。視野規定ミラーアレイ 272 及び瞳規定ミラーアレイ 246 のミラー素子 $M_{i,j}$ では、それらの焦点距離が通常は約 1 m の範囲内にあり、被照明面が小さい（ミラー素子の通常の直径は約数ミリメートル～数センチメートル

50

ルである)ため、この条件は満たされる。しかしながら、ミラーM1又はM2では、それらが非点収差鏡面を有している場合でも大きな偏向角を得ることができない。

【0102】

図11で分かり得るように、偏向角が大きいほど、光源230をはるかにより好都合な高さに配置することが可能となる。この実施形態では、光源230の対称軸AXが実質的に水平に延びているため、光源230が視野規定ミラー272と同じ高さに配置される。他の実施形態では、対称軸AXは、水平面に対して45度未満、好ましくは20度未満の角度を形成する。

【0103】

EUV照明システムでは、入射する高エネルギーEUV投影光の大部分がミラー素子により吸収されるため、ミラー素子を積極的に冷却する必要がある場合が多い。したがって、ミラー素子M_{i,j}を附加的に加熱する温度制御デバイス290を用いた熱の発生には、ミラー素子を冷却するためのさらなる対応が普通は必要である。

【0104】

図14は、温度制御デバイスがミラー素子M_{i,j}を局所的に加熱するのではなく局所的に冷却する、別の実施形態によるミラー素子M_{i,j}の斜視図である。そのために、温度制御デバイスは、ミラー支持体100をヒートシンク128に接続する複数のペルチェ素子130を備える。このようなマイクロペルチェ素子130は、例えばフライブルク所在のMICROPELT GmbHから市販されている。

【0105】

各マイクロペルチェ素子130は、図14に示されているが、配線132により作動させることができるため、多種多様な異なる温度分布を生成するようにミラー支持体100を局所的に冷却することができる。同じくこの実施形態では、熱膨張係数の異なる構造が、ミラー支持体100の所望の変形を引き起こす。

【0106】

マイクロペルチェ素子130を設けることで、これらがない場合に必要であり得る附加的な冷却システムを完全に省くことができる。

【0107】

ペルチェ素子130又は他の冷却部材を加熱部材と、又はさらにより有利には図11に示すような熱制御システム290と組み合わせることも構想される。その場合、ミラー素子M_{i,j}は、(準)同時に(附加的に)加熱及び冷却され得る。これにより、ミラー支持体の非常に大きな温度差及び結果として大きな変形をもたらすことが可能となる。

【0108】

好適な実施形態の上記の説明は、例として行ったものである。当業者は上記開示から、本発明及びそれに伴う利点を理解するだけでなく、開示されている構造及び方法の様々な変形及び変更が明らかであることに気付くであろう。したがって、本出願人は、添付の特許請求の範囲により規定される本発明の趣旨及び範囲内に入るような変形及び変更の全て、及びそれらの等価物を包含することを意図する。

10

20

30

【図1】

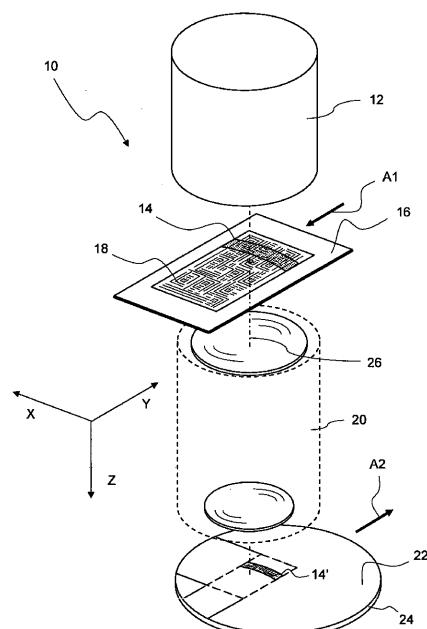


FIG. 1

【図2】

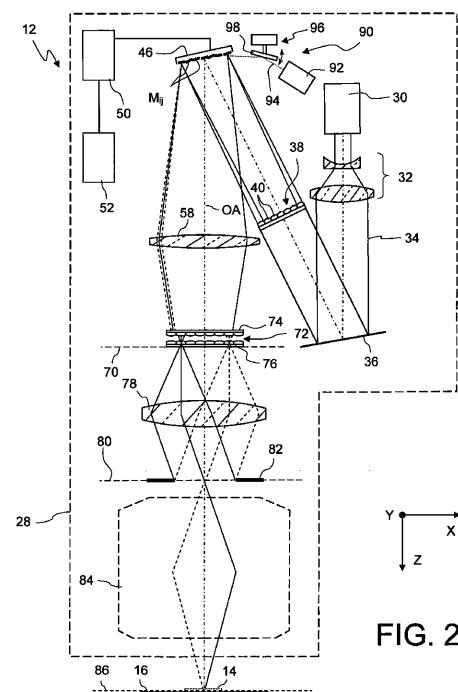


FIG. 2

【図3】

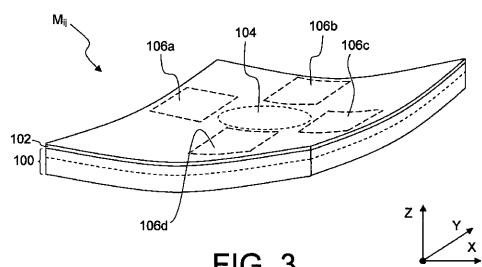


FIG. 3

【図5】

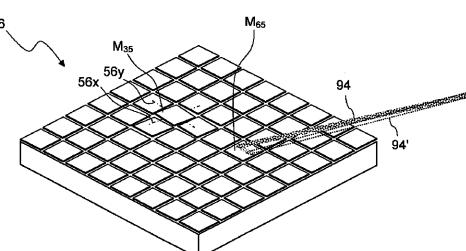


FIG. 5

【図4 a】

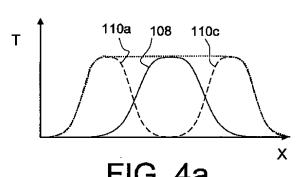


FIG. 4a

【図4 b】

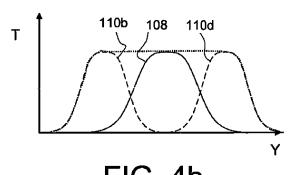


FIG. 4b

【図6 a】

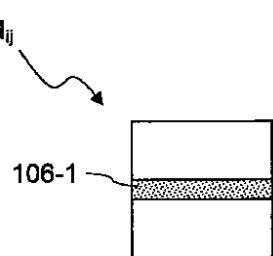


FIG. 6a

【図 6 b】

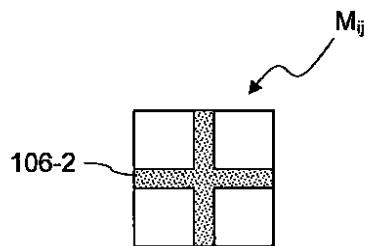


FIG. 6b

【図 6 d】

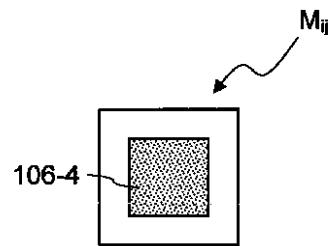


FIG. 6d

【図 6 c】

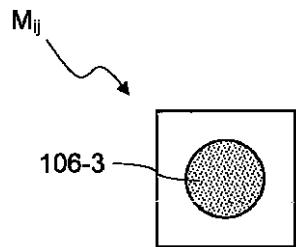


FIG. 6c

【図 7】

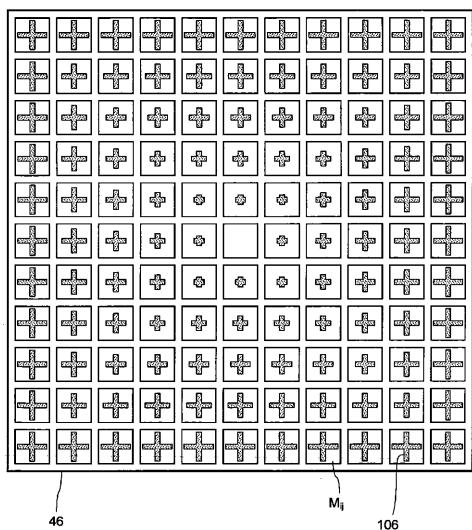


FIG. 7

【図 8】

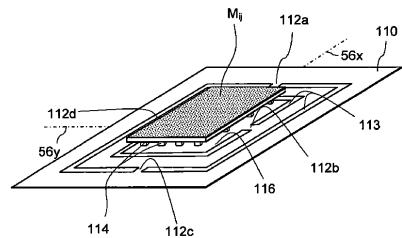


FIG. 8

【図 9】

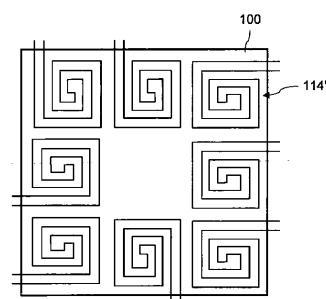


FIG. 9

【図 1 0】

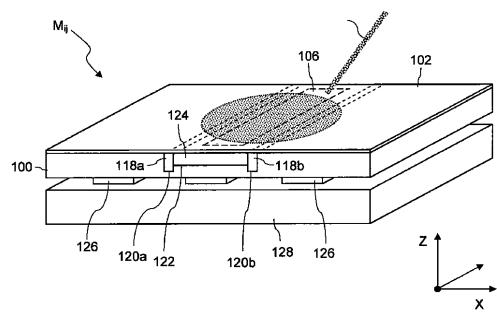


FIG. 10

【図 1 1】

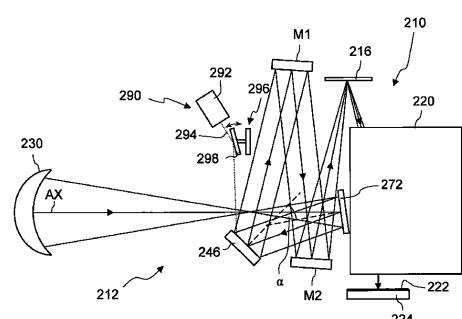


FIG. 11

【図 1 2】

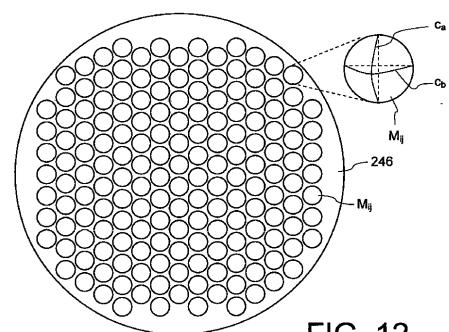


FIG. 12

【図 1 3】

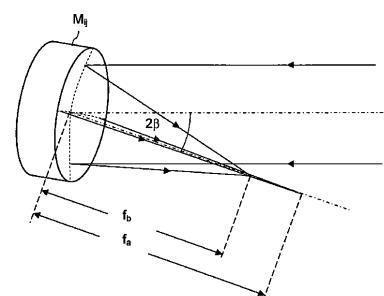


FIG. 13

【図 1 4】

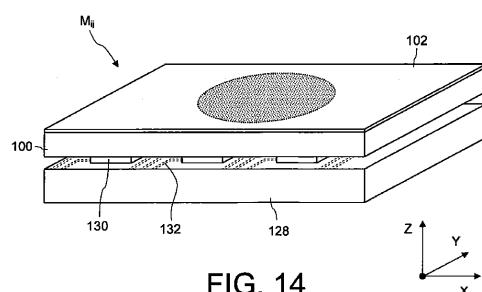


FIG. 14

フロントページの続き

(72)発明者 ダニエル ベンツ
 ドイツ国 71364 ウィンネンデン レーマーシュトラーセ 22/2
(72)発明者 セヴェリン ヴァルディス
 ドイツ国 73430 アーレン ピショッフ - フィッシャー - シュトラーセ
(72)発明者 アルミニ ヴェルベル
 ドイツ国 79288 ゴッテンハイム ティールシュトラーセ 29
(72)発明者 ベルント ヴァルム
 ドイツ国 90571 シュヴァイヒ ダンツィガー シュトラーセ 42

審査官 赤尾 隼人

(56)参考文献 特開2008-091907 (JP, A)
 米国特許出願公開第2005/0018269 (US, A1)
 国際公開第2008/023071 (WO, A1)
 特開2007-335859 (JP, A)
 米国特許出願公開第2006/0077553 (US, A1)
 国際公開第2004/092843 (WO, A2)
 特開2007-316194 (JP, A)
 特表2007-505488 (JP, A)
 国際公開第2010/032224 (WO, A2)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

H01L 21/027
G03F 7/20 - 7/24
G02B 5/00 - 5/136 ; 7/00 ; 7/18 - 7/24 ;
 26/00 - 26/08
G02F 1/00 - 1/125