

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 特 許 公 報 (B2)

(11) 特許番号  
特許第5513324号  
(P5513324)

(45) 発行日 平成26年6月4日 (2014. 6. 4)

(24) 登録日 平成26年4月4日 (2014. 4. 4)

(51) Int. Cl.

F I

HO 1 L 21/027 (2006. 01)

HO 1 L 21/30 5 1 5 D

GO 3 F 7/20 (2006. 01)

GO 3 F 7/20 5 2 1

請求項の数 9 (全 34 頁)

(21) 出願番号	特願2010-196091 (P2010-196091)	(73) 特許権者	000001007
(22) 出願日	平成22年9月1日 (2010. 9. 1)		キヤノン株式会社
(65) 公開番号	特開2012-54425 (P2012-54425A)		東京都大田区下丸子3丁目30番2号
(43) 公開日	平成24年3月15日 (2012. 3. 15)	(74) 代理人	100076428
審査請求日	平成25年8月30日 (2013. 8. 30)		弁理士 大塚 康德
		(74) 代理人	100112508
			弁理士 高柳 司郎
		(74) 代理人	100115071
			弁理士 大塚 康弘
		(74) 代理人	100116894
			弁理士 木村 秀二
		(74) 代理人	100130409
			弁理士 下山 治
		(74) 代理人	100134175
			弁理士 永川 行光

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 決定方法、露光方法及びプログラム

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

マスクを照明する照明光学系と、前記マスクのパターンを基板に投影する投影光学系とを備える露光装置において前記照明光学系の瞳面に形成すべき光強度分布を決定する決定方法であって、

前記マスクのパターンを設定する第1のステップと、

前記投影光学系の像面に形成される前記マスクのパターンの像を評価するためのカットライン及び前記像の目標位置を設定する第2のステップと、

前記照明光学系の瞳面に形成される光強度分布を構成する複数の要素光源を設定する第3のステップと、

前記複数の要素光源のそれぞれについて、前記マスクのパターンを照明したときに前記カットライン上に形成される前記マスクのパターンの像を算出する第4のステップと、

前記算出された像から前記カットライン上における前記マスクのパターンの像のエッジの間の中点の位置を求め、求められた前記中点の位置を前記目標位置に近づけるように前記複数の要素光源のそれぞれの強度を決めて、前記光強度分布を決定する第5のステップと、

を有することを特徴とする決定方法。

【請求項 2】

前記第5のステップでは、混合整数計画法によって、前記マスクのパターンの像の前記カットライン上のエッジ間の中点の位置を前記目標位置に近づけるように、前記光強度分

布を決定し、

前記混合整数計画法では、前記マスクのパターンの像の強度が閾値を超える場合に第1の整数値をとり、前記マスクのパターンの像の強度が前記閾値を超えない場合に第2の整数値をとる変数を用い、

前記変数は、前記第4のステップで算出した前記マスクのパターンの像の位置ごとに設定されることを特徴とする請求項1に記載の決定方法。

【請求項3】

前記投影光学系の像面からデフォーカスした複数のデフォーカス面を設定するステップを更に有し、

前記第4のステップでは、前記複数のデフォーカス面のそれぞれについても、前記第2のステップで設定したカットラインに対応する位置の上に形成される前記マスクのパターンの像を算出し、

前記第5のステップでは、前記複数のデフォーカス面のそれぞれについて算出した像にも基づいて、前記マスクのパターンの像の前記カットライン上のエッジの間の midpoint の位置を前記複数のデフォーカス面のそれぞれの目標位置に近づけるように前記光強度分布を決定することを特徴とする請求項1に記載の決定方法。

【請求項4】

前記第3のステップは、前記複数の要素光源のそれぞれについて強度を比例倍した比例倍要素光源を生成するステップを含み、

前記第4のステップでは、前記比例倍要素光源についても、前記第2のステップで設定したカットラインに対応する位置の上に形成される前記マスクのパターンの像を算出し、

前記第5のステップでは、前記比例倍要素光源について算出した像にも基づいて、前記マスクのパターンの像の前記カットライン上のエッジの間の midpoint の位置を前記目標位置に近づけるように前記光強度分布を決定することを特徴とする請求項1に記載の決定方法。

【請求項5】

前記第4のステップでは、前記マスクのパターンの像のエッジを含むエッジ領域に含まれる第1の個数の位置のそれぞれについて像の強度を算出し、

前記第5のステップで決定した光強度分布で前記マスクのパターンを照明したときに前記カットライン上に形成される前記マスクのパターンの像のエッジを含むエッジ領域を特定し、前記第3のステップで設定した複数の要素光源のそれぞれについて、当該特定したエッジ領域において前記第1の個数よりも多い第2の個数の位置のそれぞれについて像の強度が算出されるように、前記カットライン上に形成される前記マスクのパターンの像を算出する第6のステップと、

前記第6のステップで算出した像に基づいて、前記マスクのパターンの像の前記カットライン上のエッジの間の midpoint の位置を前記目標位置に近づけるように前記複数の要素光源のそれぞれの強度を決めて、新たな光強度分布を決定する第7のステップと、

を更に有することを特徴とする請求項1に記載の決定方法。

【請求項6】

前記第5のステップでは、前記第4のステップで算出した像に基づいて、前記マスクのパターンの像の前記カットライン上のエッジの間の midpoint の位置を前記目標位置に近づけるように、且つ、前記マスクのパターンの像の前記カットライン上の寸法を目標寸法値に近づけるように、前記光強度分布を決定することを特徴とする請求項1に記載の決定方法。

【請求項7】

前記第5のステップでは、求められた前記 midpoint の位置を前記目標位置に近づけるように、前記複数の要素光源のそれぞれに与える重み付けを決定し、前記重み付けを与えた前記複数の要素光源を合成した光源を前記光強度分布として決定することを特徴とする請求項1乃至6のうちのいずれか1項に記載の決定方法。

【請求項8】

請求項1乃至7のうちのいずれか1項に記載の決定方法を用いて決定された光強度分布を形成する照明光学系から射出した光でマスクを照明するステップと、

10

20

30

40

50

前記マスクのパターンの像を、投影光学系を介して基板に投影するステップと、  
を有することを特徴とする露光方法。

【請求項 9】

マスクを照明する照明光学系と、前記マスクのパターンを基板に投影する投影光学系とを備える露光装置において前記照明光学系の瞳面に形成すべき光強度分布を決定する決定方法をコンピュータに実行させるためのプログラムであって、

前記コンピュータに、

前記マスクのパターンを設定する第 1 のステップと、

前記投影光学系の像面に形成される前記マスクのパターンの像を評価するためのカットライン及び前記像の目標位置を設定する第 2 のステップと、

前記照明光学系の瞳面に形成される光強度分布を構成する複数の要素光源を設定する第 3 のステップと、

前記複数の要素光源のそれぞれについて、前記マスクのパターンを照明したときに前記カットライン上に形成される前記マスクのパターンの像を算出する第 4 のステップと、

前記算出された像から前記カットライン上における前記マスクのパターンの像のエッジの間の中点の位置を求め、求められた前記中点の位置を前記目標位置に近づけるように前記複数の要素光源のそれぞれの強度を決めて、前記光強度分布を決定する第 5 のステップと、

を実行させることを特徴とするプログラム。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、照明光学系の瞳面に形成すべき光強度分布（有効光源）を決定する決定方法、露光方法及びプログラムに関する。

【背景技術】

【0002】

フォトリソグラフィ技術を用いて半導体デバイスを製造する際に、露光装置が使用されている。露光装置は、マスク（レチクル）のパターンを投影光学系によって基板（ウエハなど）に投影してパターンを転写する。近年では、半導体デバイスの微細化が進み、露光装置においては、更なる高解像度を実現する技術が要求されている。

【0003】

露光装置では、基板を露光する際の露光量やフォーカス位置が理想的な状態になっているとは限らないため、所望の形状（マスクのパターン形状）とは異なる形状のパターンが基板に転写される可能性がある。露光量が理想的な状態でなくなる要因としては、光源の不安定さや照明領域における照度分布の不均一性などがある。また、フォーカス位置が理想的な状態でなくなる要因としては、基板の保持位置の不安定性や基板の凹凸などがある。所望の形状のパターンを基板に転写することが可能な露光量及びフォーカス位置の範囲はプロセスウィンドウと呼ばれ、露光装置においては、広いプロセスウィンドウを実現する技術が要求されている。

【0004】

高解像度化や広いプロセスウィンドウを実現する技術としては、例えば、斜入射照明が知られている。斜入射照明は、輪帯形状の有効光源（照明光学系の瞳面における光強度分布）や複数（例えば、2つや4つ）の極を有する形状の有効光源を用いて、マスクに対して露光光を斜めに入射させる。輪帯形状の有効光源は、輪帯半径と輪帯幅の2つの自由度（パラメータ）で規定される。そこで、2つの自由度を様々に偏光しながらそれぞれの自由度で規定される有効光源に対するパターンの像をシミュレーションで求め、かかるパターンの像に基づいて輪帯半径と輪帯幅を選択することで最適な有効光源を決定する技術が提案されている。

【0005】

また、近年では、有効光源を規定する自由度を高めた技術が提案されている（非特許文

10

20

30

40

50

献 1 参照)。非特許文献 1 の技術は、照明光学系の瞳面を、例えば、碁盤目状に複数の領域に分割し、それぞれの領域における光強度を個別に設定する。但し、照明光学系の瞳面を縦横それぞれに 6 3 分割する場合を考えると、その自由度は千を超えることになる。このような広大な最適化空間内にある自由度の組み合わせのそれぞれに対してパターンの像を求め、最適な有効光源を決定することは、計算時間の観点から現実的ではない。また、初期値を調整して計算を繰り返すことで最適解を求める発見的な最適化手法も提案されている（特許文献 1 参照）が、計算時間に長時間を要することに加えて、ローカル解にとらわれる可能性がある。

【 0 0 0 6 】

一方、このような自由度の高い有効光源の最適化において、数理計画法を用いた技術が提案されている（特許文献 2 参照）。数理計画法では、その解は最適解であることが数学的に保証され、且つ、計算時間の高速化を実現することができる。

【先行技術文献】

【特許文献】

【 0 0 0 7 】

【特許文献 1】特許第 3 3 4 2 6 3 1 号公報

【特許文献 2】特許第 4 3 7 8 2 6 6 号公報

【非特許文献】

【 0 0 0 8 】

【非特許文献 1】T. Matsuyama, et. al., "A Study of Source & Mask Optimization for ArF Scanners", Proc. of SPIE, USA, SPIE, 2009 年, Vol. 7274, p. 727408

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【 0 0 0 9 】

特許文献 2 の技術は、プロセスウィンドウの最大化問題に近似を適用して、数理計画法の 1 つである線形計画問題にして解くというものである。プロセスウィンドウとは、一般的には、パターンの像の幅が許容値の範囲内となる露光量の範囲とフォーカス位置の範囲との積である。特許文献 2 の技術は、ラインパターンの像に対して、ラインパターンの像における 2 つの側壁の位置を規定し、その条件下で有効光源を最適化している。

【 0 0 1 0 】

しかしながら、特許文献 2 の技術では、有効光源を最適化できない場合がある。例えば、マスクのパターンが同じ寸法の 3 つのラインパターンを等間隔に配置して構成されている場合を考える。この場合、中央のラインパターンに着目すると、コマ収差やディストーションなどの非対称な収差が存在しなければ、中央のラインパターンの位置（中点位置）と中央のラインパターンに対応する像の位置（中点位置）とは一致する。一方、端のラインパターンに着目すると、非対称な収差が存在していなくても、光近接効果によって、端のラインパターンの位置と端のラインパターンに対応する像の位置との間には差が生じてしまう。パターンの位置とそのパターンに対応する像の位置との差はパターンシフトと呼ばれ、かかるパターンシフトは、一般的に、ほとんどのパターンに対して発生する。特許文献 2 の技術は、ラインパターンの像の両エッジの位置座標を固定し、かかる位置座標にラインパターンの像の両エッジが位置するように有効光源を求めており、パターンシフトの概念が欠落している。従って、パターンシフトが発生する場合には、特許文献 2 の技術では、最適な有効光源を決定することができなくなってしまう。

【 0 0 1 1 】

また、半導体デバイスの微細化によって、パターンシフトの発生が歩留まり（スループット）に影響を与える場合もある。例えば、SRAM におけるイオン注入工程用のマスクについて考える。かかるマスクは、単純なラインアンドスペースパターンを有し、そのパターンのピッチは、数百 nm 以上と比較的大きい。このようなマスクにおいては、パター

10

20

30

40

50

ンの線幅に対する要求は厳しくないが、イオン注入工程では下地に存在する分離酸化膜層への重ね合わせ精度が重要となるため、パターンシフトに対する要求が厳しい。従って、マスクのパターンに対して、パターンシフト量が許容値の範囲内になるように、有効光源を最適化（決定）する必要がある。

#### 【 0 0 1 2 】

本発明は、このような従来技術の課題に鑑みてなされ、照明光学系の瞳面に形成すべき光強度分布の決定に有利な技術を提供することを例示的目的とする。

#### 【課題を解決するための手段】

#### 【 0 0 1 3 】

上記目的を達成するために、本発明の一側面としての決定方法は、マスクを照明する照明光学系と、前記マスクのパターンを基板に投影する投影光学系とを備える露光装置において前記照明光学系の瞳面に形成すべき光強度分布を決定する決定方法であって、前記マスクのパターンを設定する第1のステップと、前記投影光学系の像面に形成される前記マスクのパターンの像を評価するためのカットライン及び前記像の目標位置を設定する第2のステップと、前記照明光学系の瞳面に形成される光強度分布を構成する複数の要素光源を設定する第3のステップと、前記複数の要素光源のそれぞれについて、前記マスクのパターンを照明したときに前記カットライン上に形成される前記マスクのパターンの像を算出する第4のステップと、前記算出された像から前記カットライン上における前記マスクのパターンの像のエッジの間の中点の位置を求め、求められた前記中点の位置を前記目標位置に近づけるように前記複数の要素光源のそれぞれの強度を決めて、前記光強度分布を決定する第5のステップと、を有することを特徴とする。

#### 【 0 0 1 4 】

本発明の更なる目的又はその他の側面は、以下、添付図面を参照して説明される好ましい実施形態によって明らかにされるであろう。

#### 【発明の効果】

#### 【 0 0 1 5 】

本発明によれば、例えば、照明光学系の瞳面に形成すべき光強度分布の決定に有利な技術を提供することができる。

#### 【図面の簡単な説明】

#### 【 0 0 1 6 】

【図1】本発明の一側面としての決定方法を説明するためのフローチャートである。

【図2】図1に示すフローチャートのS102で設定されるマスクパターンの一例を示す図である。

【図3】図1に示すフローチャートのS110で生成される要素光源を説明するための図である。

【図4】図1に示すフローチャートのS110で生成される要素光源を説明するための図である。

【図5】図1に示すフローチャートのS112で算出される光学像の強度分布を説明するための図である。

【図6】図1に示すフローチャートのS112で算出される光学像の強度分布を説明するための図である。

【図7】図1に示すフローチャートのS114の有効光源の決定を説明するための図である。

【図8】図1に示すフローチャートのS114の有効光源の決定を説明するための図である。

【図9】図1に示すフローチャートのS114の有効光源の決定を説明するための図である。

【図10】図1に示すフローチャートのS114の有効光源の決定を説明するための図である。

【図11】図1に示すフローチャートのS114の有効光源の決定を説明するための図である。

ある。

【図 1 2】図 1 に示すフローチャートの S 1 1 4 で決定される有効光源を示す図である。

【図 1 3】図 1 2 に示す有効光源で図 2 に示すマスクパターンを照明したときに、投影光学系の像面に形成される光学像を示す図である。

【図 1 4】図 1 に示すフローチャートの S 1 1 4 で決定される有効光源を示す図である。

【図 1 5】図 1 4 に示す有効光源で図 2 に示すマスクパターンを照明したときに、投影光学系の像面に形成される光学像を示す図である。

【図 1 6】図 1 に示すフローチャートの S 1 1 4 で決定される有効光源を示す図である。

【図 1 7】本発明の一側面としての決定方法を説明するためのフローチャートである。

【図 1 8】図 1 7 に示すフローチャートの S 1 7 1 4 で決定した有効光源に対するマスクパターンの光学像の強度分布を示す図である。

10

【図 1 9】図 1 7 に示すフローチャートの S 1 7 1 6 で算出されるマスクパターンの光学像の強度分布を示す図である。

【図 2 0】図 1 9 に示すマスクパターンの光学像の強度分布において、強度分布の値を内挿した左側の区間（エッジ領域）を示す拡大図である。

【図 2 1】図 1 9 に示すマスクパターンの光学像の強度分布において、強度分布の値を内挿した右側の区間（エッジ領域）を示す拡大図である。

【図 2 2】図 1 7 に示すフローチャートの S 1 7 1 8 で決定した新たな有効光源を示す図である。

【図 2 3】図 2 2 に示す有効光源で図 2 に示すマスクパターンを照明したときに、投影光学系の像面に形成される光学像を示す図である。

20

【図 2 4】露光装置の構成を示す概略ブロック図である。

【発明を実施するための形態】

【0017】

以下、添付図面を参照して、本発明の好適な実施の形態について説明する。なお、各図において、同一の部材については同一の参照番号を付し、重複する説明は省略する。

【0018】

本発明は、IC、LSIなどの半導体チップ、液晶パネルなどの表示素子、磁気ヘッドなどの検出素子、CCDなどの撮像素子等の各種デバイスの製造やマイクロメカニクスで用いられる有効光源を決定する際に適用することができる。ここで、マイクロメカニクスとは、半導体集積回路製造技術を微細構造体の製作に応用して高度な機能を有するミクロン単位の機械システムを作成する技術や、かかる機械システム自体をいう。

30

< 第 1 の実施形態 >

図 1 は、本発明の一側面としての決定方法を説明するためのフローチャートである。本実施形態の決定方法は、コンピュータなどの情報処理装置によって実行され、マスク（レチクル）を照明する照明光学系と、マスクのパターンを基板に投影する投影光学系とを備える露光装置において、マスクを照明するための有効光源を決定（最適化）する。ここで、有効光源とは、投影光学系の物体面にマスクを配置しない状態において、投影光学系の瞳面に形成される光強度分布である。従って、有効光源を決定することは、照明光学系の瞳面に形成すべき光強度分布を決定することを意味する。

40

【0019】

S 1 0 2（第 1 のステップ）では、投影光学系の物体面に配置するマスクのパターン（マスクパターン）を設定する。本実施形態では、図 2 に示すように、遮光部分で構成されたパターン群 P T と、透過部分で構成された背景部 B C とを有するマスクパターンを設定する。かかるマスクパターンは、第 1 のパターン部 P T 1 及び第 2 のパターン部 P T 2 の 2 種類のラインアンドスペースパターンを含む。第 1 のパターン部 P T 1 を構成するラインパターンの長手方向の長さ a、幅方向の長さ b 及びピッチ c のそれぞれは、400 nm、75 nm 及び 150 nm である。また、第 2 のパターン部 P T 2 を構成するラインパターンの長手方向の長さ d、幅方向の長さ e 及びピッチ f のそれぞれは、400 nm、50 nm 及び 100 nm である。マスクパターンは、一般には、様々な種類のパターンを含む

50

。S 1 0 2では、マスクパターンに含まれる全ての種類のパターンを設定してもよいが、必要なパターンのみを設定してもよい。また、本実施形態では、マスクパターンを2次元で設定したが、1次元で設定してもよいし、3次元で設定してもよい。

#### 【0020】

S 1 0 4（第2のステップ）では、S 1 0 2で設定したマスクパターンの光学像（投影光学系の像面に形成される像）を評価するためのカットライン（着目部分）を設定する。本実施形態では、第1のパターン部P T 1を構成する5つのラインパターンのうち、3つのラインパターンのそれぞれの中央部分に対応する投影光学系の像面の部分にカットラインC L 1、C L 2及びC L 3を設定する（図2参照）。同様に、第2のパターン部P T 2を構成する5つのラインパターンのうち、3つのラインパターンのそれぞれの中央部分に対応する投影光学系の像面の部分にカットラインC L 4、C L 5及びC L 6を設定する（図2参照）。なお、本実施形態では、ラインパターンの幅方向の長さに着目しているため、各ラインパターンの幅方向にカットラインを設定する。但し、ラインパターンの長手方向の長さに着目するのであれば、各ラインパターンの長手方向にカットラインを設定すればよい。また、隣接するラインパターンの間隔の長さに着目するのであれば、隣接するラインパターンを横切るようにカットラインを設定すればよい。なお、図2では、説明を簡単にするために、投影光学系における物体面の寸法と投影光学系の像面における寸法が等しい（即ち、投影光学系の倍率が1倍である）ものとして、マスクパターンに対してカットラインを設定するように図示している。但し、実際には、投影光学系の倍率に基づいて像面上の寸法に換算したマスクパターンを考慮して、投影光学系の像面にカットラインを設定する必要がある。

#### 【0021】

中央のラインパターンに設定したカットラインC L 1及びC L 4の上に形成される光学像においては、左右非対称な収差や左右非対称な有効光源を与えなければ、パターンシフトは発生しない。従って、中央のラインパターンに対応する光学像の位置と中央のラインパターンの位置とは一致する。一方、端のラインパターンに設定したカットラインC L 3及びC L 6の上に形成される光学像においては、収差や有効光源が左右対称であったとしても、光近接効果によって、パターンシフトが発生する。従って、端のラインパターンに対応する光学像は、端のラインパターンの位置に対して左右にシフトした位置に形成され、端のラインパターンに対応する光学像の位置と端のラインパターンの位置とが一致するとは限らない。

#### 【0022】

S 1 0 6では、S 1 0 4で設定したカットラインの上に形成されるマスクパターンの光学像のカットラインの上の位置の目標位置を設定する。本実施形態では、マスクパターンの光学像の位置を表す物理量は、マスクパターンの光学像の中点の位置（中点位置）とする。なお、中点位置とは、あるカットラインの上に形成されるマスクパターンの光学像における左側のエッジの位置と右側のエッジの位置との中間の位置（座標）を意味する。従って、本実施形態では、マスクパターンの光学像のカットラインの上のエッジの間の中点位置の目標位置を設定する。なお、マスクパターンの中点位置と、かかるマスクパターンに対応する光学像の中点位置とが一致していれば、パターンシフトが発生していないと言える。一方、マスクパターンの中点位置と、かかるマスクパターンに対応する光学像の中点位置とが一致していなければ、パターンシフトが発生していると言える。

#### 【0023】

カットラインの設定（S 1 0 4）では、カットラインC L 1乃至C L 6のそれぞれの中点がラインパターンのそれぞれの中点と一致するように設定している。カットラインC L 1乃至C L 3の長さは120 nmで設定しているため、カットラインの上の位置（座標）において、端から60 nmの位置が対応するラインパターン（マスクパターン）の中点位置である。また、カットラインC L 4乃至C L 6の長さは90 nmで設定しているため、カットラインの上の位置（座標）において、端から45 nmの位置が対応するラインパターン（マスクパターン）の中点位置である。本実施形態では、パターンシフト量を最小に

する有効光源を決定するため、カットラインＣＬ１乃至ＣＬ６の上において、ラインパターンの中点位置と一致する位置を目標位置として設定する。具体的には、以下の表１に示すように、カットラインＣＬ１乃至ＣＬ６のそれぞれに対して、マスクパターンの光学像のカットラインの上のエッジの間の中点位置の目標位置を設定する。

【００２４】

【表１】

カットライン	CL1	CL2	CL3	CL4	CL5	CL6
目標位置[nm]	60	60	60	45	45	45
目標値[nm]	75	75	75	50	50	50

10

【００２５】

なお、本実施形態では、上述したように、マスクパターンの光学像の位置を表す物理量として、光学像の中点位置を用いている。但し、マスクパターンの光学像の位置を表す物理量は、光学像の中点位置に限定されるものではなく、光学像の両エッジの位置が固定されず、パターンシフト量に対して光学像の位置が一意に決まる物理量であればよい。

【００２６】

Ｓ１０８では、Ｓ１０４で設定したカットラインの上に形成されるマスクパターンの光学像の寸法の目標値（目標寸法値）を設定する。本実施形態では、表１に示すように、カットラインＣＬ１乃至ＣＬ６のそれぞれの上に形成されるマスクパターンの光学像の幅方向の長さ（線幅）の目標値を設定する。

20

【００２７】

有効光源の最適化においては、一般的に、パターンシフト量とマスクパターンの光学像の線幅とを考慮することが多い。本実施形態においても、マスクパターンの光学像のカットラインの上の線幅（寸法）の目標値を設定することで、パターンシフト量に加えて光学像の線幅も考慮して有効光源を決定することが可能となる。但し、マスクパターンの光学像の線幅を考慮しなくてもよい場合には、マスクパターンの光学像のカットラインの上の線幅の目標値を設定する必要はなく、Ｓ１０８を省略してもよい。

30

【００２８】

Ｓ１１０（第３のステップ）では、照明光学系の瞳面に形成される互いに異なる複数の要素光源を生成する。本実施形態では、図３に示すように、照明光学系の瞳面を碁盤目状に複数の領域Ｒ１乃至Ｒ１７７に分割し、複数の領域Ｒ１乃至Ｒ１７７のうち１つの領域のみを光らせたものを要素光源として生成する。なお、図３において、点線で示す円は、コヒーレンスファクターが１の円を表している。

【００２９】

図４は、Ｓ１１０で生成される複数の要素光源の一例を示す図である。図４（ａ）は、領域Ｒ９６のみを光らせた要素光源を示し、図４（ｂ）は、領域Ｒ２１のみを光らせた要素光源を示している。上述したように、本実施形態では、複数の領域Ｒ１乃至Ｒ１７７のうち１つの領域のみを光らせたものを要素光源として生成するため、１７７個の要素光源が生成される。最終的に決定される有効光源は、Ｓ１１０で生成した複数の要素光源の線形和（複数の要素光源を合成した光源）として決定されることになる。

40

【００３０】

本実施形態では、照明光学系の瞳面を碁盤目状に分割したが、他の形状、例えば、円弧状に分割してもよい。また、本実施形態では、分割した領域を１つずつ光らせたものを要素光源としたが、複数の領域を光らせたものを１つの要素光源としてもよい。

【００３１】

Ｓ１１２（第４のステップ）では、Ｓ１１０で生成した複数の要素光源のそれぞれにつ

50



いて、複数の要素光源のそれぞれでマスクパターンを照明したときに、S 1 0 4で設定したカットラインの上に形成されるマスクパターンの光学像（の強度分布）を算出する。なお、光学像（空中像）の強度は、ある露光条件において、基板上の任意の1点に到達する光の光量を意味する。また、光学像の強度分布は、光学シミュレータなどを用いて算出することができる。

#### 【0032】

図5は、図4(a)に示す要素光源で図2に示すマスクパターンを照明したときに、カットラインCL1の上に形成される光学像の強度分布を示す図である。また、図6は、図4(b)に示す要素光源で図2に示すマスクパターンを照明したときに、カットラインCL1の上に形成される光学像の強度分布を示す図である。図5及び図6では、カットライン上の位置（座標）を横軸に採用し、カットライン上の各位置における光学像の強度を縦軸に採用している。図5及び図6に示すように、1つの光学像の強度分布は、有限個（241個）の光強度のデータで構成され、本実施形態では、0.5nmごと（間隔）のカットライン上の位置における光強度のデータを含む。ここでは、光強度のデータが存在するカットライン上の位置をグリッドと称し、光強度のデータが存在するカットライン上の位置の間隔を  $x$  とする。 $x$  を小さくすればするほど光学シミュレータによる光学像（の強度分布）の算出精度は向上するが、データ数も多くなってしまう。従って、 $x$  は、0.5nm乃至1nm程度であることが好ましい。

#### 【0033】

本実施形態では、S 1 1 0で生成した177個の要素光源のそれぞれに対して、S 1 0 4で設定した6つのカットラインCL1乃至CL6のそれぞれの上に形成される光学像の強度分布、即ち、1062個の光学像の強度分布を算出する。なお、光学像の強度分布は、要素光源の強度に対して線形であれば、どのような形態であってもよい。例えば、レジスト像に相当する像を得るために、光学像（の強度分布）にレジストの酸の拡散を表すガウス関数をコンボリューションする場合があるが、このような像も要素光源の強度に対して線形であるため、本実施形態の光学像に含まれる。

#### 【0034】

S 1 1 4（第5のステップ）では、S 1 1 2で算出した光学像（の強度分布）に基づいて、有効光源を決定する。具体的には、マスクパターンの光学像のカットライン上のエッジ間の中点位置を目標位置に近づけるように、複数の要素光源のそれぞれに与える重み付け（発光強度）を決定し、かかる重み付けを与えた複数の要素光源を合成した光源を有効光源として決定する。換言すれば、S 1 1 0で生成した複数の要素光源（本実施形態では、177個の要素光源）のそれぞれに対する発光強度の比を決定することで、有効光源を決定する。

#### 【0035】

図7を参照して、本実施形態における有効光源の決定（S 1 1 4）の概要を説明する。図7は、S 1 1 0で生成した要素光源と、S 1 1 2で算出した光学像の強度分布と、S 1 1 2で決定する要素光源の発光強度  $p_k$  ( $k = 1 \sim 177$ ) との関係を示す図である。

#### 【0036】

着目するカットラインにおいて、177個の要素光源のそれぞれに対応する光学像の強度分布に重み付けして合成した強度分布が最終的に決定される有効光源に対する光学像の強度分布となる。光学像の強度分布に重み付けして合成した強度分布がS 1 0 6で設定した光学像の位置の目標位置（及びS 1 0 8で設定した光学像の線幅の目標値）を満たすように、177個の要素光源のそれぞれに与える重み付け（発光強度）を決定する。換言すれば、複数の要素光源のそれぞれに与える重み付けを変更することによって、最終的な有効光源に対応する光学像の強度分布を変化させることができる。なお、このような手法は、アッペの公式に基づくものであり、当業界では周知の技術である。例えば、特許文献2の技術においても、アッペの公式が用いられている。

#### 【0037】

上述したように、ある有効光源でマスクパターンを照明した際の着目する位置に対応す

10

20

30

40

50

る光学像の強度は、要素光源のそれぞれに対する光学像の強度の値に、その要素光源の重み（発光強度）を付けて合成することで算出される。ある有効光源において、光学像のある位置が明点になるか、或いは、暗点になるかは、このような線形則で容易に求めることができる。例えば、特許文献2において、複数の位置のそれぞれに対して光学像の明暗を規定して有効光源を最適化するのには、位置に対する光学像の強度の線形則が容易に成り立つからである。

【0038】

一方、光学像のパターンシフト量は、有効光源に対して高度に非線形な物理量である。パターンシフトが発生するパターンの光学像において、パターンシフト量と、各位置における光学像の明暗は、1対1に対応しない。従って、このような非線形な問題に対して、

10

【0039】

そこで、本実施形態では、以下の式に示すように、混合整数計画法を用いて、上述した非線形な問題を定式化する。これにより、光学像のパターンシフトを考慮した有効光源の最適化問題を数理計画法で解くことが可能となる。

【0040】

## 【数 1】

数式群 1

$$\text{最小化 } t \quad \cdot \cdot \cdot \quad (1)$$

制約条件

$$\sum_{k=1}^m I_{ijk} p_k > u_{ij} \quad \forall i, \forall j \quad \cdot \cdot \cdot \quad (2)$$

$$\sum_{k=1}^m I_{ijk} p_k < (1 - u_{ij}) + M u_{ij} \quad \forall i, \forall j \quad \cdot \cdot \cdot \quad (3)$$

10

$$\left| \sum_{i=1}^{A_j} (1 - u_{ij}) - \sum_{i=B_j}^{L_j} (1 - u_{ij}) \right| \leq t \quad \forall j \quad \cdot \cdot \cdot \quad (4)$$

$$\left| \sum_{i=1}^{L_j} (1 - u_{ij}) - W_j \right| \leq t \quad \forall j \quad \cdot \cdot \cdot \quad (5)$$

$$u_{ij} \geq u_{(i+1)j} \quad i \in \{j | 1 \leq i \leq A_j - 1\} \forall j \quad \cdot \cdot \cdot \quad (6)$$

20

$$u_{ij} \leq u_{(i+1)j} \quad i \in \{j | B_j \leq i \leq L_j - 1\} \forall j \quad \cdot \cdot \cdot \quad (7)$$

$$p_k \geq 0 \quad k = 1, \dots, m \quad \cdot \cdot \cdot \quad (8)$$

$$t \geq 0 \quad \cdot \cdot \cdot \quad (9)$$

$$u_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall i, \forall j \quad \cdot \cdot \cdot \quad (10)$$

定数の定義

$$L_j = \text{Max}(i) \quad \forall j \quad \cdot \cdot \cdot \quad (11)$$

30

$$W_j = \text{Int} \left( \frac{\text{Width}_j}{\Delta x} + 0.5 \right) \quad \forall j \quad \cdot \cdot \cdot \quad (12)$$

$$m = \text{Max}(k) \quad \cdot \cdot \cdot \quad (13)$$

## 【0041】

数式群 1 において、決定変数は  $p_k$  ( $k = 1, 2, \dots, m$ ) であり、 $u$  及び  $t$  は制御用のダミー変数であり、 $I$ 、 $W$ 、 $A$ 、 $B$ 、 $L$ 、 $m$ 、 $M$ 、 $Wid\text{th}$  及び  $x$  は定数である。各要素光源の発光強度（重み）である  $p_k$  が最終的に求めたいものである。

40

## 【0042】

数式群 1 の最大の特徴は、式 (10) で表されるような  $u$  値を導入したことである。 $u$  値は、光学像の強度が閾値を超える場合に第 1 の整数値を取り、光学像の強度が閾値を超えない場合に第 2 の整数値をとる変数であって、本実施形態では、0 又は 1 をとる 2 値の変数である。従って、数式群 1 で定義される問題は、混合整数計画問題（MIP 問題）となる。なお、混合整数計画問題は、ILOG 社が開発した CPLEX などの市販のソルバで容易に解くことが可能である。具体的には、式 (1) を最小化の目的関数、式 (2) 乃至式 (10) を制約条件及び境界条件としてソルバに入力することによって、式 (2) から式 (10) を同時に満たす変数の組み合わせのうち、式 (1) を最小化するような解を

50

得ることができる。

【 0 0 4 3 】

数式群 1 の各式の意味を説明する。式 ( 2 ) 及び式 ( 3 ) は、光学像の強度に関する式である。式 ( 2 ) 及び式 ( 3 ) の左辺の  $I_{i j k}$  は、S 1 1 2 で算出される光学像の強度であって、k 番目の要素光源を単位光量光らせたときに、j 番目のカットラインの上に形成される光学像の i 番目の位置における強度の値を意味する。本実施形態では、カットラインの数が 6 つであるため、j は 1 から 6 の値となる。i はカットラインの上に形成される光学像の強度分布の各グリッド位置に 1 から順番に付与されている番号である。本実施形態では、0.5 nm ( x ) 間隔で光学像の強度を求めているため、120 nm の長さのカットラインに対しては、i は 1 から 241 までの値となる。また、i の最大値を  $L_j$  とする ( 式 ( 1 1 ) 参照 )。k は要素光源に付与される番号 ( 要素光源番号 ) である。本実施形態では、177 個の要素光源が生成されるため、k は 1 から 177 までの値となる。また、k の最大値、即ち、要素光源の総数を m とする ( 式 ( 1 3 ) 参照 )。

【 0 0 4 4 】

上述したことから、k ( k = 1、2、・・・、177 ) 番目の要素光源を発光強度  $p_k$  で光らせたときに、j 番目のカットラインの上に形成される光学像の i 番目の位置における光強度を合成した値は、 $I_{i j k} p_k$  となる。但し、発光強度である  $p_k$  は、非負実数である ( 式 ( 8 ) 参照 )。

【 0 0 4 5 】

基板を現像する際に、現像の可否の閾値となる光学像の強度の値は、スライスレベルと呼ばれる。スライスレベルが「1」であると考えたと、ポジレジストにおいては、以下の条件 ( A ) 及び条件 ( B ) が成り立つ。

条件 ( A ) :  $I_{i j k} p_k > 1$  であれば、現像した際にレジストが溶解する。

条件 ( B ) :  $I_{i j k} p_k < 1$  であれば、現像した際にレジストが残留する。

【 0 0 4 6 】

本実施形態では、レジストがポジレジストである場合を例として説明するが、レジストがネガレジストであってもよいことは言うまでもない。なお、レジストがネガレジストである場合には、 $I_{i j k} p_k > 1$  であれば、現像した際にレジストが残留し、 $I_{i j k} p_k < 1$  であれば、現像した際にレジストが溶解する。

【 0 0 4 7 】

式 ( 2 ) 及び式 ( 3 ) と、式 ( 1 0 ) で定義される変数  $u_{i j}$  との関係について説明する。例えば、 $I_{i j k} p_k < 1$  である場合、 $u_{i j}$  が 1 であると式 ( 2 ) を満たすことができない。一方、 $I_{i j k} p_k > 1$  である場合には、 $u_{i j}$  が 0 であっても 1 であっても式 ( 2 ) を満たすことができる。

【 0 0 4 8 】

式 ( 3 ) の M は、「大きい値」を意味し、通常の光学像の強度の値ではない大きな値 ( 10 や 20 など ) である。本実施形態では、M を 50 としている。これにより、 $I_{i j k} p_k > 1$  である場合には、 $u_{i j}$  が 0 であると式 ( 3 ) を満たすことができないが、 $I_{i j k} p_k < 1$  である場合には、 $u_{i j}$  の値に関わらず、式 ( 3 ) が満たされる。従って、 $I_{i j k} p_k$  と  $u_{i j}$  との間には、以下の関係が成り立つ。

【 0 0 4 9 】

【 数 2 】

$$u_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{if}(\sum_{k=1}^m I_{ijk} p_k > 1) \\ 0 & \text{if}(\sum_{k=1}^m I_{ijk} p_k < 1) \end{cases} \quad \dots (14)$$

【 0 0 5 0 】

図 8 は、式 ( 1 4 ) に示す関係を模式的に表す図である。図 8 を参照するに、式 ( 2 ) 及び式 ( 3 ) によって、光学像の強度の範囲が抑えられていることがわかる。 $u_{i j}$  が「1」の位置に関しては、光学像の強度は 1 よりも大きい値となり、 $u_{i j}$  が「0」の位置に関しては、光学像の強度は 1 よりも小さい値となる。このように、レジストの溶解の可否が  $u_{i j}$  の値に直接対応する。

【 0 0 5 1 】

式 ( 4 ) は、マスクパターンの光学像の midpoint 位置に関する式であり、S 1 0 6 で設定した目標位置と実際の光学像の midpoint 位置との差を表す式である。式 ( 4 ) における定数の定義について説明する。 $PS_j$  は、j 番目のカットラインにおけるマスクパターンの光学像の midpoint 位置の目標位置である。 $A_j$  は、 $x_i < PS_j$  を満たす最大の i 値であり、 $B_j$  は、 $x_i > PS_j$  を満たす最小の i 値である。 $x_i$  は、カットラインの上の i 番目の位置 ( 座標 ) を意味し、以下の式で表される。

【 0 0 5 2 】

【 数 3 】

$$x_i = (i-1) \cdot \Delta x \quad \forall j$$

【 0 0 5 3 】

図 9 は、任意のカットラインの上の i 番目の位置と、かかる位置における光学像の強度の値 (  $I_{i j k p k}$  ) との関係を示す図である。マスクパターンの光学像の midpoint 位置の目標位置  $PS_j$  を図 9 に示すように設定した場合、 $A_j = 9$ 、 $B_j = 10$ 、 $L_j = 21$  となる。

【 0 0 5 4 】

式 ( 4 ) の意味を説明する。式 ( 4 ) の左辺に含まれる「 $1 - u_{i j}$ 」は、 $u_{i j} = 0$  のときに「1」をとり、 $u_{i j} = 1$  のときに「0」をとる。従って、 $(1 - u_{i j})$  は、「 $u_{i j} = 0$  となるグリッドの数」を表している。本実施形態では、レジストがポジレジストであるため、 $(1 - u_{i j})$  はスライスレベルを下回る部分の長さ、即ち、レジストが残留している部分の幅に比例する量となる。

【 0 0 5 5 】

このように、式 ( 4 ) の左辺において、絶対値内の第 1 項は、マスクパターンの光学像の midpoint 位置の目標位置の左側において「 $u_{i j} = 0$  となるグリッドの数」を表している。また、式 ( 4 ) の左辺において、絶対値内の第 2 項は、マスクパターンの光学像の midpoint 位置の目標位置の右側において「 $u_{i j} = 0$  となるグリッドの数」を表している。これらの値が同じ値であると、マスクパターンの光学像の midpoint 位置が目標位置と一致し、式 ( 4 ) の左辺において、絶対値が 0 となる。式 ( 4 ) は、この値の絶対値が  $t$  以下になるように制約している式である。従って、非負変数  $t$  ( 式 ( 9 ) 参照 ) を最小化すること ( 式 ( 1 ) 参照 ) が数理計画法で解くべき問題となる。

【 0 0 5 6 】

なお、本実施形態では、マスクパターンの光学像の midpoint 位置の最適化を行っているが、光学像の midpoint 位置はパターンシフト量に 1 対 1 で対応する。従って、本実施形態では、マスクパターンの光学像のパターンシフトを考慮した有効光源の最適化を行っていると言える。

【 0 0 5 7 】

式 ( 5 ) 及び式 ( 1 2 ) は、マスクパターンの光学像の線幅に関する式である。本実施形態では、光学像において連続する暗部の長さが光学像の線幅であるため、このときの線幅  $Width$  は、以下の式 ( 1 5 ) で近似することができる。

【 0 0 5 8 】

【数 4】

$$\text{Width} \approx \sum_{i=1}^{L_j} (1 - u_{ij}) \cdot \Delta x \quad \cdots (15)$$

【0059】

一方、j 番目のカットラインの上に形成される光学像の線幅の目標値である  $\text{Width}_j$  は、式(12)で表される整数  $W_j$  を用いて、以下の式(16)で近似することができる。

【0060】

10

【数 5】

$$\text{Width}_j \approx W_j \cdot \Delta x \quad \cdots (16)$$

【0061】

但し、式(12)に含まれる  $\text{Int}$  関数は小数部分の切り捨てを意味する関数であり、非負実数 A に対して  $\text{Int}(A + 0.5)$  は、A の四捨五入をすることと等価である。従って、光学像の線幅の目標値と最適化結果における光学像の線幅との差分は、式(15)及び式(16)から、以下の式(17)に比例する。

【0062】

20

【数 6】

$$\sum_{i=1}^{L_j} (1 - u_{ij}) - W_j \quad \cdots (17)$$

【0063】

式(17)がゼロに近いほど、光学像の線幅の目標値と最適化結果における光学像の線幅との差分が小さいことを意味している。式(5)は、この値の絶対値が  $t$  以下になるように制約している式である。従って、非負変数  $t$  (式(9)参照)を最小化すること(式(1)参照)が数理計画法で解くべき問題となる。なお、パターンの線幅に対する要求が厳しくなく、パターンシフトのみを考慮したい場合には、光学像の線幅を考慮せず、光学像の中心位置のみを考慮して有効光源を最適化することも可能である。このような場合には、式(5)及び式(12)を数式群 1 から除外すればよい。

30

【0064】

制約条件である式(6)及び式(7)について説明する。マスクパターンの光学像の中心位置及び線幅が物理的に正しい意味を有するためには、レジストが残留する部分は必ず連続していなければならない。例えば、マスクパターンの光学像の強度分布において、図10に示すように、スライスレベルを下回る部分が2箇所に分離している場合、かかる光学像の強度分布は望ましいものとは言えない。そこで、本実施形態では、図11に示すような式(6)及び式(7)を制約条件とし、このような光学像の強度分布が最適化結果として導出されることを防止している。図11は、式(6)及び式(7)の意味を模式的に示す図である。

40

【0065】

このように、マスクパターンの光学像の中心位置(及び線幅)を考慮した有効光源の最適化問題は、2値の変数である  $u_{ij}$  の和を目標値に近づける混合整数計画問題に置き換えることができる。

【0066】

本実施形態では、表1に示すマスクパターンの光学像の中心位置の目標位置及びマスクパターンの光学像の線幅の目標値に対して、以下の表2に示す最適化結果(177個の要素光源のそれぞれの発光強度  $p_k$ ) が得られた。S110で生成した複数の要素光源のそ

50

れぞれに対して表 2 に示す発光強度  $p_k$  をかけて合成することで、図 12 に示すような有効光源が得られる。

【 0 0 6 7 】

【表 2】

要素光源 番号 $k$	発光強度 $p_k$	要素光源 番号 $k$	発光強度 $p_k$	要素光源 番号 $k$	発光強度 $p_k$	要素光源 番号 $k$	発光強度 $p_k$	要素光源 番号 $k$	発光強度 $p_k$
1	0	37	0	73	0	109	0	145	0
2	0	38	0	74	0	110	0	146	0.0603994
3	0	39	0	75	0	111	0	147	0
4	0	40	0.0539869	76	0.1296630	112	0.0682349	148	0
5	0	41	0	77	0	113	0.0338880	149	0
6	0	42	0	78	0.2463640	114	0	150	0
7	0	43	0	79	0	115	0	151	0
8	0	44	0	80	0	116	0	152	0
9	0	45	0.1642760	81	0	117	0	153	0
10	0	46	0	82	0	118	0	154	0
11	0	47	0	83	0	119	0.0675053	155	0
12	0	48	0	84	0	120	0	156	0
13	0	49	0	85	0	121	0	157	0
14	0	50	0.0539869	86	0	122	0	158	0
15	0	51	0	87	0	123	0	159	0
16	0	52	0.0682349	88	0	124	0	160	0
17	0	53	0.0338880	89	0	125	0.0338880	161	0
18	0	54	0	90	0	126	0.0682349	162	0
19	0	55	0	91	0	127	0	163	0
20	0	56	0	92	0	128	0.0539869	164	0
21	0	57	0	93	0	129	0	165	0
22	0	58	0	94	0	130	0	166	0
23	0	59	0.0675053	95	0	131	0	167	0
24	0	60	0	96	0	132	0	168	0
25	0	61	0	97	0	133	0.1642760	169	0
26	0	62	0	98	0	134	0	170	0
27	0	63	0	99	0	135	0	171	0
28	0	64	0	100	0.2463640	136	0	172	0
29	0	65	0.0338880	101	0	137	0	173	0
30	0	66	0.0682349	102	0.1296630	138	0.0539869	174	0
31	0	67	0	103	0	139	0	175	0
32	0.0603994	68	0	104	0	140	0	176	0
33	0	69	0	105	0	141	0	177	0
34	0	70	0.2463640	106	0.1296630	142	0		
35	0	71	0	107	0	143	0		
36	0	72	0.1296630	108	0.2463640	144	0		

【 0 0 6 8 】

図 13 は、図 12 に示す有効光源で図 2 に示すマスクパターンを照明したときに、投影光学系の像面に形成される光学像を示す図である。図 13 において、PT はマスクパターンのパターン群を示し、IM は光学像（レジストが残留する部分の境界線）を示している。この際、カットライン CL1 乃至 CL6 のそれぞれの上に形成されるマスクパターンの光学像の中心位置及び線幅を以下の表 3 に示す。図 13 及び表 3 を参照するに、パターンシフトがほとんど発生しておらず、且つ、マスクパターンの光学像の線幅が目標値に近いことがわかる。

【 0 0 6 9 】

【表 3】

カットライン	CL1	CL2	CL3	CL4	CL5	CL6
中心位置[nm]	60	59.99	60.33	45	45	44.97
線幅[nm]	74.67	75.1	75.2	49.73	50.71	49.67

【 0 0 7 0 】

ここで、本実施形態における有効光源の最適化が数学的に正しいことを示す。カットライン CL1 乃至 CL3 のそれぞれに対して、以下の表 4 に示すように、マスクパターンの光学像の中心位置の目標位置及び線幅の目標値を設定する。表 4 に示すマスクパターンの

光学像の中心位置の目標位置及び線幅の目標値は、マスクパターンの設計値から大きく変化させたものであり、難易度の高い最適化である。なお、カットラインCL4乃至CL6に関しては考慮しないものとする。

【0071】

【表4】

カットライン	CL1	CL2	CL3
目標位置[nm]	60	60	70
目標値[nm]	75	65	75

10

【0072】

表4に示すマスクパターンの光学像の中心位置の目標位置及びマスクパターンの光学像の線幅の目標値に対して、本実施形態では、図14に示すような有効光源が得られる。図15は、図14に示す有効光源で図2に示すマスクパターンを照明したときに、投影光学系の像面に形成される光学像を示す図である。図15において、PTはマスクパターンのパターン群を示し、IMは光学像（レジストが残留する部分の境界線）を示している。この際、カットラインCL1乃至CL3のそれぞれの上に形成されるマスクパターンの光学像の中心位置及び線幅を以下の表5に示す。図15及び表5を参照するに、本実施形態における有効光源の最適化は、難易度の高い最適化にも適用可能であり、数学的に正しいこ

20

【0073】

【表5】

カットライン	CL1	CL2	CL3
中心位置[nm]	60	60	70.03
線幅[nm]	74.64	65.3	75.69

【0074】

30

なお、本実施形態では、有効光源の対称性を考慮している。有効光源の対称性は、マスクパターンの対称性から考えられるものであり、最終的な解となる有効光源が4回対称（上下左右対称）になるようにした。具体的には、以下の式（18）、（19）及び（20）を新たな制約条件として数式群1に加えればよい。

$$\begin{aligned}
 p_{11} &= p_{55} = p_{173} = p_{177} \cdots (18) \\
 p_{39} &= p_{51} = p_{127} = p_{139} \cdots (19) \\
 p_{85} &= p_{93} \cdots (20)
 \end{aligned}$$

式（18）乃至式（20）は、本実施形態における有効光源の対称性を制約する式の一部であり、 $p_k$ （ $k=1\sim 177$ ）の全てに対して同様な式を設定する。このように、要素光源間の対称性を考慮することによって、独立変数を実質的に低減させることが可能であり、計算時間を短縮できることがある。なお、要素光源間の関係式については、これらに限定されるものではなく、その他の式を設定してもよい。

40

<第2の実施形態>

第1の実施形態においては、着目するカットラインを全てラインパターンの光学像（レジストが残留する部分）とした。但し、実際には、スペースパターンの光学像（レジストが溶解する部分）に着目する場合もある。このような場合には、数式群1に含まれる一部の式を以下のように置き換えればよい。

【0075】

スペースパターンに着目する場合、式（14）における $u_{ij}$ の値の定義が逆になればよい。そのため、数式群1に含まれる式（2）及び式（3）のそれぞれを、以下の式（21）及

50



び式(22)に置き換えればよい。

【0076】

【数7】

$$\sum_{k=1}^m I_{ijk} p_k > 1 - u_{ij} \quad \forall i, \forall j \quad \dots (21)$$

$$\sum_{k=1}^m I_{ijk} p_k < u_{ij} + M \cdot (1 - u_{ij}) \quad \forall i, \forall j \quad \dots (22)$$

10

【0077】

式(21)及び式(22)によって、 $u_{ij}$ は、以下の式(23)に示すような意味を有する。従って、第1の実施形態と同様に、スペースパターン(明部)の光学像の中点位置(及び線幅)を考慮して、有効光源を最適化することが可能となる。

【0078】

【数8】

$$u_{ij} = \begin{cases} 0 & \text{if}(\sum_{k=1}^m I_{ijk} p_k > 1) \\ 1 & \text{if}(\sum_{k=1}^m I_{ijk} p_k < 1) \end{cases} \quad \dots (23)$$

20

【0079】

光学像における明部の線幅を考慮するためのカットラインと、光学像における暗部の線幅を考慮するためのカットラインとが混在する場合であっても、有効光源の最適化は可能である。この場合、光学像における明部の線幅を考慮するためのカットラインに対しては、式(21)及び式(22)を $u_{ij}$ の定義として与え、光学像における暗部の線幅を考慮するためのカットラインに対して、式(2)及び式(3)を $u_{ij}$ の定義として与えればよい。

30

< 第3の実施形態 >

第1の実施形態で示した数式群1において、全てのjに対する式(4)及び式(5)は、同一の変数tによって抑えられていた。換言すれば、tは、式(4)の左辺及び式(5)の左辺の最大値であり、数式群1は、tを最小化する問題となっているため、「最大値最小化」の問題となる。

【0080】

本実施形態では、数式群1において、目的関数である式(1)を式(24)に置き換え、制約条件の1つである式(4)を式(24)に置き換えて、混合整数計画問題を解くことにする。これは、パターンシフトの最適化に関しては各jに対して $t_{1j}$ が定義され、線幅の最適化に関しては各jに対して $t_{2j}$ が定義されており、その線形和を最小化する問題となっている。

40

【0081】

【数 9】

$$\text{最小化 } \sum (\alpha_j \cdot t1_j + \beta_j \cdot t2_j) \quad \dots \quad (24)$$

$$\left| \sum_{i=1}^{A_j} (1-u_{ij}) - \sum_{i=B_j}^{L_j} (1-u_{ij}) \right| \leq t1_j \quad \forall j \quad \dots \quad (25)$$

$$\left| \sum_{i=1}^{L_j} (1-u_{ij}) - W_j \right| \leq t2_j \quad \forall j \quad \dots \quad (26)$$

10

$$t1_j \geq 0 \quad \forall j \quad \dots \quad (27)$$

$$t2_j \geq 0 \quad \forall j \quad \dots \quad (28)$$

【0082】

式(24)における  $t1_j$  及び  $t2_j$  は、ユーザが予め与える 0 以上の数値である。例えば、 $t1_1$ 、 $t1_2$ 、 $t1_3$ 、 $t1_4$  及び  $t1_5$  に 1 を与え、 $t1_6$  に 5 を与え、 $t2_1$ 、 $t2_2$ 、 $t2_3$ 、 $t2_4$ 、 $t2_5$  及び  $t2_6$  に 1 を与える。この場合、式(24)は、 $t1_1 + t1_2 + t1_3 + t1_4 + t1_5 + 5 \times t1_6 + t2_1 + t2_2 + t2_3 + t2_4 + t2_5 + t2_6$  となる。これにより、 $t1_6$  の値が  $(t1_j + t2_j)$  に対して最も大きく影響するため、 $t1_6$  が優先的に小さくなるような解が得られる。このように、 $t1_j$  及び  $t2_j$  を任意に設定することによって、クリティカルなパターンほど、光学像の midpoint 位置の目標位置（及び寸法の目標値）との差が小さくなるような有効光源を求めることができる。

20

&lt; 第 4 の実施形態 &gt;

実際の半導体デバイスの製造においては、露光時におけるデフォーカス量についても考慮する必要がある。一般的には、投影光学系の像面からデフォーカスしても、マスクパターンの光学像のパターンシフトや線幅に変化を与えない有効光源が好ましい。

【0083】

30

第 1 の実施形態乃至第 3 の実施形態では、1 つのフォーカス面に対して有効光源を最適化しているが、投影光学系の像面からデフォーカスした複数のデフォーカス面に対しても有効光源を最適化することも可能である。

【0084】

具体的には、複数のデフォーカス面を設定し、S112において、複数のデフォーカス面のそれぞれについても、カットラインに対応する位置の上に形成されるマスクパターンの光学像を算出する。そして、それぞれの光学像の位置の目標位置（及び線幅の目標値）を設定することで、デフォーカスを考慮しながら有効光源を最適化することができる。

【0085】

複数のデフォーカス面のそれぞれにおけるカットライン（に対応する位置）は、別のカットラインとみなすことができる。本実施形態では、カットライン CL1 乃至 CL6 のそれぞれに対して +25 nm デフォーカスしたものをカットライン CL7 乃至 CL12 とみなす。また、本実施形態では、カットライン CL1 乃至 CL6 のそれぞれに対して +50 nm デフォーカスしたものをカットライン CL13 乃至 CL18 とみなす。

40

【0086】

カットライン CL1 乃至 CL18 のそれぞれの上に形成される光学像に対して以下の表 6 に示すような目標位置及び目標値を設定した場合に求められる有効光源を図 16 に示す。この際、カットライン CL1 乃至 CL18 のそれぞれの上に形成されるマスクパターンの光学像の midpoint 位置及び線幅を以下の表 7 に示す。

【0087】

50

【表 6】

カットライン	デフォーカス	CL1	CL2	CL3	CL4	CL5	CL6
目標位置[nm]	0nm	60	60	60	45	45	45
	25nm	60	60	60	45	45	45
	50nm	60	60	60	45	45	45
目標値[nm]	0nm	75	75	75	50	50	50
	25nm	75	75	75	50	50	50
	50nm	75	75	75	50	50	50

10

【 0 0 8 8 】

【表 7】

カットライン	デフォーカス	CL1	CL2	CL3	CL4	CL5	CL6
中点位置[nm]	0nm	60	59.66	59.67	45	44.9	44.68
	25nm	60	59.67	59.39	45	44.62	44.76
	50nm	60	59.74	58.45	45	43.62	45
線幅[nm]	0nm	75.92	74.27	77.14	48.88	51.16	51.4
	25nm	75.52	74.49	76.14	48.88	51.36	50.47
	50nm	74.14	75.24	72.8	48.93	52.02	46.8

20

【 0 0 8 9 】

本実施形態によれば、デフォーカスを考慮しながら有効光源を最適化することができる。なお、本実施形態では、プラス方向にデフォーカスしたときの光学像のみを考慮している。但し、マイナス方向にデフォーカスしたときの光学像を考慮してもよいし、プラス方向にデフォーカスしたときの光学像とマイナス方向にデフォーカスしたときの光学像の両方を考慮してもよい。

30

< 第 5 の実施形態 >

実際の半導体デバイスの製造においては、露光時における露光量（ドーズ）についても考慮する必要がある。一般的には、ドーズが理想量とは異なる量であったとしても、マスクパターンの光学像のパターンシフトや線幅に変化を与えない有効光源が好ましい。

【 0 0 9 0 】

ドーズは、全露光量を意味する。従って、第 1 の実施形態乃至第 4 の実施形態において、 $p_k$  ( $k = 1 \sim 177$ ) が解として得られた場合、ドーズは、 $p_k$  となる。かかるドーズを基準ドーズとする。例えば、ドーズが 1.1 倍になるということは、全ての  $p_k$  の値が 1.1 倍になることと等価である。

40

【 0 0 9 1 】

複数のドーズに対して有効光源を最適化する際には、第 4 の実施形態と同様に考えればよい。本実施形態では、基準ドーズ、1.1 倍ドーズ、0.9 倍ドーズの 3 種類のドーズを設定する（即ち、 $p_k$  の値を比例倍して比例倍要素光源を生成する）。そして、それぞれのドーズに対して、カットライン CL1 乃至 CL6 の上に形成される光学像の位置の目標位置（及び線幅の目標値）を設定する。ここでは、1.1 倍ドーズにおけるカットライン CL1 乃至 CL6 のそれぞれをカットライン CL7 乃至 CL12 とみなし、0.9 倍ドーズにおけるカットライン CL1 乃至 CL6 のそれぞれをカットライン CL13 乃至 CL18 とみなす。そして、数式群 1 に含まれる式 (2) 及び式 (3) を以下の式 (29) 乃

50

至式(35)に置き換えればよい。第4の実施形態と比較して、同一のカットラインの上に形成される光学像はドーズが変更されても同じであることを表す式(35)が更に加わっている。

【0092】

【数10】

$$\sum_{k=1}^m I_{ijk} p_k > u_{ij} \quad \forall i, j \in \{j | 1 \leq j \leq 6\} \quad \dots (29)$$

$$\sum_{k=1}^m I_{ijk} p_k < (1 - u_{ij}) + Mu_{ij} \quad \forall i, j \in \{j | 1 \leq j \leq 6\} \quad \dots (30)$$

10

$$1.1 \cdot \sum_{k=1}^m I_{ijk} p_k > u_{ij} \quad \forall i, j \in \{j | 7 \leq j \leq 12\} \quad \dots (31)$$

$$1.1 \cdot \sum_{k=1}^m I_{ijk} p_k < (1 - u_{ij}) + Mu_{ij} \quad \forall i, j \in \{j | 7 \leq j \leq 12\} \quad \dots (32)$$

$$0.9 \cdot \sum_{k=1}^m I_{ijk} p_k > u_{ij} \quad \forall i, j \in \{j | 13 \leq j \leq 18\} \quad \dots (33)$$

$$0.9 \cdot \sum_{k=1}^m I_{ijk} p_k < (1 - u_{ij}) + Mu_{ij} \quad \forall i, j \in \{j | 13 \leq j \leq 18\} \quad \dots (34)$$

20

$$I_{ijk} = I_{i(j+6)k} = I_{i(j+12)k} \quad \forall i, \forall k, j \in \{j | 1 \leq j \leq 6\} \quad \dots (35)$$

【0093】

なお、ドーズの値は、1.1倍ドーズや0.9倍ドーズに限定されるものではなく、1.2倍ドーズや0.8倍ドーズなどであってもよい。また、ドーズの数も3種類に限定されず、4種類や5種類であってもよい。

<第6の実施形態>

上述したように、マスクパターンの光学像(の強度分布)の算出精度は、 $\times$ を小さくすることで向上させることが可能である。但し、 $\times$ を小さくすることで、有効光源を決定する際の制約条件の数が多くなり、計算時間が増大する場合がある。そこで、本実施形態では、計算時間の増大を防止しながら、マスクパターンの光学像の算出精度の向上を図ることができる有効光源の決定方法について説明する。

30

【0094】

図17は、本発明の一側面としての決定方法を説明するためのフローチャートである。かかる決定方法は、S102乃至S114と同じS1702乃至S1714に加えて、S1716(第6のステップ)及びS1718(第7のステップ)を有する。本実施形態の決定方法では、S1714で決定した有効光源を用いて、カットラインの上に形成されるマスクパターンの光学像の算出を繰り返す。具体的には、S1716では、まず、S1714で決定した有効光源でマスクパターンを照明したときに、カットラインの上に形成されるマスクパターンの光学像のエッジを含むエッジ領域を特定する。そして、S1710で生成した複数の要素光源のそれぞれについて、カットラインの上に形成されるマスクパターンの光学像を算出する。この際、エッジ領域に含まれる強度のデータ数(第2の個数)がS1712で算出したマスクパターンの光学像のエッジ領域に含まれる強度のデータ数(第1の個数)よりも多くなるようにする。換言すれば、S1712で算出した光学像のエッジ領域に含まれる第1の個数の位置よりも多い第2の個数の位置のそれぞれについて強度が算出されるように、カットラインの上の位置(座標)を再分割して、マスクパターンの光学像を算出する。また、S1718では、S1716で算出した光学像に基づいて、新たな有効光源を決定する。具体的には、マスクパターンの光学像のカットライン上

40

50

のエッジ間の中点位置を目標位置に近づけるように、複数の要素光源のそれぞれに与える重み付けを決定し、かかる重み付けを与えた複数の要素光源を合成した光源を新たな有効光源として決定する。

#### 【0095】

このように、本実施形態では、カットラインの上に形成されるマスクパターンの光学像（の強度分布）の算出と有効光源の決定とを繰り返して（複数回）行うことで、光学像のエッジの位置の範囲を狭めていく。これにより、計算時間の増大を防止しながら、マスクパターンの光学像の算出精度の向上を図ることができる。

#### 【0096】

ここで、カットラインの上に形成されるマスクパターンの光学像（の強度分布）の算出と有効光源の決定との繰り返しの概要について説明する。例えば、S1714で決定した有効光源に対するマスクパターンの光学像の強度分布が図18に示すような強度分布になったとする。このとき、マスクパターンの光学像の強度分布がスライスレベルを横切った箇所、即ち、隣接する $u_{ij}$ の値が異なる $x$ の区間に着目する。かかる区間を含む特定の長さの区間（エッジ領域）について、強度分布の値（光強度）を内挿する。図18に示すように、強度分布の値を内挿する区間は、カットラインの右側と左側に存在する。本実施形態においては、それぞれ3 $x$ の区間について、カットラインの上の位置（座標）を再分割する。なお、強度分布の値を内挿する区間は、 $x$ の何倍であってもよいが、計算制度を向上させるためには、3倍以上にするとよい。

#### 【0097】

図18に示すマスクパターンの光学像の強度分布の3 $x$ の区間に対して、強度分布の値（光強度）を内挿した結果（即ち、S1716で算出される光学像の強度分布）を図19に示す。図19では、内挿された強度分布の値を白丸で示している。このように、S1712においては算出されていない強度分布の値を内挿して光学像を算出することを、複数の要素光源の全てに対して行う。

#### 【0098】

なお、本実施形態では、 $x$ を5つの区間に再分割しているが、 $x$ の分割数はいくつであってもよい。計算時間と算出精度の向上の効果を考慮すると、 $x$ を4つの区間乃至8つの区間に再分割することが好ましい。また、内挿時の補完方法は、本実施形態では、線形補完を用いているが、他の補完方法を用いてもよいし、光学像を再算出してもよい。

#### 【0099】

図20及び図21のそれぞれは、図19に示すマスクパターンの光学像の光強度分布において、強度分布の値を内挿した左側の区間（エッジ領域）及び右側の区間を示す拡大図である。図20及び図21は、 $i$ に対して、再分割を行った際の位置（座標）を $i'$ とし、再分割された位置（座標）の間隔を $x'$ とする。図20を参照するに、隣接する $u_{ij}$ の値が異なる $x$ の区間、即ち、 $i = 5$ 及び6を含む $i = 4$ から $i = 7$ の区間に関して、再分割を行う。再分割した位置は、 $i' = 1$ から $i' = 14$ となる。同様に、図21を参照するに、隣接する $u_{ij}$ の値が異なる $x$ の区間、即ち、 $i = 19$ 及び20を含む $i = 18$ から $i = 21$ の区間に関して、再分割を行う。再分割した位置は、 $i' = 15$ から $i' = 28$ となる。

#### 【0100】

これらの $i$ 及び $i'$ に対して、第1の実施形態と同様に、各変数を定義して、混合整数計画問題に置き換える。但し、特定の $i'$ と同じ位置（座標）を表す $i$ （本実施形態では、 $i = 5$ 、6、19、20）に関しては、式には含めない。

#### 【0101】

なお、繰り返しにおいては、以前に求めた $u_{ij}$ の値に関しては、定数として扱う。図20及び図21では、 $i = 4$ 以下、或いは、 $i = 21$ 以上においては $u_{ij} = 1$ が定数となり、 $i = 7 \sim 18$ においては $u_{ij} = 0$ が定数となる。これにより、レジストが溶解するか否かの境界となった位置（座標）の近傍の区間のみを詳細に再計算することができる。

10

20

30

40

50

## 【 0 1 0 2 】

$PS_j$ 、 $x$  及び  $x'$  と、光学像の強度分布の値（光強度）がスライスレベル以下になるように固定されている位置の両端の中点（図 2 0 及び図 2 1 では、 $i = 7$  及び 1 8 の位置の中点）から、数式群 1 における式（4）に対応する式を導くことが可能である。また、 $Width_j$ 、 $x$  及び  $x'$  と、光学像の強度分布の値（光強度）がスライスレベル以下になるように固定されている区間（図 2 0 及び図 2 1 では、 $i = 7 \sim 18$ ）から、数式群 1 における式（5）及び式（12）に対応する式を導くことが可能である。

## 【 0 1 0 3 】

なお、本実施形態では、カットラインの上に形成されるマスクパターンの光学像（の強度分布）の算出と有効光源の決定とを 1 回だけ繰り返しているが、繰り返す回数は、何回であってもよい。

10

## 【 0 1 0 4 】

図 2 2 は、S 1 7 1 8 で決定した新たな有効光源を示す図である。図 2 3 は、図 2 2 に示す有効光源で図 2 に示すマスクパターンを照明したときに、投影光学系の像面に形成される光学像を示す図である。図 2 3 において、PT はマスクパターンのパターン群を示し、IM は光学像（レジストが残留する部分の境界線）を示している。この際、カットライン CL 1 乃至 CL 6 のそれぞれの上に形成されるマスクパターンの光学像の中点位置及び線幅を以下の表 8 に示す。表 3 と表 8 とを比較するに、マスクパターンの光学像の算出と有効光源の決定とを繰り返すことで、カットライン CL 1 乃至 CL 6 のそれぞれの上に形成される光学像の位置及び線幅のそれぞれが目標位置及び目標値に更に近づいていることがわかる。

20

## 【 0 1 0 5 】

## 【表 8】

カットライン	CL1	CL2	CL3	CL4	CL5	CL6
中点位置[nm]	60	59.97	59.9	45	45.01	44.98
線幅[nm]	75.01	75.02	75.01	50.14	50.1	50.05

## 【 0 1 0 6 】

このように、第 1 の実施形態乃至第 6 の実施形態における決定方法は、パターンシフト量が許容値の範囲内になるように（即ち、光学像の位置が目標位置に近づくように）、有効光源を最適化（決定）することができる。

30

## 【 0 1 0 7 】

本発明は、以下の処理を実行することによっても実現される。即ち、上述した実施形態の機能を実現するソフトウェア（プログラム）を、ネットワーク又は各種の記憶媒体を介してシステム又は装置に供給し、そのシステム又は装置のコンピュータ（又は CPU や MPU 等）がプログラムを読み出して実行する処理である。

## &lt; 第 7 の実施形態 &gt;

以下、図 2 4 を参照して、照明光学系からの光で照明されたマスクのパターンをウエハに転写する露光装置 1 0 0 について説明する。図 2 4 は、露光装置 1 0 0 の構成を示す概略ブロック図である。露光装置 1 0 0 は、照明光学系 1 8 0 において、上述した決定方法によって決定された有効光源を形成し、かかる有効光源でマスクを照明する。露光装置 1 0 0 は、本実施形態では、ステップ・アンド・スキャン方式の露光装置であるが、ステップ・アンド・リピート方式やその他の露光方式も適用することができる。

40

## 【 0 1 0 8 】

露光装置 1 0 0 は、照明装置 1 1 0 と、マスク 1 2 0 を支持するマスクステージ（不図示）と、投影光学系 1 3 0 と、ウエハ 1 4 0 を支持するウエハステージ（不図示）とを有する。

## 【 0 1 0 9 】

50

照明装置 110 は、光源 160 と、照明光学系 180 とを含み、転写用の回路パターンが形成されたマスク 120 を照明する。光源 160 は、例えば、波長約 193 nm の ArF エキシマレーザ、波長約 248 nm の KrF エキシマレーザなどのエキシマレーザを使用する。但し、光源 160 の種類及び個数は限定されず、例えば、波長約 157 nm の F<sub>2</sub> レーザや狭帯域化した水銀ランプなどを光源 160 として使用することもできる。照明光学系 180 は、光源 160 からの光を用いてマスク 120 を照明する光学系であって、上述した決定方法によって決定された有効光源を形成する。照明光学系 180 は、引き回し光学系 181 と、ビーム整形光学系 182 と、偏光制御部 183 と、位相制御部 184 と、射出角度保存光学素子 185 と、リレー光学系 186 と、多光束発生部 187 とを含む。また、照明光学系 180 は、偏光状態調整部 188 と、計算機ホログラム 189 と、リレー光学系 190 と、アパーチャ 191 と、ズーム光学系 192 と、多光束発生部 193 と、開口絞り 194 と、照射部 195 とを含む。

10

#### 【0110】

引き回し光学系 181 は、光源 160 からの光を偏向してビーム整形光学系 182 に導光する。ビーム整形光学系 182 は、光源 160 からの光の断面形状の縦横比率を所定の値に変換する（例えば、断面形状を長方形から正方形にする）。ビーム整形光学系 182 は、多光束発生部 187 を照明するために必要な大きさ及び発散角を有する光束を形成する。

#### 【0111】

偏光制御部 183 は、例えば、直線偏光子などで構成され、不要な偏光成分を除去する機能を有する。偏光制御部 183 で除去（遮光）される偏光成分を最小限にすることで、光源 160 からの光を効率よく所定の直線偏光にすることができる。位相制御部 184 は、偏光制御部 183 によって直線偏光となった光に  $\pi/4$  の位相差を与えて円偏光に変換する。射出角度保存光学素子 185 は、例えば、オプティカルインテグレータ（複数の微小レンズで構成されたハエの目レンズやファイバーなど）で構成され、一定の発散角度で光を射出する。リレー光学系 186 は、射出角度保存光学素子 185 から射出された光を多光束発生部 187 に集光する。射出角度保存光学素子 185 の射出面と多光束発生部 187 の入射面とは、リレー光学系 186 によって、互いにフーリエ変換の関係（物体面と瞳面の関係、又は、瞳面と像面の関係）になっている。多光束発生部 187 は、偏光状態調整部 188 及び計算機ホログラム 189 を均一に照明するためのオプティカルインテグレータで構成される。多光束発生部 187 の射出面には、複数の点光源からなる 2 次光源が形成される。多光束発生部 187 から射出された光は、円偏光として偏光状態調整部 188 に入射する。

20

30

#### 【0112】

偏光状態調整部 188 は、位相制御部 184 によって円偏光となった光に  $\pi/4$  の位相差を与えて所定の偏光方向を有する直線偏光に変換する。偏光状態調整部 188 から射出された光は、直線偏光として回折光学素子として機能する計算機ホログラム 189 に入射する。本実施形態では、偏光状態調整部 188 は、計算機ホログラム 189 よりも光源側に配置されているが、偏光状態調整部 188 と計算機ホログラム 189 との配置関係を入れ替えてもよい。また、偏光状態調整部 188 をサブ波長構造（SWS: Sub Wavelength Structure）で構成した場合には、1つの素子で偏光状態調整部と回折光学素子の機能を有する（即ち、回折光学素子と一体的に構成する）ことができる。

40

#### 【0113】

計算機ホログラム 189 は、リレー光学系 190 を介して、アパーチャ 191 の位置に、上述した決定方法で決定された有効光源（光強度分布）、例えば、図 4 に示すような有効光源を形成する。また、計算機ホログラム 189 は、輪帯照明や 4 重極照明などを形成することも可能であり、偏光状態調整部 188 と協同して、タンジェンシャル偏光やラディアル偏光などを実現することもきできる。このような互いに異なる有効光源を形成する複数の計算機ホログラム 189 は、例えば、ターレットなどの切り替え部に配置される。

50

そして、上述した決定方法によって決定された有効光源に対応する計算機ホログラム 189 を照明光学系 180 の光路に配置することで、様々な有効光源を形成することができる。

【0114】

アパーチャ 191 は、計算機ホログラム 189 によって形成された有効光源（光強度分布）のみを通過させる機能を有する。計算機ホログラム 189 とアパーチャ 191 とは、互いにフーリエ変換の関係になるように配置されている。ズーム光学系 192 は、計算機ホログラム 189 によって形成された有効光源を所定の倍率で拡大して多光束発生部 193 に投影する。多光束発生部 193 は、照明光学系 180 の瞳面に配置され、アパーチャ 191 の位置に形成された光強度分布に対応した光源像（有効光源）を射出面に形成する。多光束発生部 193 は、本実施形態では、ハエの目レンズやシリンドリカルレンズアレイなどのオプティカルインテグレータで構成される。なお、多光束発生部 193 の射出面の近傍には、開口絞り 194 が配置される。照射部 195 は、コンデンサー光学系などを含み、多光束発生部 193 の射出面に形成される有効光源でマスク 120 を照明する。

10

【0115】

マスク 120 は、転写すべき回路パターン（主パターン）と補助パターンとを有する。マスク 120 は、図示しないマスクステージに支持及び駆動される。マスク 120 からの回折光は、投影光学系 130 を介して、ウエハ 140 に投影される。露光装置 100 は、ステップ・アンド・スキャン方式の露光装置であるため、マスク 120 とウエハ 140 とを走査することによって、マスク 120 のパターンをウエハ 140 に転写する。

20

【0116】

投影光学系 130 は、マスク 120 のパターンをウエハ 140 に投影する光学系である。投影光学系 130 は、屈折系、反射屈折系、或いは、反射系を使用することができる。

【0117】

ウエハ 140 は、マスク 120 のパターンが投影（転写）される基板であり、図示しないウエハステージに支持及び駆動される。但し、ウエハ 140 は、ガラスプレートやその他の基板に置き換えることもできる。ウエハ 140 には、レジストが塗布されている。

【0118】

露光において、光源 160 からの光は、照明光学系 180 によってマスク 120 を照明する。マスク 120 のパターンを反映する光は、投影光学系 130 によってウエハ 140 の上に結像する。この際、マスク 120 は、上述した決定方法によって決定された有効光源で照明される。従って、露光装置 100 は、高いスループットで経済性よく高品位なデバイス（半導体素子、LCD 素子、撮像素子（CCD など）、薄膜磁気ヘッドなど）を提供することができる。かかるデバイスは、露光装置 100 を用いてフォトレジスト（感光剤）が塗布された基板（ウエハ、ガラスプレート等）を露光する工程と、露光された基板を現像する工程と、その他の周知の工程と、を経ることによって製造される。

30

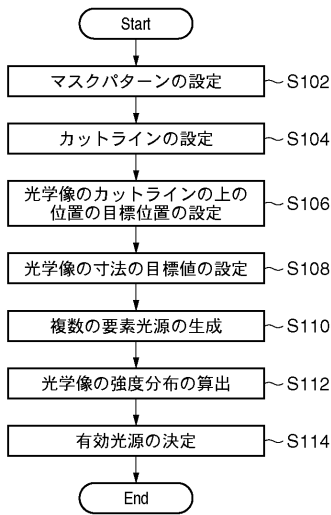
【0119】

以上、本発明の好ましい実施形態について説明したが、本発明はこれらの実施形態に限定されないことはいうまでもなく、その要旨の範囲内で種々の変形及び変更が可能である。

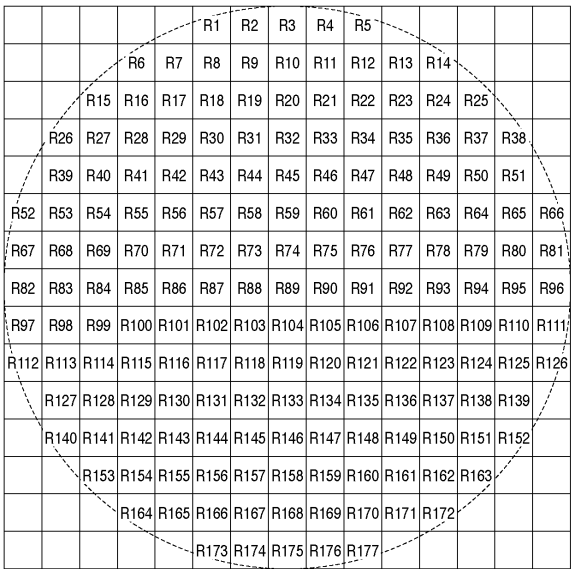
40



【 図 1 】



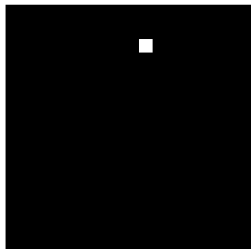
【 図 3 】



【 図 4 】

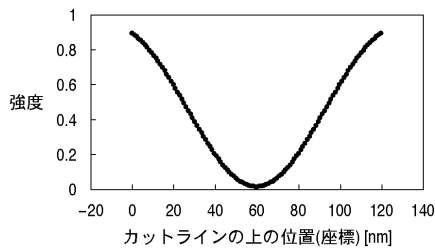


(a)

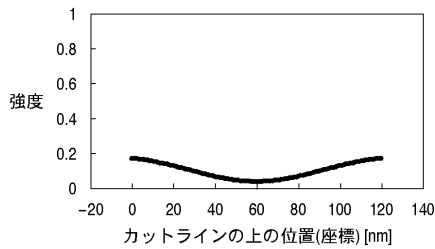


(b)

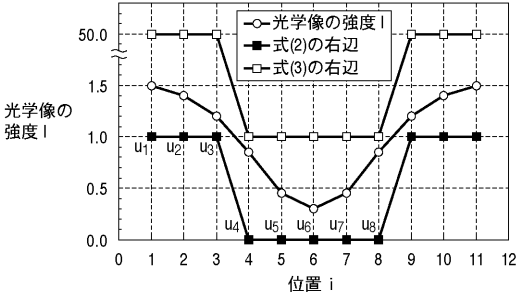
【 図 5 】



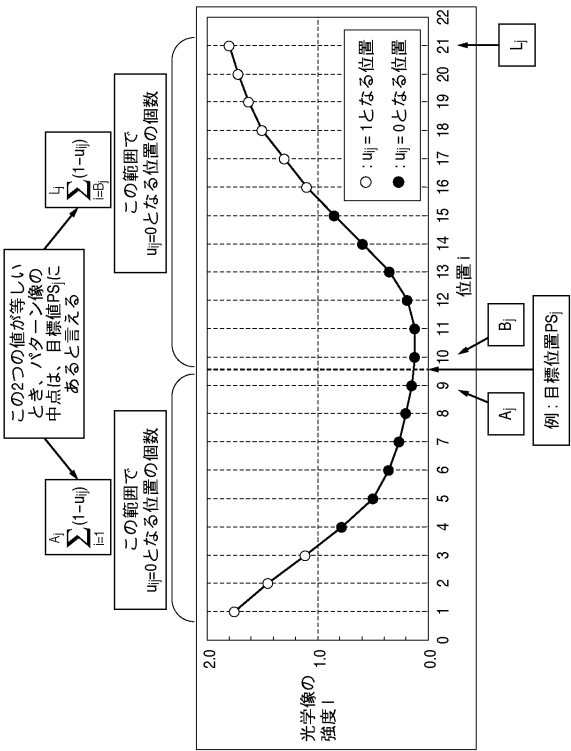
【 図 6 】



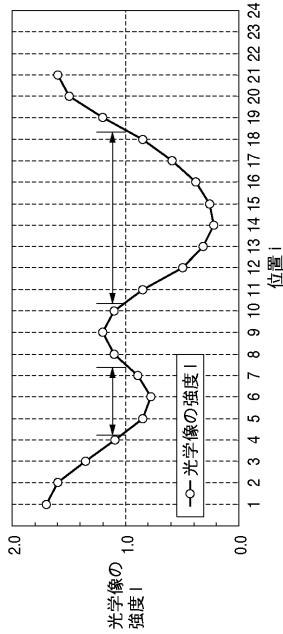
【図 8】



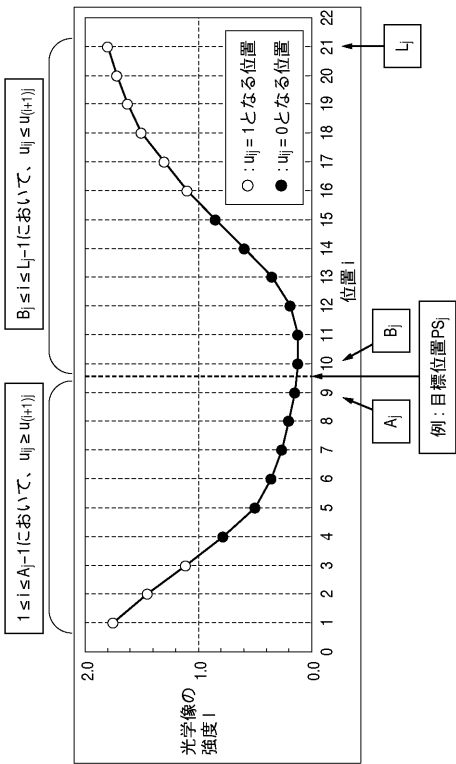
【図 9】



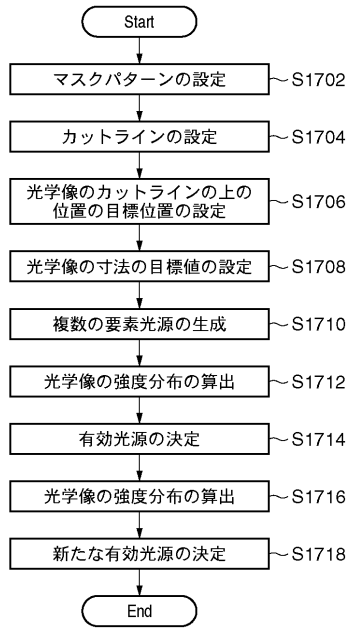
【図 10】



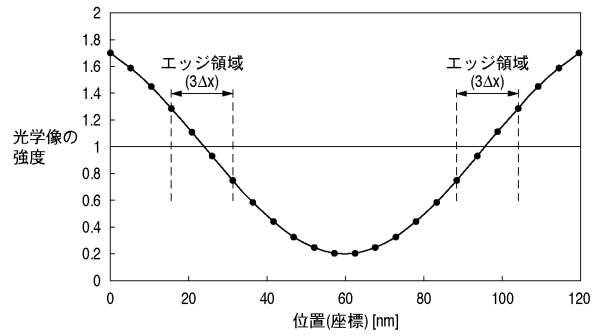
【図 11】



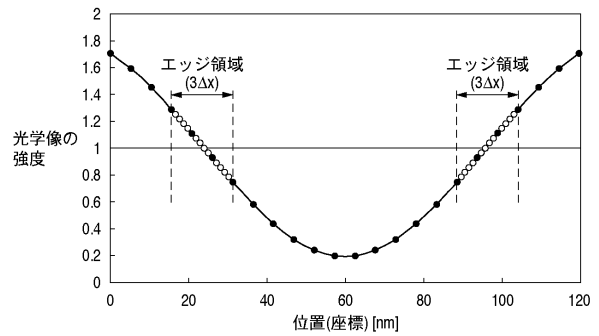
【図 17】



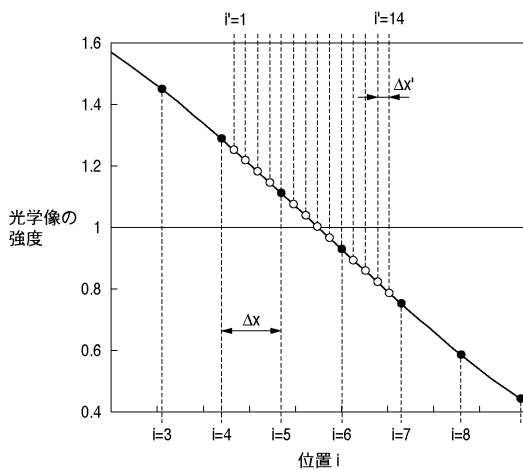
【図 18】



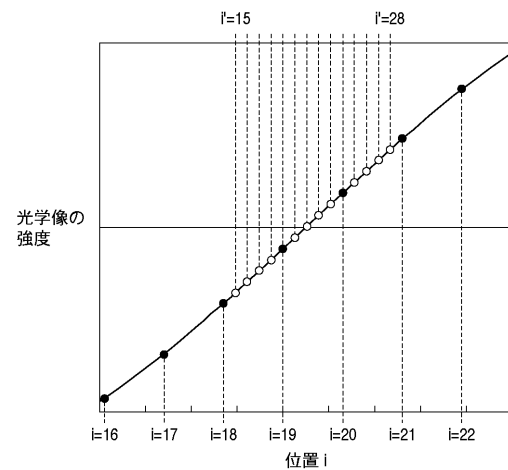
【図 19】



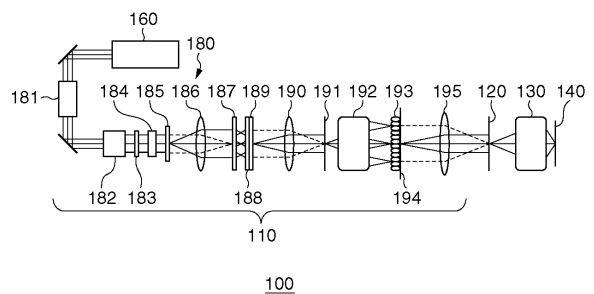
【図 20】



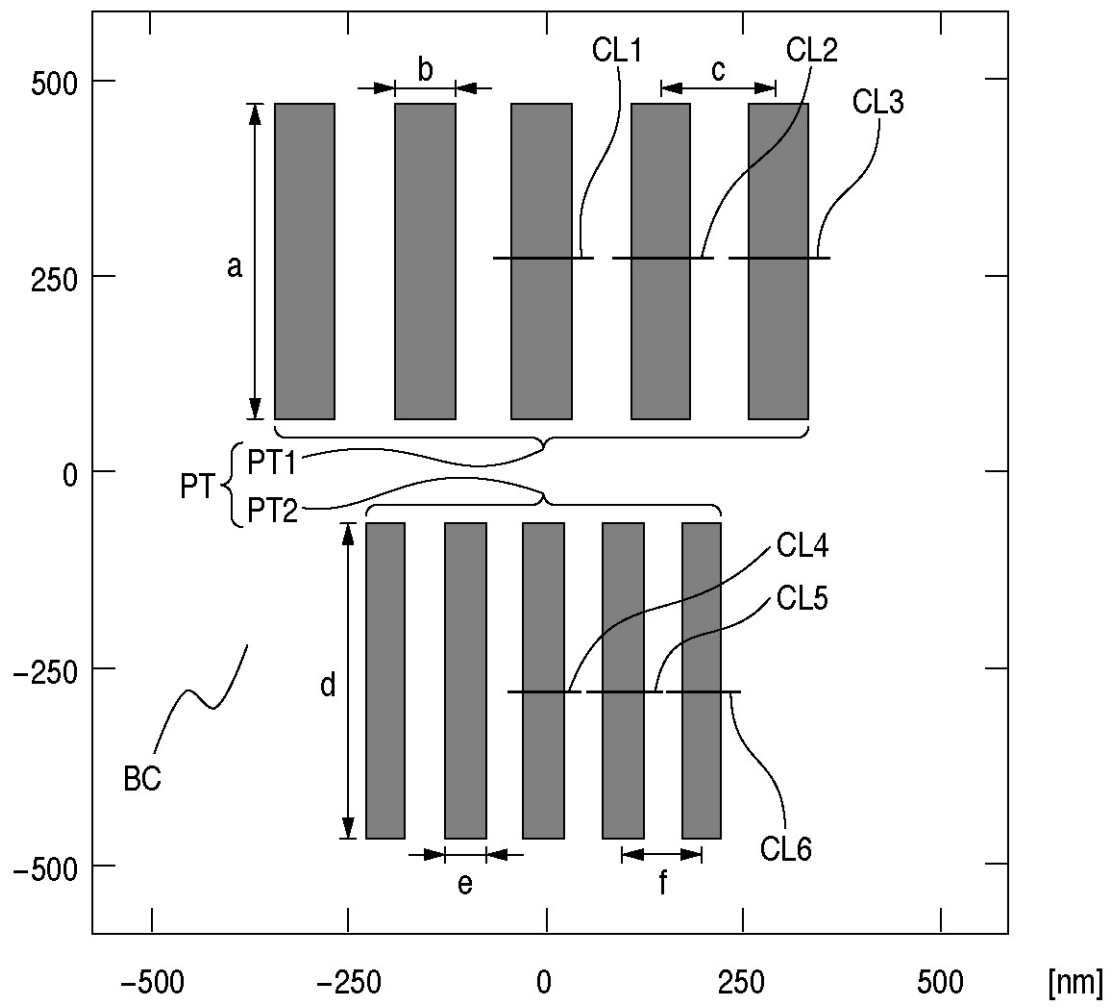
【図 21】



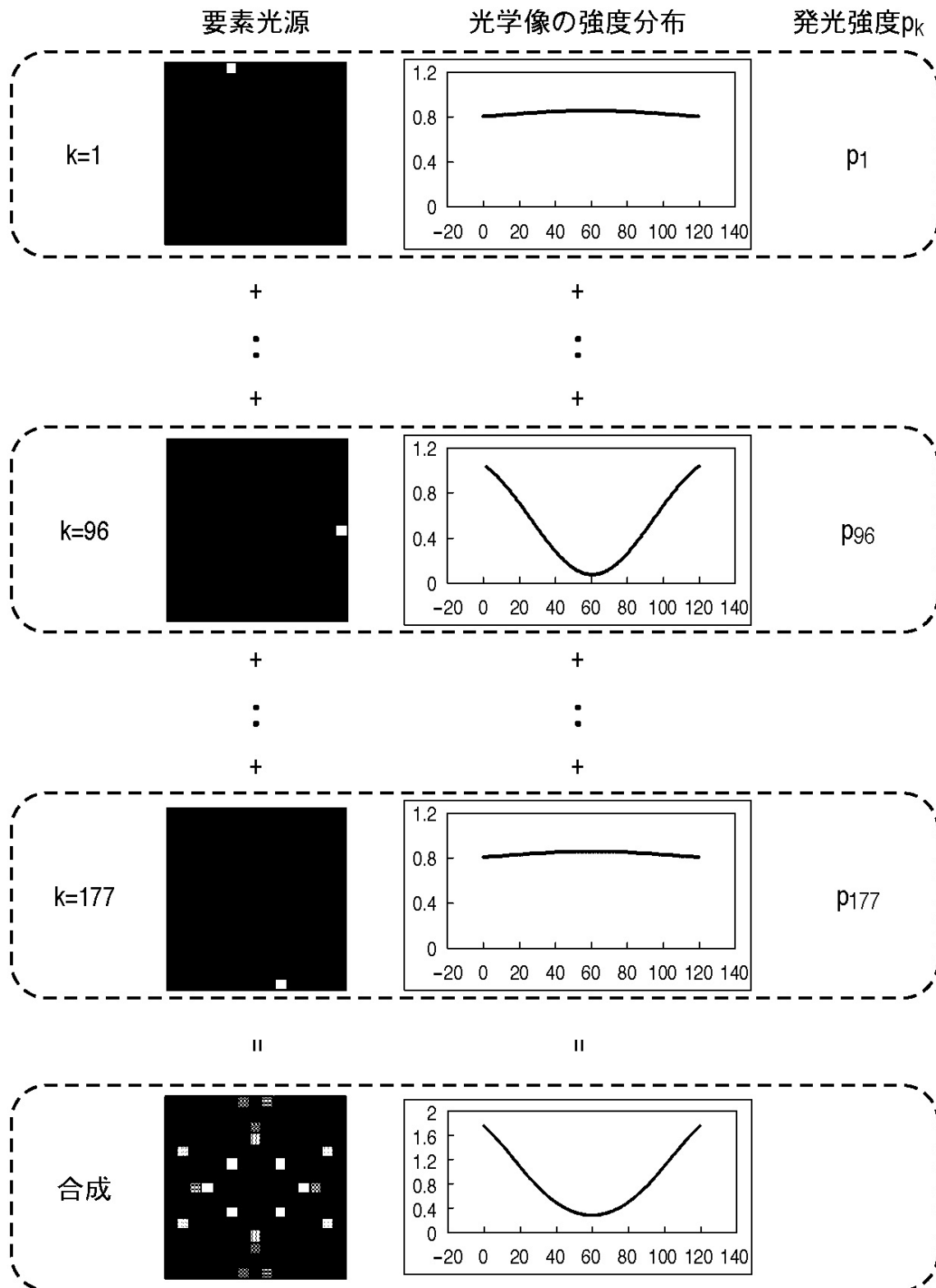
【図 24】



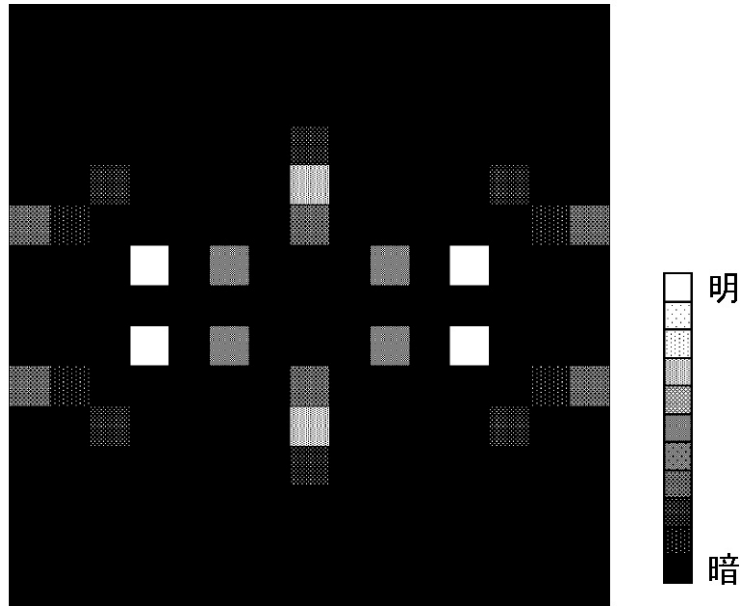
【図2】



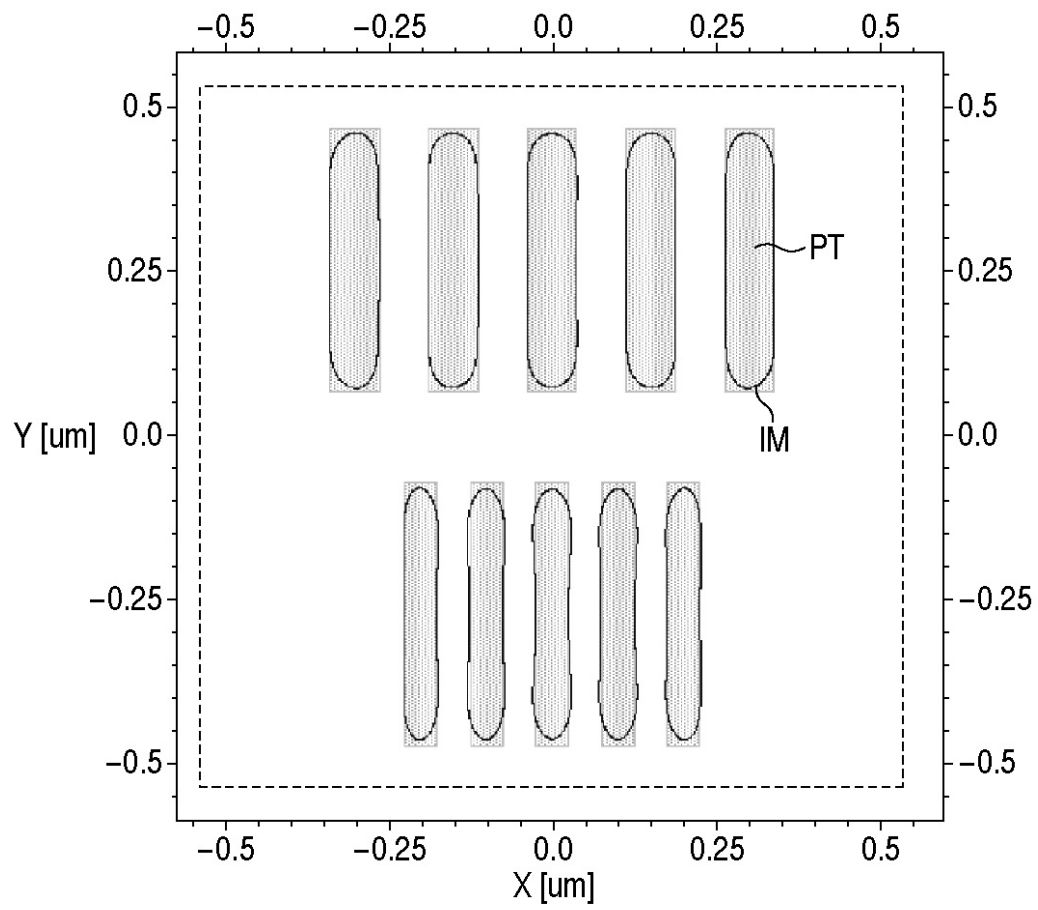
【図 7】



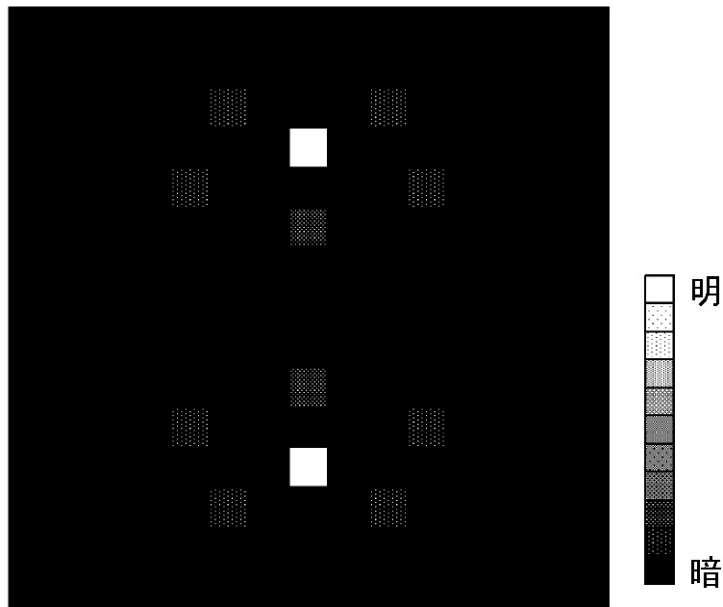
【図 1 2】



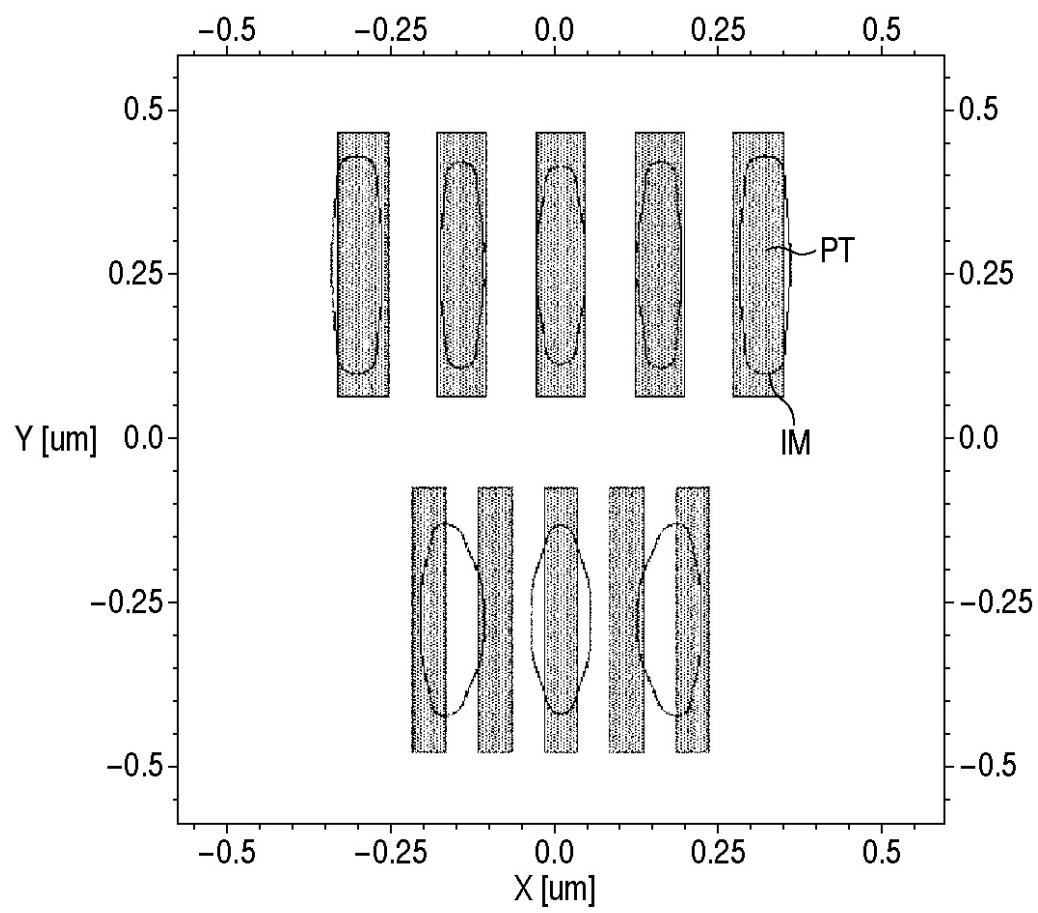
【図 1 3】



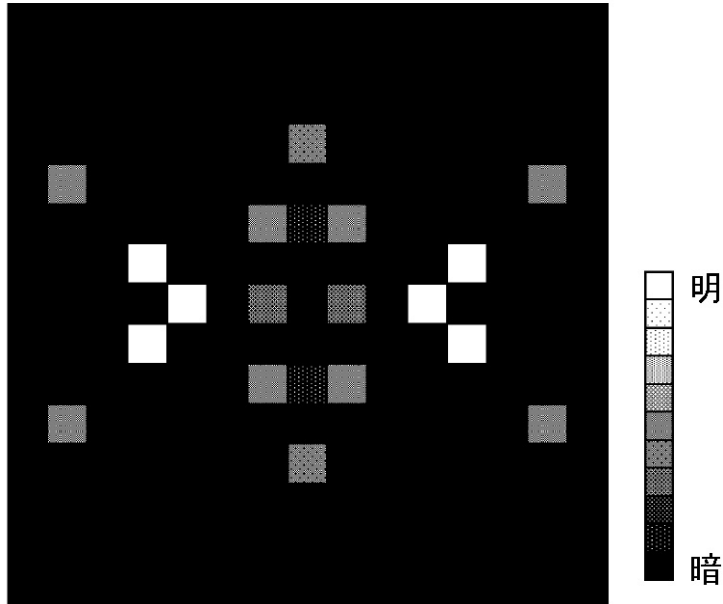
【図 14】



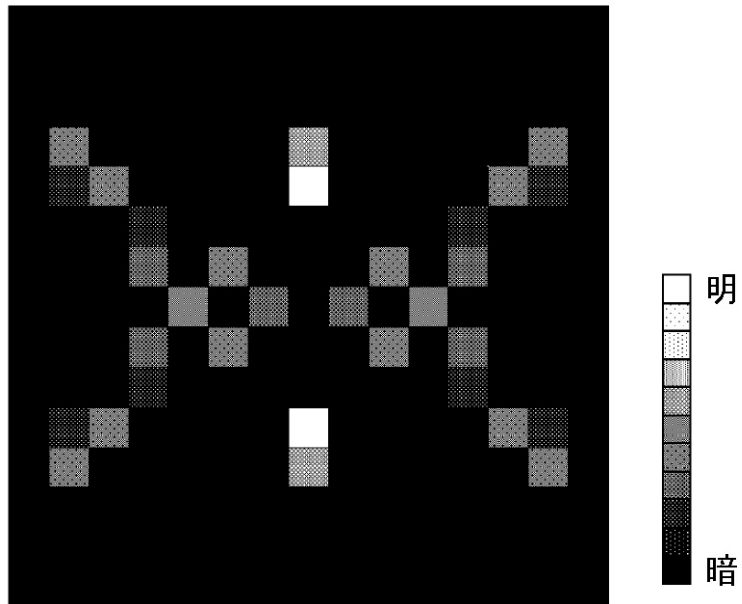
【図 15】



【図 16】

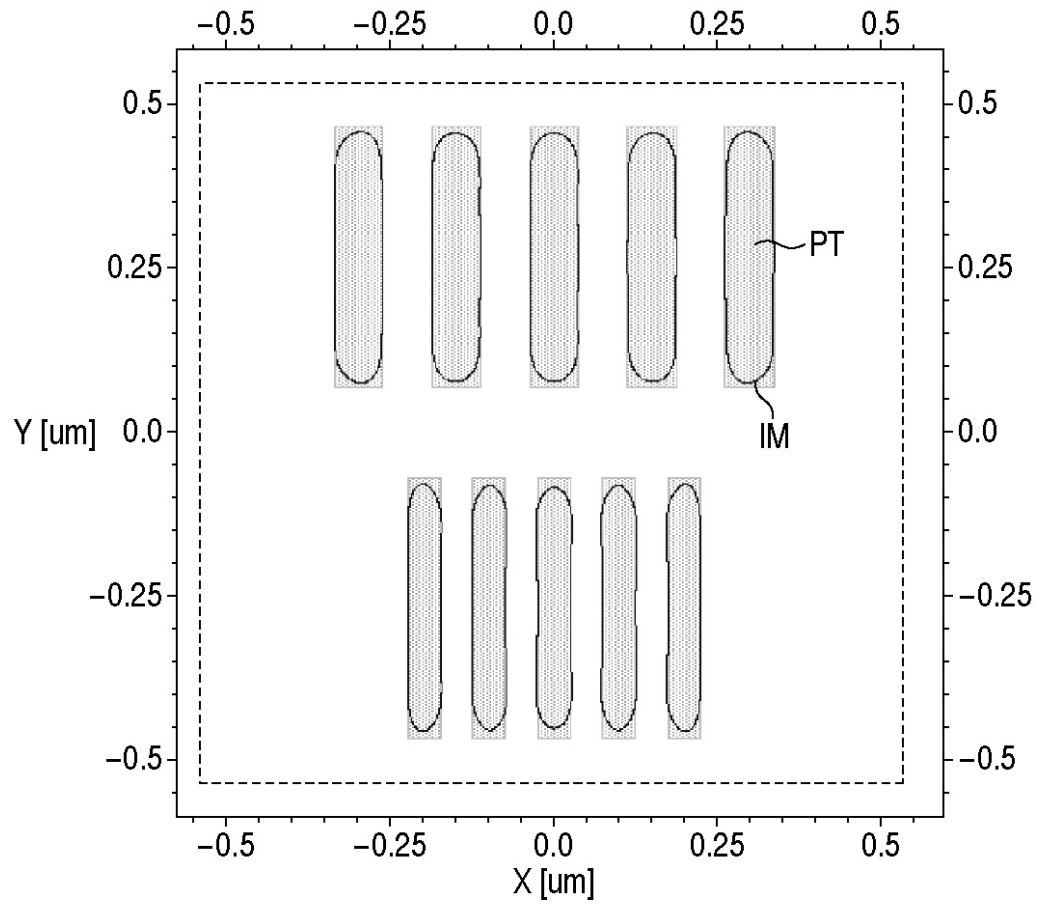


【図 22】





【図 23】



---

フロントページの続き

- (72)発明者 行田 裕一  
東京都大田区下丸子3丁目30番2号 キヤノン株式会社内
- (72)発明者 石井 弘之  
東京都大田区下丸子3丁目30番2号 キヤノン株式会社内
- (72)発明者 三上 晃司  
東京都大田区下丸子3丁目30番2号 キヤノン株式会社内
- (72)発明者 深川 容三  
東京都大田区下丸子3丁目30番2号 キヤノン株式会社内

審査官 赤尾 隼人

- (56)参考文献 特開2009-302206(JP,A)  
特表2007-520892(JP,A)  
特開平8-335552(JP,A)  
特開2005-167253(JP,A)

- (58)調査した分野(Int.Cl., DB名)  
H01L 21/027  
G03F 7/20