

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 特 許 公 報 (B2)

(11) 特許番号
特許第5662762号
(P5662762)

(45) 発行日 平成27年2月4日 (2015. 2. 4)

(24) 登録日 平成26年12月12日 (2014. 12. 12)

(51) Int. Cl.	F I
H O 1 L 21/027 (2006. 01)	H O 1 L 21/30 5 1 6 D
G O 3 F 7/20 (2006. 01)	H O 1 L 21/30 5 1 5 D
	H O 1 L 21/30 5 0 2 Z
	G O 3 F 7/20 5 2 1

請求項の数 11 (全 26 頁)

(21) 出願番号	特願2010-240106 (P2010-240106)	(73) 特許権者	000001007
(22) 出願日	平成22年10月26日 (2010. 10. 26)		キヤノン株式会社
(65) 公開番号	特開2011-129885 (P2011-129885A)		東京都大田区下丸子3丁目30番2号
(43) 公開日	平成23年6月30日 (2011. 6. 30)	(74) 代理人	100076428
審査請求日	平成25年10月9日 (2013. 10. 9)		弁理士 大塚 康德
(31) 優先権主張番号	特願2009-265530 (P2009-265530)	(74) 代理人	100112508
(32) 優先日	平成21年11月20日 (2009. 11. 20)		弁理士 高柳 司郎
(33) 優先権主張国	日本国 (JP)	(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】 有効光源を算出する方法及びプログラム、露光方法並びにデバイス製造方法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

照明光学系から出射された光で原版を照明し、当該照明された原版のパターンを投影光学系を介して基板に投影して前記基板を露光する露光装置における前記照明光学系の瞳面に形成すべき光強度分布をコンピュータを用いて算出する方法であって、

前記投影光学系の瞳関数をフーリエ変換する処理を通して前記投影光学系のインパルス応答関数を決定する工程と、

前記インパルス応答関数の原点から第二のゼロ点までの長さを応答の長さとし、前記基板に形成すべき目標パターンを構成する要素の中で互いに隣接する要素の間隔が前記応答の長さ以下の要素のみを抽出し、当該抽出されたパターンを示す関数を像関数として決定する工程と、

前記瞳関数と、前記決定されたインパルス応答関数と、前記決定された像関数とから、前記照明光学系の瞳面に形成すべき光強度分布を得る工程と、
を含むことを特徴とする方法。

【請求項 2】

照明光学系から出射された光で原版を照明し、当該照明された原版のパターンを投影光学系を介して基板に投影して前記基板を露光する露光装置における前記照明光学系の瞳面に形成すべき光強度分布をコンピュータを用いて算出する方法であって、

前記投影光学系の瞳関数をフーリエ変換する処理を通して前記投影光学系のインパルス応答関数を決定する工程と、

前記インパルス応答関数の原点から第二のゼロ点までの長さを応答の長さとし、前記基板に形成すべき目標パターンを構成する要素からパターンを抽出し、当該抽出されたパターンを示す関数を像関数として決定する工程と、

前記瞳関数と、前記決定されたインパルス応答関数と、前記決定された像関数とから、前記照明光学系の瞳面に形成すべき光強度分布を得る工程と、
を含み、

前記像関数を決定する工程は、

前記基板に形成すべき目標パターンによる回折光の分布を算出する工程と、

前記算出された回折光の分布から同位相の回折光を抽出する工程と、

前記抽出された回折光をフーリエ変換する工程と、

前記投影光学系の光軸周りの直径が前記応答の長さ以下の円で囲まれる範囲におけるピーク位置の関数を求める工程と、

前記求められたピーク位置の関数に前記目標パターンを構成する要素の形状を表す関数を畳み込み、当該畳み込まれた関数を像関数として決定する工程と、
を含むことを特徴とする方法。

【請求項 3】

照明光学系から出射された光で原版を照明し、当該照明された原版のパターンを投影光学系を介して基板に投影して前記基板を露光する露光装置における前記照明光学系の瞳面に形成すべき光強度分布をコンピュータを用いて算出する方法であって、

前記投影光学系の瞳関数をフーリエ変換する処理を通して前記投影光学系のインパルス応答関数を決定する工程と、

前記インパルス応答関数の原点から第二のゼロ点までの長さを応答の長さとし、前記基板に形成すべき目標パターンを構成する要素からパターンを抽出し、当該抽出されたパターンを示す関数を像関数として決定する工程と、

前記瞳関数と、前記決定されたインパルス応答関数と、前記決定された像関数とから、前記照明光学系の瞳面に形成すべき光強度分布を得る工程と、
を含み、

前記像関数を決定する工程は、

前記像関数を $r(x, y)$ とし、前記基板に形成すべき目標パターンの像を $I(x, y)$ とし、前記投影光学系の瞳面上の点 (f, g) における前記目標パターンの回折光の分布を $a(f, g)$ とし、フーリエ変換を F とし、逆フーリエ変換を F^{-1} とするとき、式

$$r(x, y) = F \left[\frac{1}{a(f, g)} F^{-1} \left[\frac{I(x, y)}{F[a(f, g)]} \right] \right]$$

の右辺に前記目標パターンの像 $I(x, y)$ と前記目標パターンの回折光の分布 $a(f, g)$ とを代入することによって像関数 $r(x, y)$ を算出する工程を含み、

前記像関数 $r(x, y)$ は前記応答の長さ以下の範囲においてのみ値を持つことを特徴とする方法。

【請求項 4】

前記瞳関数は投影光学系の収差を含むことを特徴とする請求項 1 乃至 3 の何れか 1 項に記載の方法。

【請求項 5】

前記光強度分布を得る工程は、

前記決定された像関数を前記インパルス応答関数で除算する除算処理を行い、当該除算処理が行われた関数を逆フーリエ変換する工程と、

前記逆フーリエ変換された関数を前記瞳関数の複素共役関数で除算する除算処理を行うことによって前記照明光学系の瞳面に形成すべき光強度分布を得る工程と、
を含むことを特徴とする請求項 1 乃至 4 の何れか 1 項に記載の方法。

【請求項 6】

前記インパルス応答関数を決定する工程は、前記原版を照明する光の波長を λ とし、前記投影光学系の開口数を NA とするとき、前記瞳関数をフーリエ変換した後、前記投影光学系の像面における座標を (NA/λ) で割ることにより前記座標を前記投影光学系の瞳面における座標で置き換え、かつ、前記インパルス応答関数の値がゼロの点をゼロではない値で置き換える工程を含むことを特徴とする請求項 1 乃至 5 の何れか 1 項に記載の方法。

【請求項 7】

照明光学系から出射された光で原版を照明し、当該照明された原版のパターンを投影光学系を介して基板に投影して前記基板を露光する露光装置における前記照明光学系の瞳面に形成すべき光強度分布を算出する方法をコンピュータに実行させるプログラムであって

10

前記方法は、

前記投影光学系の瞳関数をフーリエ変換する処理を通して前記投影光学系のインパルス応答関数を決定するステップと、

前記インパルス応答関数の原点から第二のゼロ点までの長さを応答の長さとし、前記基板に形成すべき目標パターンを構成する要素の中で互いに隣接する要素の間隔が前記応答の長さ以下の要素のみを抽出し、当該抽出されたパターンを示す関数を像関数として決定するステップと、

前記瞳関数と、前記決定されたインパルス応答関数と、前記決定された像関数とから、前記照明光学系の瞳面に形成すべき光強度分布を得るステップと、

20

を含むことを特徴とするプログラム。

【請求項 8】

照明光学系から出射された光で原版を照明し、当該照明された原版のパターンを投影光学系を介して基板に投影して前記基板を露光する露光装置における前記照明光学系の瞳面に形成すべき光強度分布を算出する方法をコンピュータに実行させるプログラムであって

前記方法は、

前記投影光学系の瞳関数をフーリエ変換する処理を通して前記投影光学系のインパルス応答関数を決定するステップと、

前記インパルス応答関数の原点から第二のゼロ点までの長さを応答の長さとし、前記基板に形成すべき目標パターンを構成する要素からパターンを抽出し、当該抽出されたパターンを示す関数を像関数として決定するステップと、

30

前記瞳関数と、前記決定されたインパルス応答関数と、前記決定された像関数とから、前記照明光学系の瞳面に形成すべき光強度分布を得るステップと、

を含み、

前記像関数を決定するステップは、

前記基板に形成すべき目標パターンによる回折光の分布を算出するステップと、

前記算出された回折光の分布から同位相の回折光を抽出するステップと、

前記抽出された回折光をフーリエ変換するステップと、

前記投影光学系の光軸周りの直径が前記応答の長さ以下の円で囲まれる範囲におけるピーク位置の関数を求めるステップと、

40

前記求められたピーク位置の関数に前記目標パターンを構成する要素の形状を表す関数を畳み込み、当該畳み込まれた関数を像関数として決定するステップと、

を含むことを特徴とするプログラム。

【請求項 9】

照明光学系から出射された光で原版を照明し、当該照明された原版のパターンを投影光学系を介して基板に投影して前記基板を露光する露光装置における前記照明光学系の瞳面に形成すべき光強度分布を算出する方法をコンピュータに実行させるプログラムであって

前記方法は、

50

前記投影光学系の瞳関数をフーリエ変換する処理を通して前記投影光学系のインパルス応答関数を決定するステップと、

前記インパルス応答関数の原点から第二のゼロ点までの長さを応答の長さとし、前記基板に形成すべき目標パターンを構成する要素からパターンを抽出し、当該抽出されたパターンを示す関数を像関数として決定するステップと、

前記瞳関数と、前記決定されたインパルス応答関数と、前記決定された像関数とから、前記照明光学系の瞳面に形成すべき光強度分布を得るステップと、
を含み、

前記像関数を決定するステップは、

前記像関数を $r(x, y)$ とし、前記基板に形成すべき目標パターンの像を $I(x, y)$ とし、前記投影光学系の瞳面上の点 (f, g) における前記目標パターンの回折光の分布を $a(f, g)$ とし、フーリエ変換を F とし、逆フーリエ変換を F^{-1} とするとき、式

$$r(x, y) = F \left[\frac{1}{a(f, g)} F^{-1} \left[\frac{I(x, y)}{F[a(f, g)]} \right] \right]$$

の右辺に前記目標パターンの像 $I(x, y)$ と前記目標パターンの回折光の分布 $a(f, g)$ とを代入することによって像関数 $r(x, y)$ を算出するステップを含み、

前記像関数 $r(x, y)$ は前記応答の長さ以下の範囲においてのみ値を持つことを特徴とするプログラム。

【請求項 10】

基板を露光する露光方法であって、

請求項 1 乃至請求項 6 のいずれか 1 項に記載の方法を用いて算出された光強度分布を有する照明光学系から出射された光で原版を照明し、当該照明された原版のパターンを投影光学系を介して基板に投影して前記基板を露光する工程を含む、
ことを特徴とする露光方法。

【請求項 11】

デバイスを製造する方法であって、

請求項 10 に記載の露光方法を用いて基板を露光する工程と、
前記工程で露光された基板を現像する工程と、

を含む方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、有効光源を算出する方法及びプログラム、露光方法並びにデバイス製造方法に関する。

【背景技術】

【0002】

フォトリソグラフィ技術を用いて半導体メモリや論理回路等の微細な半導体デバイスを製造する際に、露光装置が従来から使用されている。露光装置は、原版であるマスク（レチクル）に描画されたパターン（回路パターン）を投影光学系によってウエハ等の基板に投影してパターンを基板に転写する。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、露光波長（露光光の波長）よりも小さい寸法を有するパターンの形成が必要となってきた。このような微細なパターンの形成では、マスクを照明する照明条件（有効光源）によって像性能が異なるため、最適な有効光源を設定することが重要となっている。

【0003】

そのため試行錯誤的に複数の照明を仮定して、光学像（空中像）を計算して有効光源を選ぶという方法が一般に実施されるが、時間と労力がかかる。従って、有効光源を決定する定量的な方法が必要とされている。一般には、有効光源の決定には、光学像の計算が必

10

20

30

40

50

要となる。例えば、光源を２次元的に複数の要素に分割し、かかる複数の要素を点光源とみなす。そして、１つの点光源からの光がマスク及び投影光学系を通過して像面に到達したときの光学像を計算し、パターンの結像に寄与する光を選択することで有効光源を最適化することができる（特許文献１～３参照）。しかし、かかる方法は、光学像（空中像）を計算しなければならないため、有効光源の決定に多大な時間を要してしまう。

【先行技術文献】

【特許文献】

【０００４】

【特許文献１】特開平６－１２０１１９号公報

【特許文献２】特開２００２－３３４８３６号公報

【特許文献３】特開２００４－１２８１０８号公報

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【０００５】

そこで、本発明は、時間のかかる結像計算を行わないで、短時間に有効光源を算出することを課題とする。また、収差のある場合について、収差のない場合と比べて結像性能の低下が少なくなるような有効光源を算出することを課題とする。

【課題を解決するための手段】

【０００６】

本発明の一つの側面は、照明光学系から出射された光で原版を照明し、当該照明された原版のパターンを投影光学系を介して基板に投影して前記基板を露光する露光装置における前記照明光学系の瞳面に形成すべき光強度分布をコンピュータを用いて算出する方法であって、前記投影光学系の瞳関数をフーリエ変換する処理を通して前記投影光学系のインパルス応答関数を決定する工程と、前記インパルス応答関数の原点から第二のゼロ点までの長さを応答の長さとし、前記基板に形成すべき目標パターンを構成する要素の中で互いに隣接する要素の間隔が前記応答の長さ以下の要素のみを抽出し、当該抽出されたパターンを示す関数を像関数として決定する工程と、前記瞳関数と、前記決定されたインパルス応答関数と、前記決定された像関数とから、前記照明光学系の瞳面に形成すべき光強度分布を得る工程と、を含むことを特徴とする。

【発明の効果】

【０００７】

本発明によれば、時間のかかる結像計算を行わないで、短時間に有効光源を算出することができる。

【図面の簡単な説明】

【０００８】

【図１】有効光源を決定する方法のフローチャート

【図２】例示的な目標パターン、像関数、インパルス応答関数、決定された有効光源を示す図

【図３】実施例１における目標パターン、像関数、決定された有効光源を示す図

【図４】実施例１におけるマスクパターンと、当該有効光源を用いて得られた空中像の二次元像を示す図

【図５】実施例２における目標パターン、目標パターンからの回折光分布、ピッチサンプリング、形状を表す関数の分布、像関数、決定された有効光源を示す図

【図６】実施例２における照明光源、マスクパターン、当該マスクパターンを用いて得られた二次元像を示す図

【図７】実施例３における目標パターン、決定された有効光源、当該有効光源を用いて得られた空中像の二次元像を示す図

【図８】露光装置を示す図

【図９】実施例４における例示的な目標パターン、有効光源分布、決定された有効光源から得られたマスクパターンを示す図

10

20

30

40

50

【図 10】実施例 4 における空中像の C D フォーカス特性を示す図

【発明を実施するための形態】

【0009】

本発明は、I C、L S I 等の半導体チップ、液晶パネル等の表示素子、磁気ヘッド等の検出素子、C C D 等の撮像素子といった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原版のデータ（マスクパターン）を生成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。本発明は、例えば、開口数（N A）の大きな投影光学系を備える露光装置や投影光学系とウエハとの間を液体で満たす液浸露光装置に用いられる原版のデータ（マスクパターン）を照明するための有効光源の決定方法として使用しうる。

10

【0010】

以下、添付図面を参照して、本発明の実施形態について説明する。なお、各図において、同一の部材には同一の参照番号を付し、重複する説明は省略する。露光装置におけるマスクパターンとウエハパターンの関係は、部分コヒーレント結像の関係にある。部分コヒーレント結像では、マスク面での可干渉性を知るために有効光源の情報が必要となる。ここで、可干渉性とは、マスク面上の距離に応じた干渉の度合いのことであり、いわゆる空間的コヒーレンスを意味する。また、有効光源とは、マスクがないときに、投影光学系の瞳に形成される光強度分布である。すなわち、有効光源を決定することは、照明光学系の瞳面に形成されるべき光強度分布を算出することである。

20

【0011】

有効光源の可干渉性は、さらに T C C（Transmission Cross Coefficient: 相互透過係数）に組み込まれる。T C C は、投影光学系の瞳面で定義され、有効光源、投影光学系の瞳関数、そして、投影光学系の瞳関数の複素共役の重なり部分である。投影光学系の瞳面上の点の座標を（f, g）とし、有効光源を表現する関数を S（f, g）とし、瞳関数を P（f, g）とすれば、T C C は、数式 1 のように表すことができる。ただし、数式 1 において、* は複素共役を表し、積分範囲は - から までである。

【数 1】

$$TCC(f', g', f'', g'') = \iint S(f, g) P(f + f', g + g') P^*(f + f'', g + g'') df dg \quad (1)$$

30

【0012】

瞳関数は、投影光学系の瞳面を表す関数で、瞳の形状、大きさ、収差等の情報を持つ。投影光学系の収差、照明光の偏光、レジスト情報等は瞳関数 P（f, g）に組み込むことができるので、本明細書では、単に瞳関数と記述した場合に偏光、収差、レジスト情報を含むことがある。数式 1 に示したように、本来 T C C は 4 次元関数であるが、本文では単に T C C と略記することもある。T C C を用いて空中像を表現する関数 I（x, y）を求めるには、投影光学系の瞳面におけるマスクパターンのスペクトル分布（回折光分布）を表現する関数 a（f, g）を用いて、数式 2 のように 4 重積分すればよい。マスクパターンの回折光分布 a（f, g）は、マスクパターンを表現する関数 m（x, y）をフーリエ変換した関数 F（m（x, y））である。ただし、数式 2 において、* は複素共役を表し、積分範囲は - から である。M. Born, E. Wolf 著, 「Principles of Optics」, Cambridge University Press, 1999 年, 7th (extended) edition, p. 554 - 632 には、数式 2 の詳しい説明がある。

40

【数 2】

$$I(x, y) = \iiint TCC(f', g', f'', g'') a(\underline{f'}, \underline{g'}) a^*(\underline{f''), \underline{g''}}) \\ \times \exp\{-i2\pi[(f' - f'')x + (g' - g'')y]\} df' dg' df'' dg''$$

【0013】

数式 2 すなわち空中像を表現する関数 $I(x, y)$ を離散化した変数であらわし、変形すると数式 3、数式 4 のようになる。数式 4 において、 F^{-1} は逆フーリエ変換を表す。

【数 3】

$$I(x, y) = \sum_{f', g'} Y_{f', g'}(x, y) \quad (3)$$

10

【数 4】

$$Y_{f', g'}(x, y) = a(f', g') \exp[-i2\pi(f'x + g'y)] \\ \times F^{-1} [W_{f', g'}(f'', g'') a^*(f'', g'')] \quad (4)$$

20

【0014】

$W_{f', g'}(f'', g'')$ は、ある固定された座標 (f', g') に対して、数式 5 で定義される。

【数 5】

$$W_{f', g'}(f'', g'') = TCC(f', g', f'', g'') \quad (5)$$

【0015】

フーリエ変換と逆フーリエ変換は交換可能に使用されることがあるので、以下のように言い換えてよい。すなわち、 $Y_{f', g'}(x, y)$ は、有効光源を表現する関数と、瞳関数もしくは瞳関数の複素共役関数とのコンボリューション積分に、回折光分布もしくは回折光分布の複素共役関数を掛けて、フーリエ変換もしくは逆フーリエ変換したものである。さらに、足し算の順序を変更すれば、 $Y_{f', g'}(x, y)$ は数式 6 で記述できる。

30

【数 6】

$$Y_{f', g'}(x, y) = a^*(f', g') \exp[i2\pi(f'x + g'y)] \\ \times F [W_{f', g'}(f'', g'') a(f'', g'')] \quad (6)$$

40

【0016】

$(f', g') = (0, 0)$ のとき、投影光学系の瞳関数と有効光源が重なるため $W_{0, 0}(f'', g'')$ が全ての 2 次元相互透過係数の中で一番大きな影響を持つことは明らかである。これを近似空中像と呼ぶ。

【0017】

数式 6 の近似空中像と数式 5 をもちいて、次のような式で有効光源を決定することができる。 (f'', g'') を (f, g) と記述し、瞳関数を $P(f, g)$ 、有効光源を $S(f, g)$ 、回折光分布を $a(f, g)$ として表記すると数式 7 又は数式 8 のようになる

50

。瞳関数の位相が考慮されているので、収差のある場合を取り扱うことができる。

【数 7】

$$S(f, g) = 1/P(f, g) \times F[r^*(x, y)/F[P^*(f, g)]]^{(7)}$$

【数 8】

$$S(f, g) = 1/P^*(f, g) \times F^{-1}[r(x, y)/F[P(f, g)]]^{(8)}$$

【0018】

10

ここで、投影光学系の像面における像を表す像関数 $r(x, y)$ を定義する。数式 5、数式 6 を解くと数式 9 のようになり、像関数 $r(x, y)$ は、数学的には数式 9 を用いて求めることもできる。

【数 9】

$$r(x, y) = F\left[\frac{1}{a(f, g)} F^{-1}\left[\frac{I(x, y)}{F[a(f, g)]}\right]\right]^{(9)}$$

【0019】

20

数式 9 において、像関数 $r(x, y)$ は、近似空中像 $I(x, y)$ と回折光分布 $a(f, g)$ を用いた関数である。近似空中像がどのくらいの範囲まで有効な値を持つかは投影光学系のインパルス応答である $F[p(f, g)]$ で決まっている。投影光学系を通過する光（原版を照明する光）の波長を、投影光学系の開口数を NA とすると、近似空中像の有効な値の範囲は、 $F[p(f, g)]$ の原点から第二のゼロ点までの範囲内の約 $(7.016(\lambda/NA)/(2))$ までである。したがって、約 $1.12(\lambda/NA)$ 以下が像関数 $r(x, y)$ の有効な範囲である。収差がある場合はこの長さは多少変化するが、これを応答の長さとする。有効光源 $S(f, g)$ は像関数 $r(x, y)$ を解像するための光源である。すなわちこの方法は、応答の長さ以下にある近接した物体を解像する光源を求めるものである。また、光学系の解像が可能な範囲 $0.5(\lambda/NA)$ より大きくなければならないことは言うまでもない。

30

【0020】

目標パターンの相対的な位置関係のうち、最小構造が解像できれば目標パターン全体が解像できる。目標パターンが周期パターンであれば応答の長さ以下の範囲の最小単位構造だけを考えればよいことになる。周期性を複数含む一般的なパターンにおいても像関数 $r(x, y)$ は上記の有効な範囲内に近接したパターンを取り出して考えればよい。なお、像面上の長さは物体面上の長さに投影光学系の倍率をかけて表す。倍率が 1 以外の場合は、像面上の長さとして物体面上の長さはその倍率だけ違う。そのため、倍率が 1 以外の場合は、目標パターンが周期パターンであれば応答の長さに倍率を考慮した長さ以下の範囲の最小単位構造だけを考えればよいことになる。

【0021】

40

数式 9 において近似空中像 $I(x, y)$ は光源が決まらなければ正確に求められないが、ここでは、目標パターンそのもの又は目標パターンの一部の像と等しいと仮定して像関数を求めてもよい。また、回折光分布 $a(f, g)$ は実際にはマスクパターンの回折光分布を求めるべきであるが、目標パターンの回折光分布に等しいと仮定して像関数を求めることにした。以下、像関数を算出する具体的手法について説明する。

【0022】

〔像関数の第 1 の算出手法〕

第 1 の手法では、像関数 $r(x, y)$ を、目標パターン全体の相対的な位置関係におけるパターンの最小単位であると仮定する。具体的には、目標パターンを構成する要素の中で互いに隣接する要素の間隔が応答の長さ以下の要素のみを抽出し、当該抽出されたパタ

50

ーンを示す関数を像関数として決定する。目標パターンが1つの周期性しか有さない周期パターンであれば、数式9における像関数 $r(x, y)$ の替わりにこの手法で決定された像関数を用いて、有効光源 $S(f, g)$ を決定することができる。

【0023】

[像関数の第2の算出手法]

第1の手法において注意すべき点は、パターンの周期性に関し、目標パターンにおけるパターン間の間隔が常に1周期であるとは限らないということである。パターン間の間隔は、 n 倍 (n は正の整数) の周期を含んでいるからである。パターンの周期性は周波数空間で表現できるものであるから、回折光分布を求めれば最小周期構造がわかるはずである。しかし回折光分布をフーリエ変換して像面上の周期性に換算しても、一般的には、正負の回折光がキャンセルしあって最小周期構造が消失してしまう。そこで、回折光の同位相のものを抽出し、 $2NA/\lambda$ の領域まで含めてフーリエ変換して、像面上の最小周期構造を打ち消さないようにして周期性を求め、前記範囲内に隣接するパターンの空中像を抜き出したものを像関数 $r(x, y)$ と定義する。第2の手法は第1の手法を任意パターンまで拡張したものである。

【0024】

図1Bを用いて、像関数の第2の算出手法について説明する。像関数を算出するコンピュータに入力すべき情報は、目標パターンデータそのもの又はその一部と、露光光の波長及び投影光学系の開口数 NA である。コンピュータはその入力情報に基づいてパターンの周期性を算出する。コンピュータは、まず処理11において、目標パターンによる回折光の分布を算出する。コンピュータは、次の処理12において、瞳半径の2倍の範囲の同位相の周波数成分を抽出し、抽出された周波数成分をフーリエ変換する。コンピュータは、処理12において同位相の周波数成分を抽出するため、ある値以上 (又はある値以下) の周波数成分のみを抽出する。コンピュータは、処理13において、フーリエ変換された後の像から、投影光学系の光軸を中心とし直径が応答の長さ約 $1.12 \times (\lambda / NA)$ 以下の円で囲まれる範囲におけるピーク位置を求める (ピッチサンプリング)。コンピュータは、処理14において、目標パターンを構成する要素の形状を表す関数を設定する。形状を表す関数は、目標パターンの一要素の形状そのものを表す関数でもいいし、目標パターンの一要素の形状を何らかの例えばガウス分布等の関数で近似してもいい。形状を表す関数は、目標パターンの一要素を予め設定した光源と投影光学系の波長と投影光学系の開口数とから結像計算によって求めた強度分布から定義してもいい。コンピュータは、処理15において、処理13で抽出されたピーク位置の各点に、処理14において設定した目標パターンの一要素の形状を表す関数を畳み込んで、ピーク位置各点すべてにおいて足し合わせて像関数を算出する。

【0025】

[像関数の第3の算出手法]

第3の手法では、コンピュータは、数式9において、目標パターンの空中像を $I(x, y)$ として投影光学系の光軸を中心とし、目標パターンの回折光の分布を $a(f, g)$ として像関数を算出する。空中像 $I(x, y)$ は光源が決定していないと求められない。そのため、目標パターン又はその一部を空中像として置き換える。具体的には、数式10

【数10】

$$r(x, y) = F \left[\frac{1}{a(f, g)} F^{-1} \left[\frac{I(x, y)}{F[a(f, g)]} \right] \right]$$

の右辺に、目標パターン又はその一部の像で置換された空中像 $I(x, y)$ と目標パターン又はその一部の回折光の分布 $a(f, g)$ とを代入して像関数 $r(x, y)$ を算出する。像関数 $r(x, y)$ は投影光学系の光軸を中心とし直径が応答の長さ約 $1.12 \times (\lambda / NA)$ 以下の円で囲まれる範囲においてのみ値を持ち、応答の長さより大きい位置ではゼロとする。

10

20

30

40

50

【 0 0 2 6 】

この場合、空中像 $I(x, y)$ と回折光分布 $a(f, g)$ はあくまでも近似なので、これらの設定により、求められた有効光源が変わる不安定性がある。しかしながら、第2、第3の像関数を求めるための方法は、任意のパターンにおいて広く一般化した方法である。

【 0 0 2 7 】

[有効光源の決定]

図1Aは、照明光学系の瞳面に形成すべき光強度分布を算出する、すなわち、有効光源を決定するための方法を示す概略ブロック図であって、プログラムによってコンピュータに実行させる。図1Aの有効光源を決定する方法は数式8に基づく。処理1において、コンピュータは、前記第1～第3の手法を用いて像関数を算出する。処理2において、コンピュータは、投影光学系の瞳関数をフーリエ変換する。瞳関数をフーリエ変換した関数は、投影光学系のインパルス応答（インパルス応答関数）である。ここでインパルス応答の第二のゼロ点までの長さを応答長さとして求めておく。コンピュータは、処理2において、投影光学系の像面における座標を $(NA/)$ で割ることにより投影光学系の瞳面における座標で置き換える。また、コンピュータは、処理2において、フーリエ変換の結果ゼロのインパルス応答が算出された点の算出値をゼロではない有限の値に置き換えておく。

【 0 0 2 8 】

処理3において、コンピュータは、処理1で算出された像関数を処理2で算出されたインパルス応答で除算する除算処理を行い、当該除算処理がなされた関数を逆フーリエ変換する。処理4において、コンピュータは、処理3で逆フーリエ変換された関数を瞳関数の複素共役関数で除算する除算処理を行って、有効光源を取得する。処理4において、コンピュータは、処理3によって得られた分布の実部を取り、マイナスの強度をすべてゼロに置き換える。なお、照明光学系の NA_s と投影光学系の NA との比を考慮して、この比をこえる光源分布をゼロに置き換えてもいい。なお、除算の計算は結果的に除算が行われれば良く、コンピュータの演算回路において除算処理を行うこと、例えば、演算回路によるビットシフトも含む。以下同様。

【 0 0 2 9 】

たとえば図2Aのようなパターンの場合を例にして、説明する。原版を照明する ArF の波長 λ が 193 nm 、投影光学系の NA が 1.35 、目標パターン間の中心距離（ピッチ）が 130 nm 、目標パターン1辺の大きさが 65 nm であるとした。応答長さは約 160 nm である。処理1で、像関数の第1の算出手法を用いて、コンピュータがパターンの中心位置の間隔が 160 nm 以下の目標パターンを抽出して算出した像関数は図2Bのようになる。処理2により、コンピュータが算出した投影光学系のインパルス応答は、図2C、2Dのようになる。図2Cは、投影光学系のインパルス応答の2次元強度分布で、図2Dはその1次元断面である。処理3、4により、コンピュータは図2Eのような有効光源を取得する。この場合、照明光学系の NA_s と投影光学系の NA との比は1とした。このようにして、図2Aのような目標パターンに適した光源は図2Eのような有効光源布、すなわち4重極に分布した照明が得られる。この結果はよく知られたものと一致する。このようにして得られた光源と目標パターンとから、マスクパターンデータを作成することもできる。マスクパターン作成の方法は、特開2008-040470号公報に開示されている。

【 0 0 3 0 】

以下、これらの処理の詳細について、実施例を用いて説明する。実施例において、露光装置は投影光学系の NA が 1.35 であり、露光光の波長が 193 nm である。また、マスクパターンの長さは、投影光学系の倍率をかけた像面上の長さで表すものとする。光源はすべて、瞳上での有効光源で示され、瞳の半径を1として示してある。また、投影光学系と照明光学系の NA 比は以後、すべて1とする。また、目標パターンのハーフピッチ $HP(\text{nm})$ を、露光光の波長 $\lambda(\text{nm})$ 、 NA で規格化して $k_1 = HP(\text{nm}) / (\lambda(\text{nm}) / NA)$ であらわすことにする。

【 0 0 3 1 】

[実施例 1]

図 3 A ~ 3 F を用いて、有効光源を決定する方法の実施例 1 について説明する。図 3 A は基板上に形成されるべき目標パターンを示している。ここでは、目標パターンの最小のハーフピッチ HP を 65 (nm) とする。露光光の波長 $\lambda = 193 \text{ (nm)}$ 、 $NA = 1.35$ で規格化すると、目標パターンのハーフピッチは $k_1 = 0.45$ である。マスクはハーフトーン位相シフトマスクを仮定し、パターンの透過率を 1、パターンの周囲の透過率を 6% とした。ここでは、パターンとパターンの周囲との位相差は (rad) である。目標パターンは横方向に密集したホールと孤立状のホールが交互に並んでいる。単純な周期パターンでなく孤立状のホールを含み、孤立状のホールと密集したホールとの大きさのバ

10

【 0 0 3 2 】

図 3 B は、数式 9 を用いる像関数の第 3 の算出手法で求めた像関数の分布を示す。この像関数と図 2 C, 2 D で示したような投影光学系のインパルス応答を数式 8 (又は数式 7) に適用することにより導き出された、目標パターンの解像に適した有効光源を図 3 C に示す。

【 0 0 3 3 】

次に、像関数の求め方、有効光源の求め方を説明する。近似空中像を目標パターンそのものとし、回折光分布を目標パターンから求めたものを使用して、像関数を数式 9 より求めた。瞳関数のフーリエ変換したインパルス応答は図 2 C, 2 D で示される。瞳が円形で無収差ならば、瞳関数をフーリエ変換するとベッセル関数となる。図 2 C はインパルス応答の 2 次元的な分布を示し、図 2 D はインパルス応答の 1 次元断面の分布を示す。インパルス応答がゼロとなる点を、ゼロでない、ゼロ近傍の有限の値で置き変えておく。このようにして、図 3 B のような像関数の分布が得られる。求められた像関数をインパルス応答で割って逆フーリエ変換し、瞳関数の複素共役関数で割ったものを有効光源とする。このようにして、図 3 C のような有効光源が得られた。

20

【 0 0 3 4 】

次に第 2 の算出手法による像関数を導出し、有効光源を求めて前者の第 3 の算出手法による結果と比較する。第 2 の算出手法による像関数の導出方法は実施例 2、3 でくわしく説明するので、ここでは結果のみを示す。この像面上のピッチサンプリングは図 3 D のようになっている。ピッチサンプリングは後述するようにパターンの周期性を表す分布から求めている。この分布から明るいピーク位置を抽出して周期性を得るが、位相シフトマスクの場合は暗いピークが顕著であり、暗いピーク位置を抽出しても周期性は得られる。図 3 D においては明るいピーク位置を、暗いピーク位置を で示した。周期性はどちらを考慮しても同じである。パターン要素の形状を表す関数は円形の分布を仮定した。

30

【 0 0 3 5 】

求められた像関数は図 3 E で表される。図 3 D のような像面上のピッチサンプリングを示す図と、図 3 B, 図 3 E のような像関数を示す図の縦軸と横軸はすべて像面上の長さ (nm) で示している。コンピュータは、像関数をインパルス応答で割り、逆フーリエ変換して、瞳関数の複素共役関数で割った。そしてマイナスの強度すべてをゼロとして有効光源を算出した。算出された有効光源は、図 3 F で表される。図 3 C, 図 3 F の縦軸と横軸は規格化した瞳面上での座標を示している。

40

【 0 0 3 6 】

第 2、第 3 の手法の像関数を比較すると、画素数を上げて画像を細かくしていくとよく似た分布となる。したがって、図 3 C, 図 3 F の光源分布においても非常によく似た光源分布となる。それぞれを結像シミュレーションで確認したが、ほぼ同等の性能が得られている。

【 0 0 3 7 】

50

次にマスクパターンを目標パターンと同じものとして、結像シミュレーションにより効果を検証する。図3Aに示される目標パターンと同じマスクパターン(図4A)を露光光の波長 $\lambda = 193 \text{ (nm)}$ 、 $NA = 1.35$ の露光装置で、図3Cまたは図3Fの有効光源を照明条件とした照明光で結像させると、図4Bのような像が得られる。光源の偏光分布は無偏光とした。図4Bは基準パターンの横方向の幅が 65 (nm) となるような強度値とその $\pm 10\%$ の強度値をスライスレベルとした強度分布の等高線である。その結果、コントラスト、形状再現性がよく、結果は省略するがフォーカス特性も非常に優れていることが確認された。

【0038】

[実施例2]

次は実施例1と同様なパターンの例を用いて有効光源を決定する方法を説明する。図5Aは基板上に形成されるべき目標パターンを示している。ここでは、目標パターンの最小のハーフピッチ $HP = 50 \text{ (nm)}$ とする。すなわち、露光光の波長 $\lambda = 193 \text{ (nm)}$ 、 $NA = 1.35$ から、目標パターンのハーフピッチは $k_1 = 0.35$ である。マスクはバイナリマスクを仮定し、パターンの透過率を1、パターンの周囲の透過率をゼロとした。図5E、Fは、図1Bで示される像関数の第2の算出手法により導き出された像関数と有効光源を示す。図5Eは像関数を示し、図5Fは有効光源を示す。

【0039】

第2の算出手法による像関数の導出方法について詳しく説明する。目標パターンからピッチサンプリングを求めるために、コンピュータは目標パターンの回折光の分布を求めた。目標パターンの回折光の分布を図5Bで示す。ここで、コンピュータは、回折光のある値以上の同位相のものを抽出し、 $2NA/\lambda$ の領域まで含めてフーリエ変換して、像面上の周期性を求めた。あるいは、回折光分布のある値以下の負の同位相のものを抽出することによって、周期性を求めてもよい。コンピュータは、回折光のフーリエ変換像からピーク位置を求め、これらのピーク位置のうち設定された範囲内のサンプリング点を抽出して、像面上のピッチサンプリングを得た。この像面上のピッチサンプリングは図5Cのようになっている。像面上のピッチサンプリングを示す図の縦軸と横軸はすべて、像面上の長さ (nm) で示している。

【0040】

次に、コンピュータは像関数を求めた。形状を表す関数として、ここでは図5Dのような円形の分布を仮定した。これをピッチサンプリングにコンボリューションして求められた像関数は図5Eで表される。コンピュータは、像関数をインパルス応答で割り、逆フーリエ変換して、瞳関数の複素共役関数で割った。そしてマイナスの強度すべてをゼロとして有効光源を算出した。算出された有効光源は、図5Fで表される。図5Cから図5Eの縦軸と横軸はすべて、像面上の長さ (nm) を示している。図5B、Fの縦軸と横軸は規格化した瞳面上での座標を示している。

【0041】

次に、像面上に目標パターンを結像させるためのマスクパターンを作成する。まず、目標パターンと同じものをマスクパターン(図6B)とした場合の空中像を計算した。照明条件は図6Aのようなものとした。すなわち照明条件は、得られた光源分布(図5F)の各要素が接線方向に偏光方向を持つ、いわゆるタンジェンシャル偏光とした。タンジェンシャル偏光は図6Aのような図中の矢印の方向を偏光方向とした偏光の分布をもつ。図6Bのマスクパターンを、露光光の波長 $\lambda = 193 \text{ (nm)}$ 、 $NA = 1.35$ の露光装置で結像させると、得られた空中像は図6Cのようになった。図6Cでは、マスクパターンが目標パターンと同じであると、光近接効果によりホール形状が縦長に歪んだり孤立部分と密集部分の大きさが異なるなどのバランスの悪さが目立つ。そこで、孤立部分と密集部分とのバランスを良くするために、図5Fの有効光源が及ぼす近接効果を考慮して、図5Aの目標パターンに近接効果補正をおこなうことによってマスクパターンを作成する。この方法は特開2008-040470号公報に開示されている。たとえば、目標パターンと光源とから、2D-FTCCにより近似空中像を計算し、その近似空中像より主パターンを

10

20

30

40

50

形状変形（またはバイアス補正）し、補助パターンを加え、マスクパターンを作成する。このようにして得られたマスクパターンは図 6 D のようになった。この図 6 D のマスクパターンを露光光の波長 $\lambda = 193 \text{ (nm)}$ 、 $NA = 1.35$ の露光装置で、図 6 A のような照明条件を用いて結像させると、図 6 E のような像が得られた。図 6 C、E はある基準パターンの横方向の幅が 50 (nm) となるような強度値とその $\pm 10\%$ の強度値をスライスレベルとした強度の等高線である。また、図 6 B、D の縦軸と横軸は像面上の長さ (nm) に換算してある。

【0042】

ここで、像面上に得られた像は、孤立部分と密集部分とのバランスがよく、形状、大きさともに均一な像が得られる。結果は示さないが、デフォーカスすると前者との差が顕著になる。他の照明条件、ホールの照明条件としてよく用いられる 4 重極タイプの照明条件と比べても深度が大きく得られている。特開 2008-040470 号公報のような目標パターンからマスクパターンを求める方法において、光源分布は先に与えられていた。しかし、本特許のような光源を求める本方法が加わるなら、目標パターンから直接、光源を得、さらに前記公報の方法でマスクパターンを求めることができる。したがって、本方法は目標パターンからマスクパターンを求めるための初期光源生成の方法と考えられる。

【0043】

[実施例 3]

次はブリックウォール（煉瓦壁）パターンの例を用いて有効光源を決定する方法を説明する。図 7 A は基板上に形成されるべき目標パターンを示している。ここでは、目標パターンの横方向のハーフピッチ $HP = 60 \text{ (nm)}$ 、縦方向のハーフピッチ $HP = 150 \text{ (nm)}$ とする。パターンの大きさは横が 60 (nm) 、縦が 240 (nm) である。すなわち、露光光の波長 $\lambda = 193 \text{ (nm)}$ 、 $NA = 1.35$ から、目標パターンの最小のハーフピッチは $k_1 = 0.42$ である。マスクはバイナリマスクを仮定し、パターンの透過率を 1、パターンの周囲の透過率をゼロとした。

【0044】

ここでは処理 1 として、像関数を図 1 B で示される第 2 の算出手法で求めた。図 1 B の処理 1 4 において、目標パターンを構成する要素の形状を表す関数を、楕円の形状になると仮定したものと、円形状になると仮定したものとを比較した。像関数を求めてから、図 1 A における処理 2、3、4 を行い、有効光源をそれぞれ求めた。図 7 B はパターン要素を楕円の形状で仮定したもの、図 7 C はパターン要素を円の形状で仮定したものから得られた有効光源である。

【0045】

これらの光源により、目標パターンがどのように結像されるか調べた。マスクパターンを図 7 A の目標パターンと同じものとし、図 7 B、7 C の有効光源を照明条件とした露光装置で、結像させた。照明条件の偏光分布は得られた有効光源の各要素が接線方向に偏光方向を持つ、すなわちタンジェンシャル偏光とした。図 7 B、7 C の有効光源から得られた 2 次元像は、図 7 D、7 E のようになった。図 7 D、7 E は基準パターンの横方向の幅が 60 (nm) となるような強度値とその $\pm 10\%$ の強度値をスライスレベルとした強度の等高線である。図 7 B の有効光源から得られた強度分布（図 7 D）のほうがコントラスト、形状再現性がよく、結果は省略するがフォーカス特性も優れていることがわかった。したがって、図 1 B で示される第 2 の算出手法で像関数を求める際、像関数が妥当な分布となるように、目標パターンの形状を表現するような関数を設定する重要性が示唆される。

【0046】

[実施例 4]

投影光学系はデフォーカス収差のみを考慮し、基板（ウエハ）に塗布されるレジストは考慮しないものとする。像面のデフォーカス量は $\text{def} \text{ (nm)}$ とする。この場合、数式 7 または数式 8 における瞳関数 $P(f, g)$ において、収差を考慮すると、収差関数を Δ とし数式 11 のように表すことができる。

10

20

30

40

50

【数 1 1】

$$P(f, g) = \exp[-2\pi i / \lambda \cdot \Phi(f, g)] \quad (11)$$

【0 0 4 7】

例えば、収差としてデフォーカスのみを考えると収差関数 は次のようなものである。ここで、 n は媒質の屈折率を示している。

【数 1 2】

$$\Phi(f, g) = def \cdot n \cdot (1 - \sqrt{1 - (NA/n)^2 (f^2 + g^2)}) \quad (12)$$

10

【0 0 4 8】

収差関数 を Z e r n i k e 係数で展開すると収差関数 は、次のように表すこともできる。瞳の座標を極座標 (,) (0 1, 0 2) とする。

【数 1 3】

$$\Phi(\rho, \theta) = A_{00} + \sum_{n=2}^{\infty} A_{n0} R_n^0(\rho) + \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^n A_{nm} R_n^m(\rho) \cos m\theta \quad (13)$$

ここで、 n 、 m は整数、 $n \geq m \geq 1$ であり、 A_{nm} は係数である。 $R_n^m(\rho) \cos m\theta$ は直交関数系である。

20

【0 0 4 9】

本実施例では、数式 1 1 , 1 2 を用いて、有効光源を決定する。図 9 A は基板上に形成されるべき目標パターンを示している。ここでは、目標パターンの最小のハーフピッチ H_P を 65 (nm) とする。露光光の波長 $\lambda = 193$ (nm)、 $NA = 1.35$ で規格化すると、目標パターンのハーフピッチは $k_1 = 0.45$ である。マスクはハーフトーン位相シフトマスクを仮定し、パターンの透過率を 1、パターンの周囲の透過率を 6% とした。ここでは、パターンとパターンの周囲との位相差は (rad) である。パターンを示す図の縦軸と横軸はすべて像面上の長さに換算した長さ (nm) で示してある。以下すべて、横軸を X 軸、縦軸を Y 軸とする。

【0 0 5 0】

30

デフォーカス収差を考慮して目標パターンから光源分布を算出する。像関数の算出方法は、上述した第 1 ~ 3 の算出方法のいずれを用いても良い。算出方法 3 を用いた場合、数式 9 における近似空中像 $I(x, y)$ は無収差の場合と異なるべきであるが、無収差の場合と等しいと仮定した。すなわち、近似空中像 $I(x, y)$ は、目標パターンそのもの又は目標パターンの一部の像と等しいと仮定して像関数を求めている。

【0 0 5 1】

求めた像関数から、数式 7 または数式 8 より光源分布を算出する。この際、数式 1 1 の瞳関数をフーリエ変換してインパルス応答を求め、インパルス応答の第二のゼロ点までの長さより応答の長さを求めた。収差のある場合には、収差のない場合と比べて応答の長さが変化している。

40

【0 0 5 2】

デフォーカス収差を考慮した場合と考慮しない場合を比較する。ここで、デフォーカス量として $def = 50$ (nm) を設定した。要求深度の 50% から 70% 程度、すなわち $0.5 / NA^2$ から $0.7 / NA^2$ 程度を設定すると良い。あるいは、インパルス応答の中心強度が周辺強度より落ちない程度の収差にすると良い。この程度の収差であるとき、インパルス応答の第二のゼロ点までの応答の長さは収差のないもののものに代用しても良い。

【0 0 5 3】

図 9 B は、無収差すなわち数式 1 1 において $def = 0$ として、数式 7 (又は数式 8) から算出された光源分布を示している。図 9 C は、前述の光源分布より得られたマスクパターンである。図 9 D は、デフォーカス収差を考慮して、すなわち数式 1 2 において $def = 5$

50

0 (nm)として、数式7(又は数式8)から算出された光源分布を示している。図9Eは、前述の光源分布より得られたマスクパターンである。デフォーカス収差を考慮すると、考慮しなかった場合とは異なる光源分布およびマスクパターンが得られる。

【0054】

次に、これらの光源分布とマスクパターンを用いた結像シミュレーションにより性能を検証する。結像シミュレーションは、露光光の波長 = 193 (nm)、NA = 1.35の露光装置で、図9B又は9Dの有効光源を照明条件とした照明光として、図9C又は9Eに示されるマスクパターンを結像させる。結像シミュレーションは、デフォーカスを変化させておこなった。

【0055】

性能の評価は、デフォーカスを変化させたときの二次元像の線幅(CD)変化を求めることによって行った。まず、ベストフォーカスで得られた空中像から、基準パターンのx方向の幅が65 (nm)となるような強度値を基準スライスレベルとして求めた。次に、各デフォーカスごとに、空中像を基準スライスレベルの等高線により二次元像として求め、その二次元像の線幅(CD)を求めた。このようにして、デフォーカスに対してCDを求め、収差を考慮した光源と収差を考慮しない光源での結像性能を比較する。結果を図10に示す。図10では、デフォーカス収差を考慮した光源とマスクから得られた空中像から求めたCDを黒い線で、デフォーカス収差を考慮しない光源とマスクから得られた空中像から求めたCDを灰色の線で示している。図10に示されるように収差を考慮した光源の方がフォーカスによる変化を受けにくく、すなわちフォーカス特性の優れていることが確認される。結果は示さないが、同じマスクパターンとしても、収差を考慮した光源の方がフォーカス特性の優れていることが確認されている。したがって、収差を考慮した光源分布は、収差による結像性能の低下が緩和されることが示唆される。また、本実施例では、デフォーカス収差を考慮した光源分布を示したが、数式13を用いて、任意の収差関数を用いて光源分布を算出することができる。

【0056】

[露光装置]

図8を参照して、照明光学系から出射された光で原版を照明し、当該照明された原版のパターンを投影光学系を介して基板に投影して基板を露光する露光装置100について説明する。図8は、露光装置100の構成を示す概略ブロック図である。ここで、露光装置100は、照明光学系180において、上述の生成プログラムを実行して生成された有効光源データに対応した有効光源を形成する。露光装置100は、上述の生成プログラムを実行して生成された光源のデータに基づいて作成されたマスク120を照明する。露光装置100は、本実施形態では、ステップ・アンド・スキャン方式でマスク120のパターンをウエハ140に露光する投影露光装置である。但し、露光装置100は、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。露光装置100は、図8に示すように、照明装置110と、マスク120を支持するレチクルステージ(不図示)と、投影光学系130と、ウエハ140を支持するウエハステージ(不図示)とを有する。照明装置110は、転写用の回路パターンが形成されたマスク120を照明し、光源160と、照明光学系180とを有する。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エキシマレーザ等のエキシマレーザを使用する。但し、光源160は、エキシマレーザに限定されず、波長約157 nmのF2レーザや狭帯域化した水銀ランプ等を使用してもよい。

【0057】

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り、本実施形態では、上述の生成プログラムを実行して生成された有効光源データに対応した有効光源を形成して、マスク120を照明する。照明光学系180は、引き回し光学系181と、ビームを整形する光学系182と、偏光制御部183と、位相制御部184と、射出角度を保存する光学素子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18

10

20

30

40

50

9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。引き回し光学系181は、光源160からの光を偏向してビームを整形する光学系182に導光する。ビームを整形する光学系182は、光源160からの光の断面形状の寸法の縦横比率を所望の値に変換して（例えば、断面形状を長方形から正方形にして）、光源160からの光の断面形状を所望の形状に整形する。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。

【0058】

偏光制御部183は、直線偏光子等で構成され、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望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。射出角度を保存する光学素子185は、例えば、オブティカルインテグレータ（複数の微小レンズより構成されるハエの目レンズやファイバー束等）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、射出角度を保存する光学素子185から射出した光を多光束発生部187に集光する。射出角度を保存する光学素子185の射出面と多光束発生部187の入射面は、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ブティカルインテグレータ（複数の微小レンズより構成されるハエの目レンズやファイバー束等）で構成される。多光束発生部187の射出面は、複数の点光源からなる光源面を形成する。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。

【0059】

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望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である計算機ホログラム189に入射する。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、前後を入れ替えても良い。また、偏光状態調整部をSWS（Sub Wavelength Structure、サブ波長構造）で構成し、回折光学素子と一体的に構成されていてもよい。つまり、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ように形成することができる。円偏光の光が入射されたとき、偏光状態調整部188を通過した光は所望の偏光方向を有する直線偏光に変換され、計算機ホログラム189の所定の部分に入射し、任意の偏光方向を持った任意の光源分布が形成される。

【0060】

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、タンジェンシャル偏光をもつ有効光源等の所望の光強度分布を形成する。また、計算機ホログラム189は、輪帯照明や4重極照明等を形成することも可能であり、偏光状態調整部188とあわせて、タンジェンシャル偏光やラディアル偏光等の所望の光偏光分布を実装することができる。これらの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、ターレット等の切り替え部に配置される。また、偏光状態調整部188も切り替え可能である。そして、上述した処理装置1によって生成された有効光源データ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、種々の有効光源を実表することができる。

【0061】

アパーチャ191は、計算機ホログラム189によって形成される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面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によって形成される光強度分布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（有効光源分布）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等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等を有し、多光束発生部 193 の射出面に形成される有効光源分布でマスク 120 を照明する。

【0062】

マスク 120 は、上述した処理装置 1 によって生成されたマスクデータに基づいて作成され、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 から発せられた回折光は、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。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。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 の代わりにガラスプレートやその他の基板を用いることもできる。ウエハ 140 には、フォトレジストが塗布されている。露光において、光源 160 から発せられた光は、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 上に結像する。この際、上述した処理装置 1 によって生成されたマスクデータに基づいて作成されたマスク 120 は、上述した処理装置 1 によって生成された有効光源データに対応する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 等）、薄膜磁気ヘッド等）を多重露光により提供することができる。

【0063】

〔デバイス製造方法〕

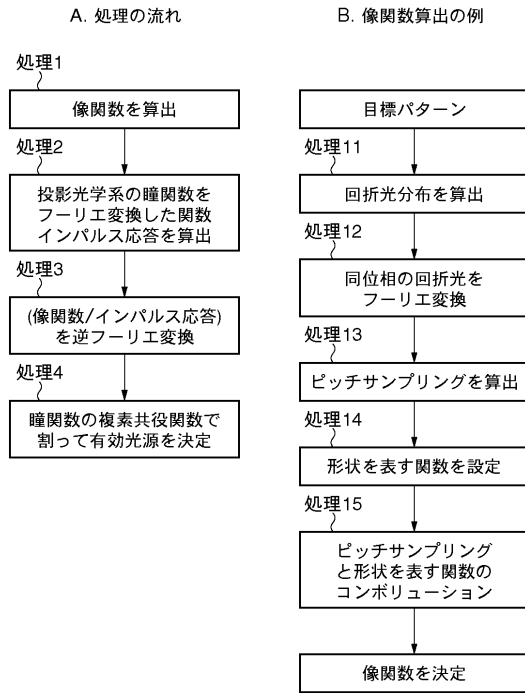
つぎに、本発明の一実施形態のデバイス（半導体デバイス、液晶表示デバイス等）の製造方法について説明する。ここでは、半導体デバイスの製造方法を例に説明する。半導体デバイスは、ウエハに集積回路を作る前工程と、前工程で作られたウエハ上の集積回路チップを製品として完成させる後工程を経ることにより製造される。前工程は、前述の露光装置を使用して感光剤が塗布されたウエハを露光する工程と、ウエハを現像する工程を含む。後工程は、アッセンブリ工程（ダイシング、ボンディング）と、パッケージング工程（封入）を含む。なお、液晶表示デバイスは、透明電極を形成する工程を経ることにより製造される。透明電極を形成する工程は、透明導電膜が蒸着されたガラス基板に感光剤を塗布する工程と、前述の露光装置を使用して感光剤が塗布されたガラス基板を露光する工程と、ガラス基板を現像する工程を含む。本実施形態のデバイス製造方法によれば、従来よりも高品位のデバイスを製造することができる。

【0064】

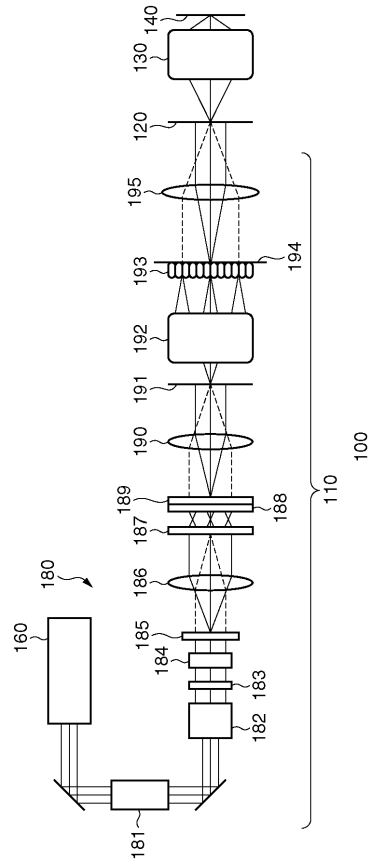
〔その他の実施形態〕

また、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記憶媒体を介してシステム或いは装置に供給し、そのシステム或いは装置のコンピュータ（または 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。この場合、そのプログラム、及び該プログラムを記憶した記憶媒体は本発明を構成することになる。以上、本発明の好ましい実施例について説明したが、本発明はこれらの実施例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。

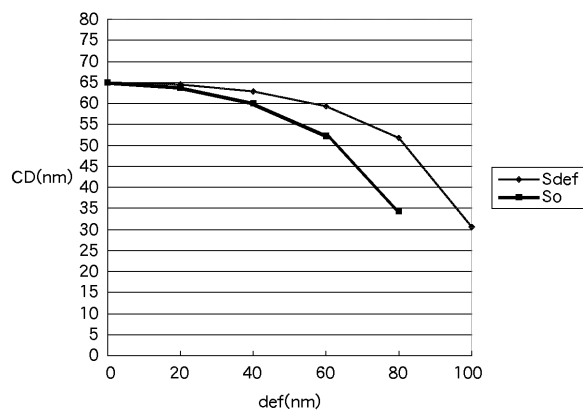
【図 1】



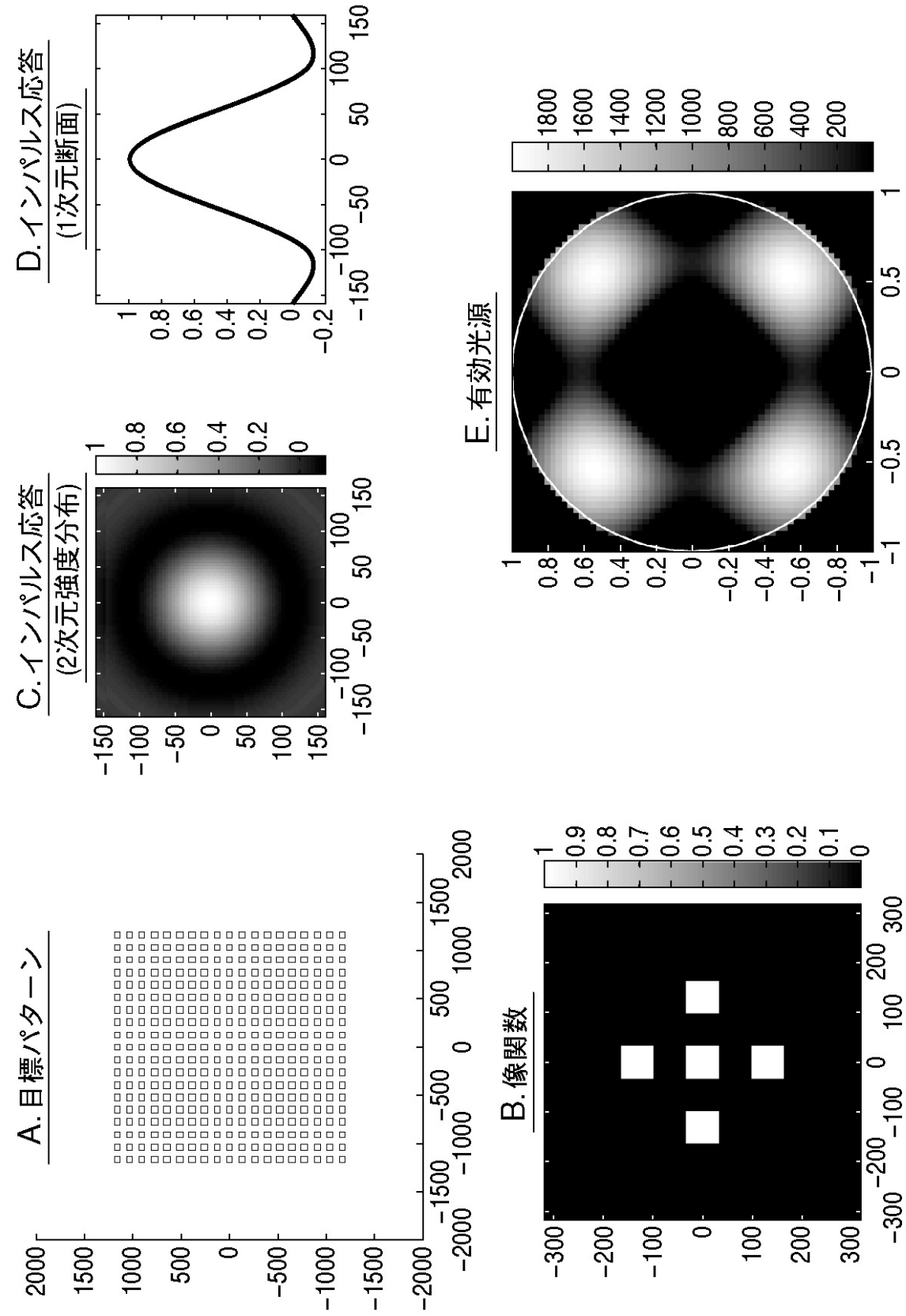
【図 8】



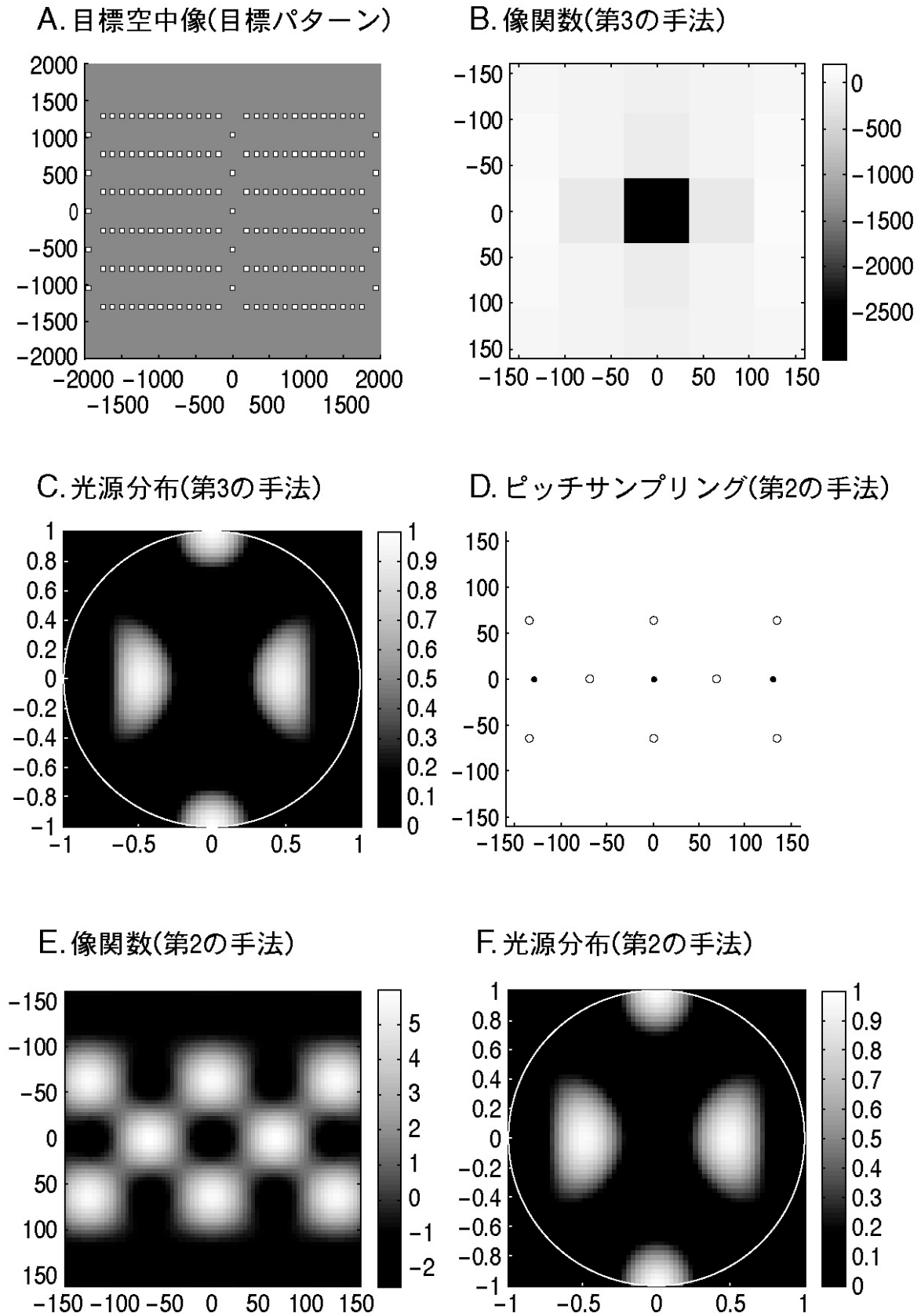
【図 10】



【 図 2 】

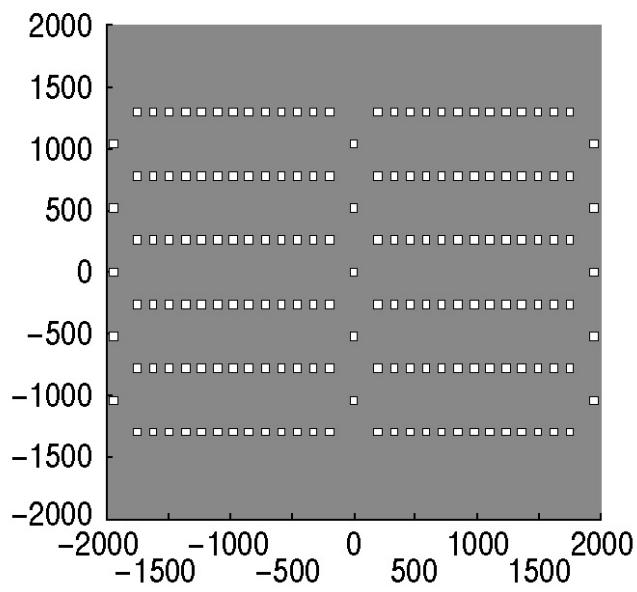


【図3】

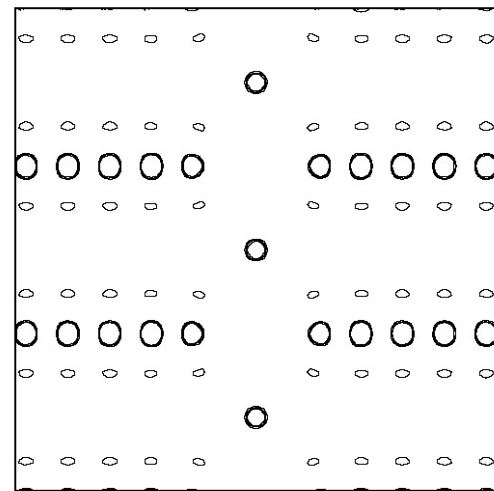


【図 4】

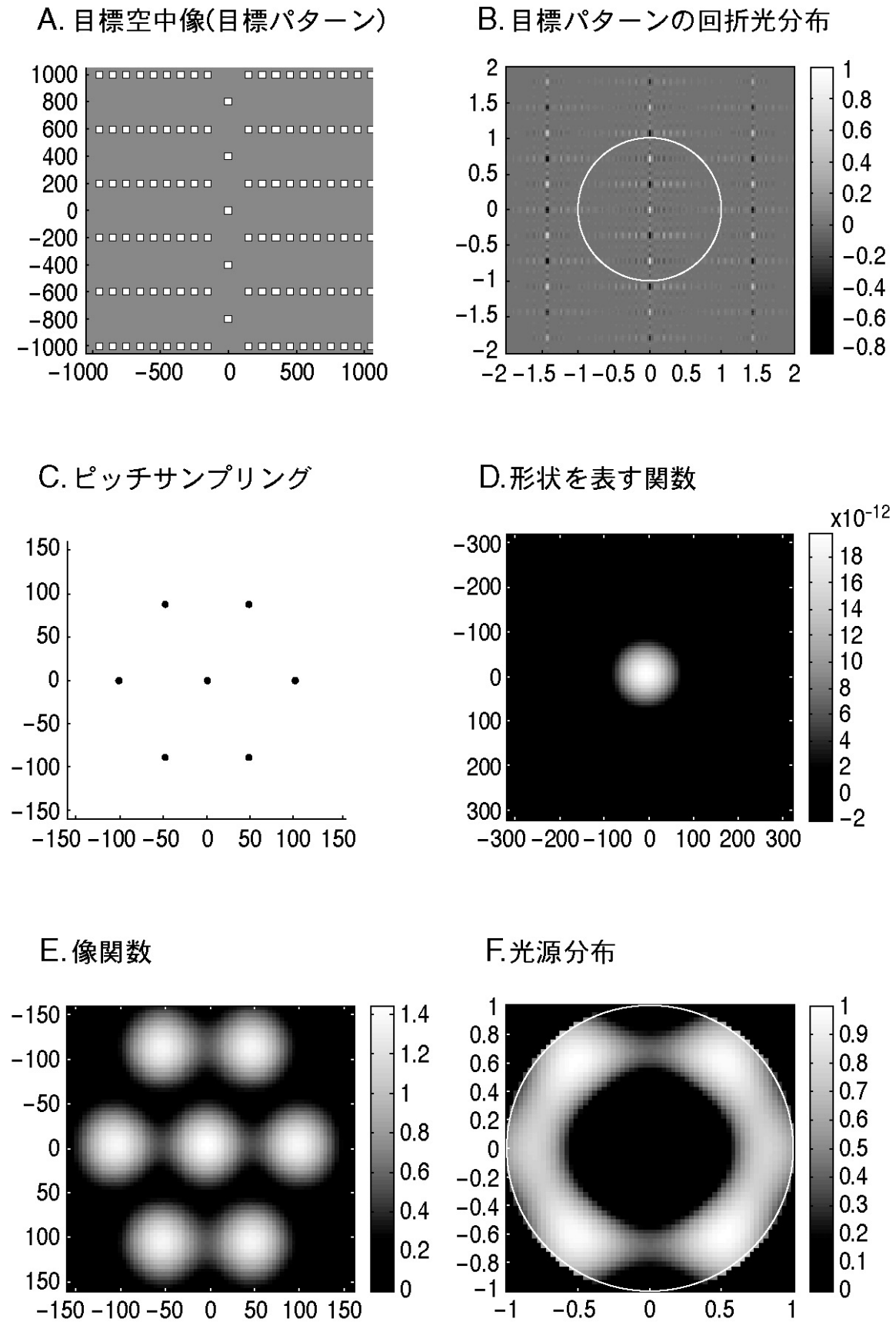
A. マスクパターン



B. 空中像

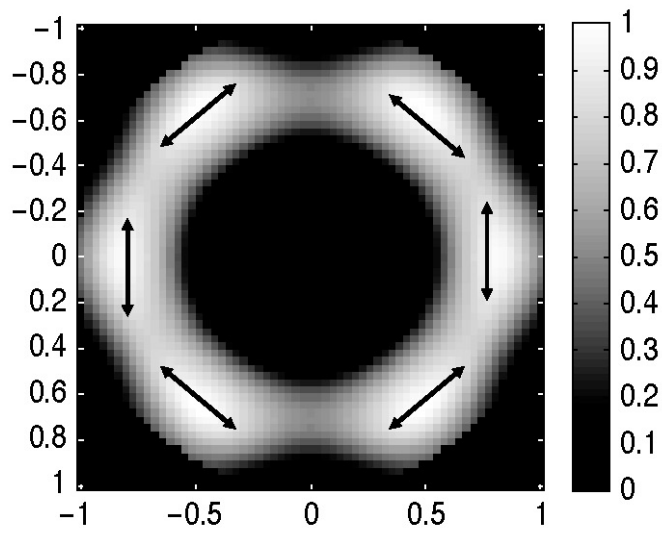


【図5】

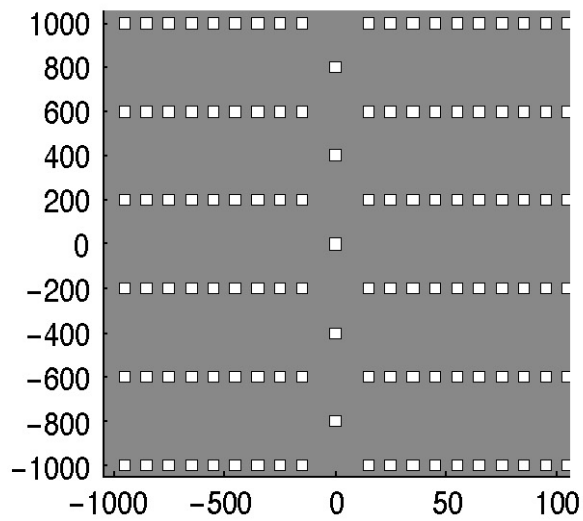


【図6】

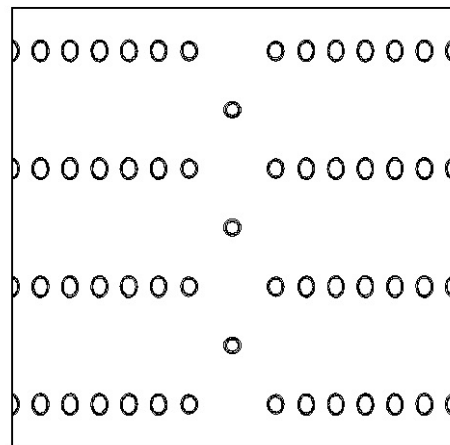
A. 照明光源(強度と偏光分布)



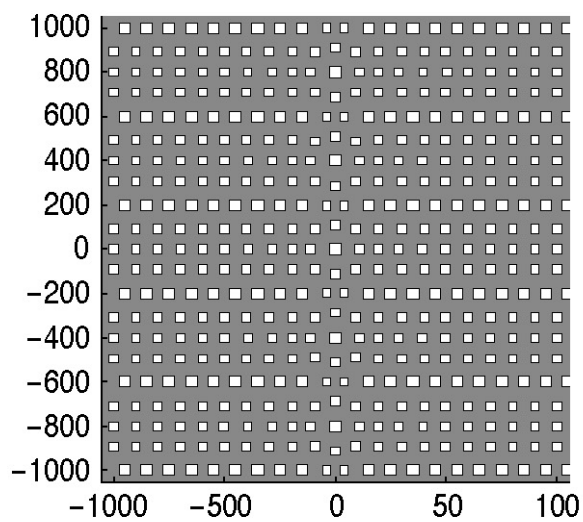
B. マスクパターン1



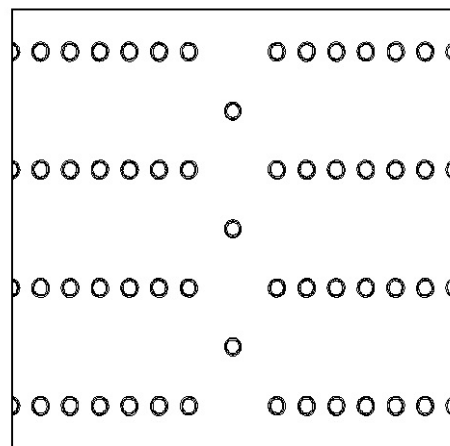
C. 空中像1



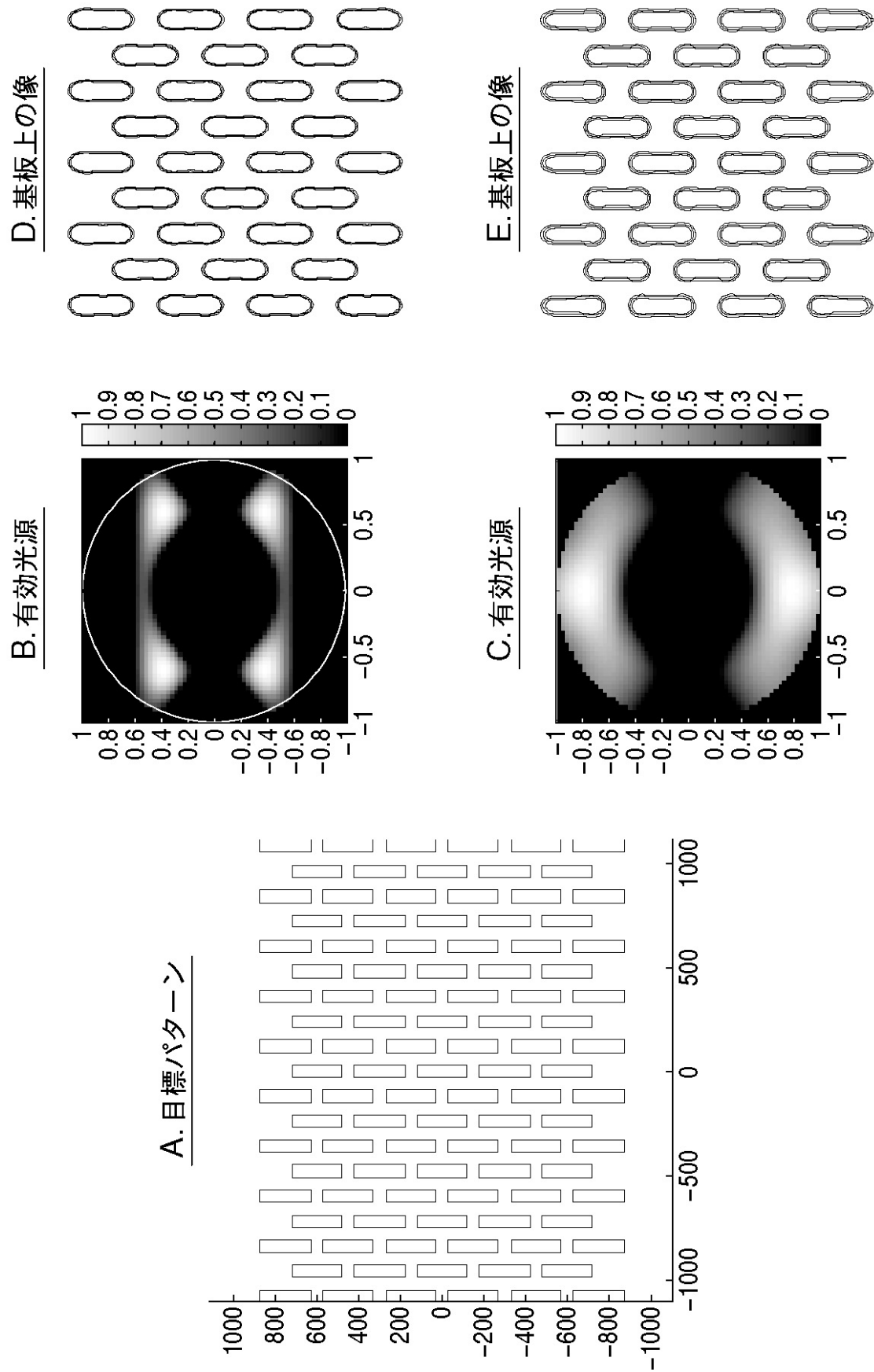
D. マスクパターン2



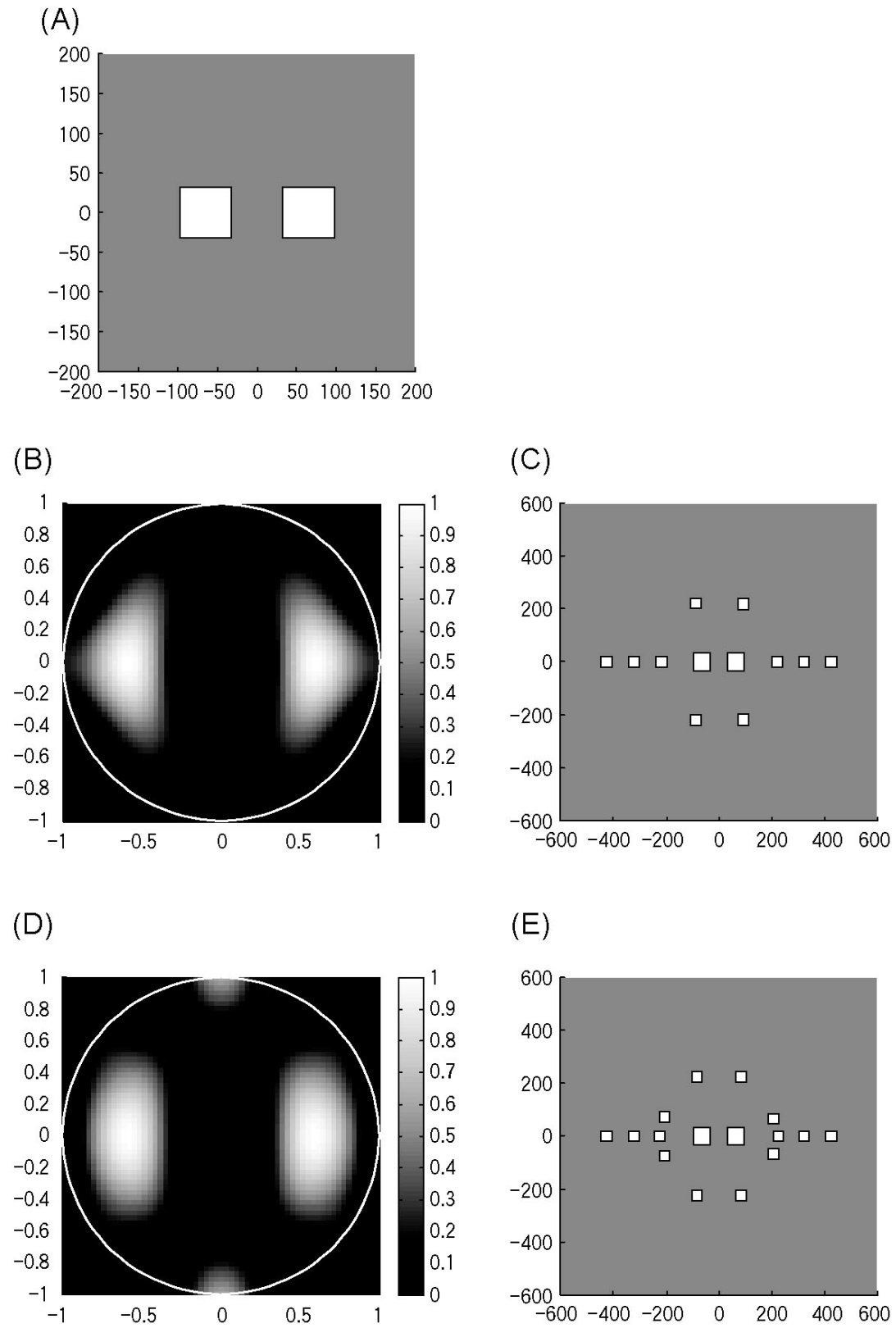
E. 空中像2



【図7】



【図 9】



フロントページの続き

- (72)発明者 川島 美代子
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 藤嶋 浩史
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 山添 賢治
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 佐野 浩樹

- (56)参考文献 特開2002-334836(JP,A)
特開2008-040470(JP,A)
特開2005-234571(JP,A)
特開平08-162511(JP,A)
特開平06-120119(JP,A)
特開2004-128108(JP,A)
米国特許出願公開第2010/0275178(US,A1)
特開2004-077154(JP,A)
特開平10-116770(JP,A)
特開2011-238706(JP,A)
特開2010-027693(JP,A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

G03F 7/20 - 7/24 、 9/00 - 9/02 、
H01L21/027、21/30