

(19)日本国特許庁(JP)

(12)特許公報(B2)

(11)特許番号
特許第7508278号
(P7508278)

(45)発行日 令和6年7月1日(2024.7.1)

(24)登録日 令和6年6月21日(2024.6.21)

(51)国際特許分類

F I

G 0 3 F 7/20 5 0 1

G 0 3 F 7/20 5 2 1

請求項の数 19 (全24頁)

(21)出願番号	特願2020-97739(P2020-97739)	(73)特許権者	000001007
(22)出願日	令和2年6月4日(2020.6.4)		キヤノン株式会社
(65)公開番号	特開2021-189397(P2021-189397 A)		東京都大田区下丸子3丁目30番2号
(43)公開日	令和3年12月13日(2021.12.13)	(74)代理人	100126240
審査請求日	令和5年5月23日(2023.5.23)		弁理士 阿部 琢磨
		(74)代理人	100223941
			弁理士 高橋 佳子
		(74)代理人	100159695
			弁理士 中辻 七朗
		(74)代理人	100172476
			弁理士 富田 一史
		(74)代理人	100126974
			弁理士 大朋 靖尚
		(72)発明者	鈴木 敢士
			東京都大田区下丸子3丁目30番2号
			最終頁に続く

(54)【発明の名称】 露光装置、露光方法、及び物品の製造方法

(57)【特許請求の範囲】

【請求項1】

基板を露光する露光装置であって、
複数の固体発光素子と、前記複数の固体発光素子のそれぞれに対応して設けられた複数の
のコレメートレンズと、前記複数のコレメートレンズから出射した光を集光するコンデン
サレンズと、を含み、前記複数の固体発光素子からの光でマスクを照明する照明光学系と、
前記マスクのパターンの像を前記基板に投影する投影光学系と、を有し、
前記複数の固体発光素子のそれぞれは、前記複数のコレメートレンズのそれぞれの光軸
外で最大強度となるように発光し、
前記コンデンサレンズの後側焦点位置の光強度分布である瞳面強度分布は、前記複数の
固体発光素子のそれぞれからの光を重畳させることにより形成される光強度分布であり、
前記瞳面強度分布は、前記照明光学系の光軸外で最大強度となる光強度分布であることを
特徴とする露光装置。

【請求項2】

前記瞳面強度分布は、4回以上の回転対称性を示す光強度分布であることを特徴とする
請求項1に記載の露光装置。

【請求項3】

前記瞳面強度分布は、輪帯形状の光強度分布であることを特徴とする請求項2に記載の
露光装置。

【請求項4】

前記瞳面強度分布は、四重極形状の光強度分布であることを特徴とする請求項 2 に記載の露光装置。

【請求項 5】

前記照明光学系は、前記光のうち一部の光を遮光する開口絞りを更に備えることを特徴とする請求項 1 乃至 4 のいずれか 1 項に記載の露光装置。

【請求項 6】

前記複数の固体発光素子の発光分布は、前記開口絞りを透過した後の前記投影光学系の瞳面における光強度分布である有効光源分布に対応した分布であることを特徴とする請求項 5 に記載の露光装置。

【請求項 7】

前記発光分布で最大の光強度となる領域は、前記有効光源分布の発光領域を仮想的に前記複数の固体発光素子の発光面に逆投影した領域の中に含まれることを特徴とする請求項 6 に記載の露光装置。

【請求項 8】

前記発光分布の領域を S 、前記逆投影した分布の領域を S' 、前記複数の固体発光素子の発光面における照度分布を $I(x, y)$ としたとき

【数 1】

$$\left(\frac{\int_{S'} I(x, y) dS'}{\int_S I(x, y) dS} \right) / \left(\frac{\int_{S'} dS'}{\int_S dS} \right)$$

で規定される特性値が 1 . 1 3 以上であることを特徴とする請求項 7 に記載の露光装置。

【請求項 9】

前記複数の固体発光素子のそれぞれは、前記複数のコリメートレンズのそれぞれの光軸に対して偏心して配置されることを特徴とする請求項 1 乃至 8 のいずれか 1 項に記載の露光装置。

【請求項 10】

前記複数のコリメートレンズの焦点距離が可変であることを特徴とする請求項 1 乃至 9 のいずれか 1 項に記載の露光装置。

【請求項 11】

前記複数の固体発光素子は、第 1 の固体発光素子と第 2 の固体発光素子を含み、
前記照明光学系は、前記第 1 の固体発光素子の発光面である第 1 発光面と、前記第 2 の固体発光素子の発光面である第 2 発光面を含む複数の発光面の発光分布を重畳して、前記投影光学系の瞳面に形成することを特徴とする請求項 1 乃至 10 のいずれか 1 項に記載の露光装置。

【請求項 12】

前記第 1 の固体発光素子の発光分布は、前記第 2 の固体発光素子の発光分布と異なる発光分布であることを特徴とする請求項 11 に記載の露光装置。

【請求項 13】

前記第 1 の固体発光素子は、前記発光面に対して垂直な軸周りの角度が、前記第 2 の固体発光素子と異なる角度で配置されることを特徴とする請求項 11 又は 12 に記載の露光装置。

【請求項 14】

基板を露光する露光装置であって、
第 1 の波長特性を有する第 1 の固体発光素子と、前記第 1 の波長特性とは異なる第 2 の波長特性を有する第 2 の固体発光素子とを含む複数の固体発光素子と、前記複数の固体発光素子にそれぞれ対応して設けられた複数のコリメートレンズと、前記複数のコリメートレンズから出射した光を集光するコンデンサレンズと、を有し、前記複数の固体発光素子からの光でマスクを照明する照明光学系と、

前記マスクのパターンの像を前記基板に投影する投影光学系と、を有し、

10

20

30

40

50

前記複数の固体発光素子のそれぞれは、前記複数のコリメートレンズのそれぞれの光軸外で最大強度となるように発光し、

前記コンデンサレンズの後側焦点位置における瞳面強度分布は、前記第 1 の固体発光素子からの光により形成される第 1 光強度分布と、前記第 2 の固体発光素子からの光により形成される第 2 光強度分布と、を重畳させた光強度分布であることを特徴とする露光装置。

【請求項 1 5】

前記第 2 の波長特性の重心波長は、前記第 1 の波長特性の重心波長よりも長い波長であることを特徴とする請求項 1 4 に記載の露光装置。

【請求項 1 6】

前記第 2 光強度分布において最大の光強度となる領域は、前記第 1 光強度分布において最大となる光強度の領域よりも前記照明光学系の光軸を中心として外側の領域であることを特徴とする請求項 1 5 に記載の露光装置。

10

【請求項 1 7】

前記複数のコリメートレンズは、前記第 1 の固体発光素子からの光をコリメートする第 1 コリメートレンズ及び前記第 2 の固体発光素子からの光をコリメートする第 2 コリメートレンズを含み、

前記第 1 コリメートレンズの焦点距離は、前記第 2 コリメートレンズの焦点距離とは異なることを特徴とする請求項 1 4 乃至 1 6 のいずれか 1 項に記載の露光装置。

【請求項 1 8】

基板を露光する露光方法であって、

20

照明光学系を介した光でマスクを照明する第 1 の工程と、

前記マスクのパターンの像を前記基板に投影する第 2 の工程と、を有し、

前記照明光学系は、複数の固体発光素子と、前記複数の固体発光素子のそれぞれに対応して設けられた複数のコリメートレンズと、前記複数のコリメートレンズから出射した光を集光するコンデンサレンズと、を含み、

前記複数の固体発光素子のそれぞれは、前記複数のコリメートレンズのそれぞれの光軸外で最大強度となるように発光し、

前記コンデンサレンズの後側焦点位置の光強度分布である瞳面強度分布は、前記複数の固体発光素子のそれぞれからの光を重畳させることにより形成される光強度分布であり、

前記瞳面強度分布は、前記照明光学系の光軸外で最大強度となる光強度分布であることを特徴とする露光方法。

30

【請求項 1 9】

請求項 1 乃至 1 7 のいずれか 1 項に記載の露光装置を用いて基板を露光する露光工程と、

前記露光工程で露光された基板を現像する現像工程と、

前記現像工程で現像された基板の処理を行う処理工程と、を含み、

前記処理工程で処理された基板から物品を製造することを特徴とする物品の製造方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、露光装置、露光方法、及び物品の製造方法に関する。

40

【背景技術】

【0002】

露光装置は、マスク（原版）に形成されているパターンをプレート（基板）に転写する装置であって、照明光学系を介して被照射面であるマスクに光を照明し、投影光学系を介してマスクのパターンの像をプレート上に投影する。露光装置の照明光学系では、光源からの光でオプティカルインテグレータを照明し、照明光学系の瞳面に相当する当該オプティカルインテグレータの射出面において 2 次光源を生成する。2 次光源は、所定の形状および所定の大きさを持つ発光領域で形成される。また、発光領域における光量分布である有効光源分布は、マスクの各点を照明する光の角度分布に対応する。

【0003】

50

露光装置においては、微細パターンに対する転写性能の向上技術として、超解像技術（RET：Resolution Enhancement Techniques）が知られている。RETの1つとして、マスクの各点を照明する光の角度分布を最適化する変形照明の技術が知られている。例えば、微細パターンに対する解像性能を向上させることを目的として、有効光源分布を輪帯形状にした輪帯照明が用いられる。

【0004】

露光装置の光源として、例えば、水銀ランプが用いられているが、近年、水銀ランプの代わりに、固体発光素子である発光ダイオード（LED：Light Emitting Diode）へ置換することが期待されている。LEDは発光を制御する基板回路に電流を流してから、光の出力が安定するまでの時間が短く、水銀ランプのように常時発光させる必要がないため、省エネルギー且つ長寿命であるというメリットがある。

10

【0005】

特許文献1には、複数のLED素子の発光分布を照明光学系の瞳面に重畳し、有効光源分布を均一にするための構成が記載されている。また、照明光学系の瞳面に配置する開口絞りの開口部の形状を輪帯形状とすることで、解像性能を向上させる変形照明を用いる内容についても開示されている。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0006】

【文献】特開2016-188878号公報

20

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0007】

一般的に、LED素子は、その発光面内で一様な強度で発光するように構成されているため、瞳面位置の光強度分布も一様な分布となる。そのため、変形照明を形成するためには、照明光学系の瞳面に所望の形状の開口絞りを配置し、光を遮光する必要がある。結果として、変形照明の形成のためには、開口絞りの遮光領域の分だけ照度が低下してしまう。

【0008】

そこで、本発明は、LEDを光源とした変形照明において、照度の低下を抑制するために有利な露光装置を提供することを目的としている。

30

【課題を解決するための手段】

【0009】

上記目的を達成するために、本発明の一側面としての露光装置は、基板を露光する露光装置であって、複数の固体発光素子と、前記複数の固体発光素子のそれぞれに対応して設けられた複数のコリメートレンズと、前記複数のコリメートレンズから出射した光を集光するコンデンサレンズと、を含み、前記複数の固体発光素子からの光でマスクを照明する照明光学系と、前記マスクのパターンの像を前記基板に投影する投影光学系と、を有し、前記複数の固体発光素子のそれぞれは、前記複数のコリメートレンズのそれぞれの光軸外で最大強度となるように発光し、前記コンデンサレンズの後側焦点位置の光強度分布である瞳面強度分布は、前記複数の固体発光素子のそれぞれからの光を重畳させることにより形成される光強度分布であり、前記瞳面強度分布は、前記照明光学系の光軸外で最大強度となる光強度分布であることを特徴とする。

40

【発明の効果】

【0010】

本発明によれば、例えば、LEDを光源とした変形照明において、照度の低下を抑制するために有利な露光装置を提供することができる。

【図面の簡単な説明】

【0011】

【図1】露光装置の構成を示す概略図である。

【図2】照明光学系構成を示す概略図である。

50

- 【図 3】LED アレイ光源の構成を示す図である。
- 【図 4】照明光学系のその他の構成例を示す図である。
- 【図 5】比較例における輪帯照明の形成を示す図である。
- 【図 6】実施例 1 における輪帯照明の形成を示す図である。
- 【図 7】比較例と実施例 1 のシミュレーション結果を示す図である。
- 【図 8】比較例と実施例 1 の瞳面強度分布の強度プロファイルを示す図である。
- 【図 9】比較例に対する実施例 1 の光量比を示す図である。
- 【図 10】実施例 1 における四重極照明の形成を示す図である。
- 【図 11】有効光源分布を逆投影した逆投影分布を示す図である。
- 【図 12】異なる発光分布の複数の LED 素子における輪帯照明の形成を示す図である。 10
- 【図 13】異なる角度の複数の LED 素子における輪帯照明の形成を示す図である。
- 【図 14】異なる偏心の複数の LED における四重極照明の形成を示す図である。
- 【図 15】焦点距離が可変である集光部の構成を示す図である。
- 【図 16】瞳面強度分布のシミュレーション結果を示す図である。
- 【図 17】図 16 の瞳面強度分布の強度プロファイルを示す図である。
- 【図 18】複数の発光分布の発光面を示す図である。
- 【図 19】実施例 5 における変形照明の波長域と発光領域の関係を示す図である。
- 【図 20】実施例 5 のシミュレーション結果を示す図である。
- 【図 21】実施例 5 における有効光源分布の形成を示す図である。
- 【図 22】様々な分布と式 (5) の評価値の対応について示す図である。 20
- 【発明を実施するための形態】
- 【0012】
- 以下に、本発明の好ましい実施形態を添付の図面に基づいて詳細に説明する。
- 【0013】
- < 第 1 実施形態 >
- 図 1 は、本発明の一側面としての露光装置の構成を示す概略図である。露光装置 100 は、複数の波長域を含む光でマスク (原版) 1 を照明し、プレート (基板) 6 にマスク 1 のパターンを転写するリソグラフィ装置である。露光装置 100 は、フラットパネルディスプレイ、半導体素子、MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) などを製造するための装置である。 30
- 【0014】
- 露光装置 100 は、光源からの光によって、被照明面であるマスク 1 を照明する照明光学系 10 と、マスク 1 に形成されたパターンの像をプレート 6 へと投影する投影光学系 101 とを有する。更に、露光装置 100 は、マスク 1 を保持し、駆動又は位置決めするマスクステージ 2 と、プレート 6 を保持し、駆動又は位置決めするプレートステージ 7 と、プレートステージ 7 に設けられた計測部 8 と、制御部 9 とを有する。マスク 1 は、投影光学系 11 の物体面に配置され、プレート 6 は、物体面と光学的に共役な位置である投影光学系 11 の像面に配置される。
- 【0015】
- 投影光学系 101 は、例えば、反射光学系であり、ミラー 3、4 及び 5 を含む。投影光学系 101 は、マスク 1 からの光をミラー 3、4、5、4、3 の順に反射し、マスク 1 の投影像をプレート 6 に形成する。投影光学系 101 が反射光学系で構成される場合、光源からの光の色収差が屈折光学系よりも小さい。このような構成は、複数の波長域を含む広帯域光 (ブロードバンド照明光) を用いる場合に好適である。 40
- 【0016】
- 制御部 9 は、露光装置 100 の各部、即ち、照明光学系 10、投影光学系 101、マスクステージ 2、プレートステージ 7 などを統括的に制御して露光装置 100 を動作させる。制御部 9 は、例えば、FPGA (Field Programmable Gate Array の略。) などの PLD (Programmable Logic Device の略。)、又は、ASIC (Application Specific Integrat 50

ed Circuitの略。)、又は、プログラムが組み込まれた汎用又は専用のコンピュータ、又は、これらの全部又は一部の組み合わせによって構成される。

【0017】

図2は、照明光学系10の構成を示す概略図である。照明光学系10は、例えば、光源11と、コンデンサレンズ12、15と、オプティカルインテグレータ13と、開口絞り14とを含む。

【0018】

光源11は、例えば、固体発光素子であるLED素子を複数含むLEDアレイ光源のことであり、詳しい構成については後述する。光源11から射出される光は、コンデンサレンズ12で集光され、オプティカルインテグレータ13を照射する。位置関係としては、コンデンサレンズ12の前側焦点位置の近傍に光源11の射出面が位置し、コンデンサレンズ12の後側焦点位置の近傍にオプティカルインテグレータ13の入射面が位置するように構成する。ここで、光源11の射出面やオプティカルインテグレータ13の入射面はコンデンサレンズ12の焦点位置に完全に一致する必要はなく、例えば焦点距離から10%以内に位置されても良い。

【0019】

オプティカルインテグレータ13は、例えば、フライアイレンズであり、多数の同一のレンズエレメントから構成される。オプティカルインテグレータ13は入射面上の光を波面分割し、その射出面で光源11の多重光源像を形成する。換言すると、オプティカルインテグレータ13を構成する多数のレンズエレメントの1つ1つの射出面に、光源11の光学像が形成され、これが2次光源となる。オプティカルインテグレータ13の射出面近傍に配置される開口絞り14は、マスク1を照射する光の角度分布を制御する。開口絞り14は、例えば、輪帯形状の透過領域や四重極状の透過領域を設けることで、輪帯や四重極などの変形照明を形成可能である。開口絞り14を透過した光は、コンデンサレンズ15によって集光され、照明光としてマスク1を照射する。また、プレートステージ7には、オプティカルインテグレータ13の射出面に形成される2次光源の形状や光強度を計測可能なイメージセンサ(例えば、CCDセンサ)である計測部8が設けられている。

【0020】

ここで、照明光学系10の瞳面位置とは、オプティカルインテグレータ13の射出面に相当する。また、マスク1が配置されている面に対して光学的にフーリエ変換した面が瞳面位置に相当する。瞳面強度分布とは、オプティカルインテグレータ13の射出面の光量分布を指す。有効光源分布とは、マスク1を照明する光の角度分布であり、図2においては開口絞り14を透過した後の光量分布に相当する。ここで、開口絞り14が設けられない場合には、瞳面強度分布と有効光源分布は同一となる。また、本実施形態における変形照明は、有効光源分布が輪帯形状や四重極状であるものとして説明するが、これに限られるものではなく、円形で略均一な分布とは異なる有効光源分布全般を指す。

【0021】

オプティカルインテグレータ13の分割数が無限大の極限を考える(レンズエレメント1つの大きさが無限小の極限を考える)と、オプティカルインテグレータ13の入射面の光量分布と、射出面の光量分布である瞳面強度分布は同一となる。オプティカルインテグレータ13の分割数が有限の場合は入射面の光量分布と瞳面強度分布は必ずしも一致しない。しかし、両者の分布には高い相関があることからオプティカルインテグレータ13の入射面の光量分布を「瞳面強度分布」と称しても差し支えない。

【0022】

次に、光源11の構成について図3で説明する。図3(a)は、x軸方向から見た光源の断面の概略図であり、図3(b)は、z軸方向から見た光源の概略図である。光源11は、基台21に複数のLED素子22が実装されている構成となっている。LED素子22は、高圧水銀ランプと比べて放射エネルギーが小さいため複数用いる必要があり、例えば、1000個程度のLED素子22が基台21に実装される。LED素子22は、基台21の上に二次元的に配列されており、特に図3(b)では正方格子状に配列しているが

10

20

30

40

50

このような配列に限らず、その他の配列、例えば、千鳥状に配列されてもよい。

【0023】

LED素子22は紫外光を放射するUV-LEDであり、発光ピークの波長は、例えば、365nm、385nm、405nmである。複数のLED素子22はすべて同一の発光波長であっても良いし、異なる発光波長のものを同一の基台上に混在させてもよい。また、LED素子22から放射される光は、放射角度が半角で60～70度程度であり、一般的なフラットパネルディスプレイ向けの投影光学系の開口数NAが0.1前後(角度に換算すると5.7度前後)であることを考えると非常に大きな角度分布である。そこで、LED素子22からの放射光束を損失なく下流の光学系で取り込むため、各LED素子22の直下に、放射光束をコリメートする集光部23を設けることが望ましい。

10

【0024】

集光部23には、各LED素子22の1つ1つに対応するようにコリメートレンズが設けられている。図3(b)の点線と点線が交わっている交点は、集光部23に含まれる各コリメートレンズの光軸を表している。ここでは各コリメートレンズの光軸と各LED素子22の中心が一致するように図示されているが、必ずしもその通り配置する必要はない。

【0025】

集光部23の前側焦点位置の近傍に、LED素子22の発光面が位置するように構成することで、集光部23の後側焦点位置の近傍に、LED素子22の発光面における光線情報がフーリエ変換された分布が形成される。この集光部23の後側焦点位置が、コンデンサレンズ12の前側焦点位置の近傍に位置するよう構成すれば、LED素子22の発光面とオプティカルインテグレータ13の入射面が光学的に共役となる。全てのLED素子22に対して同様に構成することで、全てのLED素子22の発光面とオプティカルインテグレータ13の入射面が光学的に共役となる。換言すれば、全てのLED素子22の発光面の光学像がオプティカルインテグレータの入射面に重畳して投影され、瞳面強度分布が形成される。ここで、必ずしもすべてのLED素子が同様の構成をとる必要はなく、大多数のLED、例えば90%以上のLED素子に対して上記の関係であればよい。

20

【0026】

ここで、照明光学系10の変形例を図4で説明する。図2で説明した照明光学系10との差異は、複数のLEDアレイ光源を含む点である。図4では、2つの光源11a、11bによってマスク1を照射する。光源11aには第1の波長特性1を有する第1のLED素子が複数含まれ、光源11bには第2の波長特性2を有する第2のLED素子が複数含まれる。第1の波長特性1を有する第1のLED素子は、例えば、ピーク波長が365nmで発光するLED素子であり、第2の波長特性2を有する第2のLED素子は、例えば、ピーク波長が405nmで発光するLED素子である。

30

【0027】

2つの光源11a、11bから放射される波長特性の異なる光を、波長合成部16で合成し、コンデンサレンズ12へ導く。波長合成部16は、例えば、ダイクロイックミラーであり、365nmの光は透過し、405nmの光は反射するような光学薄膜を形成しているガラスである。このような構成により、図2で説明した照明光学系10と比較して、より多くの光量をオプティカルインテグレータ13に導くことができる。

40

【0028】

図4で説明した照明光学系10のような構成の場合でも、光源11aに含まれる複数の第1のLED素子の発光面とオプティカルインテグレータ13の入射面は光学的に共役である。即ち、複数の第1のLED素子の発光面の光学像がオプティカルインテグレータ13の入射面上で重畳して投影される。同様に、光源11bに含まれる複数の第2のLED素子の発光面とオプティカルインテグレータ13の入射面は光学的に共役である。即ち、複数の第2のLED素子の発光面の光学像がオプティカルインテグレータ13の入射面上で重畳して投影される。

【0029】

<比較例>

50

本実施形態との比較のために、変形照明の形成の比較例について説明する。図5は比較例における輪帯照明の形成に関する模式図である。図5(a)はある1つのLED素子22の発光面の光量分布である発光分布27を表しており、図5(b)は、瞳面における瞳面強度分布25を表し、図5(c)は輪帯形状の開口径24を表す。開口径24は、光を透過する透過領域と、中央部と外周部の光を遮蔽する遮蔽領域があり、図5(c)では、透過領域をドットで、遮蔽領域を斜線で表している。開口径24の透過領域でのみ光が透過するため、有効光源分布26の形状は、開口径24の形状によって決まる。

【0030】

図5(a)内の破線の交点は、LED素子からの放射光をコリメートする集光部23に含まれるコリメートレンズの光軸に対応しており、図5(b)及び図5(c)内の破線の交点は、照明光学系10の光軸に対応する。図5(a)では、複数のLED素子22が全て図5(a)で示すような発光分布27を有しているものとする。比較例では、発光分布27は略均一な発光分布であり、その発光面が瞳面に投影されることから瞳面強度分布25は略均一な強度分布となっている。

【0031】

比較例では、図5(b)で示している瞳面強度分布25は略均一な強度分布であるために、開口径24によって光を遮蔽する領域が大きければ大きいほど光源の光量を損失してしまう。特に、上述した輪帯照明等の変形照明では、光を遮蔽する領域が大きいために多くの光量を損失してしまう。露光装置において、光源の光量が低下することは、プレート6の処理(例えば、プレート6への露光処理)にかかる時間の増加の要因の1つとなってしまうため、プレート6を処理する生産性の悪化につながってしまうという問題が生じる。

【0032】

また、LED素子22に電流をより多く流すことで、LED素子22自体の発光量を上げることにより上記の問題を解決することも考えられるが、別の問題が発生しうる。例えば、LED素子22に電流が多く流れることによる温度上昇によって、LED素子22が正常に動作できる温度を超えてしまうといった問題や、LED素子22に電流が多く流れることにより、LED素子22の寿命が短くなってしまふといった問題がある。したがって、別の方法によって有効光源分布26の光量を向上させることが好ましい。

【0033】

そこで本実施形態では、開口径24の透過領域に光量を集中させ、開口径24の遮光領域の光量を少なくするような技術を提供する。これにより、変形照明を形成する際の光量の損失を小さくすることができる。

【0034】

<実施例1>

実施例1では、発光分布と瞳面強度分布が同じ分布である場合における変形照明の形成について説明する。変形照明とは、例えば、照明形状が回転対称となる輪帯照明や、照明形状が4回回転対称となる四重極照明である。以下では、4回以上の回転対称性を示す変形照明について説明する。図6は、実施例1を示す図である。

【0035】

図6(a)はある1つのLED素子22の発光分布37を表しており、図6(b)は、瞳面における瞳面強度分布35を表し、図6(c)は輪帯形状の開口径34を表す。開口径34は、光を透過する透過領域と、中央部と外周部の光を遮蔽する遮蔽領域があり、図6(c)では、透過領域をドットで、遮蔽領域を斜線で表している。開口径34の透過領域でのみ光が透過するため、有効光源分布36の形状は、開口径34の形状によって決まる。

【0036】

図6(a)内の破線の交点は、LED素子からの放射光をコリメートする集光部23に含まれるコリメートレンズの光軸に対応しており、図6(b)及び図6(c)内の破線の交点は、照明光学系10の光軸に対応する。図6(a)の発光分布37は、図5(a)の

10

20

30

40

50

略均一な発光分布 2 7 とは異なり、輪帯形状の発光分布となっている。

【 0 0 3 7 】

図 6 (a) では、複数の L E D 素子 2 2 が全て図 6 (a) で示すような発光分布 3 7 を有しているものとする。ここで、図 6 (a) 及び図 6 (b) のドットパターンで図示される領域が発光領域であり、その他の灰色で図示される領域は非発光領域である。ここで、非発光領域は、微弱に発光しているが発光領域に対して相対的に強度が低い領域も含む。例えば、発光分布 3 7 の最大発光強度の値に対して 2 0 % 以下の発光強度である領域を非発光領域であるとする。

【 0 0 3 8 】

輪帯形状の発光領域を有する発光分布 3 7 が瞳面に投影されることから、照明光学系の光軸外で最大の光強度となる輪帯形状の瞳面強度分布 3 5 が形成される。この発光領域は開口絞り 3 4 の透過領域に対応するよう構成されるため、開口絞り 3 4 の遮蔽領域で遮蔽される光量は比較例と比べて小さく、開口絞り 3 4 の透過領域を透過する光量は比較例と比べて大きくなる。

【 0 0 3 9 】

次に、シミュレーションによって実施例 1 における効果を定量的に評価した結果について説明する。図 7 は、比較例と実施例 1 のシミュレーション結果を示す図である。図 7 (a) は、比較例における L E D 素子 2 2 の発光分布と瞳面強度分布であり、図 7 (b) は、実施例 1 における L E D 素子 2 2 の発光分布と瞳面強度分布である。L E D 素子 2 2 の発光領域は、図 7 (a) 、図 7 (b) 共に 1 . 4 m m × 1 . 4 m m の正方形の領域としており、総放射エネルギーが同等になる様に設定している。

【 0 0 4 0 】

また、集光部は、図 7 (a) 、図 7 (b) 共に 2 枚のコリメートレンズで構成しており、集光部の焦点距離は図 7 (a) では 6 . 5 6 m m 、図 7 (b) では 6 . 8 8 m m である。瞳面強度分布の軸は、集光部から射出した光の角度分布を投影光学系の開口数 N A で規格化した値を横軸 f_x 、縦軸 f_y としている。

【 0 0 4 1 】

また、瞳面強度分布のスケールは微小立体角内に含まれる光量を縦階調としてプロットしている。L E D 素子の発光分布、瞳面強度分布における画像の縦階調はともに図 7 (b) のデータの最大値で規格化した。ここで、開口数 N A に対する照明光の広がり比をコヒーレンスファクター と称する。座標 f_x 、 f_y との関係は $r = \sqrt{f_x^2 + f_y^2}$ である。

【 0 0 4 2 】

比較例のシミュレーションを示す図 7 (a) の L E D 素子 2 2 の発光分布は均一であることから、瞳面強度分布も $r < 1 . 0$ の範囲では略均一な分布となっている。 $r > 1 . 0$ の周辺部で強度が減衰しているのは、L E D 素子の周辺部から放射される光はコリメートレンズに入射する光線高が大きく、レンズの収差の影響を受けて集光されにくいためである。一方、比較例 1 のシミュレーションを示す図 7 (b) の L E D 素子 2 2 の発光分布は輪帯形状に強く発光している。瞳面強度分布も同様に輪帯形状に強く発光する分布となっている。

【 0 0 4 3 】

図 8 は、図 7 (a) と図 7 (b) の瞳面強度分布の $f_x = 0$ における規格化強度を示す強度プロファイルである。図中の (a) は図 7 (a) に対応しており、起伏のない略均一な分布である。一方、図中の (b) は図 7 (b) に対応しており、 $|f_y| = 0 . 8 0$ で極大値を取り、照明光学系 1 0 の光軸を中心として外側に局在した分布である。強度を比較すると、 $|f_y| < 0 . 5 2$ では (a) の方が高く、 $0 . 5 2 < |f_y| < 0 . 9 3$ では (b) の方が高い。

【 0 0 4 4 】

図 8 で示す結果を元に、輪帯形状の領域における光量について、図 7 (a) と図 7 (b) の比較を行う。即ち、輪帯形状の開口絞りを置いた場合における有効光源分布の光量に

10

20

30

40

50

について評価する。図 9 は、図 7 (a) の $f_x = 0$ における瞳面強度分布において $i_n < 0.90$ の領域に含まれる光量を図 7 (b) の $f_x = 0$ における瞳面強度分布において $i_n < 0.90$ の領域に含まれる光量で割った値をグラフ表示した図である。ここで、 i_n は輪帯領域の下限値を示しており、 $0.45 < i_n < 0.90$ の値を取る変数である。即ち、輪帯の上限を $= 0.90$ に固定し、様々な輪帯幅に対しての光量比を評価している。例えば、図 9 の $i_n = 0.60$ は、 i_n が $0.60 \sim 0.90$ である輪帯における (a) に対する (b) の光量比を表す。輪帯の幅によって変動はあるものの、常に (b) の光量の方が大きい。例えば、 i_n が $0.45 \sim 0.90$ の輪帯では光量比は 1.14 であり、比較例に対して実施例 1 では 14% の光量の利得がある。また、 i_n が $0.70 \sim 0.90$ の輪帯では、光量比は 1.22 であり、比較例に対して実施例 1 では 22% の光量の利得がある。

10

【 0 0 4 5 】

次に、発光分布が輪帯形状ではない例について図 10 を用いて説明する。図 10 (a) は四重極形状の発光分布 47 を表しており、図 10 (b) は瞳面における瞳面強度分布 45 を表し、図 10 (c) は四重極形状の開口絞り 44 と有効光源分布 46 を表す。四重極形状に発光する発光分布 47 の発光領域は四重極形状の開口絞り 44 の透過領域に対応するよう構成される。一般に、四重極照明では、輪帯照明と比較して開口絞り 44 で遮光される領域が大きいことから、マスク 1 に導かれる光量は小さくなる。したがって、本実施形態における四重極照明は、輪帯照明の場合に比べて光量の利得が大きくなる。

【 0 0 4 6 】

20

本実施形態において、照度の低下を抑制する効果を得るためには、LED 素子の発光分布が所望の有効光源分布に対応するような分布である必要がある。即ち、所望の有効光源分布を逆投影した分布を LED 素子の発光分布とすれば良い。また、逆投影した分布と LED 素子の発光分布は完全に同じでなくても良く、例えば、逆投影した光強度分布で最も光強度が高い領域で、LED 素子が最も強く発光するような発光分布であれば良い。これについて図 11 を用いて説明する。

【 0 0 4 7 】

図 11 (a) と図 11 (b) は、それぞれ図 10 (a) と図 10 (c) の意味するところと同じであり、図 11 (a) は発光分布 47、図 11 (b) は四重極形状の開口絞り 44 と有効光源分布 46 である。この有効光源分布 46 を、発光分布 47 の発光面に対して逆投影した分布が図 11 (c) の逆投影分布 48 である。ここで、逆投影について説明する。LED 素子の発光面と照明光学系の瞳面位置は、光学的に共役となるように構成され、LED 素子の発光面の光学像が照明光学系の瞳面位置に所定の投影倍率に拡大されて投影される。逆投影とは、瞳面上の光強度分布を、投影倍率の逆数の倍率で仮想的に投影することを指す。逆投影分布 48 の波線パターンで示す領域 48 a は、開口絞り 44 を透過した、有効光源分布 46 における発光領域に対応している。

30

【 0 0 4 8 】

逆投影分布 48 の斜線パターンで示す領域 48 b は、開口絞り 44 で遮光された、有効光源分布 46 における非発光領域に対応している。図 11 (d) は、図 11 (c) の点線のうち x 軸と平行である点線上における、LED 素子の発光強度のプロファイルを示すものである。図 11 (d) において斜線で示す領域は逆投影像の斜線パターン領域 48 b、即ち、有効光源分布の非発光領域に相当する。それ以外の領域は有効光源 46 の発光領域に対応する。図 11 (d) で示す通り、LED 素子の面内で高い発光強度を有する領域が、有効光源分布の逆投影像の発光領域 48 a の中に含まれる。このような構成であれば、発光分布 47 の放射光を開口絞り 44 の透過部に集中させられるため、開口絞り 44 による光量の損失を抑制することができる。

40

【 0 0 4 9 】

また、複数の LED 素子が光源に含まれる場合には、各 LED 素子に対し有効光源分布を逆投影し、LED 素子の発光分布と有効光源分布の対応を評価する。このとき、必ずしも全ての LED 素子で上記条件を満たす必要はなく、例えば、 90% 以上の LED 素子で

50

上記条件を満たせばよい。

【 0 0 5 0 】

ここまでは開口絞り 4 4 が設けられる場合について説明したが、開口絞り 4 4 が設けられない場合には、有効光源分布において、完全な非発光領域が形成されない可能性がある。この場合には、例えば、有効光源分布の最大強度に対して 5 0 % を閾値とし、発光強度が 5 0 % 以上の領域を発光領域、5 0 % より小さい領域を非発光領域と定義しても良い。

【 0 0 5 1 】

本実施形態において、照度の低下を抑制する効果をより高めるための定量的な条件について説明する。LED 素子の発光面の領域を S 、有効光源分布の逆投影像の領域を S' 、LED 素子の発光面における発光分布（単位面積当たりの発光強度分布）を $I(x, y)$ としたとき、以下の式（1）で規定される特性値が 1.13 以上であれば良い。

【 0 0 5 2 】

【数 1】

$$\left(\frac{\int_{S'} I(x, y) dS'}{\int_S I(x, y) dS} \right) / \left(\frac{\int_{S'} dS'}{\int_S dS} \right) \dots \quad (1)$$

式（1）のうち以下の式（2）は、有効光源分布の逆投影像の発光領域の面積と LED 素子の発光面の面積の比である。つまり、式（2）は、LED 素子の発光分布が完全に均一である場合に、開口絞りを透過可能な光量を LED 素子の総発光量で規格化した値に相当する。換言すれば、LED 素子の発光分布が完全に均一である場合の、LED 素子の総発光エネルギーに対する開口絞りを透過可能なエネルギーの比を表す。

【 0 0 5 3 】

【数 2】

$$\left(\frac{\int_{S'} dS'}{\int_S dS} \right) \dots \quad (2)$$

式（1）のうち以下の式（3）は、有効光源分布の逆投影像の発光領域内における LED の発光強度の積分値と、LED 素子の発光面内における LED 素子の発光強度の積分値との比である。つまり、式（3）は、開口絞りを透過可能なエネルギーを LED 素子の総発光エネルギーで規格化した値に相当する。換言すれば、LED 素子の総発光エネルギーに対する開口絞りの透過可能なエネルギーの相対値を表す。

【 0 0 5 4 】

【数 3】

$$\left(\frac{\int_{S'} I(x, y) dS'}{\int_S I(x, y) dS} \right) \dots \quad (3)$$

以上より、式（3）と式（2）の比である式（1）は、均一発光の LED 素子を用いた場合に開口絞りを透過する光量に対して、開口絞りを透過する光量の比を表す。換言すれ

ば、式(1)は、本実施形態による変形照明による光量の利得を表すとも言える。

【0055】

発明者の知るところでは、略均一な面内発光分布であるUV-LEDの市販品を用いた場合には、式(1)の評価値が最大でも1.12となり、1.13を超えるように構成することは出来ない。光源に複数のLED素子が含まれる場合には、各LED素子に対して式(1)を評価することになるが、必ずしも全てのLED素子で式(1)の評価値が1.13以上である必要はない。例えば、全てのLED素子に対する式(1)の評価値の平均が1.13以上であればよい。

【0056】

LED素子の発光分布を局在させる方法について説明する。LED素子には、陽極、陰極の電極が接合されている。この陽極と陰極の間に電位差を与えてLED素子内部に電界を形成し、その電界に沿ってキャリアが移動する。LED素子は、キャリアである電子と正孔が発光層で再結合することでエネルギーが光となって放射されることにより発光する。LED素子内部の電界は、電極を起点として形成されることから、電極周辺ほど電界密度が高くなり、発光強度は高くなる。一方、電極から離れるほど電界密度が低くなり、発光強度は低くなる。一般的に、キャリアが電界の向きと垂直方向に拡散するよう電流拡散層を設けるが、その場合であっても上記のような傾向となる。また、LED素子は素子の面内で均一に発光するよう電極の形成がなされることが一般的であるが、本実施形態では、部分的に高い強度で発光する領域を意図的に設け、その領域を変形照明の発光領域に対応するよう構成することを特徴とする。

【0057】

したがって、実施例1では、発光分布と瞳面強度分布が同じ分布である場合に、上記のようなLED素子の発光分布であることによって、変形照明の光量の損失を抑制することができる。

【0058】

<実施例2>

実施例1では、発光分布と瞳面強度分布が同じ分布である場合について説明した。実施例2では、発光分布と瞳面強度分布が異なる分布である場合について説明する。

【0059】

図12は、異なる発光分布を示す複数のLED素子を用いて、所望の瞳面強度分布を得ることを示す図である。図12(a)は互いに異なる4種の発光分布57a~57dを表す。発光分布57a~57dは、全て四重極形状であるが発光分布57b、57c、57dは、発光分布57aに対し、発光面に対して垂直な軸であるz軸周りにそれぞれ22.5度、45度、67.5度回転した分布である。発光分布57a~57dのそれぞれの発光面が照明光学系の瞳面に対して共役であり、それぞれの光学像が瞳面位置で重畳される。

【0060】

図12(b)は、瞳面における瞳面強度分布55を表し、図12(c)は輪帯形状の開口絞り54を表す。瞳面強度分布55は、図12(b)のようになるよう図12(a)の発光分布57a~57dが設計されており、輪帯形状の開口絞り54の透過部を満たすように導光される。そして、輪帯形状の開口絞り54透過後には、図12(c)のような輪帯形状の有効光源分布56が形成される。このように、複数の異なる発光分布であるLED素子の光学像を瞳面上で重畳することで、それぞれのLED素子の発光分布とは異なる有効光源分布を形成することが可能である。

【0061】

図13は、同一の発光分布を示す複数のLED素子を発光面に対して垂直な軸であるz軸周りに回転して配置することで、所望の瞳面強度分布を得ることを示す図である。図13(a)に図示する4つの発光分布67a~67dは全て同一の発光分布であるが、LED素子の配置される角度が互いに異なる。このような場合にも、全ての発光面の光学像が照明光学系の瞳面位置に対して重畳され、図13(b)のような照明光学系の光軸外で最大の光強度となる瞳面強度分布65となる。更に、輪帯形状の開口絞り64で部分的に遮

光されて輪帯形状の有効光源分布 66 が形成される。すなわち、LED 素子の発光分布が同じであっても、配置される角度が異なることにより、LED 素子の発光分布とは異なる有効光源分布を形成することが可能である。

【0062】

図 14 は、同一の発光分布を示す複数の LED 素子を光軸に対し偏心した位置に配置することで、所望の瞳面強度分布を得ることを示す図である。図 14 (a) の発光分布 77a ~ 77d は、LED 素子の中心付近で発光強度の極大をとる LED 素子である。ただし、それぞれの LED 素子について、集光部 23 に含まれる各コリメートレンズの光軸から互いに異なる位置に偏心して配置されている。具体的には、各コリメートレンズの光軸からの LED 素子のずれ量を d とすると、 $(x, y) = (d, 0)$, $(-d, 0)$, $(0, d)$, $(0, -d)$ の 4 種類となるよう配置されている。結果的に、瞳面上では四重極形状の瞳面強度分布 75 が形成され、効率的に四重極形状の有効光源分布 76 を形成可能である。このように、集光部の光軸から外れた点で高い発光強度を有するよう構成することで、変形照明の光量の損失を抑制することができる。

10

【0063】

ここで、図 12 (a)、図 13 (a)、図 14 (a) で示す 4 種類の LED 素子は、全てを同時に発光させる必要はなく、個別に点灯または消灯してもよい。また、それぞれの LED 素子の発光光量を同等にする必要はなく、相対的に異ならせてもよい。このように有効光源分布の対称性を異ならせることで、解像力の方位差を制御することも可能である。例えば、図 14 (a) で $(x, y) = (d, 0)$, $(-d, 0)$ に配置した発光分布 77b、77c を点灯し、 $(x, y) = (0, d)$, $(0, -d)$ に配置した発光分布 77a、77d を消灯する。このようなときは、 x 方向に配列する長手方向が y 方向のラインアンドスペースパターンに対する解像力を大きく向上させることが可能である。

20

【0064】

これとは逆に、図 14 (a) で $(x, y) = (0, d)$, $(0, -d)$ に配置した発光分布 77a、77d を点灯し、 $(x, y) = (d, 0)$, $(-d, 0)$ に配置した発光分布 77b、77c を消灯しても良い。このようなときは、 y 方向に配列する長手方向が x 方向のラインアンドスペースパターンに対する解像力を大きく向上させることが可能である。

【0065】

したがって、実施例 2 のように、発光分布と瞳面強度分布が異なる分布である場合であっても、上記のような LED 素子の発光分布であることによって、変形照明の光量の損失を抑制することができる。

30

【0066】

< 実施例 3 >

実施例 1、実施例 2 では、変形照明の光量の損失を抑制するための発光分布について説明した。実施例 3 では、集光部 23 の焦点距離が可変である照明光学系 10 の構成について説明する。

【0067】

図 15 は、LED アレイ光源 11 の構成を示す図である。集光部 23 内はコリメートレンズ 23a とコリメートレンズ 23b の 2 つのレンズで構成されており、コリメートレンズ 23b が z 軸に沿って駆動可能である。コリメートレンズ 23a とコリメートレンズ 23b の間隔 Z が可変であることから、集光部 23 の焦点距離も可変となる。図 15 (a) は、コリメートレンズ 23a とコリメートレンズ 23b の間隔 Z が短い構成を示す図であり、図 15 (b) は、コリメートレンズ 23a とコリメートレンズ 23b の間隔 Z が長い構成を示す図である。

40

【0068】

ここで、集光部 23 の焦点距離が可変となる構成であれば必ずしも上記通りの機構である必要はない。例えば、コリメートレンズが 3 つ以上配置される構成であっても良いし、コリメートレンズ 23b ではなくコリメートレンズ 23a が駆動する構成であっても良い

50

。図 1 5 に示す構成では、コリメートレンズ 2 3 a とコリメートレンズ 2 3 b の間隔 Z が大きい程焦点距離も大きくなるため、図 1 5 (a) における集光部 2 3 の焦点距離と比べて、図 1 5 (b) における集光部 2 3 の焦点距離の方が大きくなる。

【 0 0 6 9 】

次に、焦点距離が可変であることにより、どのような効果が得られるかについて説明する。図 1 6 は、コリメートレンズ 2 3 a とコリメートレンズ 2 3 b の間隔 Z の違いにより瞳面強度分布にどのような効果があるかを示す図である。図 1 6 (a) では、 $Z = 1$ mm の場合の瞳面強度分布を示しており、図 1 6 (b) では $Z = 3$ mm の場合の瞳面強度分布を示している。即ち、図 1 6 (a) は、 Z が短い場合を示す図 1 5 (a) に対応した図であり、図 1 6 (b) は、 Z が長い場合を示す図 1 5 (b) に対応した図である。また、このときの集光部 2 3 の焦点距離はそれぞれ図 1 6 (a) では 6 . 5 6 mm、図 1 6 (b) では 7 . 2 4 mm である。瞳面強度分布の軸は、集光部から射出した光の角度分布を投影光学系の開口数 NA で規格化した値を横軸 f_x 、縦軸 f_y としている。また、縦階調はともに図 1 6 (b) の最大値で規格化している。

【 0 0 7 0 】

図 1 6 (a) と比較して焦点距離の大きい図 1 6 (b) の方が、分布の広がりが小さく、高い光強度を示す領域の f_y が小さいことが分かる。図 1 7 は、図 1 6 (a) と図 1 6 (b) の $f_x = 0$ として、 f_y の強度プロファイルを示すグラフである。図 1 6 と同様に、縦軸は (b) の最大値で規格化している。図 1 7 より、図 1 6 (a) と比較して図 1 6 (b) では、最大値をとる f_y が 0 . 1 2 だけ小さくなっている。即ち、光軸を中心としてより内側で局在するような光強度分布となることが分かる。このように、実施例 3 では焦点距離が可変となる照明光学系 1 0 の構成であることから、所望の広がりとなる瞳面強度分布を得ることができる。したがって、焦点距離を可変とすることで、変形照明の光量の損失を抑制するように瞳面強度分布を制御することができる。また、マスクパターンによって適した有効光源分布が変わることから、瞳面強度分布の可変性は幅広いプロセスへの対応可能性という効果ももたらす。

【 0 0 7 1 】

< 実施例 4 >

実施例 1 ~ 3 では、1 つの LED 素子はただ 1 つの発光分布を有することを前提としていた。しかし、LED 素子の電極の配置方法によっては、1 つの LED 素子に対して 2 つ以上の発光分布をもたせることも可能である。実施例 4 では、1 つの LED 素子に対して 2 つの発光分布をもたせる例について説明する。

【 0 0 7 2 】

図 1 8 は、輪帯形状の発光領域 8 7 と円形状の発光領域 8 8 を有する LED 素子の発光面の発光分布を示す。輪帯形状の発光領域 8 7 は LED 素子表面に電極を円状に配置することで実現される。円形状の発光領域 8 8 は、LED 素子表面に電極を円形状に配置することで実現される。それぞれの電極が互いにコンタクトしないように配線を行うことで、それぞれの領域の点灯・消灯を個別に制御できる。このように、1 つの LED に複数の発光分布を設け、個別に点灯・消灯の制御を行う構成により、幅広いプロセスへの対応力が得られる。ここで示した複数の発光領域の設け方はあくまで一例であり、例えば、格子状に複数のスポット状の発光領域を持つように構成してもよい。

【 0 0 7 3 】

したがって、実施例 4 では、1 つの LED 素子に対して 2 つ以上の発光分布をもたせることも可能であるため、様々な形状の変形照明の光量の損失を抑制することができる。

【 0 0 7 4 】

< 実施例 5 >

実施例 1 ~ 4 では、LED 素子から出射される光の波長について、特に考慮していなかった。実施例 5 では、複数の波長特性の光によって領域が考慮される変形照明が形成される例について説明する。複数の波長特性の光を光源として、波長特性により異なる有効光源分布を形成することで、高い解像性能を得ることが期待できる。

10

20

30

40

50

【 0 0 7 5 】

図 1 9 は、高い解像性能を得るための露光波長 と照明角度 θ_c の関係を示す図である。

【 0 0 7 6 】

ここで、繰り返し周期 P を有するパターンを露光波長 で露光するとき、投影光学系の開口数を NA とすると、

$$\theta_c = \lambda / (2 NA \cdot P) \cdots (4)$$

によって定まる照明角度 θ_c を含む発光領域を用いて変形照明することで、デフォーカスに伴うコントラストの低下を抑制することができる。式 (4) で照明角度 θ_c が波長 に依存するため、露光波長によって解像性能の向上に資する有効光源分布が異なるといえる。図 1 9 には、式 (4) の露光波長 と照明角度 θ_c の関係を実線で示している。図 1 9 に示すように、波長域 1 では発光領域 I 1 に示す有効光源分布、波長域 2 では発光領域 I 2 で示す有効光源分布となるようにすることで、解像性能の向上が期待できる。

10

【 0 0 7 7 】

図 2 0 は、複数の波長特性の光によって領域が考慮される場合にどのような効果を得られるかについてシミュレーションを行った結果である。ピーク波長が 3 6 5 n m の波長特性とピーク波長が 4 0 5 n m の波長特性を有する 2 種類の L E D 素子を光源として、1 . 5 μ m ラインアンドスペースパターンの解像性能についてシミュレーションを行った。開口数 NA は 0 . 1 0 とした。実施例 5 である変形照明は、3 6 5 n m の光で形成する $\theta_c = 0 . 4 5 - 0 . 9 0$ の輪帯形状の有効光源分布と、4 0 5 n m の光で形成する $\theta_c = 0 . 7 0 - 0 . 9 0$ の輪帯形状の有効光源分布を合わせたものである。

20

【 0 0 7 8 】

実施例 5 の比較例として、3 6 5 n m、4 0 5 n m がともに、 $\theta_c = 0 . 4 5 - 0 . 9 0$ の輪帯形状の有効光源分布を形成する条件である比較例 2 についても評価した。焦点深度 (D O F : D e p t h o f f o c u s) については、レジスト像のボトム線幅がターゲット線幅である 1 . 5 μ m に対し 1 0 % 変動する F o u c s の幅として定義した。比較例 2 に対し、実施例 5 ではコントラストと D O F がともに向上している。ここでいうコントラストとは、レジストの空中像強度のコントラストであり、コントラストが向上することとは解像力が向上していることを意味する。

【 0 0 7 9 】

比較例 2 の輪帯照明に対し、実施例 5 では 4 0 5 n m の光量が少ないため、露光光の重心波長としては短くなる。通常では露光光を短波長化すると、コントラストは向上するものの D O F は小さくなる。このように、一般的にはコントラストと D O F はトレードオフの関係にあるが、実施例 5 はそのトレードオフを解消し、コントラストと D O F を同時に向上できる点で比較例 2 より優れている。

30

【 0 0 8 0 】

実施例 5 の変形照明を形成する方法の 1 つとして、照明光学系の瞳面位置に波長フィルタを挿入し、不要な波長域・発光領域の光を遮光する方法がある。この場合、不要な波長域・発光領域の分だけ光量の損失が生じる。例えば実施例 5 を形成する場合、3 6 5 n m の光に対しては、 $\theta_c = 0 . 0 0 - 0 . 4 5$ の領域を遮光し、4 0 5 n m の光に対しては、 $\theta_c = 0 . 0 0 - 0 . 7 0$ の領域の光を遮光する。均一な発光分布の L E D 素子を光源として用いる場合は、瞳面強度分布も均一であることから、不要な波長域・発光領域の分だけ光量の損失が生じてしまう。そのような課題を解決するため、以下では、波長域によって異なる有効光源分布を形成する際の光量の損失を抑制する技術について説明する。

40

【 0 0 8 1 】

光量の損失を抑制する照明系の一例は図 4 である。照明系 1 0 は、第 1 の波長特性 1 を有する第 1 の L E D 素子を複数含む L E D アレイ光源 1 1 a と、第 2 の波長特性 2 を有する第 2 の L E D 素子を複数含む L E D アレイ光源 1 1 b を光源として含む。複数の第 1 の L E D 素子並びに複数の第 2 の L E D 素子の発光面の全て、あるいはそのほとんど (例えば 9 0 % 以上) がオプティカルインテグレータ 1 3 の入射面に対して光学的に共役である。したがって、波長により異なる有効光源分布を効率的に形成するためには、発光波

50

長の異なるＬＥＤ素子によって異なる光学構成にすればよい。

【００８２】

実施例５を効率的に形成するための具体例について図２１を用いて説明する。図２１（ａ）は、実施例５でのＬＥＤ素子の発光分布を表しており、第１の波長特性１を有する第１のＬＥＤ素子の発光分布９７ａの領域は、第１のＬＥＤ素子９７ａの発光領域である。また、第２の波長特性２を有する第２のＬＥＤ素子９７ｂの領域は、第２のＬＥＤ素子９７ｂの発光領域である。図２１（ｂ）は、瞳面強度分布を示す。第１のＬＥＤ素子の発光面と第２のＬＥＤ素子の発光面は、共に照明光学系の瞳面に対して光学的に共役であることから、瞳面強度分布は１と２の光を含む発光領域９５ａと、１の光を含む発光領域９５ｂを合わせた瞳面強度分布９５となる。図２１（ｃ）は、開口絞り９４と有効光源分布９６を示す。図２１（ｃ）に示す輪帯形状の開口絞り９４を透過後には、波長によって異なる有効光源分布９６が形成される。

10

【００８３】

このように、第１のＬＥＤ素子の発光分布９７ａと第２のＬＥＤ素子の発光分布９７ｂを異ならせることにより、波長フィルタを用いずとも瞳面上で波長により異なる有効光源分布を形成することが可能である。均一な発光分布を有するＬＥＤ素子を用いて略均一な瞳面強度分布を形成し、波長フィルタによって不要な波長域・発光領域の光を遮光する場合と比べてより多くの光量をマスクに導くことが可能である。

【００８４】

ここで、図２１（ｃ）では開口絞り９４を図示したが、開口絞りは必ずしも必要ではない。また、実際は発光領域９６ａと発光領域９６ｂの境界は離散的ではない。実際のＬＥＤ素子の発光分布は図２１（ａ）に示すような離散的なものではなく、また光学系の収差の影響で瞳面ではＬＥＤ素子の光学像がぼけて投影されるためである。９５ａと９５ｂの境界を明確に分離することを目的として、開口絞り９４の代わりに波長フィルタを挿入してもよい。

20

【００８５】

上記の説明で、ＬＥＤ素子の発光波長により発光分布を異ならせる例を示したが、必ずしも異なる発光分布である必要はないことを以下で説明する。実施例３で説明した通り、集光部２３の焦点距離を異ならせることにより、異なる有効光源分布を形成することが可能である。実施例３と実施例５を組み合わせ、例えば、第１の波長特性１を有する第１のＬＥＤ素子に対応する集光部２３について、図１６（ａ）の瞳面強度分布を形成するよう焦点距離を設定する。また、第２の波長特性２を有する第２のＬＥＤ素子に対応する集光部２３について、図１６（ｂ）の瞳面強度分布を形成するよう焦点距離を設定する。これらを重畳することで波長により異なる有効光源分布を形成することが可能である。

30

【００８６】

式（４）より、デフォーカスに伴うコントラストの低下を抑制するのに適した照明条件である c は、露光波長に比例する。これは、短波長の露光光にとって好適なマスクの照明角度より、長波長の露光光にとって好適なマスクの照明角度が大きいことに相当する。瞳上の光量分布の観点で表現し直すと、短波長の光の有効光源分布よりも長波長の光の有効光源分布が照明光学系１０を中心として、より外側で局在するような分布が望ましいといえる。定量的に表現すると、以下の式（５）のように表せる。

40

【００８７】

【数４】

$$\int_S \{I(f_x, f_y) \times \sqrt{f_x^2 + f_y^2}\} dS / \int_S I(f_x, f_y) dS \cdots (5)$$

ここで、 f_x 、 f_y は瞳面上の座標、 S は瞳面上で有効光源分布が形成されている領域、 $I(f_x, f_y)$ は有効光源分布の照度分布（単位面積あたりの光量分布）、 dS は微小面積要素である。式（５）は、ある点の光量をその点の中心からの距離を乗じて総和を

50

とった数値を、総光量で除したものであり、照明光学系 10 を中心として、外側に局在する分布であるほどより大きな値をとる。図 22 は、分布 A ～ 分布 D の 4 種類の分布に対して式 (5) を評価した結果である。光強度は全て 1 としている。

【0088】

分布 A と分布 B はそれぞれ、 $r = 0.00 - 0.50$ 、 $r = 0.00 - 0.90$ である円形状の分布であり、分布 C と分布 D はそれぞれ、 $r = 0.45 - 0.90$ 、 $r = 0.70 - 0.90$ である輪帯形状の分布である。図 22 の内 r は r の最小値、外 r は r の最大値を表している。分布 A、分布 B、分布 C、分布 D の順番で、照明光学系 10 を中心として、より外側に局在するような分布であるが、この順番で式 (5) の評価値も大きくなる。

【0089】

第 1 の波長特性 1 の有効光源分布における式 (5) の評価値を $V1$ とし、第 2 の波長特性 2 の有効光源分布における式 (5) の評価値を $V2$ とする。ここで、第 1 の波長特性 1 の重心波長と第 2 の波長特性 2 の重心波長を比較して、第 2 の波長特性 2 の重心波長が長波長であるとする。このとき、 $V1$ より $V2$ が大きくなるような有効光源分布であれば式 (4) の条件に適するため、ラインアンドスペースパターンに対する解像性能向上効果が得られる。ここで、重心波長とは、波長 λ に対する光源の発光光量を $I(\lambda)$ とするとき、以下の式 (6) で算出される波長を指す。

【0090】

【数 5】

$$\int \{I(\lambda) \times \lambda\} d\lambda / \int I(\lambda) d\lambda \cdots (6)$$

実施例 5 では、複数の波長域ごとに適切な有効光源分布を形成する変形照明であっても、光量の損失を抑制することができる。したがって、光量の損失を抑制すると共に、コントラストや DOF の性能を向上させる効果も期待できる。

【0091】

< 物品の製造方法 >

次に、前述の露光装置を利用した物品（フラットパネルディスプレイ、液晶表示素子、半導体 IC 素子、MEMS 等）の製造方法を説明する。物品の製造方法は、プレート上に塗布された感光剤に上記の露光装置を用いて潜像パターンを形成する工程（プレートを露光する工程）と、かかる工程で潜像パターンが形成されたプレートを現像する工程とを含む。更に、かかる製造方法は、他の周知の処理（酸化、成膜、蒸着、ドーピング、平坦化、エッチング、レジスト剥離、ダイシング、ボンディング、パッケージング等）を行う工程を含む。本実施形態の物品の製造方法は、従来の方法に比べて、物品の性能・品質・生産性・生産コストの少なくとも 1 つにおいて有利である。

【0092】

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ず、その要旨の範囲内で種々の変形及び変更が可能である。例えば、本発明は多重露光に適用することも可能である。また、本発明の変形照明をマスクレス露光装置に適用しても良い。

【符号の説明】

【0093】

- 1 マスク
- 2 プレート
- 10 照明光学系
- 22 LED 素子
- 100 露光装置
- 101 投影光学系

10

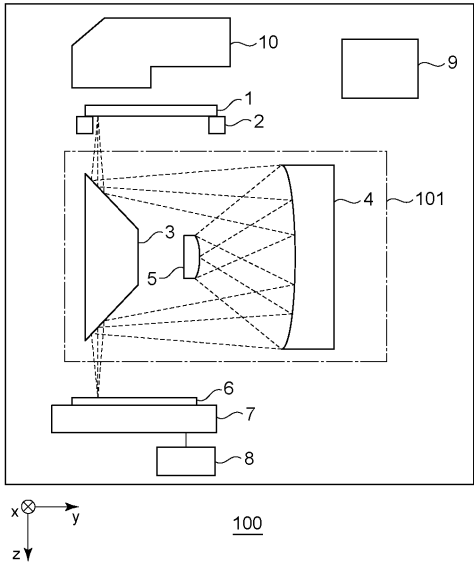
20

30

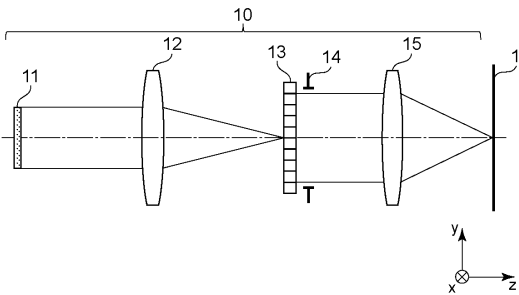
40

50

【図面】
【図 1】



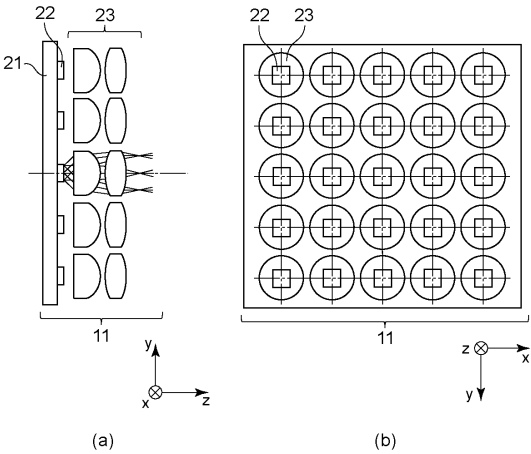
【図 2】



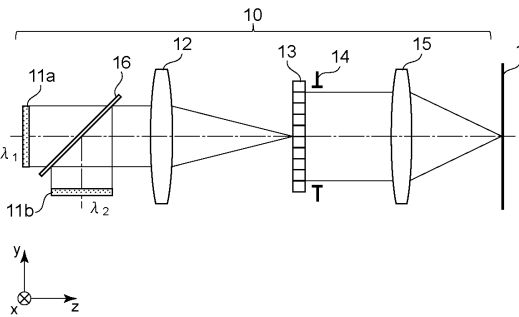
10

20

【図 3】



【図 4】

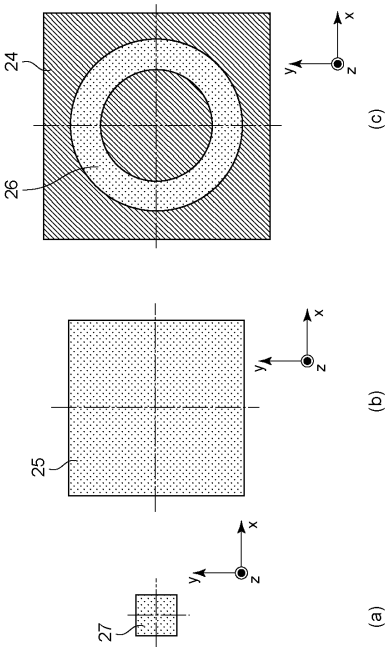


30

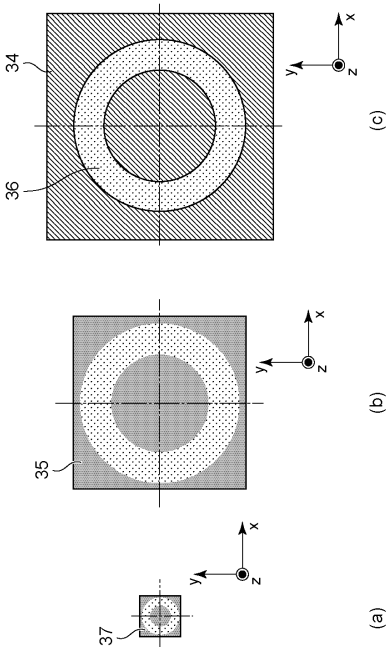
40

50

【図 5】



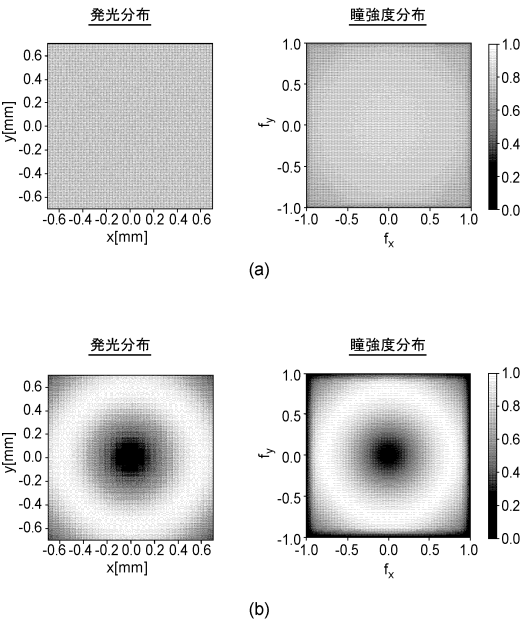
【図 6】



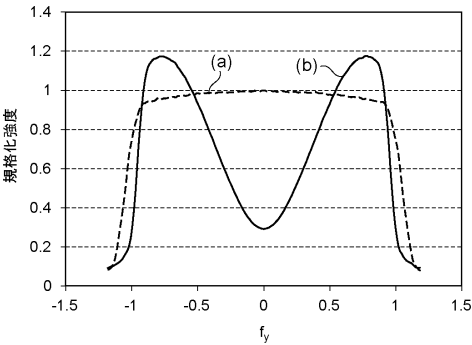
10

20

【図 7】



【図 8】

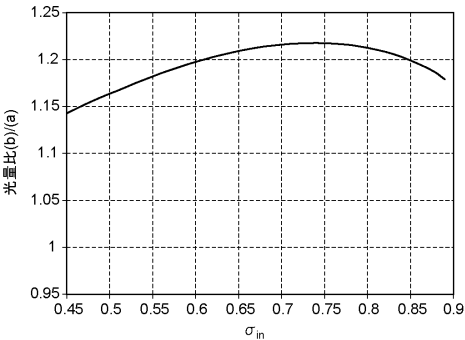


30

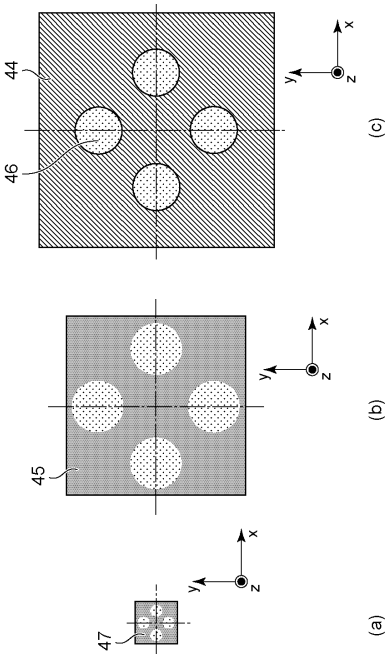
40

50

【図 9】



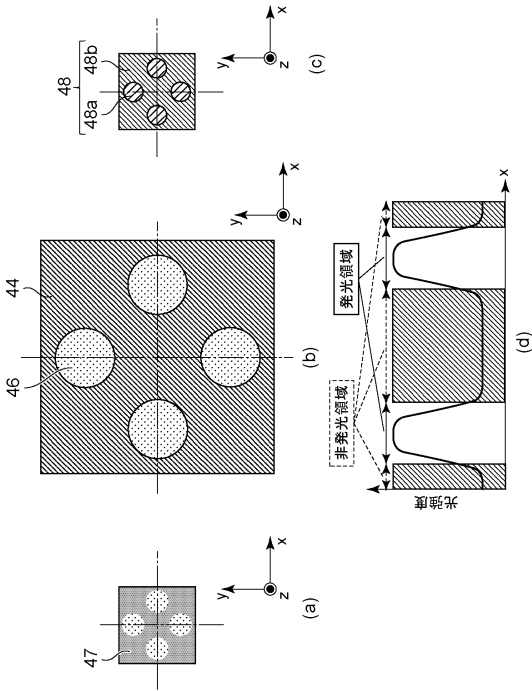
【図 10】



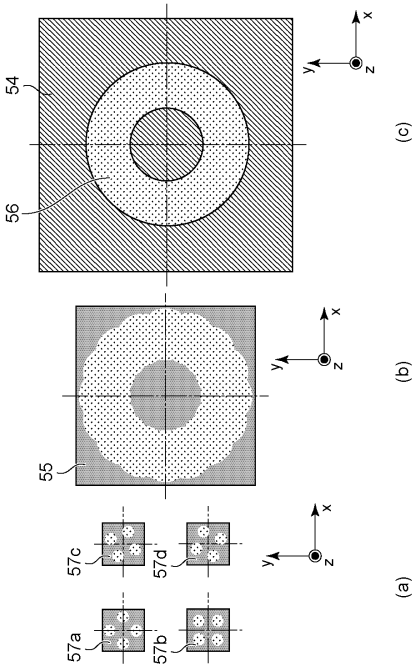
10

20

【図 11】



【図 12】

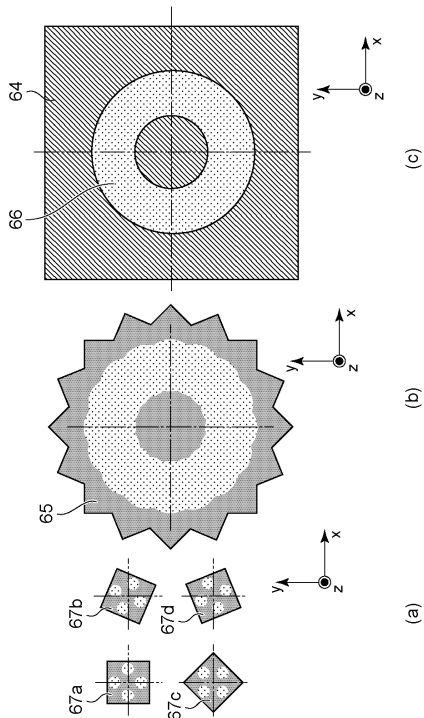


30

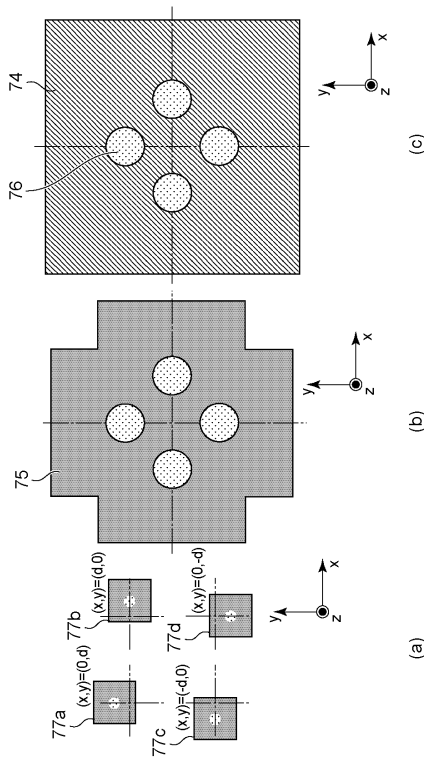
40

50

【図 1 3】



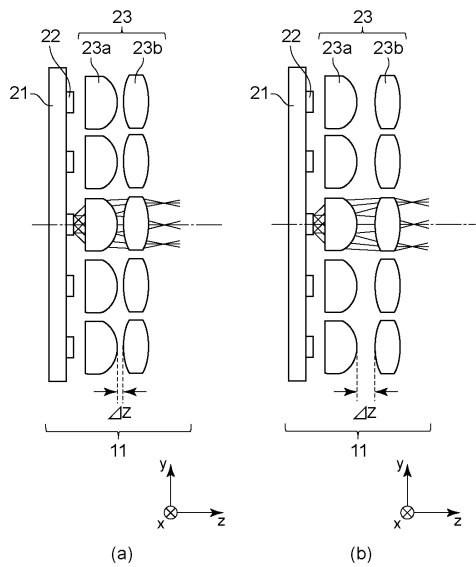
【図 1 4】



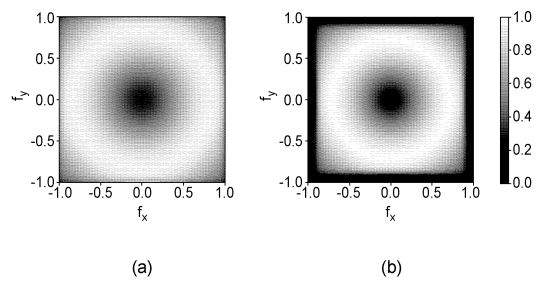
10

20

【図 1 5】



【図 1 6】

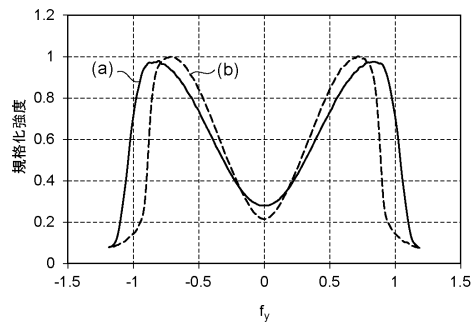


30

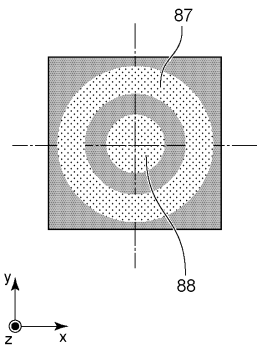
40

50

【図 1 7】



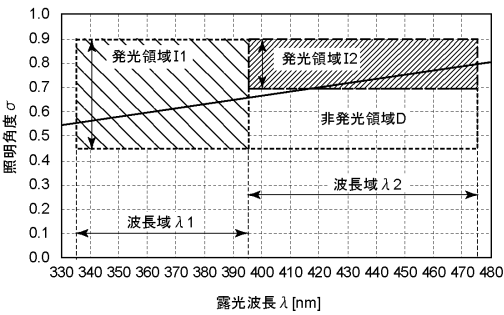
【図 1 8】



10

20

【図 1 9】



【図 2 0】

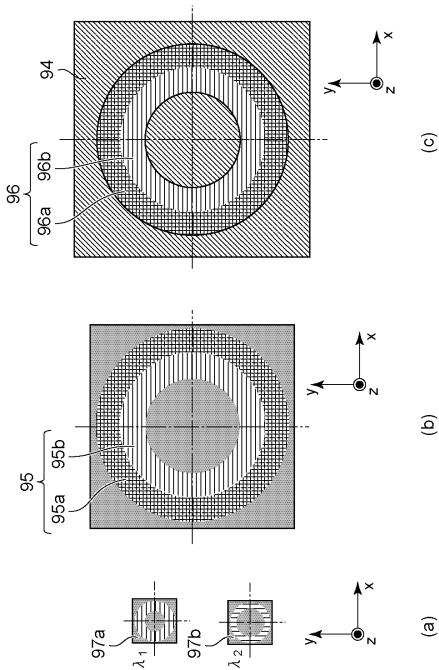
	輪帯(比較例) 365nm : $\sigma = 0.45 - 0.90$ 405nm : $\sigma = 0.45 - 0.90$	実施例5 365nm : $\sigma = 0.45 - 0.90$ 405nm : $\sigma = 0.70 - 0.90$
分布図		
空中像 コントラスト	0.57	0.59
Side-wall angle [度]	72.0	72.2
レジスト DOF[μm]	43.9	49.5

30

40

50

【図 2 1】



【図 2 2】

	分布A	分布B	分布C	分布D
内 σ	0.00	0.00	0.45	0.70
外 σ	0.50	0.90	0.90	0.90
式(5)評価値	0.33	0.60	0.70	0.80
分布図				

10

20

30

40

50

フロントページの続き

キヤノン株式会社内
(72)発明者 八講 学
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 植木 隆和
(56)参考文献 特開平10-022222(JP,A)
特開2007-242775(JP,A)
特開2009-043933(JP,A)
米国特許出願公開第2010/0220306(US,A1)
国際公開第2015/015749(WO,A1)
特開2016-188878(JP,A)
国際公開第2016/152359(WO,A1)
特開2017-073549(JP,A)
特開2018-022884(JP,A)
特開2020-122921(JP,A)
米国特許第06233039(US,B1)
(58)調査した分野 (Int.Cl., DB名)
H01L 21/027
G03F 7/20