

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 特 許 公 報 (B2)

(11) 特許番号
特許第5744579号
(P5744579)

(45) 発行日 平成27年7月8日 (2015.7.8)

(24) 登録日 平成27年5月15日 (2015.5.15)

(51) Int.Cl.	F I
HO 1 L 21/027 (2006.01)	HO 1 L 21/30 5 4 1 W
GO 3 F 7/20 (2006.01)	GO 3 F 7/20 5 0 4
HO 1 J 37/305 (2006.01)	HO 1 L 21/30 5 4 1 B
HO 1 J 37/12 (2006.01)	HO 1 J 37/305 B
	HO 1 J 37/12

請求項の数 8 (全 23 頁)

(21) 出願番号	特願2011-56811 (P2011-56811)	(73) 特許権者	000001007
(22) 出願日	平成23年3月15日 (2011.3.15)		キヤノン株式会社
(65) 公開番号	特開2012-195368 (P2012-195368A)		東京都大田区下丸子3丁目30番2号
(43) 公開日	平成24年10月11日 (2012.10.11)	(74) 代理人	100126240
審査請求日	平成26年3月17日 (2014.3.17)		弁理士 阿部 琢磨
		(74) 代理人	100124442
			弁理士 黒岩 創吾
		(72) 発明者	加藤 貴久
			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	▲瀬▼戸本 豊
			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	新井 重雄

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 荷電粒子線レンズおよびそれを用いた露光装置

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

静電型の荷電粒子線レンズであって、
前記荷電粒子線レンズは、光軸方向を法線とする第1の面と、前記第1の面とは反対側の第2の面とを有する平板からなり、
前記平板は、前記第1の面から前記第2の面に貫通する貫通孔を有し、
前記貫通孔の法線に垂直な面での開口面を開口断面とし、
前記開口断面を挟む、中心が同一な2つの同心円のなかで、2つの同心円の半径の差が最小になる2つの同心円を、半径の小さい方からそれぞれ内接円、外接円とすると、
前記第1の面側である第1の領域における開口断面の内接円と外接円の半径の差と、
前記第2の面側である第2の領域における開口断面の内接円と外接円の半径の差とが各々、前記第1の面と前記第2の面とで挟まれた前記平板の内部の領域である第3の領域における開口断面の内接円と外接円の半径の差よりも小さく、
前記第1の領域及び前記第2の領域における開口断面の少なくとも一方は、
前記開口断面の内接円と外接円の半径の差が、前記第1の領域及び前記第2の領域の少なくとも一方の内部から、前記第1の面又は前記第2の面に近づくにつれて小さくなることを特徴とする荷電粒子線レンズ。

【請求項 2】

前記開口断面の回帰分析により得られた円の直径を代表直径とすると、
前記第1の領域及び前記第2の領域における開口断面の代表直径は、

前記第 3 の領域における開口断面の代表直径より小さいことを特徴とする請求項 1 に記載の荷電粒子線レンズ。

【請求項 3】

前記第 1 の領域及び前記第 2 の領域における開口断面の代表直径は、

前記第 3 の領域における開口断面の代表直径の 40%より大きいことを特徴とする請求項 2 に記載の荷電粒子線レンズ。

【請求項 4】

前記第 1 の領域及び前記第 2 の領域の厚さは、

前記第 3 の領域の厚さよりも小さいことを特徴とする請求項 1～3 の何れか 1 項に記載の荷電粒子線レンズ。

10

【請求項 5】

前記第 1 の領域の厚さは、前記第 1 の領域における開口断面の代表直径の $1/8$ より大きく、

前記第 2 の領域の厚さは、前記第 2 の領域における開口断面の代表直径の $1/8$ より大きいことを特徴とする請求項 1～4 の何れか 1 項に記載の荷電粒子線レンズ。

【請求項 6】

前記第 1 の領域及び前記第 2 の領域の少なくとも一方が、前記第 3 の領域に対して積層又は接合された構造であることを特徴とする請求項 1～5 の何れか 1 項に記載の荷電粒子線レンズ。

【請求項 7】

20

前記平板は、電気伝導性膜で覆われていることを特徴とする請求項 1～6 の何れか 1 項に記載の荷電粒子線レンズ。

【請求項 8】

請求項 1 に記載された荷電粒子線レンズと、

前記荷電粒子線レンズを通る電子ビームを放射する電子源と、

前記荷電粒子線レンズと前記電子源とを制御する制御手段と、を有することを特徴とする露光装置。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

30

本発明は、電子ビーム等の荷電粒子線を用いた装置に使用される電子光学系の技術分野に属し、特に露光装置に用いられる電子光学系に関するものである。また、本発明において、光とは広義の光を意味し、可視光だけでなく、電子線等の電磁波も含む。

【背景技術】

【0002】

半導体デバイスの生産において、電子ビーム露光技術は、 $0.1\mu\text{m}$ 以下の微細パターン露光を可能とするリソグラフィの有力候補である。これらの装置では、電子ビームの光学特性を制御するための電子光学素子が用いられる。電子レンズには、電磁型と静電型があり、静電型は電磁型に比べコイルコアを設ける必要がなく構成が容易であり小型化に有利となる。また、電子ビーム露光技術のうち、マスクを用いずに複数本の電子ビームで同時にパターンを描画するマルチビームシステムの提案がなされている。マルチビームシステムでは電子レンズを 1 次元または 2 次元のアレイ状に配列した電子レンズアレイが用いられる。電子ビーム露光技術では、微細加工の限界が電子ビームの回折限界より主に電子光学素子の光学収差で決定されるので、収差の小さい電子光学素子を実現することが重要である。

40

【0003】

特許文献 1 には、複数の電極基板を有する静電レンズ装置であって、複数の電極基板は光軸に対して垂直な面内に配置された開口を有し、各電極の開口の配置を調整して組み立てる静電レンズ装置が開示されている。また特許文献 2 には、セラミックスで形成された筒状基材と、前記筒状基材の内周面に沿って形成された第 1 の金属層と、前記筒状基材の

50

前記内周面のエッジを覆うように形成された第2の金属層とを含む電極を備える荷電ビーム装置が開示されている。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0004】

【特許文献1】特開2007-019194

【特許文献2】特開2006-139958

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0005】

10

静電型の荷電粒子線レンズは、電磁型のレンズと比較すると相対的に構造は単純だが、レンズ開口の製造誤差に対する光学収差の敏感度が高い。特に開口が円形の場合の真円度（円であるべき部分の幾何学的円からの狂いの大きさ）のような開口形状の対称性に対する非点収差が敏感である。非対称性を有する開口の形状の影響を受けて収束された電子ビームは非点収差やその他の高次項の収差を持つ。

【0006】

特に、電子ビームが複数本あり、個々のビームが異なる非点収差を持つ場合、通常の非点収差補正器を用いて補正することができないため重要な課題となる。

【0007】

また、電極の剛性が低いと電子光学特性を制御するための電圧による静電引力で電極が変形する。電極に変形が生じるとレンズの焦点距離に誤差が生じることとなる。

20

【0008】

特に、複数本の電子ビームを制御する電子レンズアレイの場合、開口をアレイ状に配置するため電極面積が大きくなり電極の剛性が低下しやすいため重要な課題となる。

【課題を解決するための手段】

【0009】

本発明は、静電型の荷電粒子線レンズであって、前記荷電粒子線レンズは、光軸方向を法線とする第1の面と、前記第1の面とは反対側の第2の面とを有する平板からなり、前記平板は、前記第1の面から前記第2の面に貫通する貫通孔を有し、前記貫通孔の法線に垂直な面での開口面を開口断面とし、前記開口断面を挟む、中心が同一な2つの同心円のなかで、2つの同心円の半径の差が最小になる2つの同心円を、半径の小さい方からそれぞれ内接円、外接円とすると、前記第1の面側である第1の領域における前記開口断面の内接円と外接円の半径の差と、前記第2の面側である第2の領域における前記開口断面の内接円と外接円の半径の差とが各々、前記第1の面と前記第2の面とで挟まれた前記平板の内部の領域である第3の領域における前記開口断面の内接円と外接円の半径の差よりも小さく、前記第1の領域及び前記第2の領域における開口断面の少なくとも一方は、前記開口断面の内接円と外接円の半径の差が、前記第1の領域及び前記第2の領域の少なくとも一方の内部から、前記第1の面又は前記第2の面に近づくにつれて小さくなることを特徴とする。

30

【発明の効果】

40

【0010】

本発明によれば、レンズ全体の非点収差やそれより高次の収差を決定することができる。そして、レンズの収差の増加を抑えながら電極全体の厚さを厚くすることができる。

【図面の簡単な説明】

【0011】

【図1】(a)本発明の実施例1の荷電粒子線レンズの断面図である。(b)本発明の実施例1の荷電粒子線レンズの上面図である。

【図2】(a)図1(a)の破線Mで囲まれた領域の拡大した断面図である。(b)本発明の実施例1の別の開口断面図である。(c)本発明の実施例1の別の開口断面図である。

50

【図 3】(a) 図 2 (a) の破線 Y で囲まれた領域の拡大した断面図である。(b) 図 3 (a) の線分 P Q で示される領域の変位を示すグラフである。(c) 図 3 (b) のグラフの微分係数を示すグラフである。

【図 4】本発明の実施例 1 の第 1・第 2 領域の非点収差が全体に占める割合を示すグラフである。

【図 5】本発明の実施例 1 の設計例を示す表である。

【図 6】荷電粒子線レンズの収束効果を説明する概念図である。

【図 7】荷電粒子線レンズの開口表面付近の電位分布を示す概念図である。

【図 8】本発明の実施例 3 の荷電粒子線レンズの断面図である。

【図 9】(a) 図 8 破線 U で囲まれた領域の拡大断面図である。(b) 従来技術による開口を示した断面図である。

10

【図 10】(a) ~ (f) 本発明の開口断面の真円度・代表半径・代表直径を説明する上面図である。

【図 11】本発明の実施例 2 の荷電粒子線レンズを示す断面図である。

【図 12】(a) ~ (c) 開口断面の代表直径・代表半径の定義を説明する概念図である。

【図 13】本発明の実施例 4 の描画装置を示す概念図である。

【図 14】厚さ方向への代表直径の定義を説明する概念図である。

【図 15】本発明の実施例 1 の開口断面の断面図である。

【図 16】本発明の実施例 1 の第 3 の領域の収差の寄与率を示すグラフである。

20

【図 17】(a) 第 3 の領域の真円度の分布を示すグラフである。(b) 第 3 の領域の収差の寄与率を示すグラフである。

【図 18】第 3 の領域の直径と収差分布を示すグラフである。

【発明を実施するための形態】

【0012】

本発明において第 1 の面、第 2 の面とは、本発明の荷電粒子線レンズを構成する電極の一方の面（表面）とその反対側の面（裏面）を意味する。また、第 1 の領域、第 2 の領域、及び第 3 の領域は、上記電極を厚さ方向で所定の厚さに 3 つに分割した場合の各々の領域を意味する。

【0013】

30

本発明において、「第 X の面から第 Y の面へ貫通する貫通孔（X、Y は 1 から 6 の整数）」とは、第 X の面と第 Y の面とを連通するように形成された貫通孔を意味するものであって、貫通孔形成時の孔を開ける向きは問わない。即ち第 X の面側から貫通孔を形成しても良く、第 Y の面側から貫通孔を形成しても良く、第 X の面側と第 Y の面側の両方から貫通孔を形成しても良い。

【0014】

本発明の荷電粒子線レンズは、第 1 の領域・第 2 の領域の開口と第 3 の領域の開口とに荷電粒子が通過する開口を電極の厚さ方向に分割して構成する。そして、第 1 の領域、第 2 の領域の開口の形状誤差（本発明の真円度（定義は後述）は第 3 の領域の開口の形状誤差よりも小さくなるように構成する。但し、本発明における上記「分割」とは必ずしも物理的に分離されている必要はなく、一体的に形成されていても良い。要するに 3 つの領域に分割して真円度を設計することが本発明の特徴の 1 つである。このように開口を複数の領域に分けて分割して設計することにより、第 1・第 2 の領域の開口断面がレンズ全体の収差に与える影響を大きくすることができる。本発明において開口断面とは、電極に形成した貫通孔の、電極面の法線である光軸に垂直な面での開口の断面をいう。即ち貫通孔の注目している領域 / 部分において、光軸に垂直な面における開口部の断面がその領域 / 部分における開口断面となる。したがって、第 3 の領域の開口断面の精度が悪くても、第 1・第 2 の領域の形状精度によってレンズ全体の非点収差やそれより高次の収差を決定することができる。そして、第 3 の領域の厚さを大きくすることでレンズの収差の増加を抑えながら電極全体の厚さを厚くすることができる。

40

50

【 0 0 1 5 】

また本発明の荷電粒子線レンズは、第 1・第 2 の領域の開口の代表直径を D_1 とし、第 3 の領域の開口の代表直径を D_2 とすると、直径 $D_1 < D_2$ とすることにより、第 1・第 2 の開口のレンズ収差への寄与率を更に上げることができる。そのため第 1・第 2 の領域の厚さを薄く設定することができ加工を容易とし加工精度も向上することができる。そして、第 3 の領域の開口のレンズ収差への寄与率を下げるため、この部分（第 3 の領域）の厚さをより厚くして電極全体の剛性を向上させることができる。

【 0 0 1 6 】

また本発明の荷電粒子線レンズは、前記第 1 の領域および前記第 2 の領域の代表直径を前記第 3 の領域における代表直径の 40% より大きくすることが好ましい。このような構成とすることで、第 1・第 2 の領域が第 3 の領域の開口へ突出した形状の変形と第 1・第 2・第 3 の領域の開口の加工誤差に対する変形ばらつきの両方を小さくすることができる。そのため変形により第 1・第 2 の領域の開口の真円度がばらついたり、実効的な直径 D_1 がばらついたりするのを低減することができる。

【 0 0 1 7 】

また本発明の荷電粒子線レンズは、第 1・第 2 の領域の厚さを第 3 の領域の厚さよりも小さくすることにより、第 1・第 2 の領域の開口の形状加工の精度を第 3 の形状加工の精度よりも高精度とすることが可能となる。また、許容誤差の大きい第 3 の領域の開口加工を厚い（深い）貫通孔加工とすることができるため、基板貫通孔加工の難易度を下げ低コストに加工を行うことが可能となる。

【 0 0 1 8 】

また本発明の荷電粒子線レンズは、第 1・第 2 の領域の開口の収差の合計が電極全体の収差の 80% を決定する構造とすることができる。この時、第 3 の領域の開口の真円度は第 1・第 2 の 2 倍以上許容できる構造となる。第 3 の領域の開口の真円度を第 1・第 2 の領域より 2 倍以上許容することができれば、第 3 の領域の厚さを第 1・第 2 の領域と比べて大きくしても実際の加工を容易とすることが可能となる。

【 0 0 1 9 】

また本発明の荷電粒子線レンズは、形状精度が必要な第 1・第 2 の領域の開口を形成する工程と第 3 の領域の開口を形成する工程を別々に行うことができる。そのため、半導体製造技術により微細・高精度な開口を形成しエッチング条件の制御や歩留まりを向上することができる。特に、フォトリソグラフとドライエッチングといった高精度の加工技術と平坦性の高いシリコンウエハを介したウエハ接合により微細な開口を有する電極を高精度に形成可能となる。数十 μm オーダの開口径を nm オーダの真円度で静電型の荷電粒子線レンズ形成することが可能となる。この際、必要に応じてウエハを複数接合して積層構造とすることもできる。例えば、ウエハの厚さが厚くなると一般に加工精度が低下するため、1 枚のウエハの厚さは求められる加工精度に応じて決定（精度を高くする場合には薄くする）する。その結果電極全体の厚さが不足する場合に複数層のウエハを積層することが好ましい。さらに積層するものは、ウエハには限定されず、例えばスパッタ法、CVD 法、気相又は液相のエピタキシャル成長法、めっき法等で必要な堆積膜を形成することにより電極とすることもできる。

【 0 0 2 0 】

また本発明の荷電粒子線レンズは、必要に応じて電極全体を電気伝導性膜で覆うことにより電極電位を一定とし、意図しない帯電により荷電粒子線が揺らぐのを防ぐことができる。

【 0 0 2 1 】

また本発明の荷電粒子線レンズによれば、電極が複数の開口を有する荷電粒子線レンズアレイとすることができる。レンズ収差に寄与の大きい第 1・第 2 の領域の開口断面を高精度加工できるので、レンズアレイの個々のレンズの開口断面の真円度のばらつきを低減することができる。レンズアレイの場合、個々のレンズの真円度は偶然誤差なので、個別

10

20

30

40

50

に補正を行うことは難しい。しかし本発明により開口断面の真円度のばらつきを低減できるので、大規模なレンズアレイとしても個別の補正の必要性を無くすか若しくは大きく低減することができる。そして、接合構造による電極を用いる場合は、開口断面のばらつきを十分に低減することができる。接合のアライメント精度により第１・第２の領域の開口の位置ずれが生じるが、このずれはレンズアレイ全体の系統的な位置ずれであるため補正することが容易である。そのため、大規模なレンズアレイに好適な形態となる。

【００２２】

また本発明の荷電粒子線レンズは、収差への誤差の寄与率が低い位置に加工誤差の最も悪い部分を形成することができるため、収差の増加を抑えることができる。また、寄与率が最も高い電極の表裏面に真円度が最もよい部分を形成することができるため、収差を低減することができる。これは、特に、シリコンの深堀ドライエッチングを用いるときに有効で、基板へのエッチング方向を変更するだけで収差を低減することができる。

10

【００２３】

また本発明の露光装置は、収差の少ない本発明の荷電粒子線レンズを用いることで、高精度の微細パターンが形成可能な露光装置とすることができる。

【００２４】

また本発明の露光装置によれば、収差の少ない本発明の荷電粒子線レンズを用い、複数の荷電粒子線を用いることで、高精度の微細パターンを描画時間を短く形成可能な露光装置とすることができる。

【実施例】

20

【００２５】

以下実施例により本発明をさらに詳細に説明するが本発明はこれらの実施例によって何ら限定されるものではない。

【００２６】

（実施例１）

図１～図７を用いて、本発明の実施例１を説明する。

【００２７】

図１（ａ）は本発明の荷電粒子線レンズの図１（ｂ）Ａ－Ａ'線における断面図、（ｂ）は荷電粒子線レンズの上面図である。

【００２８】

30

図１（ａ）に示すように、本発明の荷電粒子線レンズは電極３Ａ、３Ｂ、３Ｃの３枚の電極を有している。３枚の電極は、光軸Ｊを法線とする平板であり、一方の面である第１の面とその反対側の面である第２の面を有しており、各電極は互いに電氣的に絶縁されている。第１の面は典型的には表面であり、第２の面は典型的には裏面である。但しここでいう、「表」、「裏」とは相対的な関係を示す便宜的な表現である。電極３Ａ、３Ｂ、３Ｃはそれぞれ給電パッド１０を有しており、このパッドを介して電極の電位を規定することができる。また光軸Ｊの矢印の方向に、図示しない光源から射出された荷電粒子線が通過する。

【００２９】

３枚の電極は、少なくとも第１の領域５、第２の領域６、と第１、第２の領域に挟まれた第３の領域７の３つの領域を有している。光軸Ｊの方向の寸法を電極の厚さとすれば、第１の領域５は、図１（ａ）の通り光軸Ｊの光源側の電極の表面を含んで一定の厚さを有して形成されている。同様に第２の領域６は、光軸Ｊの光源とは反対側の電極の表面を含んで一定の厚さを有して形成されている。そして、第３の領域７は、第１・第２の領域に挟まれた一定の厚さを有する領域であり、電極の残りの領域として定義される。

40

【００３０】

第１・第２・第３の領域５～７は、開口２Ａ、２Ｂ、２Ｃをそれぞれ有している。そして、図示の通り開口２Ａ、２Ｂ、２Ｃは電極を厚さ方向へ貫通する貫通孔である。荷電粒子線がこの開口を通過することができる。また、図１（ｂ）のように開口２Ａは円形状を有している。同様に、光軸Ｊを法線とする平面での開口を開口断面とすれば、開口２Ｂ

50

、２Ｃの開口断面も開口２Ａとほぼ同心円状の円形状である。ただし、開口２Ｃの開口断面は２Ａ、２Ｂに比べて直径が大きく図１（ａ）に示すように電極３Ａ、３Ｂ、３Ｃは、出入口の直径が小さい開口で形成される貫通孔のプロファイルを有することとなる。ここで光軸とは電子線が通過する方向である。

【００３１】

例えば、電極３Ｂには、負極性の静電圧を印加し、電極３Ａ、３Ｃはアース電位とすることで、いわゆるアインツェル型の静電レンズを構成することができる。本発明において、アインツェル型の静電レンズとは、複数（典型的には３つ）の電極を間に所定の間隔をおいて配置し、最外部に位置する電極をアース電位とし、間の電極を正又は負の極性の電位を印加する構成を有する静電レンズを意味する。３つの電極から構成される場合であれば荷電粒子線の入射側から１つ目と３つ目の電極がアース電位で、２つ目の電極が正又は負の極性の電位を印加する構成となる。荷電粒子線は、電極３Ａ、３Ｂ、３Ｃの開口を順に通過することで、レンズの効果を受ける。同時に、電極３Ａ、３Ｂまたは、３Ｂ、３Ｃ間には静電引力が発生する。

10

【００３２】

そして、本発明の荷電粒子線レンズでは、第１の領域５、第２の領域６に形成された開口２Ａ、２Ｂは、第３の領域７に形成された開口２Ｃの開口断面に比べ円形状の真円度が高くなっている（つまり真円に近い円形状となっている）。

【００３３】

本発明の荷電粒子線レンズは、このように第１、第２の領域の開口断面のみ対称性を高くすることで、電極の剛性を保ちながら静電型の荷電粒子線レンズの収差を低減することが可能となる。

20

【００３４】

まず、図１０を用いて本発明の荷電粒子線レンズの説明に必要な開口断面の対称性の定義を行う。静電型の荷電粒子線レンズのレンズ効果を生じる静電場は開口断面によって形成される。特に光軸Ｊを軸とした回転対称性のずれの大きさにより非点収差やより高次の収差が発生するため、真円からのずれが重要な指標となる。

【００３５】

図１０（ａ）は理想的な円形の開口断面４を示している。一方、（ｂ）には楕円の開口断面４を示している。本発明の荷電粒子線レンズの非点収差やより高次の収差に影響を与える形状誤差として次のような指標を定義する。図１０（ｂ）の楕円の開口断面４を２つの同心円で挟む。内側の円を内接円１１、外側の円を外接円１２とする。このような同心円の組み合わせは同心円の中心を選べば様々に存在するが、その中で内接円・外接円の半径の差が最も小さい２つを選ぶ。このように選択した内接円・外接円の半径の差の１／２を真円度と呼ぶ。真円度は、図１０（ａ）のような完全に円形の開口断面４の場合、外接円と内接円が一致するため０となる。

30

【００３６】

そして図１０（ｃ）のように、楕円以外の任意の形状についても同様の方法で真円度を定義することができる。

【００３７】

40

また円形状が理想形状ではなく、図１０（ｄ）に示すように多角形（以下の説明では一例として八角形）を設計上の理想形状とした場合でも以下の方法により、真円度・代表半径・代表直径を定義（代表半径・代表直径の定義は後述）できる。即ち、上記の真円度・代表半径・代表直径を定義して理想の八角形からの対称性のずれと開口の大きさを比較することができる。図１０（ｄ）は理想的な正八角形の外接円１１・内接円１２を示している。このように八角形の場合は、理想状態でも真円度は０以上となる。しかし、図１０（ｅ）に示すように八角形に形状誤差が生じ正八角形からずれた場合、外接円１１・内接円１２は図示のようになる。したがって、図１０（ｄ）と（ｅ）の真円度を比較すれば、正八角形より真円度は大きくなる。

【００３８】

50

これらの真円度は、断面形状を実際に測定して定義することができる。周長に対して十分な分割数で測定し、画像処理で外接円 11・内接円 12 を求めて算出することができる。

【0039】

ここで、上記した代表直径・代表半径は以下のように定義する。図 12 には図 10 (c) の開口断面 4 の代表直径を決定する手順を示している。図 12 (a) のような開口断面 4 は図 12 (b) に示すように輪郭線を十分に細かい間隔の離散的な測定点 13 の集合として測定する。必要な間隔は開口断面 4 の凹凸の代表的な周期の半分より細かいことが望ましい。このようにして測定した測定点 13 を用いて図 12 (c) に示すように、代表円 14 を 1 つ決定することができる。測定点 13 を用いて、回帰分析を行い円の方程式に幾何学的にフィッティングを行う。回帰分析には最小自乗法を用いることができるが、その他のアルゴリズムを用いてもよい。このようにして決定した代表円 14 の直径・半径をそれぞれ代表直径・代表半径とすることができる。荷電粒子線は、開口の中心を通過するため光軸上とその付近の電位分布を規定する代表形状として代表円の代表直径・代表半径は重要となる。

10

【0040】

また、図 10 (f) に示すように開口断面 4 のほとんどの部分が円形であり、ごく一部が突出したような形状の開口断面の場合でも、上記の方法で、光軸付近の静電場に寄与している代表形状として代表円を決定し、代表直径・代表半径を求めることができる。そして、このような円が得られれば、フィッティングで求めた円の中心と同心円を描き、外接円 11・内接円 12 を定義することができる。

20

【0041】

次に、厚さ方向への第 1・第 2・第 3 の領域における開口断面の真円度について説明する。図 14 は、シリコンの深堀ドライエッチングによる貫通孔を図 2 (a) の第 3 の領域 7 へ適用した場合を示している。図 14 には特に第 3 の領域 7 だけを抜粋して示している。図の矢印 T1 ~ T5 に示すように深さ方向の任意の位置で開口断面を定義することができる。このような個々の開口断面について前述した代表直径・真円度を定義することができる。ここで第 3 の領域 7 の代表直径・真円度とはこのよう開口の深さ方向へ任意の位置で定義される。領域の最表面以外の代表直径・真円度の測定については、開口を一度メッキ等で埋め戻し研磨することで観察して確認することができる。また、このような直接の測定を行わずに最表面の測定で代表することもできる。第 1・第 2・第 3 の領域の最表面以外の箇所は、後述するように収差への寄与が更に少なくなる部分であり、最表面に比べ代表直径・真円度ともオーダが同程度の変化ならば収差への影響が少ない。したがって、開口の厚み方向の断面観察を数か所行って代表直径・真円度とも大きく値が異なる(例えばオーダが異なる(位が異なる)ような分布がない)ことを確認すれば、最表面の代表直径・真円度(つまり図 14 の場合 T1、T5 の位置)を測定しその平均値で代表することができる。

30

【0042】

上記の定義により、任意の開口断面についての真円度・代表半径・代表直径を定義する。以下明細書では、円形形状の開口断面を理想とする場合の説明とするが、開口断面の理想形は、八角形やその他任意の曲線でもよい。その場合でも、真円度・代表半径・代表直径を定義して本発明を実施することが可能となる。

40

【0043】

次に本発明の第 1・第 2 の領域の開口断面が収差に与える効果について詳細に説明する。

【0044】

まず、図 6 を用いて静電型の荷電粒子線レンズが荷電粒子線を収束させるメカニズムについて説明する。図ではレンズの半径方向を R 軸、光軸方向を J 軸とし図のように原点 O とする。そして、アインツェル型レンズを J 軸と平行な平面で切断した時に横から見た図である。アインツェル型レンズを構成する 3 枚の電極のうち、電極 3A、3C はアース電

50

位とし、電極 3 B には負の電位が印加されている。また荷電粒子線は負の電荷を有している。3 枚の電極 3 A、3 B、3 C は光軸 J を法線とする 3 枚の平板である。

【 0 0 4 5 】

その状態における電気力線を実線の矢印 H で示した。また、J 方向で 3 枚の電極 3 A、3 B、3 C の中間面と 3 枚の電極間隔の中間面を破線 I で示した。さらに、図のように、J 軸の破線で区分される区間をそれぞれ区間 I、区間 I I、区間 I I I、区間 I V とする。そして、特にアインツェル型レンズの主なレンズ効果を説明するために、区間 I より原点 O 側の区間、区間 I V より J がより大きい区間には電位はないものと近似する。

【 0 0 4 6 】

R > 0 の領域での前記破線 I で区切られた区間 I、区間 I I、区間 I I I、区間 I V における R 方向の電界の向きをそれぞれ f 1、f 2、f 3、f 4 の矢印で示す。つまり、区間 I、区間 I I、区間 I I I、区間 I V それぞれで負、正、正、負となっている。そのため、ある像高 r 0 を通過する荷電粒子線の軌跡は矢印 E で示すようになる。つまり、区間 I では荷電粒子線は発散され、領域 I I では収束され、領域 I I I では収束され、領域 I V では発散される。これは、J 軸方向に光学的な凹レンズ・凸レンズ・凸レンズ・凹レンズが並んでいるのと等価である。

【 0 0 4 7 】

そして、荷電粒子線が収束される理由は以下の 2 つである。第 1 の理由は、荷電粒子線が受ける力は像高が高いほど強くなるため、区間 I I と区間 I I I における収束作用が区間 I と区間 I V における発散作用を上回るからである。第 2 の理由は、区間 I に比べ区間 I I が、区間 I V に比べ区間 I I I が荷電粒子線の走行時間が長いからである。運動量変化は力積に等しいため、走行時間が長い領域が電子ビームに与える効果が大きくなる。

【 0 0 4 8 】

以上の理由から収束効果をうけることとなる。なお、電極 3 B に正の電位を印加した場合も同様に荷電粒子線は収束される。また荷電粒子線の有する電荷を正電荷としても収束される。電極 3 B の電位・荷電粒子線の電荷の正負のいずれの組み合わせにおいても収束効果が現れる。そして、区間 I ~ I V の静電場を形成している開口の形状誤差により、収束場の対称性が崩れる場合、静電レンズは非点収差のような高次の収差を有することとなる。したがって、静電型の荷電粒子線レンズは電極に形成された開口の形状誤差が収差に敏感に影響を与えるため、開口形状を正確に形成することが必要となる。

【 0 0 4 9 】

開口の形状誤差は厚い電極へ開口を加工するほど低減するのが困難となる。電極の厚さが厚いと電極表裏の開口形状やその内部に渡って形状誤差を制御するのが難しくなる。そのため加工のコストが高くなり、精度によっては実現するのが困難になる場合がある。一方、加工難易度を下げるため電極の厚さを薄くすることが考えられる。この場合、電極に印加する電圧による静電引力によって電極の変形が生じてしまう。静電型のレンズの収差を小さくするためには、レンズの焦点距離を短くしてレンズの球面収差を低減することも必要となる。この場合電極間に印加する電界強度が大きくなるため静電引力が大きくなり電極の変形が顕著な課題となる。電極の変形が生じると電極間隔の誤差となり、開口が光軸 J から傾き後述するように荷電粒子線へのレンズ効果としての実質的な開口形状の対称性が崩れる場合がある。そのため、球面収差を低減してもそれより高次の収差が増加する、或いは 1 つの電極に開口が複数形成されるレンズアレイの場合には、個々のレンズの焦点距離にばらつきが生じる場合がある。

【 0 0 5 0 】

このように、静電型の荷電粒子線レンズの収差を低減するためには、形状誤差の少ない開口を有する剛性の高い電極が必要であり、このことが、静電型の荷電粒子線レンズの低収差化の課題となっていた。さらに、静電型のレンズアレイを形成するためには焦点距離のばらつきを低減するためにも上記課題は重要となる。

【 0 0 5 1 】

本発明の荷電粒子線レンズは、第 1 の領域 5、第 2 の領域 6 の開口 2 A、2 B と第 3 の

10

20

30

40

50

領域 7 の開口 2 C とに荷電粒子が通過する開口を分割し、開口 2 C より開口 2 A、2 B の形状誤差が小さくなっている。本発明の荷電粒子線レンズはこのような開口の分割により、開口 2 C より開口 2 A、2 B の形状がレンズ全体の収差に与える影響を大きくすることができる。したがって、開口 2 C の形状精度が悪くても、開口 2 A、2 B の形状精度によって荷電粒子線レンズ全体の非点収差やそれより高次の収差を決定することができる。そして、開口 2 C の部分の厚さを大きくすることでレンズの収差の増加を抑えながら電極全体の厚さを厚くすることができる。

【 0 0 5 2 】

次に図 7 を用いて、第 1 の領域 5、第 2 の領域 7 の開口 2 A、2 B のような電極表面付近の開口形状が収差に対して大きな影響有することを説明する。図 7 に図 6 の破線 Z で囲まれた領域を拡大した。曲線 K、L、M は電極 3 B の開口 2 の表面付近の空間の等電位線をしめしている。また、曲線 H は、開口 2 A の最表面に対応する電気力線を示している。図のように、電気力線 H の開口 2 が形成されていない側（以下、電気力線 H の外側とする）の領域では、曲線 K、L、M は電極 3 B の表面にほぼ平行となっている。したがって、この領域での電気力線は電極の法線方向と平行な方向に形成されることとなる。そのため、この部分の電極形状は、レンズ効果の場となる R 方向の電界（図 6 f 1、f 2、f 3、f 4 を参照）に対してほとんど影響していない。

【 0 0 5 3 】

一方、電気力線 H より開口 2 が形成される側（以下、電気力線 H の内側とする）の領域において、等電位線 K、L、M は、開口 2 の内部に回り込んでいることが分かる。したがって、電気力線 H とそれより内側の電気力線によって、図 6 で説明したレンズ効果の場となる R 方向の電界が主に形成されることとなる。荷電粒子線は、立体的には光軸 J を法線とする平面において、光軸 J を中心として周方向のいずれの方向についても図 6 で示したレンズ効果の場となる R 方向の電界の影響を受けている。電気力線 H とそれより内側の電気力線のこのような光軸 J を中心として周方向の対称性（つまり円形状における真円度）に影響するのは、光軸 J を法線とする平面での開口 2 の断面形状の対称性となる。そして、等電位線 K、L、M の間隔は、開口 2 の光軸 J に向かうにつれて大きくなっている。電気力線の密度は、電気力線 H から内側に向かうにつれ、又、光軸 J の方向に厚さが増すにつれ疎となっていく。したがって、開口 2 の断面形状の荷電粒子線の収束への影響は、電極の最表面が最も大きく、厚さ方向へ深くなるにつれて少なくなっていく。

【 0 0 5 4 】

また上記と同様の理由で区間 I、区間 I I I、区間 I V の電界の向き f 1、f 3、f 4 についても電極の最表面の位置の開口 2 の断面形状が荷電粒子線への収束へ最も影響し、厚み方向へ最表面から遠ざかるにつれて影響が小さくなっていく。

【 0 0 5 5 】

また、図 6、図 7 では特に 3 枚の電極構成のレンズの説明をしたが、電極の枚数が 3 枚以外の場合であっても同じ性質を有している。つまり、開口周辺に形成される電場と荷電粒子線への収束の対称性が電極の表面付近の開口形状が最も影響が大きく、厚み方向に遠ざかるにつれ小さくなっていく性質は同じである。

【 0 0 5 6 】

このように、本実施例の荷電粒子線レンズの電極 3 A、3 B、3 C は第 1 の領域 5、第 2 の領域 6 の開口 2 A、2 B が第 3 の領域 7 の開口 2 C よりもレンズの収差に大きく影響することとなる。したがって、開口 2 C の形状誤差が大きくてもレンズの収差への影響を低減することができる。

【 0 0 5 7 】

次に、本実施例の荷電粒子線レンズの開口 2 A、2 B、2 C の直径と厚さの関係による効果について説明する。

【 0 0 5 8 】

図 2 (a) は、図 1 (a) の破線 M で囲まれた領域を拡大した断面図である。図 2 (a) に示すように、第 1 の領域 5、第 2 の領域 6、第 3 の領域 7 の開口 2 A、2 B、2 C で

10

20

30

40

50

荷電粒子線を通過させることができる貫通した開口を形成している。ここで、第1の領域5の自由表面側の面が、電極3Bの第1の面であり、第2の領域6の自由表面側の面が第2の面である。即ち電極3Bは第1の面とその反対側の第2の面を有する。第1の領域5、第2の領域6はそれぞれ電極の最表面に相当する光軸Jを法線とする第1の面8、第2の面9を含んでいる。また界面13、14により第3の領域7とそれぞれ区別されている。

【0059】

そして、開口2A、2B、2Cはそれぞれ厚さ t 、 t 、 t' を有している。また、開口2A、2B、2Cはそれぞれ直径がほぼ一定で第1の領域5、第2の領域6は直径 D_1 、第3の領域7は直径 D_2 で代表される。図2(a)では直径 D_1 より直径 D_2 が大きい。

10

【0060】

また、本発明の別の実施の形態として、図2(b)、(c)のような形態が考えられる。図2(b)(c)は、図2(a)の直径 D_1 、直径 D_2 の大小関係のみが異なっている。図2(b)では直径 D_1 と直径 D_2 が同一の場合、図2(c)は直径 D_1 が直径 D_2 より大きい場合である。

【0061】

図2(a)(b)(c)いずれの場合においても開口2A、2Bは開口2Cより真円に近い形状となっている。そして、図2(a)~(c)いずれの場合でも開口2Cは開口2A、2Bよりレンズの収差へ与える影響を小さくすることができる。

【0062】

20

図4は、図2(a)(b)の場合の開口2A、2Bの収差の合計がレンズの非点収差へ占める割合(寄与率)を示している。横軸は、開口2A、2Bの直径 D_1 と開口2A、2Bの厚さ t との比である。中実の丸印が直径 D_1 と直径 D_2 が等しい場合である。

【0063】

直径 D_1 、 D_2 が等しい場合、開口2A、2Bの厚さ t が直径 D_1 の $1/8$ の厚さで、開口2A、2Bの収差の合計が全体収差の80%を占めることができる。開口2A、2Bは互いに若干の差があるため、開口2A、2B、2Cの寄与率の内訳はそれぞれ44%、36%、20%となっている。

【0064】

そして、この寄与率の関係は、開口2Cの厚さ t' を変えても変化しない。したがって、開口2Cの厚さを大きくすることで寄与率の関係を变えないう電極全体の厚さを厚くすることができる。

30

【0065】

この寄与率にそれぞれの開口2A、2B、2Cの形状誤差の比率をかけたものが各開口の収差の相対的な大小関係となる。そして、電極3Bの最終的な収差は、開口2A、2B、2Cの各収差の自乗和平均で表現することができる。そのため開口2Cの形状誤差は、開口2Cの収差が開口2A、2Bの収差と同程度の大きさとなる形状誤差まで許容することができる。開口2A、2Bの収差の合計が80%の寄与率の場合、このような開口2Cの形状誤差は開口2A、2Bの形状誤差の2倍となる。

【0066】

40

実際の加工を行う場合、開口2Cの形状誤差を2倍以上許容することができれば、開口2Cの厚さを開口2A、2Bと比べて大きくすることができる。そのため、開口2A、2Bの厚さ t は直径 D_1 の $1/8$ 以上が望ましい値となる。

【0067】

また、 $t < t'$ の領域では、形状誤差が大きくなる厚い部分を第3の領域7とすることで、加工誤差が大きい厚い開口の寄与率を低くし、全体の収差を低減することができる。

【0068】

一方、中空の丸印は、直径 D_1 が D_2 の0.8倍の場合である。直径 D_1 が D_2 の0.8倍の場合では、直径 D_1 、 D_2 が等しい場合に比べ、厚さ t が小さくても開口2A、2Bの寄与率が大きくなる。厚さ t が直径 D_1 の $1/8$ で約94%、 $1/5$ で96%の寄与

50

率となる。そして、この寄与率も開口 2 B の厚さ t' を変えても変化しない。このように特に直径 $D_1 < D_2$ となる領域では、開口 2 A、2 B の寄与率を更にあげることができる。厚さ t が小さくても寄与率が高くなるため、薄い部分への開口加工は加工誤差が少なくなり寄与率も高いため電極全体の収差を低減することが可能となる。反面、寄与率が低い開口 2 C には大きな形状誤差を許容できるため、より厚い電極を実現することができる。

【 0 0 6 9 】

次に図 3 を用いて、直径 $D_1 < D_2$ の場合の更に望ましい範囲について説明する。図 3 (a) は図 2 (a) の破線 Y で囲まれた領域の拡大図である。そして、図 1 (a) 電極 3 A、電極 3 C にはアース電位を、電極 3 B には負極性の電位を印加している。したがって、第 1 の領域 5 の上面には、静電引力が生じている。以下この静電引力は分布荷重 w として近似して扱う。

10

【 0 0 7 0 】

直径 $D_1 < D_2$ では図 3 (a) のように第 1 の領域 5 が第 3 の領域 7 ヘリング状に突出した形状となる。この突出した形状が静電引力を受けると分布荷重 w の方向へ変形してしまう。今、突出した形状の先端の面 (図 3 (a) 断面図の線分 P Q) の分布荷重方向の変形を y とすれば、

【 0 0 7 1 】

【数 1】

$$y = K_f \cdot \frac{w \cdot D_2^4}{16D} \quad (\text{式 1})$$

20

【 0 0 7 2 】

【数 2】

$$D = \frac{E \cdot t^3}{12(1 - \nu^2)} \quad (\text{式 2})$$

30

【 0 0 7 3 】

ただし、 E はヤング率、 ν はポワソン比

【 0 0 7 4 】

式 1 の係数 K_f は、直径 D_1 と直径 D_2 の比の関数で、リング状の突出した形状の剛性における直径 $D_1 \cdot D_2$ の形状因子の係数となる。係数 K_f は変位 y の比例係数なので値が大きいほど剛性が低くなる。

【 0 0 7 5 】

図 3 (b) に係数 K_f を直径 $D_1 \cdot D_2$ の比の関数としてプロットした。 D_1 / D_2 が 1 に近づくにつれて (つまり突出した形状が少なくなるにつれて) 剛性が増加しているのが分かる。更に図 3 (c) にこの係数 K_f を D_1 / D_2 で微分した関数をプロットした。係数 K_f の微分係数は $D_1 / D_2 = 0.4$ 付近で極小となる変化を示すことができる。

40

【 0 0 7 6 】

係数 K_f の微分係数の極小付近では絶対値が最大となっており、 D_1 / D_2 の変化に対する係数 K_f の変化率が最も大きい領域となる。つまり、加工誤差により D_1 / D_2 が変化した場合剛性の変化が大きくなってしまふ。そのため、突出した形状の変位 y が大きく変化する。このように加工誤差に敏感に変位がばらつくと、開口 2 A の真円度がばらついたり、変形により実効的な直径 D_1 がばらついたりする。また、電極が複数の開口を有するレンズアレイの場合には、個々の開口間の変形ばらつきが大きくなってしまふ。

【 0 0 7 7 】

50

したがって、望ましい $D1/D2$ は $0.4 \leq D1/D2 < 1.0$ となる。この範囲において、係数 K_f とその微分係数の絶対値が小さい領域とすることができ、突出した形状の変形と開口の加工誤差に対する変形ばらつきの両方を小さくすることができる。

【0078】

また、 $0.8 \leq D1/D2 < 1.0$ の範囲で用いれば更に変形と変形ばらつきを低く抑えることができるため好適な範囲となる。

【0079】

次に本実施例の具体的な材料・寸法例を説明する。電極3A、3B、3Cの第1の領域5、第2の領域6、第3の領域7とも単結晶シリコンで形成される。厚さはそれぞれ $6 \mu m$ 、 $88 \mu m$ 、 $6 \mu m$ である。開口2A、2Bの直径 $D1$ は $30 \mu m$ 、開口2Cの直径 $D2$ は $36 \mu m$ である。給電パッド10はシリコンと密着性がよく通電性が高く酸化しにくい金属膜で形成される。例えば、チタン・白金・金の多層膜を用いることができる。界面9A、9Bにはシリコン酸化膜が形成されている。電極3A、3B、3Cの第1の面8、第2の面9や開口2A、2B、2Cの内壁面はすべて金属膜で覆ってもよい。この場合、酸化しにくい白金族の金属や酸化物に導電性がみられるモリブデンのような金属を用いることができる。電極3A、3B、3Cはそれぞれ $400 \mu m$ 離間して光軸Jを法線とする平面に平行に設置される。それぞれの電極は電氣的に絶縁されている。電極3A、3Cにはアース電位を印加し、電極3Bには $-3.7 kV$ の電位を印加してアインツェル型のレンズとして機能する。荷電粒子線は電子であり、加速電圧を $5 keV$ としたとき本実施例の電極3Bの非点収差は図5のとおりとなる。開口2A、開口2Bの真円度は $9 nm$ 、開口2Cの真円度は $90 nm$ で形成されている。表に示すように、それぞれの非点収差の内訳は $2.14 nm$ 、 $2.94 nm$ 、 $1.74 nm$ であり、開口2Cの真円度は、開口2A、2Bの10倍にもかかわらず、トータルの電極3Bの非点収差は $4.0 nm$ となる。(非点収差の値はすべてガウス分布の $1/e$ 半径を示している。)これは、従来技術に相当する開口2A、2B、2Cすべての直径が $30 \mu m$ と等しく、厚さ $100 \mu m$ すべての断面形状の真円度が $9 nm$ である場合の非点収差に等しい。

【0080】

高い真円度(真円度 $9 nm$ に相当)が必要な箇所は厚さ $6 \mu m$ の加工でよいいため、加工の難易度を下げ開口全面にわたって $9 nm$ のような高精度の真円開口を形成することが可能となる。一方、剛性を保つ開口2Cの領域は厚さ $88 \mu m$ の貫通孔加工が必要となるが、この部分の真円度は10倍悪くてもよいため加工難易度を下げることができる。一方、従来技術に相当する厚さ $100 \mu m$ に直径 $30 \mu m$ の開口を真円度 $9 nm$ で形成するのは非常に困難となる。

【0081】

次に、第3の領域7の厚み方向の真円度分布と収差の寄与率の関係について説明する。前述の設計例において電極2Bの開口について図15に示すように、第3の領域7を厚み方向へ $10 \mu m$ 毎の $S1 \sim S9$ の領域に分割する。そのそれぞれの領域に真円度の違いがある場合の真円度の非点収差への感度解析を行う。図16は、横軸を $S1 \sim S9$ の深さ位置(領域の中心深さを代表位置とした)、縦軸をその領域が第3の領域7全体の収差に占める割合(寄与率)を示している。つまり $S1 \sim S9$ の真円度が等しい場合の非点収差への影響の大小関係を示している。図示の通り最表面の $20 \mu m$ の領域($S1 \cdot S2 \cdot S8 \cdot S9$)合計で 84% 程度の収差が決定される。また厚さの中央付近の領域($S4 \cdot S5 \cdot S6$)はそれぞれ 2% 以下の寄与率となりこの領域はほとんど収差に寄与しないことが分かる。

【0082】

次に、真円度の分布を実際に与えた収差の大小関係を説明する。図17(a)は真円度の $S1 \sim S9$ までの真円度の分布を示している。中空三角印は $S1 \sim S9$ まで等しい真円度、中空丸印は $S1 \cdot S9$ が最小の真円度で $S5$ に向かって徐々に大きくなる場合、中実丸印は $S1$ から $S9$ へ向かうにつれて徐々に大きくなる場合である。

【0083】

図 9 に示したように一方向からシリコンを深堀ドライエッチングする場合は中実丸印の真円度分布となる傾向がある。また、表面・裏面それぞれから深堀ドライエッチングを施す場合は、中空丸印となる傾向がある。そのため、これら 2 つの場合は実際の加工で現れる真円度分布の典型であるため重要である。そして、図 17 (b) は、非点収差の寄与率を示している。グラフのプロットのタイプがそれぞれの場合に対応している。中実丸印においては、真円度が低い側の最表面 (S1・S2) の寄与率は低下しているが、反対側の最表面 (S8・S9) の寄与率は増加する。そして、結果として最表面 20 μm の領域 (S1・S2・S8・S9) 合計で 84 % 程度の収差が決定される。中空丸印においては、厚さ中央付近の領域 (S4・S5・S6) の寄与率は増加するがこの部分の寄与率はもとと低いため全体への影響は少ない。したがって、結果として最表面 20 μm の領域 (S1・S2・S8・S9) 合計で 76 % 程度の収差が決定される。

10

【0084】

以上のように第 3 の領域 7 の総厚さが 100 μm の内、最表面 20 μm の真円度でいずれの真円度分布の場合もほとんどの収差が決定される。とくに最表面の寄与率は大い。また実質的に厚さの内部において真円度が数倍になる図 17 (a) 中空丸印の場合も最表面の影響が最も大きい。領域内での開口の厚み方向のプロファイル観察を行ってオーダが異なるような極端な形状の変化・表面状態の変化が生じていなければ、表裏の最表面の真円度のみを測定しその平均値でその領域の平均の真円度とすることができる。このような測定で決定した代表的な真円度を用いても収差の確認計算には十分よい近似となる。したがって、真円度の厚さ分布を測定することが困難な場合は、このような方法で測定方法を簡略化して本発明の開口断面の形状を確認することが可能である。

20

【0085】

また、図 18 には図 17 (a) の中実丸印の真円度分布を仮定して、第 3 の領域 7 の直径が 34 μm と 38 μm の場合の実際の非点収差の値を示している。直径が大きいほど収差が小さくなることは前述のとおりだが、特に最表面 20 μm の領域の変化が大きくなる。このように直径の変化についても最表面の影響が最も大きい。したがって、真円度と同様に、領域内での開口の厚み方向のプロファイル観察を行ってオーダが異なるような極端な形状の変化・表面状態の変化が生じていなければ、表裏面の開口断面の代表直径の平均値をその領域の平均の代表直径とすることができる。

30

【0086】

次に、本実施例の製造方法を説明する。第 1 の領域 5、第 2 の領域 6、第 3 の領域 7 を第 1 の界面 15、第 2 の界面 16 で接合して形成する。第 1 の領域 5、第 2 の領域 6 となる厚さ 6 μm のデバイス層を有する SOI (シリコンオンインシュレータ) 基板を用意する。まず、開口 2A、2B をこのデバイス層に高精度のフォトリソグラフとシリコンのドライエッチングにより形成する。その後全体を熱酸化する。次に第 3 の領域 7 と同じ厚さ 88 μm のシリコン基板にフォトリソグラフとシリコンの深堀ドライエッチングにより開口 2C を形成する。そして、開口 2A、開口 2B が形成された SOI 基板のデバイス層を開口 2C が形成されたシリコン基板の表裏面に熱酸化膜を介して直接接合する。その後、2 枚の SOI ウエハのハンドル層と埋め込み酸化膜層、開口 2A、2B の接合界面以外の熱酸化膜を順次除去することで、第 1 の領域 5、第 2 の領域 6、第 3 の領域 7 を有する電極 3A、3B、3C を形成することができる。

40

【0087】

上記のように接合した構造とすることで、形状精度が必要な開口 2A、2B を形成する工程と開口 2C を形成する工程を別々に行うことができるため、エッチング条件の制御や歩留まりを向上することができる。特に、単結晶シリコンを用いることで、フォトリソグラフとドライエッチングといった高精度の開口形成と平坦性の高い平面を介したウエハ接合により本実施例の電極を高精度に形成可能となる。そして、この設計例のように数十 μm オーダの開口径を nm オーダの真円度で形成することが可能となる。

【0088】

(実施例 2)

50

図 1 1 を用いて本発明の実施例 2 を説明する。図 1 1 は、荷電粒子線レンズの断面図である。尚、実施例 1 と同じ機能を有する個所には、同じ記号を付し、同じ効果についても説明を省略する。本実施例では電極 3 A、3 B、3 C が有する開口 2 A、2 B、2 C が複数形成されている。本実施例では、図示のとおり 1 つの電極に 5 つの開口が形成されるレンズアレイとなっている。

【 0 0 8 9 】

開口 2 C の直径は開口 2 A の直径より大きく設定されている。しかし、隣接する開口のピッチよりは小さくなっているため、第 3 の領域 7 で隣接する開口 2 C がつながることはない。そのため、電極全体の剛性を低下させることなくレンズアレイを形成することができる。

10

【 0 0 9 0 】

さらに、開口断面を高精度加工できるので、レンズアレイの個々のレンズの開口断面の真円度のばらつきを低減することができる。レンズアレイの個々のレンズの真円度が偶然誤差なので、個別に補正を行うことが非常に難しくなる。したがって、開口断面の真円度のばらつきを低減できることにより、大規模なレンズアレイを形成することが可能となる。

【 0 0 9 1 】

特に、実施例 1 と同様の方法で製造される接合構造による電極を用いる場合は、開口断面のばらつきを十分に低減することができる。接合のアライメント精度により開口 2 A と開口 2 B の位置ずれが生じるが、このずれはレンズアレイ全体で 1 つのずれとなるため補正することが容易である。そのため、大規模なレンズアレイに好適な形態となる。

20

【 0 0 9 2 】

(実施例 3)

図 8 を用いて本発明の実施例 3 を説明する。図 8 は、荷電粒子線レンズの断面図である。尚、前述の実施例と同じ機能を有する個所には、同じ記号を付し、説明を省略する。

【 0 0 9 3 】

本実施例は実施例 1 と異なり電極 3 A、3 B、3 C は界面 9 A、9 B で規定されるような接合面を有しておらず単体の単結晶シリコン基板で形成されている。図示のように 3 枚の電極はそれぞれ開口 2 を有している。

【 0 0 9 4 】

図 8 の破線 U で囲まれた部分の拡大図が図 9 (b) である。また比較のため従来技術の開口 2 の拡大図 (a) を示す。

30

【 0 0 9 5 】

図 9 (b) は矢印 N の方向に単結晶シリコン基板を貫通する深堀ドライエッチングを施した断面形状を示している。深堀ドライエッチングでは、エッチングと保護のガスを交互に切り替えながらエッチングが進行する。そのため、側壁にはスキヤロップと呼ばれる小さな凹凸が図示のように形成される。これらの凹凸はエッチングが進行するにつれてエッチング・保護のガスの供給や排気、化学反応に伴う発熱の度合い等の誤差因子が増加する。そのため、凹凸のピッチや深さが場所により変化したりして真円度が悪化してしまう。また貫通する間際になると貫通する先の界面の影響でエッチングガスの進路が曲げられ破線 S で囲んだ領域のようにノッチングとよばれる孔が広がる現象が生じることが知られている。これらの効果により、このような開口では矢印 N に進むにつれて真円度が悪化することとなる。したがって破線 S で囲まれた領域が最も真円度が悪い。このような開口を電極として用いると特に破線 S で囲まれた領域の開口断面の真円度の悪さが著しくレンズの収差を増加させてしまう。

40

【 0 0 9 6 】

一方、本実施例では、図 9 (a) の矢印 N で示すように、シリコン基板の表裏面両方から深堀ドライエッチングを施している。したがって、破線 S で囲まれた最も真円度の悪い領域は、シリコン基板の表裏面から厚み方向に最も離れた領域とすることができる。したがって、前述したとおり収差への誤差の寄与率が低い位置に加工誤差の最も悪い部分を形

50

成することができるため、収差の増加を抑えることができる。また、寄与率が最も高い電極の表裏面に真円度が最もよい部分を形成することができるため、収差を低減することができる。

【0097】

本実施例により、単結晶シリコン基板へのエッチング方向を変更するだけで収差を低減することが可能となる。

【0098】

また、本実施例は、実施例2のように、開口を複数形成したレンズアレイを形成することもできる。開口断面を高精度加工できるので、レンズアレイの個々のレンズの開口断面の真円度のばらつきを低減することができる。レンズアレイの個々のレンズの真円度が偶然誤差なので、個別に補正を行うことが非常に難しくなる。したがって、開口断面の真円度のばらつきを低減できることにより、大規模なレンズアレイを形成することが可能となる。

10

【0099】

特に、エッチングマスクの両面アライメント精度により開口2Aと開口2Bの位置ずれが生じるが、このずれはレンズアレイ全体で1つのずれとなるため補正することが容易である。そのため、大規模なレンズアレイに好適な形態となる。

【0100】

(実施例4)

図13は本発明の荷電粒子線レンズを用いたマルチ荷電粒子ビーム露光装置の構成を示す図である。本実施形態は個別に投影系をもついわゆるマルチカラム式である。

20

【0101】

電子源108からアノード電極110によって引き出された放射電子ビームは、クロスオーバー調整光学系111によって照射光学系クロスオーバー112を形成する。

【0102】

ここで電子源108としてはLaB6やBaO/W(ディスベンサーカソード)などのいわゆる熱電子型の電子源が用いられる。

【0103】

クロスオーバー調整光学系111は2段の静電レンズで構成されており、1段目・2段目共に静電レンズは3枚の電極からなり、中間電極に負の電圧を印加し上下電極は接地する、いわゆるアインツェル型の静電レンズである。

30

【0104】

照射光学系クロスオーバー112から広域に放射された電子ビームは、コリメータレンズ115によって平行ビームとなり、アパーチャアレイ117へと照射される。アパーチャアレイ117によって分割されたマルチ電子ビーム118は、集束レンズアレイ119によって個別に集束され、ブランカーアレイ122上に結像される。

【0105】

ここで集束レンズアレイ119は3枚の多孔電極からなる静電レンズで、3枚の電極のうち中間の電極のみ負の電圧を印加し上下電極は接地する、アインツェル型の静電レンズアレイである。

40

【0106】

またアパーチャアレイ117はNA(集束半角)を規定する役割も持たせるため、集束レンズアレイ119の瞳面位置(集束レンズアレイの前側焦点面位置)に置かれている。

【0107】

ブランカーアレイ122は個別の偏向電極を持ったデバイスで、描画パターン発生回路102、ビットマップ変換回路103、ブランキング指令回路107によって生成されるブランキング信号に基づき、描画パターンに応じて個別にビームのON/OFFを行う。

【0108】

ビームがONの状態のときには、ブランカーアレイ122の偏向電極には電圧を印加せず、ビームがOFFの状態のときには、ブランカーアレイ122の偏向電極に電圧を印加

50

してマルチ電子ビームを偏向する。ブランカーアレイ 1 2 2 によって偏向されたマルチ電子ビーム 1 2 5 は後段にあるストップアパーチャアレイ 1 2 3 によって遮断され、ビームが OFF の状態となる。

【 0 1 0 9 】

本実施例においてブランカーアレイは 2 段で構成されており、ブランカーアレイ 1 2 2 及びストップアパーチャアレイ 1 2 3 と同じ構造の、第 2 ブランカーアレイ 1 2 7 および第 2 ストップアパーチャアレイ 1 2 8 が後段に配置されている。

【 0 1 1 0 】

ブランカーアレイ 1 2 2 を通ったマルチ電子ビームは第 2 集束レンズアレイ 1 2 6 によって第 2 ブランカーアレイ 1 2 7 上に結像される。さらにマルチ電子ビームは第 3 ・ 第 4 集束レンズによって集束されてウエハ 1 3 3 上に結像される。ここで、第 2 集束レンズアレイ 1 2 6 ・ 第 3 集束レンズアレイ 1 3 0 ・ 第 4 集束レンズアレイ 1 3 2 は集束レンズアレイ 1 1 9 同様に、アインツェル型の静電レンズアレイである。

【 0 1 1 1 】

特に第 4 集束レンズアレイ 1 3 2 は対物レンズとなっており、その縮小率は 1 0 0 倍程度に設定される。これにより、ブランカーアレイ 1 2 2 の中間結像面上の電子ビーム 1 2 1 (スポット径が F W H M で 2 μ m) が、ウエハ 1 3 3 面上で 1 0 0 分の 1 に縮小され、 F W H M で 2 0 n m 程度のマルチ電子ビームがウエハ 1 3 3 上に結像される。そして、この第 4 集束レンズアレイ 1 3 2 が本発明の実施例 2 に示す荷電粒子線レンズアレイとなっている。

【 0 1 1 2 】

ウエハ 1 3 3 上のマルチ電子ビームのスキャンは偏向器 1 3 1 で行うことができる。偏向器 1 3 1 は対向電極によって形成されており、 x 、 y 方向について 2 段の偏向を行うために 4 段の対向電極で構成される (図中では簡単のため 2 段偏向器を 1 ユニットとして表記している) 。偏向器 1 3 1 は偏向信号発生回路 1 0 4 の信号に従って駆動される。

【 0 1 1 3 】

パターン描画中はウエハ 1 3 3 は X 方向にステージ 1 3 4 によって連続的に移動する。そして、レーザー測長機による実時間での測長結果を基準としてウエハ 1 3 3 面上の電子ビーム 1 3 5 が偏向器 1 3 1 によって Y 方向に偏向される。そして、ブランカーアレイ 1 2 2 及び第 2 ブランカーアレイ 1 2 7 によって描画パターンに応じてビームの on / off が個別になされる。これにより、ウエハ 1 3 3 面上に所望のパターンを高速に描画することができる。

【 0 1 1 4 】

本発明の荷電粒子線レンズアレイを用いることによって収差の少ない結像が実現できる。そのため微細なパターンを形成するマルチ荷電粒子ビーム露光装置を実現することができる。また、マルチビームが通過する開口形成エリアを大きくしても電極の厚さを厚くできるためマルチビームの本数を多く構成することができる。そのためパターンを高速に描画する荷電粒子ビーム露光装置を実現することができる。

【 0 1 1 5 】

また、本発明の荷電粒子線レンズアレイは、集束レンズアレイ 1 1 9 ・ 第 2 集束レンズアレイ 1 2 6 ・ 第 3 集束レンズアレイ 1 3 0 といったいずれの集束レンズアレイとしても用いることができる。

【 0 1 1 6 】

なお、本発明の荷電粒子線レンズは、図 1 3 の複数のビームが 1 本となった場合の荷電粒子線描画装置にも適用することができる。その場合でも、収差の少ないレンズを用いることによって微細なパターンを形成する荷電粒子ビーム露光装置を実現することができる。

【 符号の説明 】

【 0 1 1 7 】

1 A 、 1 B スペーサ

10

20

30

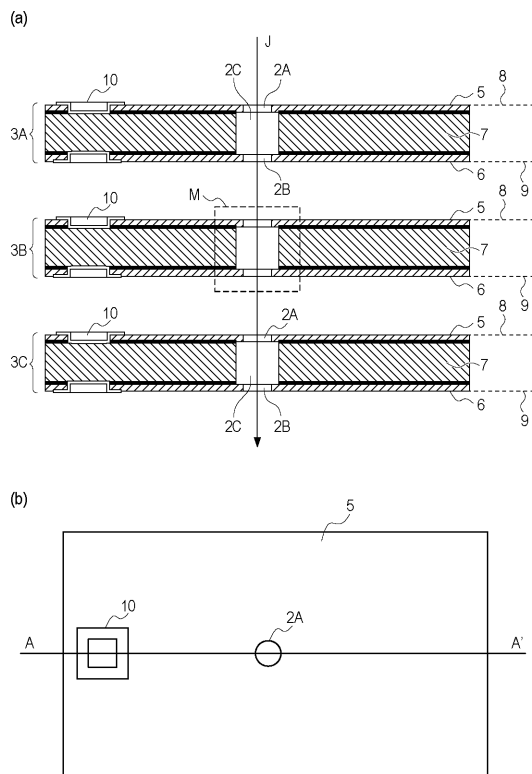
40

50

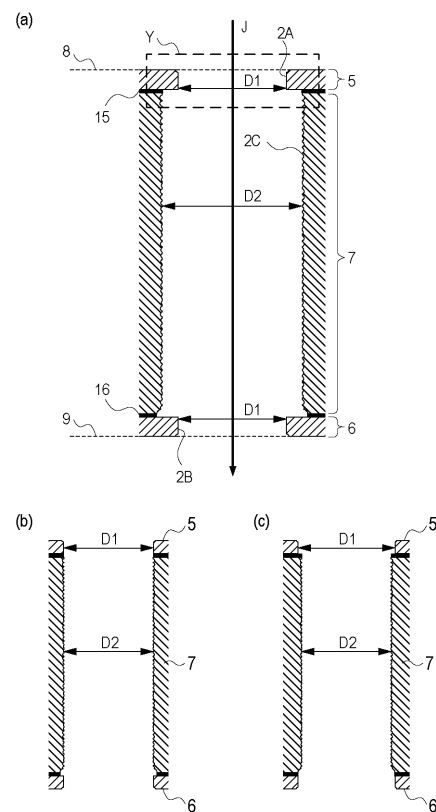
- 2、2 A、2 B 開口
- 3 A、3 B、3 C 電極
- 4 開口断面
- 5 第 1 の領域
- 6 第 2 の領域
- 7 第 3 の領域
- 8 第 1 の面
- 9 第 2 の面
- 10 給電パッド
- 11 内接円
- 12 外接円
- 13 測定点
- 14 代表円
- 15 第 1 の界面
- 16 第 2 の界面

10

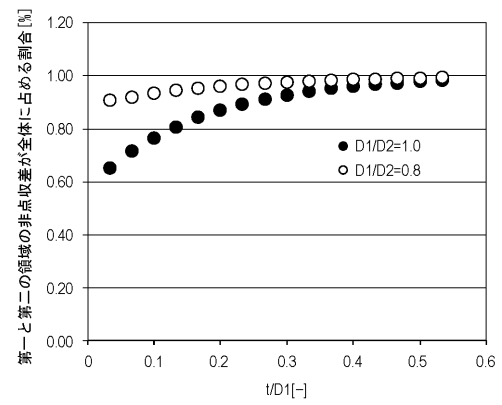
【図 1】



【図 2】

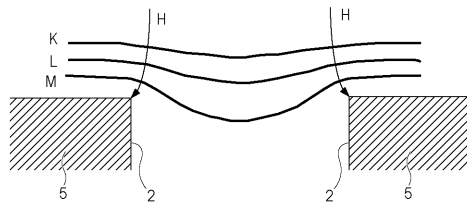


【 図 4 】

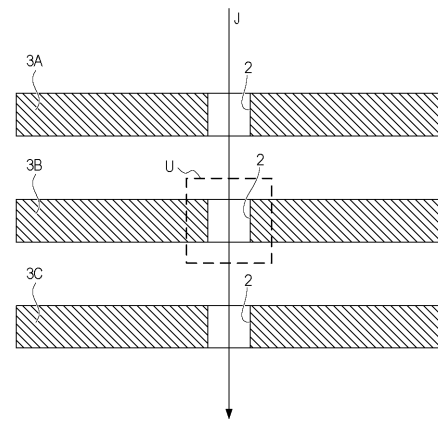


【 図 6 】

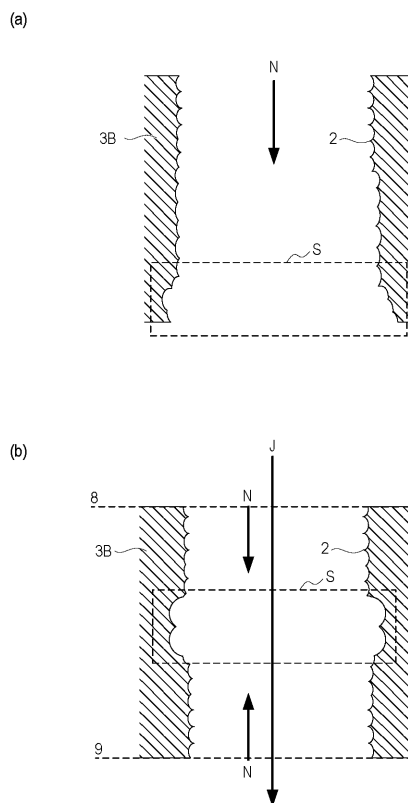
【図 7】



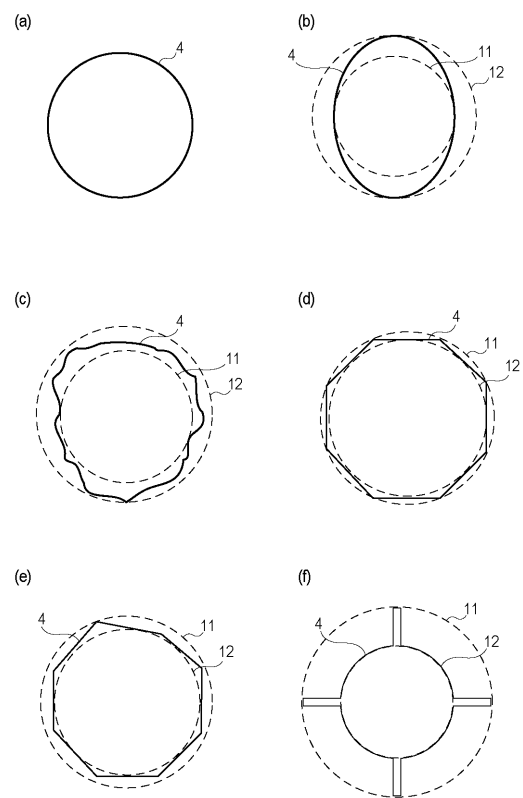
【図 8】



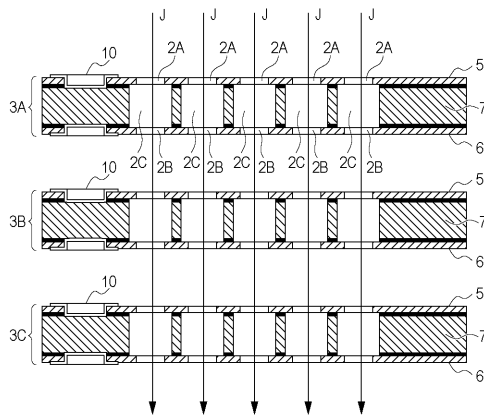
【図 9】



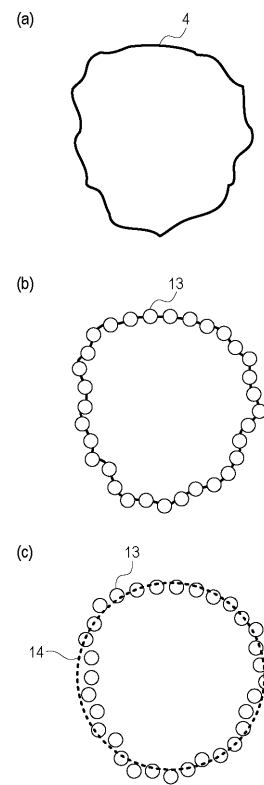
【図 10】



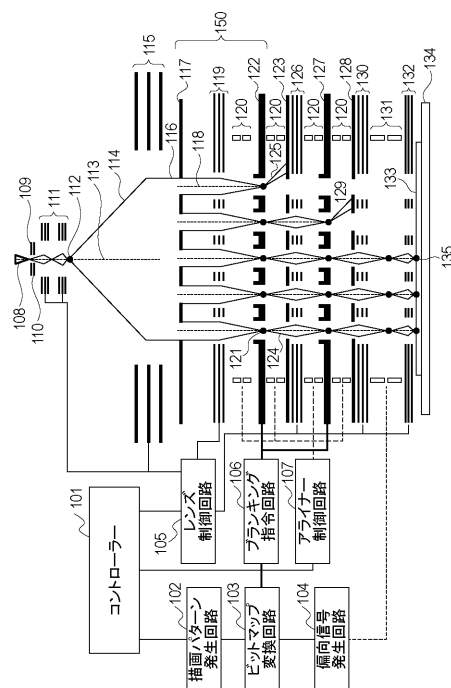
【図 1 1】



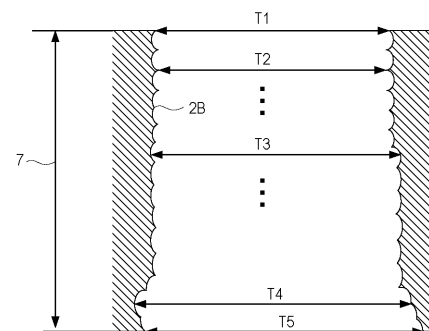
【図 1 2】



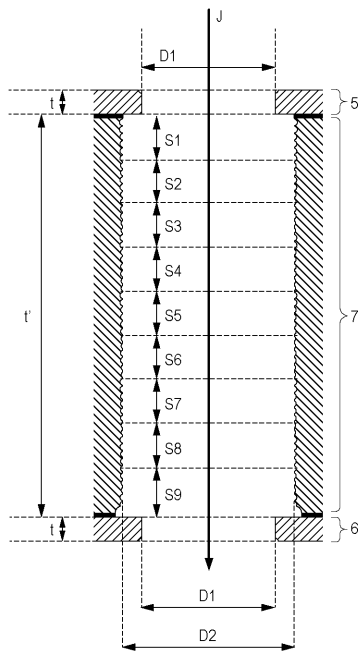
【図 1 3】



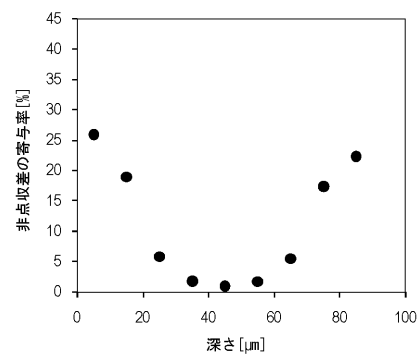
【図 1 4】



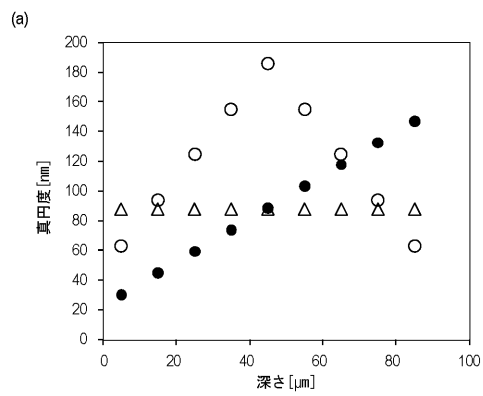
【図 15】



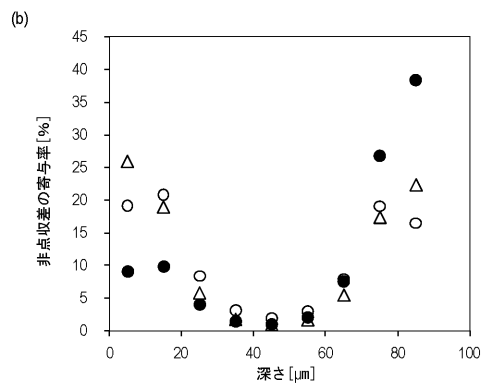
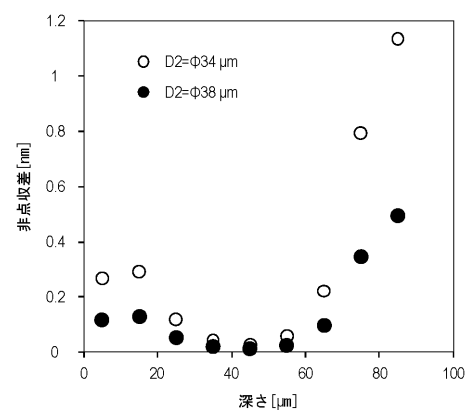
【図 16】



【図 17】



【図 18】



フロントページの続き

(56)参考文献 米国特許第03899711(US,A)
特開2005-268788(JP,A)
特開2006-049703(JP,A)
特開2004-235435(JP,A)
米国特許第04419182(US,A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

H01L	21/027
G03F	7/20
H01J	37/12
H01J	37/305